

## Sposób obróbki cieplnej warstwy tocznej główki szyny ze stali perlitycznej

Przedmiotem wynalazku jest sposób obróbki cieplnej warstwy tocznej główki szyny ze stali perlitycznej, mający zastosowanie dla stali szynowych o następujących przedziałach zawartości podstawowych składników w procentach wagowych: C: 0.6-0.9%, Mn: 0.5-1.5%, Si: 0.05-1.0%, Cr: 0.05-1.0%, Ni: 0.05 – 0.3%, Mo: 0.05-0.3%, V: 0.02-0.4%, zarówno w linii walcowniczej z wykorzystaniem ciepła walcowania, jak również po ponownym nagraniu szyny do temperatury austenitizacji.

Znane są sposoby obróbki cieplnej szyn o strukturze perlitycznej obejmujące sekwencyjne, naprzemienne cykle intensywnego chłodzenia przedzielone cyklami spowolnionego chłodzenia w spokojnym powietrzu.

Przykładowo z polskiego dokumentu patentowego nr PL190411 B1 znany jest sposób umacniania cieplnego główki szyn i kształtowników iglicowych ze stali perlitycznych z wykorzystaniem ciepła walcowania, w którym szynę lub kształtownik po procesie walcowania pierwotnie chłodzi się w spokojnym powietrzu do temperatury około 830°C, po czym samą główkę szyny lub kształtownika chłodzi się w sposób przyspieszony w 1 - 4% wodnym roztworze polihartenolu lub innego polimeru o podobnych właściwościach fizykochemicznych do temperatury około 550°C, a następnie kolejno w spokojnym powietrzu przez okres 10 – 40 s, ponownie w wyżej wymienionym roztworze do temperatury 500°C, i na koniec procesu w spokojnym powietrzu lub sprężonym powietrzem do temperatury otoczenia.

Również z europejskiego dokumentu patentowego nr EP 2231884 B1 znany jest sposób obróbki cieplnej szyn oraz urządzenia wykorzystanego do przeprowadzenia obróbki, w którym obróbka cieplna podzielona jest na etapy, z pierwszym etapem obejmującym chłodzenie w spokojnym powietrzu szyny do osiągnięcia temperatury powierzchni główki wynoszącej co najmniej 720°C

i drugim etapem chłodzenia z wykorzystaniem płynu chłodzącego do osiągnięcia temperatury powierzchni główki w zakresie od 50 do 150°C powyżej temperatury początku przemiany fazowej Ar3 w celu uniknięcia przemiany fazowej austenitu w perlit, trzecim etapem chłodzenia w powietrzu o ustalonym czasie trwania, podczas którego temperatura warstwy powierzchniowej główki szyny wyrównuje się to temperatury warstwy podpowierzchniowej, przy czym wspomniana podpowierzchniowa warstwa ma grubość mieszczącą się w przedziale między 15mm, a 25mm licząc od powierzchni, czwarty etap studzenia z wykorzystaniem chłodzącego płynu do osiągnięcia temperatury powierzchni główki niższej niż 500°C, dzięki czemu zachodzi przemiana fazowa austenitu w perlit, po której perlit ma jednorodną strukturę o małych odległościach międzyplikowych we wspomnianej powierzchniowej warstwie.

W obu tych patentach sekwencyjny sposób chłodzenia ma na celu wyrównanie temperatury na przekroju główki, co przekłada się na bardziej jednorodną strukturę oraz obniżony poziom naprężeń wewnętrznych w objętości główki. Jednakże w obu tych sposobach obróbki cieplnej główki szyny nie ma możliwości kontroli postępu przemiany perlitycznej, co może spowodować uzyskanie niskiej ciągliwości warstwy tocznej główki szyny oraz duży skok twardości między powierzchnią toczną, a środkiem główki szyny.

Celem wynalazku jest opracowanie sposobu obróbki cieplnej warstwy tocznej główki szyny ze stali perlitycznej zapewniającej sterowanie postępowaniem przemiany perlitycznej w warstwie przypowierzchniowej główki o grubości 10-20mm w ten sposób, by uzyskać wysoką ciągliwość tej warstwy ( $A_5 > 11\%$ ) połączoną z wysoką wytrzymałością ( $R_m > 1150$  MPa) poprzez optymalizację cykli intensywnego i spowolnionego chłodzenia, co zapewnia uzyskanie jej dużej odporności na procesy zużycia i generowania wad kontaktowo-zmęczeniowych.

Przedmiotem wynalazku jest sposób obróbki cieplnej warstwy tocznej główki szyny ze stali perlitycznej zawierającej w procentach wagowych C: 0.6-0.9%, Mn: 0.5-1.5%, Si: 0.05-1.0%, Cr: 0.05-1.0%, Ni: 0.05 – 0.3%, Mo: 0.05-0.3%, V: 0.02-0.4%, przebiegający w dwóch etapach, w którym szynę, bezpośrednio po procesie walcowania lub po ponownym nagraniu do temperatury austenizacji, transportuje się do stanowiska do obróbki cieplnej, następnie w etapie pierwszym, w temperaturze powyżej 700°C, główkę szyny poddaje się od 1 do 3 sekwencyjnym, naprzemiennym cyklom intensywnego chłodzenia z wykorzystaniem medium chłodzącego przedzielonych spowolnionym chłodzeniem w spokojnym powietrzu, charakteryzujący się tym, że w etapie drugim, w temperaturze poniżej 700°C, główkę szyny poddaje się od 2 do 7 wspomnianym cyklom, następnie szynę chłodzi się w spokojnym powietrzu do temperatury otoczenia, przy czym czasy cykli intensywnego i spowolnionego chłodzenia wyznacza się tak, aby średnia temperatura przemiany perlitycznej ( $T_p$ ) utrzymywała się w przedziale zdefiniowanym za pomocą zależności:

$$530^{\circ}\text{C} \leq T \leq 570^{\circ}\text{C} \quad (\text{wz\u00f3r 1})$$

zaś przej\u015bcie do nast\u0119pnego cyklu ch\u0142odzenia nast\u0119puje w momencie, gdy warto\u015b\u0107 \u015bredniej temperatury przemiany perlitycznej ( $T_p$ ) osi\u0105gnie graniczne warto\u015bci zdefiniowane za pomoc\u0105 zale\u017ano\u015bci opisanej we wzorze 1.

Korzystnie \u015bredni\u0105 temperatur\u0119 przemiany perlitycznej ( $T_p$ ) wyznacza si\u0119 za pomoc\u0105 r\u00f3wnania:

$$\langle T_p \rangle = \frac{\int T dX(t)_p}{\int dX(t)_p} \quad (\text{wz\u00f3r 2})$$

gdzie:

$X_p(t)$  – r\u00f3wnanie kinetyki przemiany perlitycznej wyznaczone na podstawie bada\u0144 dylatometrycznych,

$T$  – temperatura w skali absolutnej,

$T_p$  – \u015brednia temperatura przemiany,

$t$  – czas,

zaś kinetykę przemiany perlitycznej oblicza się wykorzystując równanie JMAK (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov):

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad (\text{wzór 3})$$

z okresem inkubacyjnym:

$$\tau_p = \frac{a_1}{(A_{c1} - T)^{a_2}} \exp\left(\frac{a_3}{RT}\right) \quad (\text{wzór 4})$$

przyjmując, że współczynnik  $n$  ma stałą wartość, a współczynnik  $k$  jest funkcją temperatury:

$$k = a_6 \exp(a_4 - a_5 T) \quad (\text{wzór 5})$$

gdzie:

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  są współczynnikami zależnymi od składu chemicznego stali,  $A_{c1}$  jest temperaturą przemiany perlitycznej,

$T$  jest temperaturą w skali absolutnej,

$R$  jest stałą gazową.

Korzystnie średnia temperatura przemiany perlitycznej ( $T_p$ ) wynosi 550°C.

Korzystnie jako medium chłodzące stosuje się wodny roztwór mieszanin polimerowych albo natrysk wodą albo mgłą wodno-powietrzną albo powietrze nasycone parą wodną albo sprężone powietrze.

Z przeprowadzonych przez autorów badań wynika, że w stalach szynowych o strukturze perlitycznej występuje zakres temperatur przemiany austenitu w perlit, w którym obserwuje się optymalne połączenie wytrzymałości i ciągliwości. Ilustruje to fig.1, na której przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ), umownej granicy plastyczności ( $R_p 0.2$ ) i wydłużenia do zerwania ( $A_5$ ) w funkcji temperatury przemiany, która zachodziła w stali R260 w warunkach izotermicznych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800. Na podstawie wyników przedstawionych na fig. 1 zdefiniowano przedział temperatury przemiany perlitycznej, w którym obserwuje się optymalne połączenie wytrzymałości

i ciągliwości opisany równaniem  $530^{\circ}\text{C} \leq T \leq 570^{\circ}\text{C}$ . Zależność właściwości mechanicznych od temperatury przemiany wynika ze stanu mikrostruktury stali w zależności od temperatury przemiany. Zilustrowano to na fig. 2, na którym przedstawiono porównanie mikrostruktury stali R260 po przemianie w temperaturach 550 i 500°C. W wyniku przemiany w temperaturze 550°C w stali powstaje idealna mikrostruktura perlitu drobnego o odległości między płytkami cementytu około 0,1 mikrometra. W przypadku, gdy przemiana austenitu zachodzi w temperaturze 500°C, powstaje złożona mikrostruktura składająca się z perlitu drobnego, perlitu zdegenerowanego oraz miejscami z bainitu górnego. Występowanie w mikrostrukturze perlitu zdegenerowanego i bainitu górnego jest przyczyną spadku wydłużenia całkowitego obserwowanego na fig.1.

Zaletą zastosowania pierwszego etapu chłodzenia według wynalazku jest przyspieszenie procesu obróbki cieplnej, w przypadku, gdy temperatura szyny jest wysoka po procesie walcowania na gorąco, natomiast korzystnym skutkiem realizacji drugiego etapu polegającego na utrzymaniu średniej temperatury przemiany perlitycznej w wąskim przedziale jest uzyskanie bardzo wysokiej wytrzymałości, a równocześnie ciągliwości struktury perlitycznej powstałej w trakcie obróbki.

Przedmiot wynalazku w przykładach wykonania został przedstawiony poniżej.

#### Przykład 1

W pierwszym przykładzie wykonania główkę szyny typu 60E1 o składzie chemicznym: 0.69%C, 1.20%Mn, 0.24%Si, 0.013%S, 0.015%P, 0.14%Cr, 0.008%N poddano obróbce cieplnej z temperatury 1050°C zakładając pięć cykli zanurzenia w 8% roztworze wodnym mieszaniny polimerowej.

Dla tej stali współczynniki w równaniach (3) - (5) wynoszą:  $a_1 = 0.89$ ,  $a_2 = 131.7$ ,  $a_3 = 3.55$ ,  $a_4 = 0.1$ ,  $a_5 = 0.076$ ,  $a_5 = 0.0005$ ,  $n = 1$ .

Obliczenia kolejnych czasów chłodzenia w roztworze i w powietrzu przy założeniu liczby cykli, prowadzono z wykorzystaniem autorskiego programu opartego na metodzie elementów skończonych, w którym implementowano model przemian fazowych JMAK. W obliczeniach śledzono wartość średniej temperatury przemiany perlitycznej ( $T_p$ ) wyrażonej za pomocą wzoru 2 w ten sposób, by wartość tego parametru podczas zanurzenia i wynurzenia mieściła się w przedziale określonym za pomocą wzoru 1, zaś jego średnia wartość dla całego cyklu zanurzenie – wynurzenie wynosiła  $550^{\circ}\text{C}$ . Kinetyka przemiany perlitycznej zależy od czasu, dlatego wartości czasów w kolejnych cyklach zanurzenie – wynurzenie jest zróżnicowana. Warunki wymiany ciepła w procesie obróbki cieplnej zgodnie z wynalazkiem wyznaczono metodą symulacji numerycznej procesu obejmującej rozwiązanie równania transportu ciepła w połączeniu z obliczeniami postępu przemiany perlitycznej. Symulacje zmian temperatury przeprowadzono za pomocą autorskiego programu MES. Współczynnik wymiany ciepła (HTC) między główką szyny i medium chłodzącym wyznaczono metodą analizy odwrotnej. Dla bazowego stężenia roztworu 8% wyznaczony współczynnik wymiany ciepła wynosił  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$  dla temperatury powierzchni główki powyżej  $700^{\circ}\text{C}$ . Gdy temperatura spada poniżej  $700^{\circ}\text{C}$  HTC rośnie i osiąga maksymalną wartość  $1900 \text{ W/m}^2\text{K}$  w  $300^{\circ}\text{C}$ . Dalszy spadek temperatury powoduje spadek HTC do wartości  $700 \text{ W/m}^2\text{K}$  w temperaturze otoczenia. Zmiana stężenia roztworu powoduje przesunięcie wykresu HTC w funkcji temperatury w górę lub w dół.

Przedziały czasu przypadające na cykle zanurzenie – wynurzenie, zapewniające uzyskanie średniej temperatury przemiany perlitycznej obliczanej ze wzoru 2 o wartości  $550^{\circ}\text{C}$  podano w tabeli 1, zaś krzywe chłodzenia przy powierzchni tocznej oraz w środku główki szyny 60E1 podczas obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 3.

Tabela 1. Czasy zanurzenia (s) w roztworze wodnym mieszaniny polimerowej i wynurzenia dla przykładu 1 obróbki cieplnej główki szyny 60E1.

P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
60 s	8 s	15 s	8s	30s	23s	15s	6s	15s	5s

P – chłodzenie w spokojnym powietrzu,

R - chłodzenie w wodnym roztworze mieszaniny polimerowej

Kontur główki szyny 60E1 z zaznaczonym miejscem pobrania próbki do badań wytrzymałościowych przedstawiono na fig. 4 (a), mikrostrukturę warstwy tocznej przy powierzchni szyny uzyskaną w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 4 (b), zaś średnią wartość odległości między płytkami cementytu w perlicie i uzyskane właściwości mechaniczne podano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiaru odległości między płytkami cementytu w perlicie oraz właściwości mechanicznych z obszaru zaznaczonego na fig.4 (a).

Średnia odległość między płytkami cementytu, ( $\mu\text{m}$ )	Granica plastyczności w próbie rozciągania $R_{p0.2}$ , (MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , (MPa)	Wydłużenie całkowite w próbie rozciągania $A_5$ , (%)	Przewężenie $Z$ , (%)	Twardość HB
0.115	885	1189	12.5	24	390

#### Przykład 2

Główkę szyny typu 60E1 o składzie chemicznym: 0.69%C, 1.20%Mn, 0.24%Si, 0.013%S, 0.015%P, 0.14%Cr, 0.008%N poddano obróbce cieplnej z temperatury 1050°C stosując siedem cykli zanurzania w 8% roztworze wodnym mieszaniny polimerowej. Przedziały czasu przypadające na cykle zanurzenie – wynurzenie, zapewniające uzyskanie średniej temperatury przemiany perlitycznej obliczanej ze wzoru 2 o wartości 550°C, otrzymane tak samo, jak w Przykładzie 1, podano w tabeli 3, zaś krzywe chłodzenia przy powierzchni tocznej oraz w środku główki szyny 60E1 podczas obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 5.

Tabela 3. Czasy zanurzenia (s) w roztworze wodnym mieszaniny polimerowej i wynurzenia dla przykładu 2 obróbki cieplnej główki szyny 60E1.

P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
145	8	25	18	15	8	15	5	15	4	15	3	15	3

Kontur główki szyny 60E1 z zaznaczonym miejscem pobrania próbki do badań wytrzymałościowych przedstawiono na fig. 6 (a), mikrostrukturę warstwy tocznej przy powierzchni szyny uzyskaną w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 6 (b), zaś średnią wartość odległości między płytkami cementytu w perlicie i uzyskane właściwości mechaniczne podano w Tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiaru odległości między płytkami cementytu w perlicie oraz właściwości mechanicznych z obszaru zaznaczonego na fig. 6 (a)

Średnia odległość między płytkami cementytu, ( $\mu\text{m}$ )	Granica plastyczności w próbie rozciągania $R_{p0.2}$ , (MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , (MPa)	Wydłużenie całkowite w próbie rozciągania $A_5$ , (%)	Przewężenie $Z$ , (%)	Twardość HB
0.108	898	1207	11.9	23	393

### Przykład 3

Główkę szyny typu 60E1 o składzie chemicznym: 0.69%C, 1.20%Mn, 0.24%Si, 0.013%S, 0.015%P, 0.14%Cr, 0.008%N poddano obróbce cieplnej z temperatury 1050°C stosując pięć cykli zanurzania w 8% roztworze wodnym mieszaniny polimerowej. Przedziały czasu przypadające na cykle zanurzenie – wynurzenie, zapewniające uzyskanie średniej temperatury przemiany perlitycznej warstwy przypowierzchniowej obliczanej ze wzoru 2 o wartości 570°C, otrzymane tak samo, jak w Przykładzie 1, podano w tabeli 5, zaś krzywe chłodzenia przy powierzchni tocznej oraz w środku główki szyny 60E1 podczas obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 7.

Tabela 5. Czasy zanurzenia (s) w roztworze wodnym mieszaniny polimerowej i wynurzenia dla przykładu 3 obróbki cieplnej główki szyny 60E1.

P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
60 s	10 s	16 s	8s	20s	21s	14s	6s	14s	6s

Kontur główki szyny 60E1 z zaznaczonym miejscem pobrania próbki do badań wytrzymałościowych przedstawiono na fig. 8 (a), mikrostrukturę warstwy tocznej przy powierzchni szyny uzyskaną w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 8 (b), zaś średnią wartość odległości między płytkami cementytu w perlicie i uzyskane właściwości mechaniczne podano w Tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki pomiaru odległości między płytkami cementytu w perlicie oraz właściwości mechanicznych z obszaru zaznaczonego na fig. 8 (a).

Średnia odległość między płytkami cementytu, ( $\mu\text{m}$ )	Granica plastyczności w próbie rozciągania $R_{p0.2}$ , (MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , (MPa)	Wydłużenie całkowite w próbie rozciągania $A_5$ , (%)	Przewężenie $Z$ , (%)	Twardość HB
0.121	867	1160	11.5	24	373

#### Przykład 4

Główkę szyny typu 60E1 o składzie chemicznym: 0.69%C, 1.20%Mn, 0.24%Si, 0.013%S, 0.015%P, 0.14%Cr, 0.008%N poddano obróbce cieplnej z temperatury 1050°C stosując pięć cykli zanurzania w 8% roztworze wodnym mieszaniny polimerowej. Przedziały czasu przypadające na cykle zanurzenie – wynurzenie, zapewniające uzyskanie średniej temperatury przemiany perlitycznej warstwy przypowierzchniowej obliczanej ze wzoru 2 o wartości 530°C, otrzymane tak samo, jak w Przykładzie 1, podano w tabeli 7, zaś krzywe chłodzenia przy

powierzchni tocznej oraz w środku główki szyny 60E1 podczas obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 9.

Tabela 7. Czasy zanurzenia (s) w roztworze wodnym mieszaniny polimerowej i wynurzenia dla przykładu 4 obróbki cieplnej główki szyny 60E1.

P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
60 s	10 s	16 s	8s	20s	23s	11s	6s	10s	5s

Kontur główki szyny 60E1 z zaznaczonym miejscem pobrania próbki do badań wytrzymałościowych przedstawiono na fig. 10 (a), mikrostrukturę warstwy tocznej przy powierzchni szyny uzyskaną w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej przedstawiono na fig. 10 (b), zaś średnią wartość odległości między płytkami cementytu w perlicie i uzyskane właściwości mechaniczne podano w Tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki pomiaru odległości między płytkami cementytu w perlicie oraz właściwości mechanicznych z obszaru zaznaczonego na fig. 10 (a).

Średnia odległość między płytkami cementytu, ( $\mu\text{m}$ )	Granica plastyczności w próbie rozciągania Rp0.2, (MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie Rm, (MPa)	Wydłużenie całkowite w próbie rozciągania A5, (%)	Przewężenie Z, (%)	Twardość HB
0.092	932	1232	11.1	20	410

DYREKTOR INSTYTUTU

dr hab. inż. Adam Zieliński, prof. nzw.

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

Im. Stanisława Staszica w Krakowie  
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30

REKTOR

Akademii Górniczo-Hutniczej  
Im. Stanisława Staszica w Krakowie

prof. dr hab. inż. Tadeusz Słomka

SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ  
INSTYTUT METALURGII ŻELAZA  
IM. ST. STASZICA

ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice  
REGON 000026867, NIP 631 020 08 19  
BDO 000027996

- 3 -

RZECZNIK PATENTOWY

mgr inż. Ewa Kurkowska  
nr wpisu 3481