

# Zmiany mikrostruktury i twardości żeliwa GJS-800-8 (ADI) wywołane zmęczeniem cieplnym

J. Zych<sup>a</sup>, J. Wróbel<sup>b</sup>

<sup>a</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

<sup>b</sup> PIOMA-Odlewnia Sp. z o.o., ul. Dmowskiego 38, 97-300 Piotrków Trybunalski, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: jzych@agh.edu.pl

Otrzymano 16.04.2012; zaakceptowano do druku 02.07.2012

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań zmęczenia cieplnego żeliwa GJS-800-8. Określono wpływ maksymalnej temperatury cyklu ( $T_{max}$ ) na odporność na zmęczenie cieplne wyznaczone metodą L.F.Coffina. Opisano także zmiany struktury powodowane procesem zmęczenia cieplnego. Przedstawiono jak zmienia się twardość, która jest wyznacznikiem wysokiej wytrzymałości. Opisano zjawisko ferrytyzacji osnowy i spadku w procesie zmęczenia cieplnego twardości (HB) i związanej z twardością wytrzymałości ( $R_m$ ). Wykazano iż w procesie zmęczenia cieplnego struktura żeliwa ADI ulega przemianie, osnowa ausferytyczna jest przebudowywana najpierw w perlityczną a następnie w ferrytyczną. Wykazano, iż dodatki stopowe podnoszą znacząco wytrzymałość na zmęczenie cieplne (Mo, Ni, Cu), nie stabilizują struktury żeliwa przy jej cyklicznym nagrzewaniu, jednak spowalniają proces przemian struktury. Podniesienie temperatury cyklu cieplnego zmniejsza odporność na zmęczenie cieplne żeliwa ADI, przyspiesza przemiany mikrostruktury oraz „z cyklu na cykl” obniża jego wytrzymałość.

**Słowa kluczowe:** zmęczenie cieplne, żeliwo sferoidalne, ADI, struktura, wytrzymałość

## 1. Wprowadzenie

Żeliwo jest materiałem dość łatwym do wytworzenia, co przy uwzględnieniu jego dobrych właściwości użytkowych czyni, iż bardzo dynamicznie rozwija się jego produkcja i zastosowanie.

Żeliwo ADI (Austempered Ductile Iron) jest jedną z najnowocześniejszych odmian żeliwa. Jego wysokie własności wytrzymałościowe jak i dobra plastyczność spowodowały, że materiał ten znajduje coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Podnoszenie wymagań na odlewy jak również stosowanie ich w coraz bardziej trudnych warunkach pracy spowodowało, że wielu konstruktorów zaczęło zwracać coraz większą uwagę na to nowoczesne tworzywo. Badania zmęczenia cieplnego żeliwa ADI pozwalają ocenić przydatność tego materiału do pracy w podwyższonych temperaturach. Istnieje uzasadniona obawa, o zdolność tego termodynamicznie nietrwałego materiału do zachowania swoich dobrych właściwości mechanicznych (HB,  $R_m$ ,  $A_5$ ) przy cyklicznych obciążeniach cieplnych z współdziałającymi zmieniającymi się naprężeniami. Aby uzyskać odpowiedź na rodzące się wątpliwości niezbędne jest wykonanie badań odporności na zmęczenie cieplne powiązane

z analizą zmian mikrostruktury oraz twardości. Poznanie wpływu warunków zmęczenia cieplnego na zmiany struktury oraz zmiany twardości pozwolą określić dopuszczalne granice termicznej obciążania materiału. Chodzi o odpowiedź na pytanie do jakiej temperatury mogą być nagrzewane części maszyn i urządzeń wykonane z to żeliwa.

## 2. Przedmiot badań

W pracy do badań zmęczenia cieplnego wytypowane żeliwo GJS-800-8. Jest to jeden gatunków żeliwa ADI charakteryzująca się wysoką plastycznością i umiarkowaną wytrzymałością. Materiał ten wytworzono z wyjściowego żeliwa sferoidalnego perlityczno-ferrytycznego GJSNi1,5MoCu. Skład wyjściowego żeliwa podano w tabeli 1.

Tabela 1: Skład chemiczny badanego żeliwa sferoidalnego, % mas.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu	Mg
3,56	2,40	0,20	0,04	0,014	1,4	0,31	0,6	0,04

Żeliwo wyjściowe poddano obróbce cieplnej: austenitacji w temperaturze 900°C przez dwie godziny, a następnie hartowaniu z przemianą izotermiczną w solance w temperaturze 380°C również przez dwie godziny. Po zakończonej obróbce cieplnej przeprowadzono badania wytrzymałościowe oraz pomiary twardości w celu określenia właściwości żeliwa przed badaniami zmęczenia cieplnego. Wyniki zestawiono w tabeli 2. (podano wartości średnie z 3 prób).

Tabela 2: Właściwości mechaniczne żeliwa GJS-800-8

Twardość HB	Wytrzymałość R <sub>m</sub> [MPa]	Plastyczność R <sub>p0,2</sub> [MPa]	Wydłużenie A <sub>5</sub> [%]
311	1001	772	7,9

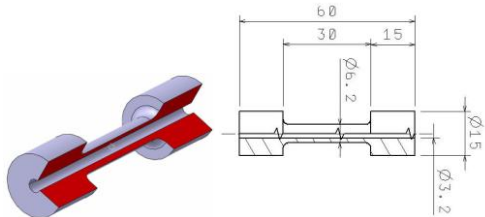
### 3. Badania zmęczenia cieplnego

W pracy wykorzystywane stanowisko do badań zmęczenia cieplnego (rys. 1.) opracowane na Wydziale Odlewnictwa AGH z zastosowaniem oporowego nagrzewania próbek prętowych (rys. 2). Badania prowadzone są przy jednoosiowym stanie naprężeń cieplnych (metoda L.F. Coffina).



Rys. 1. Stanowisko do badania zmęczenia cieplnego

Badana zmęczenie cieplnego żeliwa GJS 800-8 wykonano w zakresie temperatur: T<sub>min</sub> = 200 °C T<sub>max</sub> = 660-790°C. Maksymalna temperatura cyklu jest głównym parametrem wpływającym na przebieg zmęczenia cieplnego materiałów, dlatego badania wpływu T<sub>max</sub> przeprowadzono co 10° C . wyniki tych badań zamieszczono na rysunku 3.

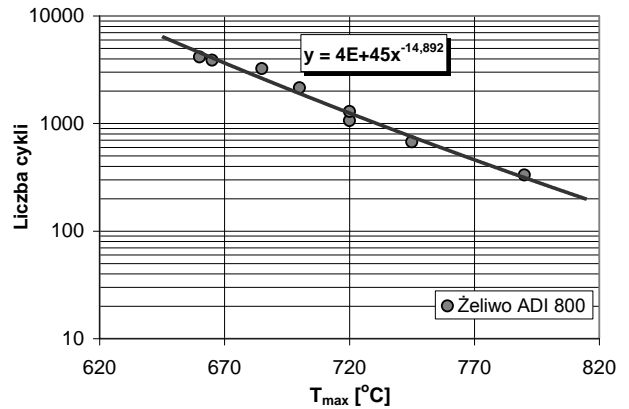


Rys. 2. Próbką zastosowana do badania zmęczenia cieplnego

Dla opisu wyników takich badań sporządzono wykres opisujący wpływ maksymalnej temperatury cyklu na zmęczenie cieplne (liczba cykli cieplnych do pęknięcia próbki), rysunek 3.

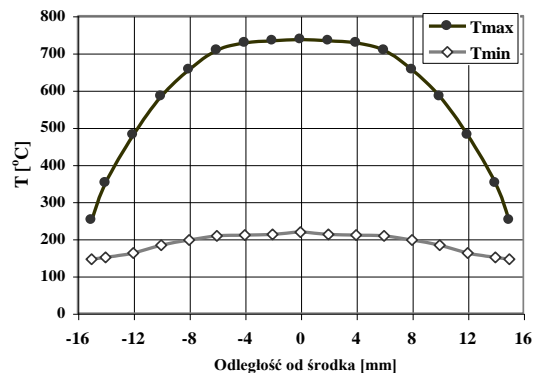
Istotne jest określenie temperatury granicznej, po przekroczeniu której następuje szybka przebudowa mikrostruktury oraz obserwuje się znaczący spadek właściwości wytrzymałościowych, w tym twardości. Daleko idące zaawansowanie procesów w opisanych obszarach powoduje, iż dalsza przydatność takiego elementu może być znacznie ograniczona.

Jak to wynika z badań wcześniejszych autorów [5-7], proces zmęczenia cieplnego żeliwa ADI wywołuje przebudowę jego struktury, co prowadzi do zmian właściwości mechanicznych, obniżenia R<sub>m</sub>, HB i A<sub>5</sub>.



Rys. 3. Graniczna liczba cykli żeliwa GJS-800-8 w ujęciu półlogarytmicznym.

Cechą charakterystyczną badań zmęczenia cieplnego, przy oporowym nagrzewaniu próbek prętowych, jest niejednorodny, ale symetryczny rozkład temperatury wzdłuż długości próbki. To temperatura jest głównym czynnikiem, który wpływa na przebudowę mikrostruktury, a co za tym idzie obniżenie wytrzymałości, twardości i innych parametrów. Rozkład temperatury wzdłuż próbki dla żeliwa GJS-800-8 pokazano na rysunku 4. W środkowej części próbki temperatura wyniosła 725°C, ale już w odległości 12 mm od środka wynosiła 480°C. Ten rozkład temperatury wzdłuż długości próbki wykorzystano w dalszych badaniach do określenia wpływu temperatury cyklu na przebudowę mikrostruktury ausferytycznej żeliwa ADI.

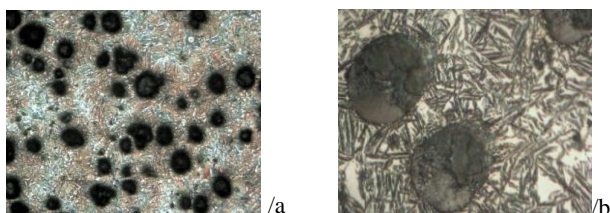


Rys. 4. Rozkład temperatury wzdłuż długości próbki żeliwa GJS-800-8 przy cyklu nagrzewania w zakresie: T = 200-725°C.

Z wcześniejszych prac autorów [5-7] wynika, iż temperatura do wartości 500°C nie wywołuje szybkiej przemiany korzystnej, wyjściowej struktury (ausferytu). Przekroczenie tej temperatury wywołuje wyraźnie malejącą liczbę cykli zmęczeniowych generujących znaczącą przebudowę struktury. Zmiany w budowie osnowy tego żeliwa jest wtedy na tyle duża, że i własności wytrzymałościowe są już znacząco niższe.

## 4. Zmiany mikrostruktury

Mikrostrukturą żeliwa GJS-800-8 w stanie wyjściowym jest typowa dla ADI struktura z osnową asuferrytyczną. Powstała podczas obróbki cieplnej asuferyt górny nadaje temu żeliwu umiarkowaną wytrzymałość i twardość oraz pozwala uzyskać wysokie wydłużenie i dobrą plastyczność. Proces zmęczenia cieplnego wpływa niekorzystnie na mikrostrukturę osnowy żeliwa ADI, powodując jej przebudowę. Pomimo zastosowania dodatków stopowych (głównie Mo) podnoszących odporność żeliwa na zmęczenie cieplne i stabilność struktury w podwyższonej temperaturze, nie udało się uchronić wyjściowej struktury przed przebudową wywołaną działaniem wysokiej temperatury. Stopowe dodatki jedynie opóźniają przemiany fazowe.



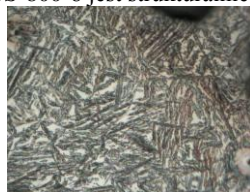
Rys. 5. Mikrostruktura wyjściowa żeliwa GJS-800-8: a/ pow. x 100, b/ pow. x 500.

Zwiększając maksymalną temperaturę cyklu przyspiesza się proces zmęczenia materiału, zmniejsza liczbę cykli do powstania pęknięcia. Wyższe temperatury powodują szybszą przebudowę struktury osnowy i jej przemianę z ausferrytycznej przez perlityczną do czysto ferrytycznej.

Obserwując zmiany struktury wzdłuż długości próbki nagrzewanej cyklicznie jak pokazano na rysunku zauważono, iż w przypadku żeliwa ADI-800-8 nagrzewanie poniżej 450-500°C (pomimo wzrostu liczby cykli cieplnych) nie prowadzi do szybkiej przebudowy mikrostruktury. Wygląd struktury jedynie w niewielkim stopniu przemienionej pokazano na rysunku 6.

Obserwacje zmian mikrostruktury w tej części próbki, która nagrzewana była cyklicznie temperatury 600-650°C wskazują na już dużo szybszą jej przebudowę - rozpad ausferytu, rysunek 7. W tych warunkach cieplno-naprężeniowych ausferyt ulega przebudowie, w jego miejsce pojawia się perlit ziarnisty oraz zaczątki ferrytu. W strefie próbki, gdzie rejestrowano dalszego podwyższenie temperatury do wartości 700°C i powyżej obserwowano już bardzo szybką przebudowę mikrostruktury, rysunek 8. Równolegle, przy zwiększaniu maksymalnej temperatury cyklu daje się zaobserwować zmniejszenie liczby cykli cieplnych, po który następują opisywane zmiany struktury. To zmniejszenie to przejście od kilku tysięcy do kilkuset cykli. W wyniku oddziaływanie wysokiej (650 – 700°C) perlit ziarnisty stopniowo zanika na rzecz coraz większej ilości ferrytu. Na

podstawie tych doświadczeń można stwierdzić, że żeliwo GJS-800-8 jest strukturalnie stabilne do około 500°C.



Rys. 6. Mikrostruktura żeliwa ADI w próbce w strefie nagrzewania do 500°C



Rys. 7. Mikrostruktura żeliwa ADI w próbce w strefie nagrzewania do 600 - 650°C



Rys. 8. Mikrostruktura żeliwa ADI w próbce w strefie nagrzewania do 700°C

Jedną z ważniejszych cech żeliwa ADI jest wysoka twardość, co nadaje temu materiałowi dobre właściwości trybologiczne. Przebudowy wyjściowej mikrostruktury wpływa w sposób znaczący na własności mechaniczne, w tym głównie na twardość i wytrzymałość. Dlatego, dla zachowania dużej trwałości konstrukcji wykonanych z żeliwa ADI należy uwzględnić ograniczenia wynikające z ograniczonej zdolności tego materiału do zachowania stabilnej struktury w warunkach cyklicznego nagrzewania (zmęczenia cieplnego)

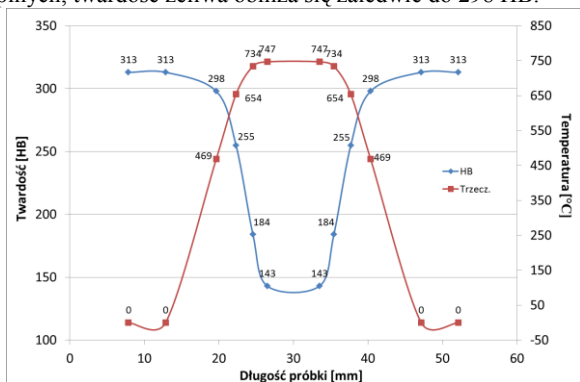
## 5. Zmiany twardości

Proces zmęczenia cieplnego wywołuje szereg zmian w strukturze żeliwa, czego konsekwencją są zmiany właściwości mechanicznych. Przebudowa mikrostruktury wywołana zmianami cieplnymi pociąga za sobą spadek twardości, wytrzymałości i wydłużenia. Twardość, którą zachowuje żeliwo ADI poddane zmęczeniu cieplnemu zależy od temperatury maksymalnej cyklu cieplnego i liczby cykli. W ramach badań opisywanych w pracy wykonywano pomiary twardości w próbkach pokazanych na rysunku 2. Pomiary wykonywane są na próbkach po zakończeniu badania zmęczenia cieplnego (po pęknięciu próbki). Rozkład twardości wzdłuż długości próbki po badaniach zmęczeniowych jest odzwierciedleniem skali zmian (przebudowy) struktury. Z kolei skala przebudowy struktury, jak opisano to wyżej, zależy od temperatury do której nagrzewana jest w danym miejscu próbka (rys. 3.) oraz zleży od liczby cykli cieplnych.

Na rysunku 9 (i w tabeli 3), w formie przykładu, pokazano rozkład temperatury wzdłuż próbki, której wyznaczano odporność na zmęczenie cieplne w zakresie temperatury 200-730°C oraz pokazano obraz rozkładu twardości wzdłuż próbki, która wytrzymała około 1000 cykli cieplnych.

Pomiary zmian twardości wykazują, iż dla zakresu temperatury poniżej 500°C, podobnie jak przy analizie zmian struktury, nie obserwuje się dużych zmian, znaczącego spadku twardości.

Z początkowej twardości 313 HB, po wykonaniu blisko 1000 cykli cieplnych, twardość żeliwa obniża się zaledwie do 298 HB.



Rys. 9. Rozkład temperatury wzdłuż próbki i twardości żeliwa ADI po zmęczeniu cieplnym zakresie: T = 200-730°C.

Tab. 3-Rozkład HB w próbce przy cyklu z zakresu 200-730°C.

HB	Twardość w danej temperaturze przy cyklu z zakresu 200-730°C						
	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	730°C
HB	321	313	272	266	211	184	143

W strefie próbki, gdzie nagrzewanie dochodziło do około 650°C twardość żeliwa ADI obniżyła się już dość wyraźnie - do około 250 HB. W strefie, gdzie nagrzewanie przekraczało 700°C spadek twardości jest już bardzo duży, do wartości około 143 HB. Zmiany twardości są konsekwencją opisaną przebudowy struktury. Można oczekiwać, iż przebudowie struktury towarzyszy nie tylko spadek twardości, ale i wytrzymałości żeliwa. W pracy autorów [6, 7] wykazano, że wytrzymałość niskostopowego żeliwa sferoidalnego (wyjściowego do wytworzenia żeliwa ADI) wytrzymałość spada o około 40% w stosunku do wartości początkowej. W tym przypadku należy oczekiwać podobnych wyników.

## 6. Wnioski

- Podobnie jak dla wielu wcześniej badanych materiałów [1-4], tak i dla żeliwa ADI maksymalna temperatury cyklu cieplnego odgrywa kluczową rolę w procesie zmęczenia, a jej wpływ można opisać funkcją potęgową (rysunek 4),

- Pierwiastki stopowe (Mo, Ni i Cu) wprowadzane do żeliwa ADI dla ułatwienia obróbki cieplnej i uzyskanie struktury ausferyty, chociaż są stabilizatorami osnowy, to przy zmęczeniu cieplnym jedynie opóźniają przebudowę struktury, ale jej nie stabilizują dla wyższych temperatur cyklu nagrzewania (> 500°C),
- Z przeprowadzonych badań wynika, iż żeliwo GJS-800-8 w może być cyklicznie nagrzewane do około 500°C bez ubocznych (negatywnych) skutków w postaci przebudowy struktury ausferytycznej. Powyżej tego zakresu jest coraz bardziej niestabilne i traci swoje wysokie właściwości mechaniczne,
- Przebudowa wyjściowej, ausferytycznej mikrostruktury żeliwa ADI wywołane zmęczeniem cieplnym obejmuje w początkowej fazie perlitizację (powstawanie perlitu ziarnistego) a końcowej - prowadzi do powstawania struktury osnowy „czysto” ferrytycznej.

## Literatura

- [1] Zych, J. (1988). Zmęczenie cieplne żeliwa przeznaczanego na formy metalowe. Prace Komisji Metal. Odlew. Metalurgia PAN Katowice 38, s.107-116..
- [2] Zych, J. (1983). Badania zmęczenia cieplnego żeliwa. IX Sympozjum Naukowe. Kraków, AGH. s. 23-29.
- [3] Zych, J. (1995). Odporność na zmęczenie cieplne żeliwa z grafitem sferoidalnym, wermikularnym i płatkowym: *Solidification of Metals and Alloys*, PAN , Katowice 24 s.135-140.
- [4] Zych, J. (1995). Wpływ molibdenu na odporność na zmęczenie cieplne żeliwa szarego z grafitem płatkowym, wermikularnym i sferoidalnym: XX Konferencja Wydziału Odlewnictwa AGH, Kraków, s. 93-99.
- [5] Zych, J. & Wróbel, J. (2011). Żeliwo ADI – tworzywo na konstrukcje pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego. *Przegląd odlewnictwa*, Nr 5-6. s. 214-222.
- [6] Zych, J. & Wróbel, J. (2010). Wpływ zmęczenia cieplnego żeliwa GJS(Ni1,5MoCu) -bazowego do wytwarzania ADI - na strukturę i wytrzymałości. *Archives of Foundry Engineering* vol. 10, Special Issue 2/2010, s. 177-181.
- [7] Zych, J. Wróbel, J. (2011). ADI – Ein Konstruktionswerk-stoff mit Widerstandsfähigkeit gegen thermische Ermüdung. *Giessereipraxis*; ISSN 0016-9781. Jg. 62 H. 10 s. 476-481.

## Changes of microstructure and hardness of GJS-800-8 (ADI) cast iron caused by thermal fatigue

### Abstract

The work presents results of investigations on thermal fatigue of GJS-800-8 cast iron. Influence of the maximum temperature of cycle (Tmax) on the thermal fatigue determined by L.F.Coffin method was determined. Changes of structure caused by the thermal fatigue were described. Changes of hardness of ADI cast iron during the thermal fatigue process as a function of maximum cycle temperature (Tmax) were presented. Phenomena of matrix ferritization and decrease of hardness (HB) and related to it strength (Rm) during the thermal cycle process were described. It was shown that during the thermal fatigue process structure of ADI cast iron transforms in such a way that austoferritic matrix first reconstructs to perlitic and then to ferritic one. It was proved, that alloy addition significantly increase thermal fatigue resistance (Mo, Ni, Cu) and do not stabilize cast iron structure during cyclic heating, but they slow down the changes process. Increase of the thermal cycle temperature decreases thermal fatigue resistance of ADI cast iron, and accelerates changes of its microstructure, and “cycle by cycle” decreases its strength. After exceeding Tmax=500°C thermal fatigue process also causes decrease of hardness (HB).