

OPRACOWANIE ZALECEŃ TECHNOLOGICZNYCH DO WALCOWANIA BLACH W LPS NA PODSTAWIE WYNIKÓW Z SYMULACJI NUMERYCZNYCH I FIZYCZNYCH

W niniejszym referacie przedstawiono zalecenia technologiczne do walcowania blach i prętów w LPS w oparciu o wyniki z symulacji numerycznych i fizycznych, badań dylatometrycznych oraz obliczeń własnych w programie „TTSteel” do symulacji obróbki cieplnej prowadzonych dla trzech wytypowanych gatunków stali. Wyniki symulacji dla walcowania z zastosowaniem zbijacza zgorzeliny wskazują na nadmierny spadek temperatury na powierzchni wsadu. Proponowany kontrolowany sposób chłodzenia dla uzyskania struktury końcowej polega na zastosowaniu różnych kombinacji odkształcenia plastycznego, szybkości chłodzenia, czasowego wytrzymania w stałej temperaturze i końcowego dochładzania po zakończeniu procesu obróbki cieplno-plastycznej. Zakłada się również możliwość wprowadzenia obróbki cieplnej w miejsce tych wariantów, w których istnieje niebezpieczeństwo nadmiernych naprężeń i odkształceń.

Słowa kluczowe: stale konstrukcyjne, walcowanie regulowane blach, symulacja numeryczna, symulacja fizyczna, obróbka cieplno-plastyczna

ELABORATION OF TECHNOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR ROLLING METAL SHEETS IN THE LPS ON THE BASIS OF NUMERICAL AND PHYSICAL SIMULATIONS RESULTS

The paper presents technological recommendations for rolling metal sheets and rods in the LPS line based on results of numerical and physical simulations, dilatometric tests and calculations using “TTSteel” program for simulation of heat treatment conducted for three selected types of steel. The results of simulation with use of the descaler show the excessive drop in temperature on the charge surface. The suggested controlled way of cooling to achieve the final structure is based on the application of various combinations of plastic deformations, cooling rates and holding up at a stable temperature followed by the final sub-cooling after the completion of thermal-mechanical working. It is also assumed that heat treatment operations may be introduced instead of the options where there is a danger of introduction of too large stresses and strains.

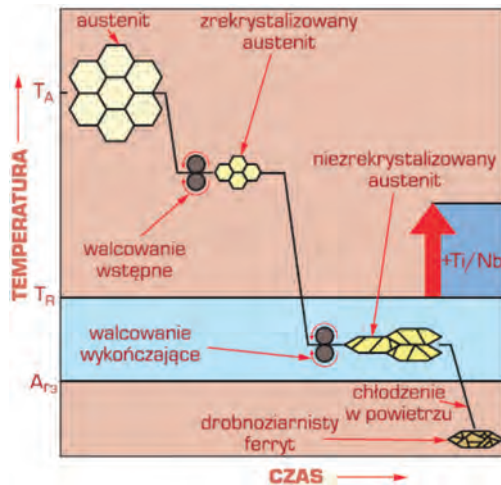
Key words: structural steels, controlled rolling of sheets, numerical simulation, physical simulation, thermo-mechanical treatment

1. WSTĘP

Do konwencjonalnego walcowania na gorąco stal konstrukcyjną nagrzewa się do temperatury około 1250°C, a walcowanie zostaje zakończone w temperaturze około 1000°C. Po takim walcowaniu uzyskuje się całkowicie zrekrytalizowany austenit gruboziarnisty, który podczas chłodzenia przemienia się w gruboziarnistą mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną. Materiał taki charakteryzuje się wysoką temperaturą przejścia w stan kruchy, dlatego konieczne jest normalizowanie w celu rozdrobnienia struktury. Celem walcowania konwencjonalnego jest zatem tylko osiągnięcie żądanych wymiarów. Otrzymanie drobnoziarnistej struktury stali konstrukcyjnej, zapewniającej wysoką granicę plastyczności i niską temperaturę przejścia w stan kruchości, wymaga obniżenia temperatury końcowej fazy odkształcenia plastycznego do ok. 850°C. Powoduje to ograniczenie rozrostu ziarna austenitu zrekrytalizo-

wanego dynamicznie, metadynamicznie lub statycznie, w procesach kucia lub walcowania. Stanowi to istotę technologii regulowanego walcowania (rys. 1), nazywanego także walcowaniem cieplno-plastycznym [1].

Stal poddawana jest walcowaniu wstępnemu w temperaturze wyższej od temperatury rekrystalizacji, kiedy zachodzi rekrystalizacja dynamiczna, a w przerwach między kolejnymi przepustami – rekrystalizacja metadynamiczna austenitu, a następnie walcowaniu wykończającemu w temperaturze niższej od temperatury rekrystalizacji T_R , kiedy przebiega już tylko zdrowienie dynamiczne i statyczne austenitu. W wyniku przemiany silnie wydłużonych i spłaszczonych ziarn austenitu, podczas chłodzenia w powietrzu, z temperatury końca walcowania niższej od A_{r3} , powstaje drobnoziarnista struktura ferrytu. Podczas regulowanego walcowania stosuje się niższą temperaturę nagrzewania do procesu. Jeżeli od stali wymaga się szczególnych właściwości, to temperatura grzania może być obniżona do 1150°C,

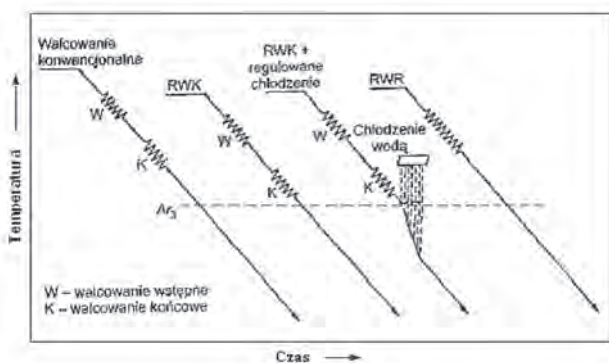


Rys. 1. Schemat regulowanego walcowania na LPS [1]
Fig. 1. Diagram of controlled rolling on LPS [1]

a w ekstremalnych przypadkach nawet do 950°C [2]. W procesach kontrolowanej obróbki cieplno-plastycznej parametry mikrostruktury austenitu kształtowane są zarówno poprzez ustalenie odpowiednich, dla danego składu chemicznego stali, warunków odkształcenia plastycznego i kontrolowanego chłodzenia, jak również poprzez modyfikację składu chemicznego stali. W wyniku zastosowania kontrolowanej obróbki cieplno-plastycznej można uzyskać bardzo drobne ziarno ferrytu w strukturze stali o wielkości około $5\ \mu\text{m}$, podczas gdy wielkość ziarna ferrytu w niskowęglowych stalach węglowo-manganowych walcowanych konwencjonalnie wynosi około $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ [3].

Wyróżnia się następujące rodzaje regulowanego walcowania (rys. 2):

- **regulowane walcowanie konwencjonalne (RWK)**
– proces prowadzący do uzyskania drobnoziarnistego i mocno odkształconego austenitu,
- **regulowane walcowanie rekrytalizujące (RWR)**
– proces prowadzący do uzyskania zrekrytalizowanego drobnoziarnistego austenitu,
- **walcowanie normalizujące,**
- **walcowanie poniżej temperatury A_{r3} w zakresie dwufazowym** [2].



Rys. 2. Schematy walcowania; RWK, RWR. [2]
Fig. 2. Diagrams of rolling; RWK, RWR [2]

Duży wpływ na mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną ma zastosowanie przyspieszonego chłodzenia bezpośrednio po ostatnim przepuszczeniu procesu walco-

wania, co związane jest z obniżeniem temperatury początku przemiany [3]. Istnieją również inne czynniki mające wpływ na uzyskanie drobnego ziarna ferrytu, jak zwiększenie zawartości Mn i C, co jednak pogarsza spawalność i udarność lub zwiększenie szybkości chłodzenia stali po procesie walcowania, co jest lepszym rozwiązaniem. Jeżeli skład stali został dobrany tak, że w czasie lub po przemianie $\gamma \rightarrow \alpha$ powstają wydzielienia, to celem regulowanego chłodzenia jest również uzyskanie optymalnego efektu umocnienia wydzieleniowego. Istnieje jednak granica w rozdrabnianiu ziarna ferrytu poprzez rozdrabnianie ziarna austenitu, gdyż przez przemianę lub rekrytalizację nie można uzyskać ziarna austenitu mniejszego od ok. $15\ \mu\text{m}$ [2]. Przyspieszone chłodzenie jest bardzo korzystne, ale proces ten ma pewne ograniczenia, gdyż w przypadku blach grubszych jest przyczyną dużych różnic między temperaturą powierzchni a temperaturą środka blachy. Aby w tym przypadku uzyskać optymalną mikrostrukturę drobnoziarnistą, należy zastosować dużą szybkość chłodzenia, a wówczas warstwa powierzchniowa może zostać oziębiona do zakresu przemiany bainitycznej lub nawet martenzytycznej.

Głównym celem pracy było opracowanie wstępnych zaleceń technologicznych do półprzemysłowego walcowania blach ze stali w gatunkach:

- stal konstrukcyjna superdrobnoziarnista (gatunek A),
- stal konstrukcyjna wielofazowa (gatunek B),
- wysokowęglowa bainityczna (gatunek C).

Zakres pracy obejmował zalecenia technologiczne do walcowania na gorąco blach. Zostały one określone na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych i fizycznych. Zalecenia technologiczne opracowano na podstawie dostarczonych przez IMŻ wyników badań wykonanych w ramach innych zadań projektu (badań dylatometrycznych i plastometrycznych oraz wyników symulacji numerycznych procesu walcowania blach [4–8]) oraz na podstawie obliczeń własnych [9–12].

Zgodnie z przyjętymi założeniami przy walcowaniu blach z tych gatunków stali zalecenia obejmują parametry technologiczne następujących zabiegów i operacji technologicznych:

- nagrzewanie wsadu – szybkość/sposób nagrzewania, zakres temperatury, czas;
- walcowanie z początkowych wymiarów wsadu na wymiar końcowy – określono temperaturę początku walcowania, wielkość gniotów w kolejnych przepustach, temperaturę końca walcowania, wytyczne do ewentualnego chłodzenia międzyoperacyjnego;
- chłodzenie po walcowaniu – sposób chłodzenia, zakres temperatury, czas/szybkość chłodzenia.

Dodatkowo założenia obejmują:

- dla stali w gatunku A technologia będzie tak dobrana, aby jej zastosowanie umożliwiło uzyskanie struktury końcowej o możliwie najmniejszym rozmiarze ziarna;
- dla stali w gatunkach B i C technologia ma umożliwić uzyskanie wyrobu o założonym kształcie bez pęknięć;
- dla stali C zaprojektowana technologia obróbki cieplno-plastycznej w LPS obejmuje walcowanie na gorąco, oziębianie do temperatury 250°C i przeprowadzenie izotermicznego wygrzewania w zakresie przemiany bainitycznej.

2. METODYKA I MATERIAŁ DO BADAŃ

Ocenę możliwości oddziaływania procesów obróbki cieplno-plastycznej i cieplnej na strukturę i właściwości stali przeprowadzono metodą symulacji komputerowej w programie „TT Steel” [8] oraz na podstawie informacji wynikających z badań przekazanych przez IMŻ a będących przedmiotem wcześniejszych prac. Symulacja w programie TT Steel umożliwia określenie struktury i właściwości mechanicznych stali na podstawie:

- składu chemicznego stali,
- rozmiarów końcowych blachy (grubość, szerokość),
- temperatury końca walcowania,
- regulowanego chłodzenia.

Wsad stanowiły wlewki płaskie pochodzące z pieca indukcyjnego, próżniowego VSG100S (stanowiącego część modułu A LPS) o wymiarach:

- grubość: 50 mm,
- szerokość: 250 i 120 mm,
- długość: 1000 mm

w gatunkach (tablice 1–3):

- stal konstrukcyjna superdrobnoziarnista (gatunek A),
- stal konstrukcyjna wielofazowa (gatunek B),
- stal wysokowęglowa bainityczna (gatunek C)

Wyrób gotowy: blachy o grubości końcowej 2÷12 mm ze stali w gatunkach A, B i C.

Zalecenia technologiczne do walcowania blach obejmowały parametry technologiczne następujących operacji technologicznych:

- nagrzewania wsadu (zakres temperatury, czas);
- walcowania (temperatury początku walcowania, wielkość gniotów w kolejnych przepustach dla otrzymania następujących grubości końcowych: 4, 8 i 12 mm, temperatury końca walcowania, wytyczne do ewentualnego chłodzenia międzyoperacyjnego);
- chłodzenia po walcowaniu (urządzenie, sposób chłodzenia, zakres temperatury, czas).

Ocenę możliwości oddziaływania procesów obróbki cieplno-plastycznej i cieplnej na strukturę i właściwości stali przeprowadzono na podstawie danych literaturowych.

Dla otrzymania określonej struktury i właściwości mechanicznych analizę prowadzono w oparciu o:

- swobodne chłodzenie na powietrzu z temperatury końca procesu walcowania;
- kontrolowany sposób w oparciu o przyspieszone chłodzenie.

Proponowany kontrolowany sposób chłodzenia dla uzyskania struktury końcowej o rozmiarze ziarna – jak przedstawiono na rysunkach 4÷7 – polega na zastosowaniu różnych kombinacji odkształcenia plastycznego, szybkości chłodzenia, czasowego wytrzymania w stałej temperaturze i końcowego dochładzania po zakończeniu procesu obróbki cieplno-plastycznej:

Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali A

Wariant I (rys. 3a)

- temperatura początku walcowania: 1100°C,
- walcowanie wstępne w kolejnych przepustach,
- zastosowanie przechłódzeń międzyoperacyjnych z wykorzystaniem natrysku wodą, mieszaniną wody i powietrza lub nadmuchem powietrza w zależności od wymiaru obrabianego wsadu.
- po walcowaniu przedostatnim i gotowym z zakresie temperatury 830÷800°C chłodzenie w spokojnym powietrzu.

Wariant II (rys. 3b)

- jak w wariacie I – przed przechłdzeniem ostatnie przepusty w 830÷800°C;
- przechłdzenie międzyoperacyjne przed przepustem przedostatnim do temperatury 650°C;
- walcowanie w dwóch przepustach w zakresie temperatury 650÷620°C;
- chłodzenie w spokojnym powietrzu do temp. otoczenia.

Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali B (rys. 4)

- temperatura początku walcowania: 1070°C;
- walcowanie wstępne w kolejnych przepustach,
- zastosowanie przechłódzeń międzyoperacyjnych z wykorzystaniem natrysku mieszaniną wody i powietrza lub wody;
- po walcowaniu przedostatnim i gotowym w zakresie temperatury 810÷780°C chłodzenie w spokojnym powietrzu.

Tablica. 1. Skład chemiczny stali superdrobnoziarnistej konstrukcyjnej – stal A

Table 1. Chemical composition of ultra-fine grained structural steel – steel A

Zawartość pierwiastków, % masowe														
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Al	Cu	N	O
0,10	0,80	0,20	0,01	<0,01	–	–	–	0,1	0,03	0,02	0,02	<0,20	0,005	0,003

Tablica.2. Skład chemiczny stali konstrukcyjnej o strukturze wielofazowej – stal B

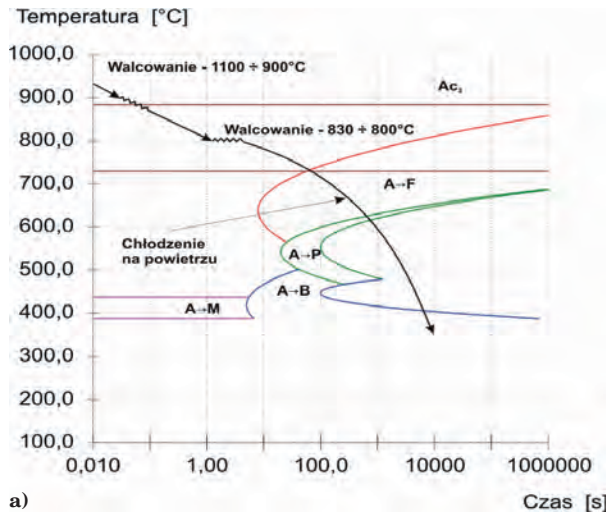
Table 2. Chemical composition of structural steel with multi-phase structure – steel B

Zawartość pierwiastków, % masowe														
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Al	Cu	N	O
0,08	1,5	0,4	0,01	0,01	0,3	0,2	–	–	–	0,1	0,04	0,2	0,003	–

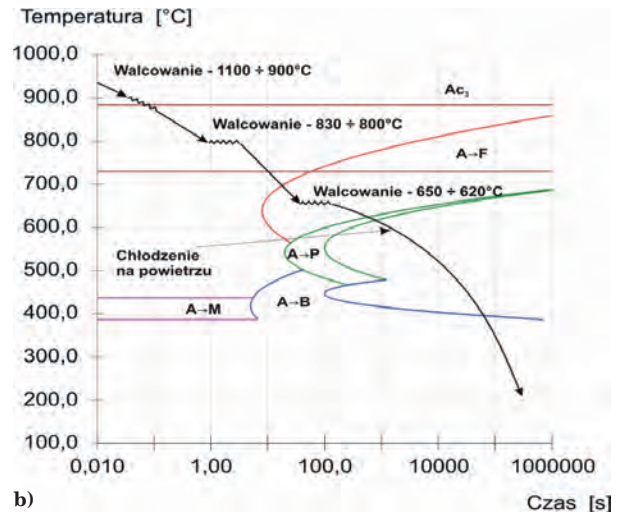
Tablica.3. Skład chemiczny stali wysokowęglowej bainitycznej – stal C

Table 3. Chemical composition of high-carbon bainitic steel – steel C

Zawartość pierwiastków, % masowe															
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	Ti	Al	Cu	N	O
0,90	2,1	1,6	<0,010	<0,010	–	–	0,27	1,7	–	–	–	0,02	–	<0,01	<0,01

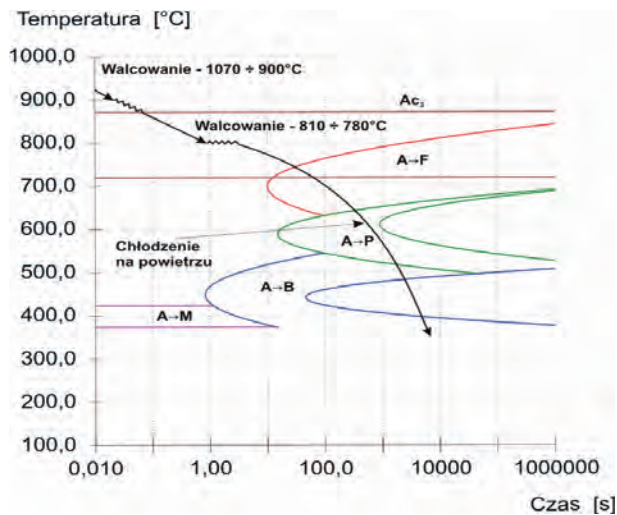


Wariant I



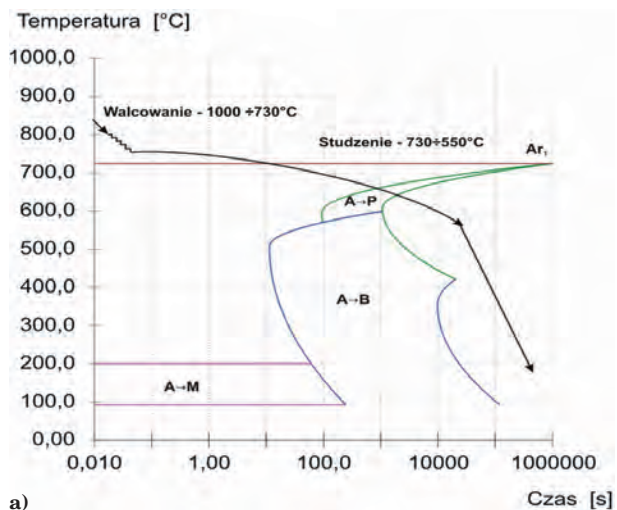
Wariant II

Rys. 3. Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali A
Fig. 3. Model course of thermo-mechanical treatment of steel A

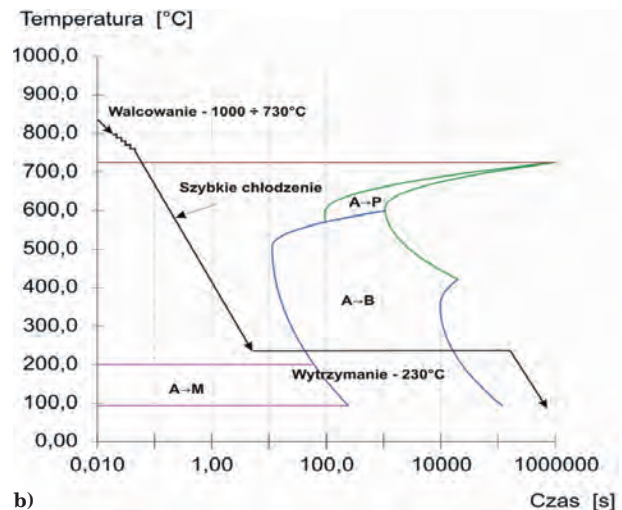


Rys. 4. Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali B

Fig. 4. Model course of thermo-mechanical treatment of steel B



Wariant I



Wariant II

Rys. 5. Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali C
Fig. 5. Model course of thermo-mechanical treatment of steel C

Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali C

Wariant I (rys. 5a)

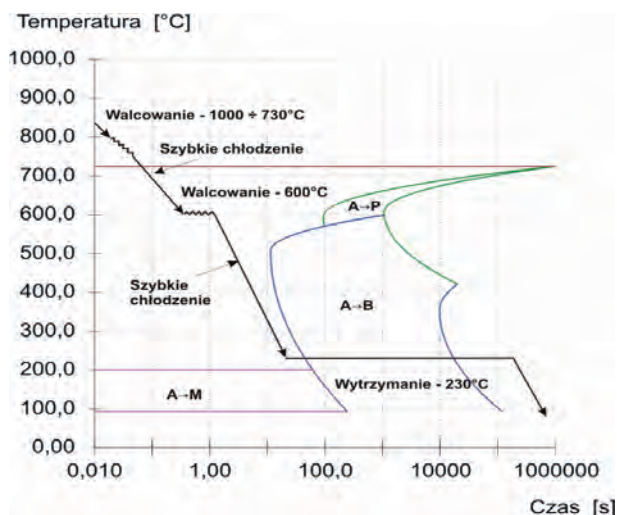
- po ostatnim przepuszczeniu w temperaturze 730°C chłodzenie w piecu do temperatury 550°C przez 5h;
 - dalej na powietrzu do temperatury otoczenia.
- Mikrostrukturę i właściwości należy kształtować poprzez zastosowanie końcowej obróbki cieplnej.

Wariant II (rys. 5b)

- chłodzenie wodą lub mieszanką wody i powietrza (w zależności od grubości blachy lub pręta) do temperatury 300°C.
- dalej materiał przetransportować do pieca (60 s)
- wytrzymać izotermicznie w temp. 230°C przez 4 h.
- po wyjściu z pieca chłodzenie na powietrzu.

Wariant III (rys. 6)

- walcowanie jest realizowane w technologii walcowania z obróbką cieplno-plastyczną,
- regulowane chłodzenie bezpośrednio po walcowaniu według technologii chłodzenia dla wariantu II.

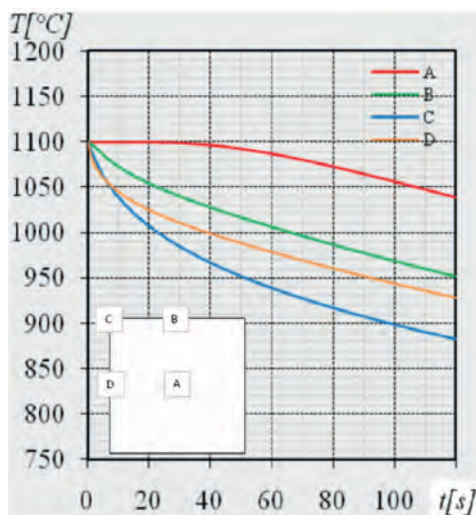


Rys. 6. Modelowy przebieg obróbki cieplno-plastycznej stali C – wariant III

Fig. 6. Model course of thermo-mechanical treatment of steel C – variant III

3. WYNIKI

Zalecenia technologiczne do nagrzewania wsadu: Proces nagrzewania wsadu w LPS przeprowadzono w piecu elektrycznym oporowym. Temperatura nagrzewania: dostosowana do gatunku stali i wymagań technologicznych. Analiza danych z modelowania procesu chłodzenia wsadu w trakcie transportu z pieca do początku walcowania na LPS wskazuje na zróżnicowany przebieg spadku temperatury (rys. 7).



Rys. 7. Przebieg zmian temperatury procesu chłodzenia wsadu (materiał A) w trakcie transportu z pieca (temperatura 1100°C) do początku walcowania w LPS

Fig.7. Course of temperature changes in cooling process of the charge (material A) during transport from furnace (temperature 1100°C) to the beginning of rolling in LPS

Ze względu na proces zgorzelinowania w LPS proces grzania zaleca się prowadzić w atmosferze obojętnej (argon, azot). Pozwala to na wyeliminowanie zbijaacza zgorzeliny, na którym zgodnie z danymi z innych prac następuje nadmierny spadek temperatury na powierzchni wsadu. Minimalny czas transportu wsadu po wysadzeniu z pieca do początku walcowania w LPS

wynosi 120 s. Przy doborze czasu grzania wsadu za wymiar charakterystyczny przyjęto grubość przekroju poprzecznego.

Zalecenia technologiczne do walcowania na gorąco blach

Parametry procesu walcowania na gorąco tj. wielkość gniotu, odkształcenie, prędkość odkształcenia, siła nacisku na walce, moment walcowania i inne wyznaczono z zależności matematycznych znanych z teorii przeróbki plastycznej. Wielkość gniotów dobrano z uwzględnieniem uzyskania możliwie najgłębszej penetracji odkształcenia na grubości pasma kierując się wynikami symulacji numerycznych procesu walcowania blach i prętów [12].

Do obliczeń siły nacisku na walce posłużono się metodą wyznaczania naprężenia uplastyczniającego opracowaną przez A. Hensla i T. Spittla opisaną następująco (1):

$$\sigma_p = A\varepsilon^B \exp(C\varepsilon) \dot{\varepsilon}^{D+E/T} \exp\left(\frac{F}{T}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- ε – odkształcenie rzeczywiste,
- $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia,
- T – temperatura,
- A, B, C, D, E, F – stałe

Temperaturę początku i końca walcowania oraz temperaturę schłodzenia międzyoperacyjnego podano na podstawie wyników obliczeń własnych i wyników badań dylatometrycznych wykonanych w Politechnice Częstochowskiej [16].

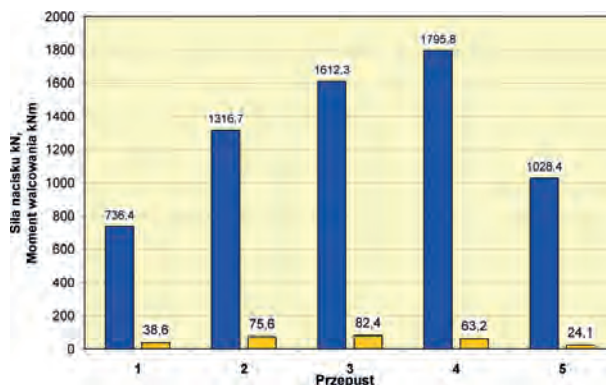
Czasy transportu pasma, czas cięcia i czasy przerw między przepustami przyjęto na podstawie danych otrzymanych z IMŻ.

Zalecenia technologiczne do walcowania blach o grubości 12 mm z wsadu 250 × 50 mm ze stali w gatunku A

Opracowanie zaleceń technologicznych i obliczenia parametrów walcowania na gorąco blach ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej wykonano dla dwóch wariantów walcowania:

Wariant I:

- temperatura początku walcowania: 1100°C,
- walcowanie w kolejnych przepustach według parametrów podanych w tabelicy 4 z przystankiem na



Rys. 8. Parametry siłowo-energetyczne procesu walcowania blach o grubości 12 mm ze wsadu 250 mm × 50 mm w gatunku A (wariant I)

Fig. 8. Force – energy parameters of rolling process for sheets with thickness of 12 mm from charge of 250 mm × 50 mm in grade A (variant I)

Tablica 4. Parametry przepustów procesu walcowania blach o grubości 12 mm z wsadu 250 mm x 50 mm w gatunku A (wariant I)
 Table 4. Parameters of roll pass for rolling sheets with thickness of 12 mm from the charge of 250 mm x 50 mm in grade A (variant I)

Przepust	Grubość po przepuszczeniu	Gniot	Wydłużenie	Szerokość pasma	Temperatura pasma	Odkształcenie rzeczywiste	Odkształcenie	Prędkość odkształcenia	Siła nacisku	Moment walcowania	Średni nacisk jednostkowy	Kąt chwytu	Prędkość walcowania	Długość pasma	Czas walcowania	Czas przerwy	Uwagi
	mm	%		mm	°C			s ⁻¹	kN	kNm	N/mm ²	°	m/s				
wsad	50,00			250										1,0			
1	40,00	20,0	1,24	253	1100	0,21		2,70	736,4	38,6	55,5	10,94	1	1,2	1,2	5	
2	28,00	30,0	1,41	257	1080	0,56		3,69	1316,7	75,6	89,2	11,99	1	1,7	1,7	5	
3	18,50	33,9	1,50	260	1060	0,76		4,69	1612,3	82,4	121,3	10,66	1	2,6	2,6	5	cięcie na 1,2 m i chłodzenie do 830 °C
4	14,00	24,3	1,32	260	830	0,69		4,89	1795,8	63,2	196,3	7,33	1	1,6	1,6	5	
5	12,00	14,3	1,17	260	800	0,43		4,31	1028,4	24,1	168,7	4,89	1	1,9	1,9	5	
															9,0	25	

Tablica 5. Parametry przepustów procesu walcowania blach o grubości 12 mm z wsadu 120mm x 50 mm w gatunku A (wariant II)
 Table 5. Parameters of roll pass for rolling sheets with thickness of 12 mm from the charge of 120 mm x 50 mm in grade A (variant I)

Przepust	Grubość po przepuszczeniu	Gniot	Wydłużenie	Szerokość pasma	Temperatura pasma	Odkształcenie rzeczywiste	Odkształcenie	Prędkość odkształcenia	Siła nacisku	Moment walcowania	Średni nacisk jednostkowy	Kąt chwytu	Prędkość walcowania	Długość pasma	Czas walcowania	Czas przerwy	Uwagi
	mm	%		mm	°C			s ⁻¹	kN	kNm	N/mm ²	°	m/s				
wsad	50,00			120										1,0			
1	40,00	20,0	1,20	125	1100	0,18		2,70	349,9	18,3	53,4	10,94	1	1,2	1,2	5	
2	32,00	20,0	1,22	128	1080	0,42		3,02	433,2	20,3	72,1	9,78	1	1,5	1,5	5	
3	26,00	18,8	1,21	130	1060	0,42		3,26	408,2	16,6	77,3	8,47	1	1,8	1,8	5	cięcie na 1 m i chłodzenie do 830 °C
4	22,00	15,4	1,18	130	830	0,37		3,28	553,9	18,4	128,5	6,91	1	1,2	1,2	5	
5	19,00	13,6	1,16	130	800	0,31		3,36	506,2	14,5	135,6	5,99	1	1,4	1,4	5	chłodzenie do 650 °C
6	15,00	21,1	1,47	130	650	0,55		4,49	1427,2	47,3	331,0	6,91	1	1,8	1,8	5	
7	12,00	20,0	1,83	130	620	0,77		4,92	1639,3	47,1	439,0	5,99	1	2,2	2,2	5	
															10,9	35	

przechłodzenie międzyoperacyjne przed przepustem przedostatnim,

- przechłodzenie międzyoperacyjne pasma natryskiem wodnym przed przepustem przedostatnim do temperatury 830°C,
- walcowanie w przepustach przedostatnim i gotowym w zakresie temperatury 830÷800°C według parametrów podanych w tablicy 4.

Wielkości obliczonych sił nacisku na walce i momentów walcowania podano w tablicy 4 i przedstawiono graficznie na rysunku 8.

Wariant II:

- temperatura początku walcowania: 1100°C,
- walcowanie w kolejnych przepustach według parametrów podanych w tablicy 5 z przystankiem na przechłodzenie międzyoperacyjne przed przepustem czwartym od końca,
- przechłodzenie międzyoperacyjne pasma natryskiem wodnym przed przepustem czwartym od końca do temperatury 830°C,
- walcowanie w dwóch kolejnych przepustach w zakresie temperatury 830÷800°C według parametrów podanych w tablicy 5,
- przechłodzenie międzyoperacyjne pasma natryskiem wodnym przed przepustem przedostatnim do temperatury 650°C,
- walcowanie w przepustach przedostatnim i gotowym w zakresie temperatury 650÷620°C według parametrów podanych w tablicy 5.

Na podstawie wyników obliczeń parametrów siłowo-energetycznych założono, że:

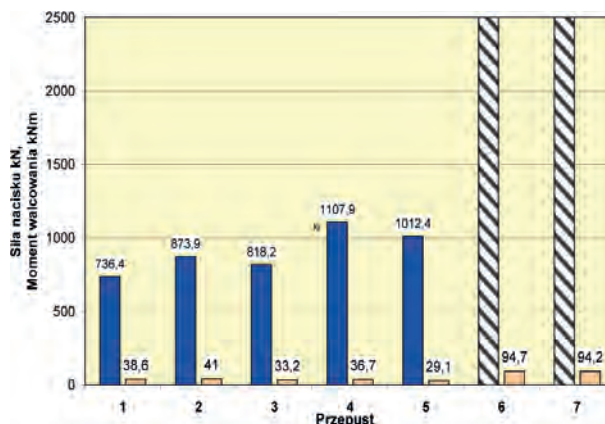
- w wariantcie I wsad o wymiarach 250 × 50 mm i 120 × 50 mm będzie walcowany na grubości końcowe 12 mm według tych samych parametrów,
- w wariantcie II nie można walcować wsadu o wymiarach 250 × 50 mm na grubość końcową 12 mm ze względu na przekroczenie obciążeń dopuszczalnych walcarki (rys. 9), a walcowanie na grubość końcową 8, 4 i 2 mm nie jest zalecane ze względu na siły nacisku na walce sięgające wartości granicznych,
- według wariantu II wsad o wymiarach 120 × 50 mm można walcować na grubości końcowe 12 mm według parametrów jak w tablicy 5.

Wielkości obliczonych sił nacisku na walce i momentów walcowania podano w tablicy 5 i przedstawiono graficznie na rysunku 10.

Na rysunku 11 przedstawiono przebieg chłodzenia wg wariantu I w środku blachy ze stali A o grubości 12 mm z podaniem otrzymanej struktury i właściwości mechanicznych.

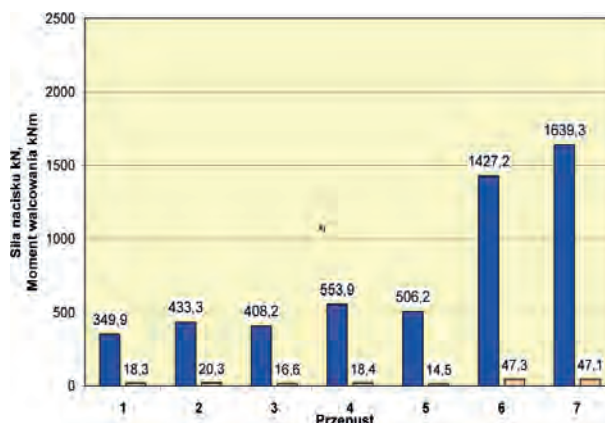
W tablicy 6 zestawiono wskazania udziału składników struktury i właściwości mechaniczne stali A w blachach o grubości 12 mm po obróbce wg wariantu I.

Wyniki badań mikrostruktury po próbach plastometrycznych wskazują, że temperatura końcowych prze-



Rys. 9. Parametry siłowo-energetyczne procesu walcowania blach o grubości 12 mm ze wsadu 250 mm × 50 mm w gatunku A (wariant II)

Fig. 9. Force – energy parameters of rolling process for sheets with thickness of 12 mm from charge of 250 mm × 50 mm in grade A (variant II)



Rys. 10. Parametry siłowo-energetyczne procesu walcowania blach o grubości 12 mm ze wsadu 120 mm × 50 mm w gatunku A (wariant II)

Fig. 10. Force – energy parameters of rolling process for sheets with thickness of 12 mm from charge of 120 mm × 50 mm in grade A (variant II)

puśców podczas walcowania blach powinna być zbliżona do 800°C.

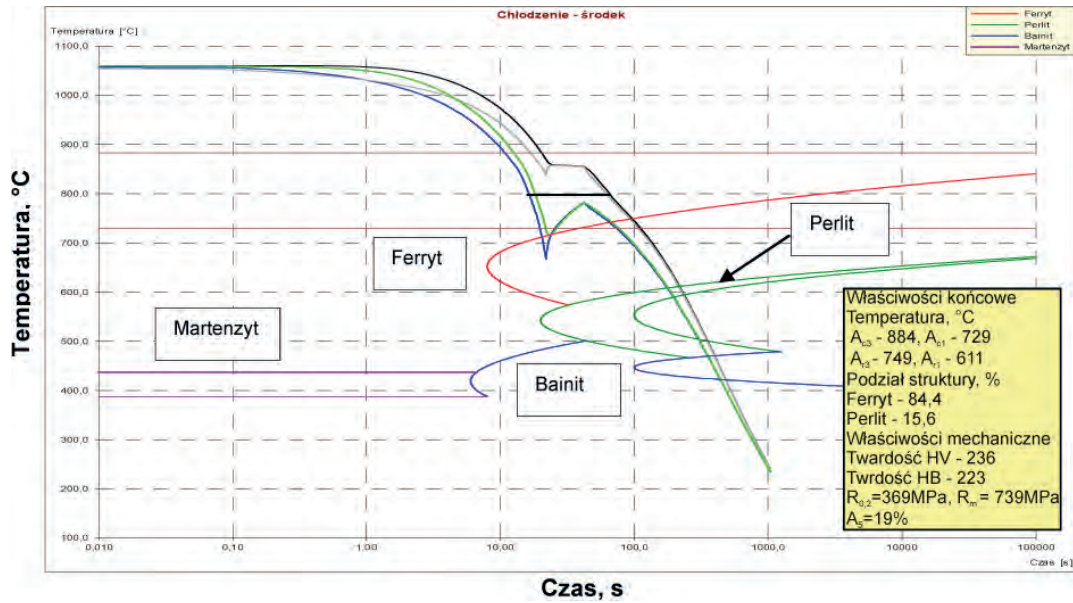
Po takiej obróbce cieplno-plastycznej możliwym jest rozdrobnienie ziarn struktury wtórnej powstałej z austenitu o średniej średnicy zastępczej płaskiego przekroju ziarna D ok. 6 μm (rys. 12).

Skład chemiczny stali typu IF, P, HSLA jest zbliżony do stali konwencjonalnej. Oddziaływanie pierwiastków stopowych na kształt i położenie krzywych CTP wskazuje na duże możliwości uzyskania określonej objętości względnej składników fazowych mikrostruktury (rys. 13). Istotny jest również wpływ odkształcenia plastycznego na położenie krzywych przemian austenitu przechłodzonego.

Tablica 6. Mikrostruktura i właściwości mechaniczne stali A dla blach o grubości 12 mm po obróbce wg wariantu jak na rys. 11

Table 6. Microstructure and mechanical properties of steel A for sheets with thickness of 12 mm after treatment according to option in fig. 11

Wariant	Udział składników struktury %		Właściwości mechaniczne MPa		Wydłużenie %
	Ferryt	Perlit	R_m	R_e	
12 mm	84,4	15,6	739	360	~19



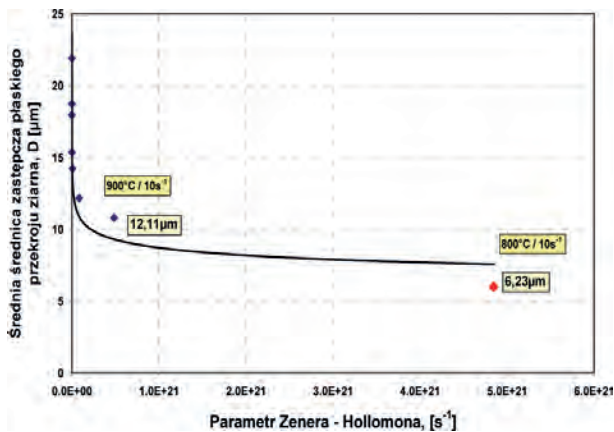
Rys. 11. Stal A – blacha 12 mm – wariant I: walcowanie 1100±1060°C (3 przepusty); chłodzenie: natrysk wodą do temp. 830°C przez 20 s; walcowanie 830±800°C (2 przepusty); chłodzenie w powietrzu

Fig. 11. Steel A – sheet 12 mm – option I: rolling at 1100±1060°C (3 roll passes); cooling: spraying with water to temperature of 830°C for 20 s; rolling at 830±800°C (2 roll passes); cooling in air

4. PODSUMOWANIE

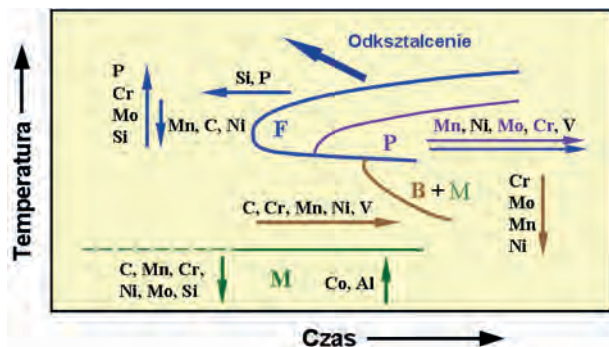
Celem regulowanego walcowania jest takie przygotowanie mikrostruktury austenitu, aby tworzący się podczas chłodzenia ferryt miał możliwie najmniejsze ziarno, zapewniające stali optymalną wytrzymałość, udurowienie i ciągliwość. W procesach kontrolowanej obróbki cieplno-plastycznej parametry mikrostruktury austenitu kształtowane są zarówno poprzez ustalenie odpowiednich, dla danego składu chemicznego stali, warunków odkształcenia plastycznego i kontrolowanego chłodzenia, jak również poprzez selekcję składu chemicznego stali [13]. W artykule przedstawiono zalecenia do walcowania blach w LPS w oparciu o wyniki symulacji numerycznej i fizycznej trzech gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej oraz wysokowęglowej bainitycznej. Na przykładzie stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej zaprezentowano tok rozumowania przy doborze wariantów obróbki cieplno-plastycznej blach. Opracowane zalecenia technologiczne i obliczone parametry procesu walcowania blach obowiązują dla podanych przez IMŻ danych. W tablicach i na rysunkach przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranych i zalecanych wariantów OCP. Zalecenia dla pozostałych gatunków stali oraz zalecanych wariantów OCP zamieszczono w sprawozdaniu z realizowanej pracy [14].

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.



Rys. 12. Wpływ odkształcenia na rozmiar ziarna austenitu w stali A

Fig. 12. Influence of deformation on grain size of austenite in steel A



Rys. 13. Wpływ dodatków stopowych na kształt i położenie krzywych CTP stali niskostopowej

Fig. 13. Influence of alloy additions on the shape and position of CTP curves of low-alloyed steel

LITERATURA

1. Dobrzański L.A.: Metalowe materiały inżynierskie, WNT Warszawa 2004 wyd. 1.
2. Blicharski M.: Inżynieria materiałowa. Stal, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004 wydanie
3. Kuziak R.: Modelowanie zmian struktury i przemian fazowych zachodzących w procesach obróbki cieplno-plastycznej stali, Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Gliwice 2005
4. Grosman F., Hadasik E., Tkocz M., Cyganek Z.: Symulacje numeryczne walcowania na gorąco blach i prętów w warunkach LPS z uwzględnieniem zjawisk zamykania i spajania nieciągłości materiałowych w paśmie oraz określenie najkorzystniejszych parametrów prowadzenia tych procesów. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 2, Politechnika Śląska, Katowice, 2009
5. Płachta A., Kuc D.: Opracowanie charakterystyk technologicznej plastyczności wybranych gatunków stali. Opracowanie charakterystyki technologicznej plastyczności stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 3 etap 3.4., Politechnika Śląska, Katowice, 2009
6. Płachta A., Kuc D.: Opracowanie charakterystyk technologicznej plastyczności wybranych gatunków stali. Opracowanie charakterystyki technologicznej plastyczności stali konstrukcyjnej wielofazowej. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 3 etap 3.4., Politechnika Śląska, Katowice, 2009
7. Płachta A., Kuc D.: Opracowanie charakterystyk technologicznej plastyczności wybranych gatunków stali. Opracowanie charakterystyki technologicznej plastyczności stali wysokowęglowej bainitycznej. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 3 etap 3.5., Politechnika Śląska, Katowice, 2009.
8. Dyja H., Koczurkiewicz B.: Opracowanie wykresów przemian fazowych CTPI, CTPc i OCTPc dla eksperymentalnych gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wielofazowej oraz wysokowęglowej stali bainitycznej. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 1 etap 1.2., Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 2009.
9. TTsteel 2.0, Symulacja obróbki cieplnej stali, ITA Czechy 2003.
10. Herian J., Hadasik E., Halaczek D. i inni: Wybrane techniki wytwarzania wyrobów metalowych. Wskaźniki techniczno – ekonomiczne, Wydawnictwo Pol. Śl. Gliwice 2004
11. Woźniak D., Grosman F.: Walcowanie blach grubych z podwyższonym uzyskiem technologicznym, Hutnik - Wiadomości Hutnicze 1999, Nr 11.
12. Praca zbiorowa pod redakcją Hadasika E.: Przetwórstwo metali – Plastyczność a struktura, Wydawnictwo Pol. Śl. Gliwice, 2006.
13. Majta J.: Odkształcenie i własności – Stale mikrostopowe – wybrane zagadnienia, Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne, Kraków 2008
14. Hetmańczyk M., Niewielski G., Hadasik E., Kuc D.: Opracowanie wstępnych zaleceń technologicznych do walcowania blach i prętów w LPS na podstawie wyników z symulacji numerycznych i fizycznych, sprawozdanie z pracy badawczej nr 6, Politechnika Śląska, Katowice, 2009