

**LABORATORIA  
APARATURA  
BADANIA**

ISSN-1427-5619

**1 / 2019**

**DWUMIESIĘCZNIK**



**Zawartość metali  
i mikroelementów w glebach  
Mikrobiologiczny profil gleby**



# Konstrukcja wykresów CTP dla stali konstrukcyjnych

Mateusz Morawiec, Aleksandra Kozłowska, Adam Grajcar, Mariusz Król\*

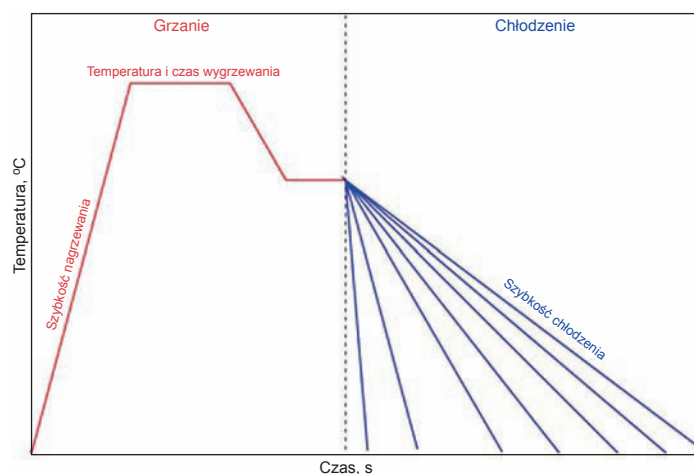
Obróbka cieplna jest powszechnie stosowaną technologią modyfikacji własności materiałów inżynierskich. Znajduje szerokie zastosowanie w hutnictwie, przemyśle maszynowym oraz wszędzie tam, gdzie modyfikacja własności mechanicznych i technologicznych materiałów inżynierskich ma istotne znaczenie. W przypadku stali konstrukcyjnych stosowanych do produkcji walcówek, prętów, blach i innych wyrobów, istotnym jest znajomość wpływu temperatury oraz sposobu chłodzenia na przemiany fazowe zachodzące w szerokim zakresie szybkości chłodzenia. Taka informacja pozwala na dokładne projektowanie obróbki cieplnej materiałów konstrukcyjnych w celu uzyskania pożądanych własności mechanicznych produkowanej stali. Informację tego typu można uzyskać z wykresów CTP (czas-temperatura-przemiana). Wykresy te mogą zostać wyznaczone dla chłodzenia ciągłego i opisane są wówczas jako CTP<sub>c</sub> („c” od ciągłe) oraz przy wytrzymaniu izotermicznym o opisie CTP<sub>i</sub> („i” od izotermiczne). Aby opracować tego typu wykresy należy przeprowadzić szereg badań, w skład których wchodzi: badania dylatometryczne, metalograficzne oraz pomiary twardości. Badania

dylatometryczne przeprowadzane są w celu wyznaczenia temperatury początku oraz końca przemian fazowych zachodzących w materiale.

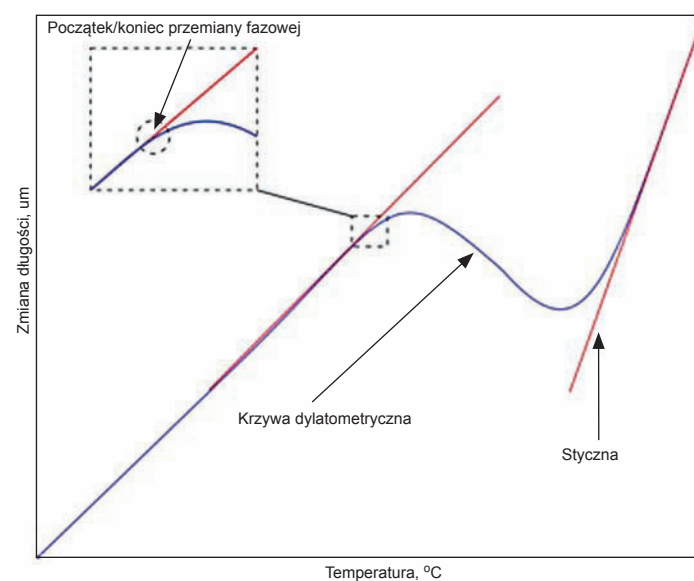
Analiza metalograficzna pozwala na zidentyfikowanie faz obecnych w mikrostrukturze po przeprowadzonej analizie dylatometrycznej, natomiast

pomiary twardości pozwalają na zaobserwowanie zmian we własnościach stali po danym cyklu cieplnym. Integracja tych informacji pozwalana na reprezentatywne wyznaczenie wykresów CTP.

Pierwszym etapem na drodze wyznaczenia wykresów CTP jest analiza dylatometryczna danej stali. W tym celu należy przeprowadzić szereg badań dylatometrycznych dla różnych szybkości chłodzenia. W zależności od tego jaką dokładność chce się uzyskać, tyle pomiarów należy przeprowadzić (od bardzo małych szybkości chłodzenia do dużych szybkości). Schematyczne przedstawienie procedury analizy dylatometrycznej przedstawiono na rysunku 1. Podczas projektowania cyklu cieplnego dla analizowanego materiału należy określić parametry, tj. szybkość nagrzewania, temperatury oraz czasy wygrzewania potrzebne do ujednorodnienia temperatury w całej objętości materiału lub zajścia przemian fazowych. Na tym etapie, przy bardzo małych szybkościach nagrzewania (rzędu 4°C/min), możliwe jest wyznaczenie temperatury początku i końca przemiany ferrytu w austenit w warunkach zbliżonych do równowagowych (tak zwanej temperatury Ac<sub>1</sub> oraz Ac<sub>3</sub>). Następnym, po ukończeniu



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie procedury analizy dylatometrycznej

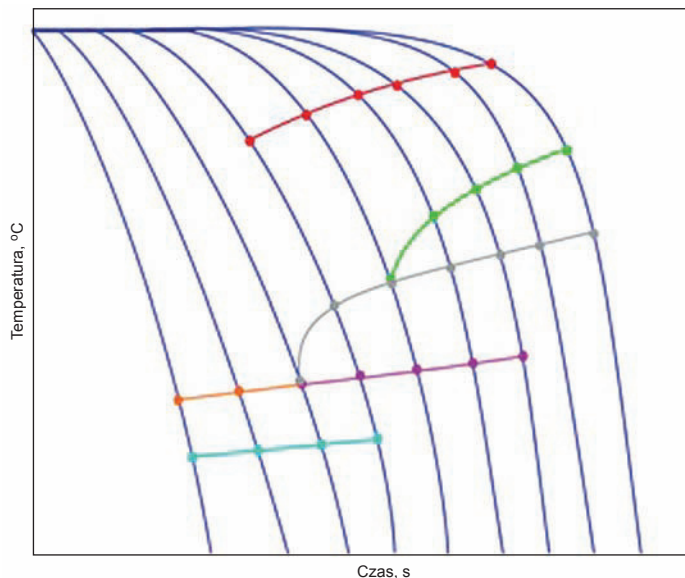


Rys. 2. Schemat analizy krzywej dylatometrycznej w celu wyznaczenia punktów początku i końca przemian fazowych



procesów nagrzewania i wygrzewania należy określić parametry chłodzenia. Jak wspomniano wcześniej, im większy zakres szybkości chłodzenia oraz ilość pomiarów w tym zakresie, tym więcej próbek potrzebnych jest do przeprowadzenia analizy dylatometrycznej. Po ustaleniu parametrów chłodzenia możliwe jest przeprowadzenie analizy dylatometrycznej danego materiału. Z każdej analizy uzyskuje się krzywe zmiany długości w funkcji temperatury, które następnie poddaje się analizie na etapie chłodzenia. Przykład fragmentu krzywej dylatometrycznej przedstawiono schematycznie na rysunku 2.

O rozpoczęciu przemiany świadczy zmiana charakteru krzywej chłodzenia z liniowego na bardziej paraboliczny. Jest to związane ze zmianami objętościowymi materiału spowodowanymi zachodzącymi w nim przemianami fazowymi. Natomiast ponowna zmiana przebiegu krzywej na liniowy świadczy o zakończeniu danej przemiany. Określenie temperatury początku lub końca przemiany polega na poprowadzeniu stycznej równoległe do liniowego fragmentu krzywej dylatometrycznej. Miejsce gdzie styczna przestaje się pokrywać z krzywą dylatometryczną określa temperaturę, w której przemiana się zaczęła bądź skończyła. Taką analizę należy przeprowadzić dla każdej szybkości chłodzenia, określając temperatury początku i końca przemian fazowych zachodzących w danym materiale, chłodzonym z daną szybkością. Posiadając komplet danych dla wszystkich



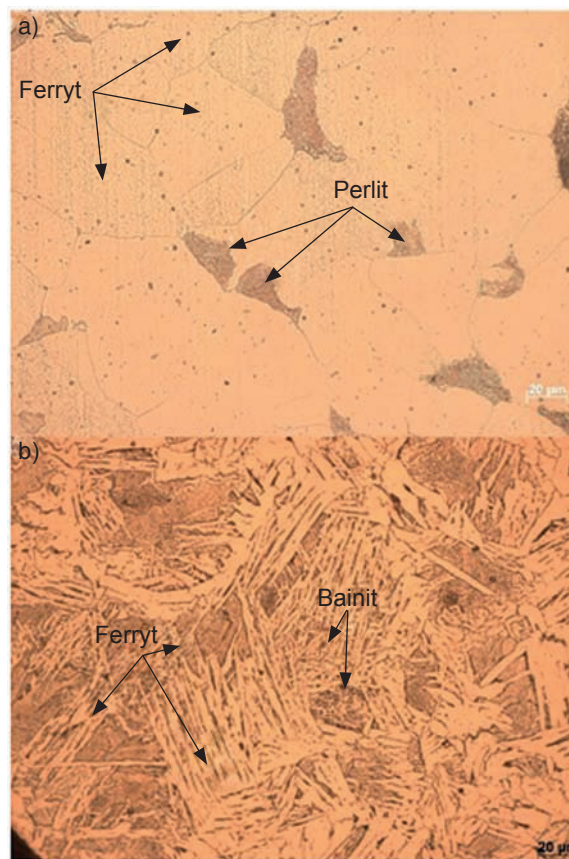
Rys. 3. Obszary występowania poszczególnych faz otrzymane w wyniku analizy dylatometrycznej

szybkości chłodzenia możliwe jest określenie obszarów występowania poszczególnych faz w trakcie chłodzenia materiału. Przykład takiej analizy przedstawiono na rysunku 3, na którym zaznaczone punkty określają wyznaczone w trakcie analizy temperatury początku i końca przemian fazowych. Połączenie tych punktów linią pozwala na wyznaczenie zakresów temperaturowych występowania danej fazy w materiale przy danych warunkach chłodzenia. Linia czerwona wyznacza początek jednej przemiany, natomiast linia zielona/szara koniec tej przemiany i jednocześnie początek kolejnej. Jednak aby możliwe było określenie jaka faza występuje w danym zakresie temperatury przy danych warunkach chłodzenia, należy przeprowadzić analizę metalograficzną. Analiza metalograficzna polega na analizie mikrostruktury próbki po chłodzeniu za pomocą mikroskopii świetlnej.

Na podstawie takiej analizy można określić skład fazowy materiału po danych warunkach chłodzenia, co pozwala

na określenie w jakim zakresie temperaturowym zachodzi dana przemiana. Rysunki 4a i 4b przedstawiają mikrostrukturę stali chłodzoną z szybkością  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  oraz  $150^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Na podstawie takiej analizy można stwierdzić, że dla szybkości chłodzenia  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  mikrostruktura składa się z mieszaniny ferrytu i perlitu, przy czym dominującą fazą jest ferryt.

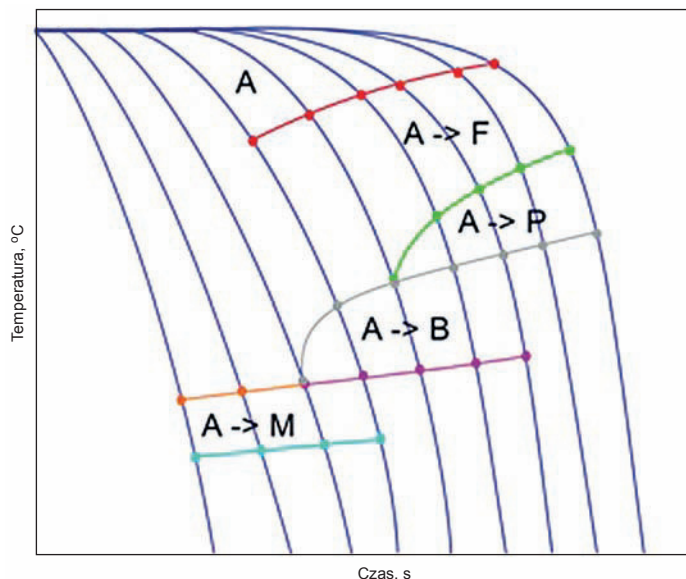
Zwiększenie szybkości chłodzenia do  $150^{\circ}\text{C}/\text{s}$  prowadzi do otrzymania mikrostruktury składającej się głównie z ferrytu oraz pewnej frakcji bainitu. Jednocześnie widać, że przy takiej szybkości chłodzenia morfologia ferrytu uległa zmianie z równoosiowej na listwową. Brak martenzytu spowodowany jest niską



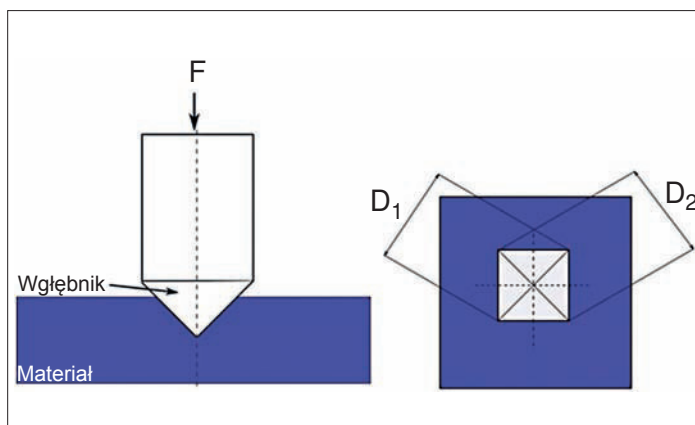
Rys. 4. Mikrostruktura stali s235JR po chłodzeniu z szybkością: a)  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , b)  $150^{\circ}/\text{s}$

hartownością tej stali. Znając skład fazowy stali po danym wariacie chłodzenia można stwierdzić jaka przemiana fazowa zaszła w danym zakresie wyznaczonych temperatur. Odnosząc to do wykresu na rysunku 3 dla najmniejszej szybkości chłodzenia (linia najbardziej wysunięta w prawo), czerwona linia wyznacza temperaturę początku przemiany austenitu w ferryt, która trwa aż do osiągnięcia linii zielonej. Po przekroczeniu tej linii przemiana ferrytyczna się kończy i rozpoczyna się przemiana perlityczna, trwająca aż do osiągnięcia linii szarej (poniżej której nie zachodzą już żadne przemiany). Analogicznie sytuacja wygląda w przypadku chłodzenia z szybkością 150°C/s, gdzie na wykresie z rysunku 3 (duża szybkość chłodzenia – krzywa w środku), linia czerwona wyznacza początek przemiany ferrytycznej, natomiast linia szara – jej koniec oraz jednocześnie początek przemiany bainitycznej, która kończy się po osiągnięciu linii fioletowej. Po przeprowadzeniu analizy metalograficznej możliwe jest wzbogacenie krzywych dylatometrycznych o informacje dotyczące składu fazowego dla poszczególnych wariantów chłodzenia. Pozwala to na opisanie obszarów występowania poszczególnych faz. Przykład pełnego wykresu przedstawiono na rysunku 5 – na tej podstawie możliwe jest określenie wpływu warunków chłodzenia na mikrostrukturę analizowanej stali.

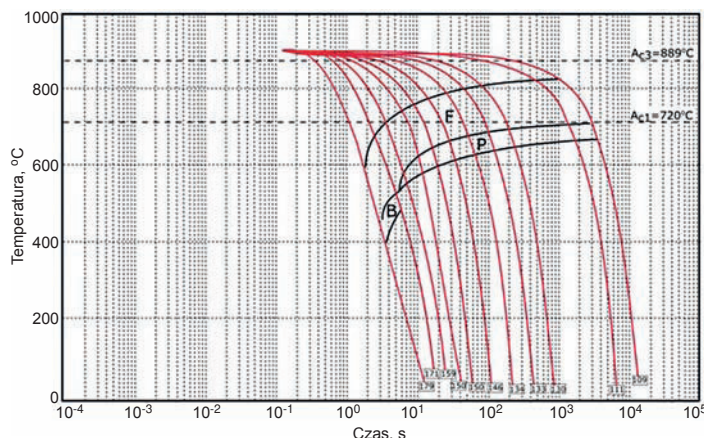
Dodatkowo, w celu oceny niewielkich różnic w materiale, trudnych do zaobser-



Rys. 5. Uzupełniony wykres z rys. 3, przedstawiający zakresy temperaturowe przemian fazowych wraz z uwzględnieniem rodzaju przemiany (wykres CTP)



Rys. 6. Schemat pomiaru twardości metodą Vickersa



Rys. 7. Wykres CTPc dla stali konstrukcyjnej niskowęglowej s235JR

wowania przy użyciu mikroskopu świetlnego, stosuje się pomiary mikrotwardości, które są wykonywane z wykorzystaniem metody Vickersa. Metoda ta pozwala na pomiary mikrotwardości materiału – jest to istotne ze względu na małe wymiary próbek dylatometrycznych. W metodzie tej wykonuje się pomiar przekątnych wgłębnia pozostawionego przez penetrator, który ma postać diamentowego ostrosłupa o podstawie kwadratu. Przebieg pomiaru przedstawiono schematycznie na rysunku 6. Po określeniu przekątnych odciśku ( $D_1$  i  $D_2$ ) możliwe jest policzenie pola powierzchni odciśku i wyznaczenie twardości zgodnie z zależnością:

$$HV = 0,18915 \frac{F}{D^2} \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – siła,  $D$  – średnia arytmetyczna zmierzonych przekątnych.

Posiadając komplet wyników, tj. temperatury początku i końca poszczególnych przemian fazowych, analizę metalograficzną faz obecnych w materiale po danym wariacie chłodzenia oraz wyniki z pomiarów mikrotwardości, możliwe jest skonstruowanie wykresu CTP. Na rysunku 7 przedstawiono przykład rzeczywistego wykresu CTPc dla stali konstrukcyjnej s235JR, opracowanego przy zastosowaniu wyżej wymienionej metodyki badawczej.

\* Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice