

Cykliczna obróbka cieplna – w teorii i w zastosowaniu

Cyclic heat treatment - theory and practice

Wojciech SZKLINIARZ



W KILKU SŁOWACH

W artykule przedstawiono nową technologię cyklicznej obróbki cieplnej opisując szczegółowo zjawiska towarzyszące procesowi, typy cyklicznej obróbki cieplnej oraz liczne przykłady wykorzystania tego procesu z uwzględnieniem najbardziej znanych jak i spektakularnych zastosowań.



SUMMARY

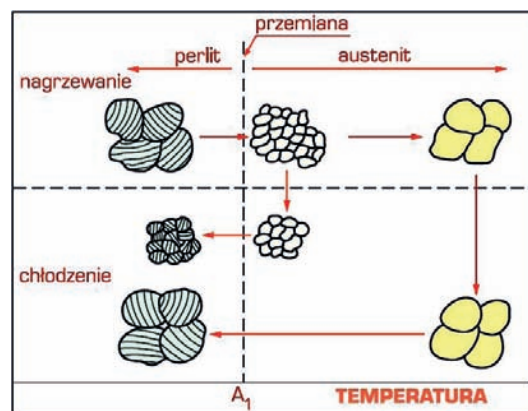
The article describes the new heat treatment technology and provides detailed information about the accompanying phenomena, types of cyclic thermal treatment and a number of examples of how the process was employed, including the most notable and impressive instances.

Wojciech Szkliniarz
Politechnika Śląska, Instytut
Nauki o Materiałach
Kraśińskiego 8, 40-019
Katowice

Wprowadzenie

Nagrzewanie stali do temperatury występowania austenitu jest zabiegiem stosowanym w większości operacji obróbki cieplnej. Warunkiem rozpoczęcia procesu tworzenia się austenitu z mieszaniny ferrytu i cementytu (perlitu) jest nagrzanie stali do temperatury wyższej od A_1 . Po nagraniu do tej temperatury na granicach międzyfazowych ferrytu i cementytu następuje niejednorodne zarodkowanie austenitu. Duża liczba granic międzyfazowych i tym samym duża liczba zarodków austenitu sprawia, że przemiana perlitu w austenit skutkuje znaczącym rozdrobnieniem ziaren austenitu (rys. 1). W warunkach powolnego chłodzenia utworzone drobne ziarna austenitu przemieniają się w ziarna perlitu o podobnej wielkości. Podwyższenie temperatury lub czasu wygrzewania w obszarze występowania austenitu skutkuje

rozrostem nie tylko jego ziaren, także ziaren powstałego podczas chłodzenia perlitu (rys. 1).



Rys. 1. Schemat zmian wielkości ziarna stali o wyjściowej mikrostrukturze perlitycznej podczas nagrzewania i następnego chłodzenia [1]

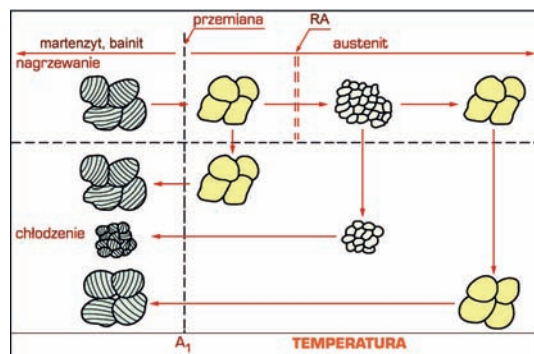
Jeśli wyjściową mikrostrukturą stali jest martenzyt lub bainit to okazuje się, że przemiana martenzytu (bainitu) w austenit w temperaturze powyżej A_1 nie prowadzi do rozdrobnienia





ziarna, odtwarzane jest jedynie tzw. byłe ziarno austenitu (rys. 2). Do rozdrobnienia ziarna nie prowadzi także przemiana odwrotna zachodząca podczas chłodzenia. Nieoczekiwanie natomiast rozdrobnienie ziarna występuje podczas nagrzewania tego nowoutworzonego austenitu do wyższej temperatury (rys. 2) i jest ono spowodowane rekrytalizacją austenitu (RA) „odkształconego” za sprawą tzw. „zgniotu fazowego” towarzyszącego przemianie martenzytu (bainitu) w austenit.

Hipotezę o tym, że przemianie alotropowej $\alpha \rightarrow \gamma$ w stopach żelaza towarzyszy wewnętrzny zgniot fazowy spowodowany zróżnicowaniem objętości właściwych faz α i γ biorących udział w przemianie sformułował już w latach 30-tych ubiegłego stulecia rosyjski uczonec A. A Bočvar [2]. W latach późniejszych jego uczniowie opracowali podstawy technologii obróbki cieplnej wykorzystującej to zjawisko do umacniania stopów żelaza i innych metali nieżelaznych [3, 4].



Rys. 2. Schemat zmian wielkości ziarna stali o wyjściowej mikrostrukturze martenzytycznej (bainitycznej) podczas nagrzewania i następnego chłodzenia (opracowano na podstawie [1])

Zgniot fazowy

Zgniot fazowy, jako zjawisko fizyczne towarzyszące przemianom fazowym, najogólniej można scharakteryzować jako mikroodkształcenie plastyczne wywołane naprężeniami wewnętrznymi powstałymi w wyniku wzajemnego oddziaływania na siebie biorących udział w przemianie faz o zróżnicowanych objętościach właściwych i właściwościach. Wizualnym odzwierciedleniem zgniotu fazowego są rejestrowane dylatometrycznie zmiany wymiarów liniowych próbek podczas nagrzewania i chłodzenia.

Wartość zgniotu fazowego ϵ towarzyszącego konkretnej przemianie typu $\alpha \rightarrow \beta$ lub $\alpha \rightarrow \gamma$

można oszacować w oparciu o następującą zależność [5, 6]:

$$\epsilon = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Omega_{\gamma(\beta)} - \Omega_{\alpha}}{\Omega_{\alpha}}$$

gdzie:

- ϵ - wartość zgniotu fazowego,
- Ω_{α} - objętość właściwa komórki elementarnej wyjściowej fazy α ,
- $\Omega_{\gamma(\beta)}$ - objętość właściwa komórki elementarnej powstającej fazy γ lub β .

Oszacowana w oparciu o równanie (1) wartość zgniotu fazowego towarzyszącego przemianie alotropowej $\alpha \rightarrow \gamma$ w żelazie wynosi ok. 1,45%. Ta sama wielkość oszacowana dla przemiany alotropowej $\alpha \rightarrow \beta$ w tytanie jest zdecydowanie mniejsza i wynosi zaledwie ok. 0,06% [6].

Do oceny wartości naprężeń wewnętrznych σ , towarzyszących konkretnej przemianie odbywającej się ze zmianą objętości właściwej można wykorzystać znaną regułę opartą na teorii sprężystości [5, 6]:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \tag{2}$$

gdzie:

E - moduł sprężystości podłużnej w temperaturze przemiany.

Wartości oszacowane w oparciu o równanie (2) określają wartość ciśnienia hydrostatycznego wywołanego przez sferyczny zarodek powstały ze zmianą objętości w nieskończenie izotropowej osnowie. Określona w ten sposób wartość naprężeń wewnętrznych towarzyszących przemianie alotropowej $\alpha \rightarrow \gamma$ w żelazie wynosi ok. 380 MPa [5]. Ta sama wielkość oszacowana dla przemiany alotropowej $\alpha \rightarrow \beta$ w tytanie jest ponad 10-krotnie mniejsza i wynosi ok. 30 MPa [5, 6]. Uwzględniając szacunkowe wartości zgniotu fazowego i naprężeń wewnętrznych towarzyszące przemianom alotropowym w żelazie i tytanie, określone odpowiednio w oparciu o równania (1) i (2), staje się zrozumiałym, dlaczego przemianie alotropowej $\alpha \rightarrow \gamma$ w żelazie towarzyszy rozdrobnienie ziarna, natomiast podczas przemiany alotropowej $\alpha \rightarrow \beta$ w tytanie takie zjawisko nie występuje [5, 6].

Cykliczna obróbka cieplna

Tam gdzie tradycyjne sposoby kształtowania mikrostruktury i właściwości materiałów nie



są wystarczająco skuteczne sięga się po nowe technologie pozwalające na bardziej efektywne wykorzystanie zachodzących w materiałach przemian fazowych. Do takich technologii należy zaliczyć m.in. cykliczną obróbkę cieplną wykorzystującą zjawisko kumulacji pożądaných zmian mikrostruktury poprzez wielokrotne powtarzanie określonych przemian fazowych. Pierwsze rozważania teoretyczne i badania laboratoryjne dotyczące cyklicznej obróbki cieplnej rozpoczęto w latach 60-tych ubiegłego stulecia [7]. Od tego czasu cykliczna obróbka cieplna stała się jakościowo nową, obiecującą i szybko rozwijającą się technologią obróbki cieplnej, umożliwiającą efektywne kształtowanie mikrostruktury i właściwości wielu metali i ich stopów [4, 6, 8÷13].

W odróżnieniu od innych rodzajów obróbki cieplnej zachodzące w warunkach wielokrotnie powtarzanego cyklu nagrzewanie↔chłodzenie przemiany fazowe oraz towarzyszące im zmiany mikrostruktury umożliwiają nadanie poddanym cyklicznej obróbce cieplnej wyrobom właściwości niemożliwych do uzyskania w warunkach jednokrotnej tradycyjnej obróbki cieplnej. Ma to szczególne znaczenie zwłaszcza wtedy, gdy zmiany mikrostruktury występujące w warunkach pojedynczego cyklu nagrzewanie→chłodzenie są niedostateczne, ekonomicznie nieadekwatne do kosztów takiej obróbki.

Spośród wielu rodzajów cyklicznej obróbki cieplnej zasadniczo można wyróżnić trzy rodzaje:

- bez przemiany alotropowej,
- z niepełnym przebiegiem przemiany alotropowej,
- z pełnym przebiegiem przemiany alotropowej.

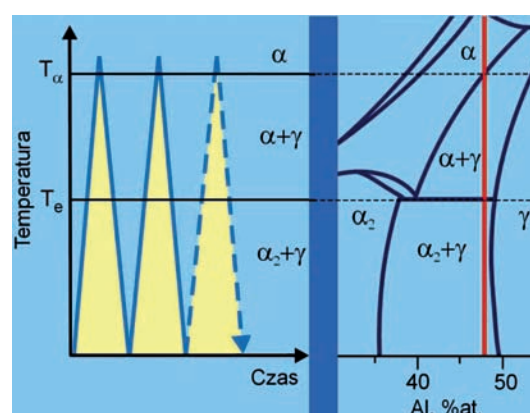
Zmiany mikrostruktury metali i stopów poddanych cyklicznej obróbce cieplnej bez przemiany alotropowej są efektem powstawania i relaksacji naprężeń wewnętrznych wywołanych gradientem temperatury, zróżnicowaniem właściwości cieplnych wchodzących w skład mikrostruktury faz a także działaniem mechanizmu rozpuszczanie-wydzielanie.

W procesach cyklicznej obróbki cieplnej z niepełnym przebiegiem przemiany alotropowej procesy relaksacji naprężeń spowodowa-

nych również częściową realizacją przemiany alotropowej prowadzą głównie do zmiany morfologii faz biorących udział w przemianie.

Największe zmiany mikrostruktury i właściwości metali i stopów są wynikiem cyklicznej obróbki cieplnej z pełnym przebiegiem przemiany alotropowej. Podstawową przyczyną tych zmian są skumulowane z cyklu na cykl mikroodkształcenia plastyczne – zgniot fazowy – wywołane naprężeniami wewnętrznymi powstałymi na skutek wzajemnego oddziaływania faz o różnej objętości właściwej biorących udział w przebiegającej w warunkach nagrzewania i chłodzenia przemianie alotropowej.

Końcowe efekty cyklicznej obróbki cieplnej są zależne od składu chemicznego stopów i warunków temperaturowo-czasowych obróbki: minimalna i maksymalna temperatura cyklu, prędkość nagrzewania pomiędzy minimalną i maksymalną temperaturą cyklu, prędkość chłodzenia pomiędzy maksymalną i minimalną temperaturą cyklu, czas wytrzymania w maksymalnej i minimalnej temperaturze cyklu oraz liczba cykli (rys. 3). W zależności od sposobów oraz warunków nagrzewania (np. z piecem indukcyjnie lub oporowo) i chłodzenia (np. z piecem, w powietrzu lub w wodzie) zmiany wywołane cykliczną obróbką cieplną mogą dotyczyć całej objętości lub jedynie powierzchni obrabianych cieplnie wyrobów.



Rys. 3. Schemat cyklicznej obróbki cieplnej (opracowano na podstawie [11])

Zastosowanie cyklicznej obróbki cieplnej

Aktualnie zabiegi cyklicznej obróbki cieplnej z powodzeniem wykorzystywane są m.in. do:

- rozdrabniania ziarna i umacniania materiałów metalicznych (stopy żelaza, tytanu, cyrkonu,



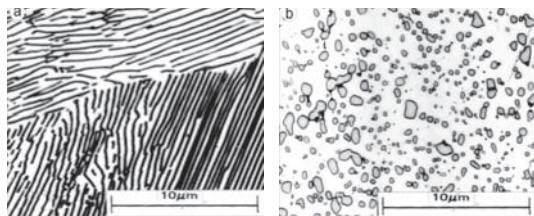
LITERATURA

[1] Dobrzański L. A.: Podstawa nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Gliwice-Warszawa 2002.
 [2] Бочвар А. А, Основы термической обработки сплавов, ГНТИ 1931.
 [3] Садовский В. Д., Структурный механизм фазовой перекристаллизации при нагреве стали, Сб. тр. Ин-та. физ. мет. АН СССР, Уральский филиал 1958.
 [4] Биронт В. С, Основы теории и технологии термоциклической обработки металлов и сплавов: учебное пособие, – Красноярск: Изд-во КПИ 1984.
 [5] Садовский В. Д., Богачева Т. Н., Смирнов Л. В., Исследование фазовой перекристаллизации в титане, Физика Металлов Металловедение, 1960, в. 10, nr 3, p. 397-400.
 [6] Szkliniarz W., Możliwości zastosowania obróbki cieplnej do rozdrabniania ziarn tytanu i jego stopów, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, z. 57, Gliwice 2000.
 [7] Кидин И. Н., Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов, Металлургия 1969.
 [8] Федюкин, В. К, Смагоринский М. Е., Термоциклическая обработка металлов и деталей машин, Машиностроение 1989.
 [9] Smoljan B., An analysis of combined cyclic heat treatment performance, Journal of Materials Processing Technology 155-156 (2004) 1704-1707.
 [10] Machado I. F., Technological advances in steels heat treatment, Journal of Materials Processing Technology 172 (2006) 169-173.
 [11] Szkliniarz W., Stopy na osnowie faz międzymetalicznych z układu Ti-Al, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
 [12] Saha A., Mondal D. K., Biswas K., Maity J., Development of high strength ductile hypereutectoid steel by cyclic heat treatment process, Materials Science and Engineering A 541 (2012) 204-215.
 Saha A., Mondal D. K., Biswas K., Maity J., Microstructural modifications and changes in mechanical properties during cyclic heat treatment of 0.16% carbon steel, Materials Science and Engineering A 534 (2012) 465-475.

aluminium, miedzi, nadstopy niklu i kobaltu, stopy na osnowie faz międzymetalicznych), często przy jednoczesnej poprawie ich plastyczności i udarności,

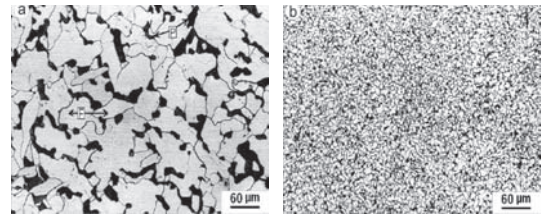
- poprawy podatności wyrobów metalowych do odkształcania plastycznego na gorąco, łącznie z możliwością odkształcania w warunkach nadplastyczności,
- poprawy obrabialności mechanicznej oraz podatności do odkształcania na zimno,
- poprawy stabilności wymiarowej wyrobów,
- zmniejszenia niejednorodności składu chemicznego odlewów metalowych,
- poprawy mikrostruktury i właściwości połączeń spawanych,
- zwiększenia efektywności innych rodzajów obróbki cieplnej, cieplno-chemicznej oraz cieplno-plastycznej.

Najbardziej znanym przykładem praktycznego wykorzystania cyklicznej obróbki cieplnej jest zastosowanie jej do wyżarzania zmiękczającego stali z cementytem płytkowym [12]. Prowadzenie wyżarzania cyklicznego (wahadłowego) wokół temperatury przemiany perlitu w austenit skutkuje otrzymaniem w mikrostrukturze stali cementytu sferoidalnego (kulkowego), w konsekwencji zmiękczeniem stali i poprawą jej obrabialności (rys. 4).



Rys. 4. Mikrostruktura stali z cementytem płytkowym po cyklicznym (wahadłowym) wyżarzaniu zmiękczającym [12]

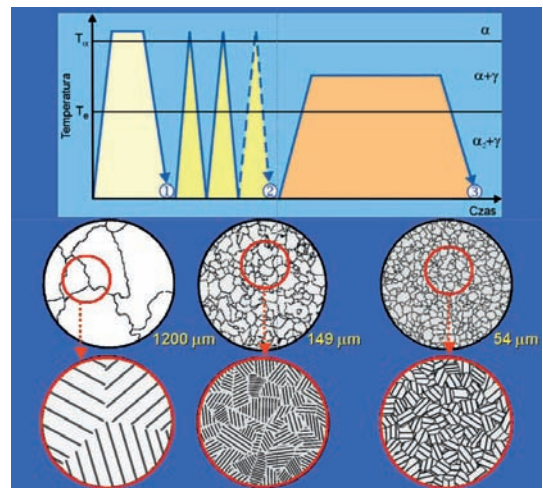
Najbardziej spektakularnymi przykładami wykorzystania cyklicznej obróbki cieplnej jest zastosowanie jej do rozdrobnienia ziarna i umacniania metali i stopów [13]. Jak pokazano na rys. 5 już po 3 cyklach obróbki z pełnym przebiegiem przemiany alotropowej stali niskowęglowej zawierającej 0,16% węgla następuje bardzo duże rozdrobnienie ziarna i znacząca poprawa właściwości wytrzymałościowych i plastycznych obrabianej stali (rys. 5).



R _m	R _{0,2}	A	HV	R _m	R _{0,2}	A	HV
MPa				MPa			
%				%			
338 ± 15	200 ± 15	39 ± 3	130 ± 2	455 ± 4	338 ± 9	42 ± 2	135 ± 1

Rys. 5. Mikrostruktura i właściwości stali niskowęglowej po ujednorodnieniu (a) i cyklicznej obróbce cieplnej z pełnym przebiegiem przemiany alotropowej (b) [13]

Bardzo często cykliczna obróbka cieplna wykorzystywana jest w charakterze składowej złożonych (kombinowanych) obróbek cieplnych [8, 10]. Jak pokazano na przykładzie stopu na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl zastosowanie cyklicznej obróbki cieplnej po uprzednim wyżarzaniu ujednorodniającym nie tylko przyczynia się do 8-krotnego rozdrobnienia ziarna stopu, ale także sprawia, że w trakcie późniejszego wyżarzania zupełnego następuje kolejne, prawie 3-krotne jego rozdrobnienie (rys. 6).



Rys. 3. Schemat cyklicznej obróbki cieplnej (opracowano na podstawie [11])

piece
PRZEMYSŁOWE
 & kotły

pismo branżowe,
które warto znać

www.pplik.pl
www.industrialfurnaces.pl

portal branżowy,
w którym warto być