

Ocena wybranych właściwości żeliwa z grafitem wermikularnym hartowanego z przemianą izotermiczną (AVCI)

Evaluation of selected properties in austempered vermicular cast iron (AVCI)

Andrzej Pytel<sup>1</sup>, Andrzej Gazda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, Centrum Badań Wysokotemperaturowych, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, Center for High-Temperature Studies, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

E-mail: andrzej.pytel@iod.krakow.pl

Streszczenie

Przedstawiono próby otrzymania żeliwa wermikularnego hartowanego z przemianą izotermiczną (AVCI – Austempered Vermicular Cast Iron) oraz wyniki badań tego żeliwa. Obejmują one metodykę wytopów, strukturę żeliwa przed i po hartowaniu izotermicznym, właściwości mechaniczne i badania dylatometryczne.

Słowa kluczowe: żeliwo z grafitem wermikularnym, żeliwo wermikularne hartowane z przemianą izotermiczną, struktura, badania wytrzymałościowe, badania dylatometryczne

Abstract

The work herein presents the tests to produce austempered vermicular cast iron (AVCI – Austempered Vermicular Cast Iron) and the results of examination of the produced AVCI. The work includes the methodology of heats, the structure of the AVCI before and after austempering, mechanical properties and dilatometer testing.

Keywords: vermicular cast iron, austempered vermicular cast iron, AVCI, structure, strength testing, dilatometer testing

1. Wprowadzenie

W szerszej skali niż żeliwo wermikularne hartowane z przemianą izotermiczną (AVCI) znane jest i stosowane na świecie żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną (ADI). Istotne informacje na temat obróbki cieplnej tego żeliwa, właściwości mechanicznych, twardości i stabilności cieplnej mikrostruktury ausferytytu przedstawiono w publikacji [1]. Analizę wpływu szybkości stygnięcia po austenitzowaniu na powstanie struktury żeliwa zamieszczono w literaturze [2].

Żeliwo wermikularne hartowane z przemianą izotermiczną znane jest i stosowane na świecie [3,4], np. znane są przykłady gatunków żeliwa z grafitem wermikularnym o wytrzymałości 600 MPa i 800 MPa [3], których podstawowe właściwości zamieszczono w tabeli 1.

Wytwarzanie żeliwa z grafitem wermikularnym w porównaniu do żeliwa z grafitem sferoidalnym nie stwarza żadnych szczególnych problemów z wyjątkiem przestrzegania specyficznych warunków krystalizacji

1. Introduction

Austempered ductile iron (ADI) enjoys a more widespread use and awareness than austempered vermicular cast iron (AVCI). The work [1] discusses important facts concerning the heat treatment, mechanical properties, hardness and ausferrite microstructural thermal stability of ADI. The effect of cooling rate after austenitization on the formation of cast iron microstructure has also been studied and the results are presented in [2].

AVCI has been known and applied throughout the world [3,4]; for example, there are grades known with the strength of 600 MPa or 800 MPa [3] and the primary properties some of that are listed in Table 1.

Unlike in spheroidal graphite iron, the manufacturing of vermicular graphite iron entails no particular difficulties, only the specific conditions of vermicular graphite crystallization must be maintained. The references state various element contents for compacted

Tabela 1. Podstawowe właściwości dwóch gatunków żeliwa z grafitem wermikularnym po hartowaniu izotermicznym  
 Table 1. The primary properties of some grades vermicular cast iron with austempered treatment

Podstawowe właściwości / Primary properties	Gatunek 1 / Grade 1	Gatunek 2 / Grade 2
Wytrzymałość/Strenght $R_m$ , MPa	> 600	> 800
Wydłużenie/Elongation $A_5$ , %	> 1	> 0,5
Twardość/Hardness, HB	250–350	350–500

grafitu wermikularnego. W literaturze podaje się różne zawartości pierwiastków stopowych wymaganych w takim żeliwie, np.: a) 0,8% wag. Cu+0,2% wag. Mo, b) 1% wag. Cu+0,4% wag. V, c) 0,4–0,8% wag. Cu+0,1% wag. Sn, d) 0,55–0,7% wag. Cu+0,1% wag. Sb, e) 1,2–2,5% wag. Cu, f) 1,5–2,5% wag. Ni [3–7]. W zależności od zawartości pierwiastków stopowych i grubości ścianek odlewów dla żeliwa wermikularnego, temperatura i czas austenitizacji żeliwa mogą być zmniejszone w stosunku do żeliwa z grafitem kulkowym (w temperaturze 830°C do 860°C czas obróbki wynosi od 0,5 h do 1,5 h) [3].

Żeliwo z grafitem wermikularnym (AVCI) hartowane z przemianą izotermiczną wykazuje szereg właściwości, które otworzyły temu żeliwu znaczny obszar zastosowań. Należy tutaj wymienić, np.: szybkie odprowadzenie ciepła, odporność na ścieranie, odporność na obciążenia mechaniczne, wysoką wytrzymałość i twardość. W związku z tym jest stosowane w wysoko uprzemysłowionych krajach do produkcji: tarcz hamulcowych do samochodów i urządzeń w kolejnictwie, wałków rozrządu, różnych części maszyn odpornych na ścieranie i narażonych na obciążenie. Właściwości mechaniczne żeliwa AVCI są porównywalne z właściwościami perlitycznego żeliwa sferoidalnego (wytrzymałość od 600 MPa do 1050 MPa). Jego odporność na ścieranie i twardość jest porównywalna do żeliwa sferoidalnego ADI. Poza tym ma większą przewodność cieplną, lepsze właściwości tłumienia drgań w porównaniu do żeliwa sferoidalnego. Wykazuje przy wytwarzaniu wyższy uzysk w wyniku niższej skłonności do powstawania jam skurczowych. Ogólne zasady otrzymywania żeliwa ausferrytycznego i zagadnienia kształtowania struktury i właściwości opisano w artykułach [8,9]. Wstępne prace badawcze związane z odmianami żeliwa o strukturze ausferrytycznej były wykonywane w Instytucie Odlewnictwa i przedstawiono je w literaturze [10].

## 2. Metodyka i wyniki badań

### 2.1. Wytopy żeliwa

Założone zawartości pierwiastków stopowych (w % wag.) do prób przedstawiono w tabeli 2.

graphite iron (CGI), e.g.: a) 0.8 wt. % Cu+0.2 wt. % Mo, b) 1 wt. % Cu+0.4 wt. % V, c) 0.4–0.8 wt. % Cu+0.1 wt. % Sn, d) 0.55–0.7 wt. % Cu+0.1 wt. % Sb, e) 1.2–2.5 wt. % Cu, f) 1.5–2.5 wt. % Ni [3–7]. Depending on chemical composition and the casting section thickness in CGI, the austenitizing temperature and time can be lower than in ADI (with the hold time being 0.5 h to 1.5 h at the temperature range of 830–860°C [3].

AVCI boasts several properties which unlocked a plethora of its potential applications. Among these properties are, for example, fast heat dissipation, abrasion resistance, mechanical load resistance, high strength or hardness. Hence highly industrialised countries use AVCI to manufacture brake discs for motor vehicles and railway machines, camshafts, as well as various parts for machines which require abrasion resistance and load resistance. The mechanical properties of AVCI are comparable to perlitic spheroidal cast iron (with the strength range from 600 MPa to 1050 MPa). The AVCI abrasion resistance and hardness are comparable with ADI. On top of that, AVCI has a higher thermal conductivity and better vibration attenuation than spheroidal cast iron. The manufacturing yield of AVCI is also higher due to the lower affinity for forming contraction cavities. The general principles of making ausferritic cast iron and the forming of structure and properties are explained in [8,9]. The initial research work on ausferritic cast irons has been carried out at the Foundry Research Institute and is presented in the literature [10].

## 2. Testing methodology and results

### 2.1. Cast iron heats

The aimed-at contents of elements (wt. %) is listed in Table 2.

Tabela 2. Zawartość pierwiastków stopowych

Table 2. List the contents of elements

Pierwiastki stopowe /Elements	Cu	Ni	Mo
Zestaw 1 / Set One	0,60–0,70	0,50–0,60	0,20–0,30
Zestaw 2 / Set Two	0,80–1,00	—	0,15–0,25
Zestaw 3 / Set Three	—	0,80–2,00	0,20–0,50

Wytopy żeliwa przeprowadzono w piecu tyglowym indukcyjnym (typu Radyne) o wyłożeniu obojętnym. Vermikularyzację przeprowadzono przy użyciu zaprawy o składzie: 44–48% wag. Si, 5–6% wag. Mg, 1,8–2,35% wag. Ca, max. 1,0% wag. Al, 5–7% wag. RE, a modyfikację przy zastosowaniu modyfikatora o składzie: 73–75% wag. Si, 2,0–2,5% wag. Ca, 1,3–1,8% wag. Zr, 1,0–1,5% wag. Al. Odlano wlewki próbne Y2, z których wycięto próbki do badań struktury, właściwości mechanicznych, twardości i badań dylatometrycznych. Następnie przeprowadzono obróbkę cieplną. Dla wszystkich zestawów żeliwa wykonano taki sam rodzaj obróbki cieplnej. Materiał poddano procesowi hartowania z przemianą izotermiczną składającemu się z dwóch operacji:

- austenitizowania w piecu retortowym typu Multitherm N41/M, w atmosferze azotu w temperaturze  $t_a = 850^\circ\text{C}/1,5\text{ h}$ ,
- hartowania izotermicznego w wannie solnej PEW-2 w kąpielii będącej mieszaniną azotanu potasu ( $\text{KNO}_3$ ) i azotynu sodu ( $\text{NaNO}_2$ ) w temperaturze  $300^\circ\text{C}/2\text{ h}$ .

## 2.2. Badania składu chemicznego żeliwa i struktury przed obróbką cieplną

Wyniki badań składu chemicznego żeliwa, określone metodą spektrometryczną, zamieszczono w tabeli 3, natomiast fotografie struktury żeliwa w stanie litym zamieszczono na rysunkach 1–3.

The CI was melted in an induction crucible furnace (Radyne) with inert lining. The vermiculitizing process was completed with a master alloy composed of: 44–48 wt. % Si, 5–6 wt. % Mg, 1.8–2.35 wt. % Ca, max. 1.0 wt. % Al, 5–7 wt. % RE (RE – rare elements), whereas the modifier composition was as follows: 73–75 wt. % Si, 2.0–2.5 wt. % Ca, 1.3–1.8 wt. % Zr, 1.0–1.5 wt. % Al. Test ingots Y2 were cast and had samples cut out for evaluation of structure, mechanical properties, hardness and dilatometric properties. Then the heat treatment followed. All samples were subjected to identical heat treatment. The materials were tempered by isothermal transformation in two successive operations:

- the austenitizing in a Multitherm N41/M retort furnace in nitrogen gas, at  $t_a = 850^\circ\text{C}/1.5\text{ h}$ ,
- the austempering in a PEW-2 salt bath made of potassium nitrite ( $\text{KNO}_3$ ) and sodium nitrite ( $\text{NaNO}_2$ ) at  $300^\circ\text{C}/2\text{ h}$ .

## 2.2. Investigation of chemical composition and microstructure prior to heat treatment

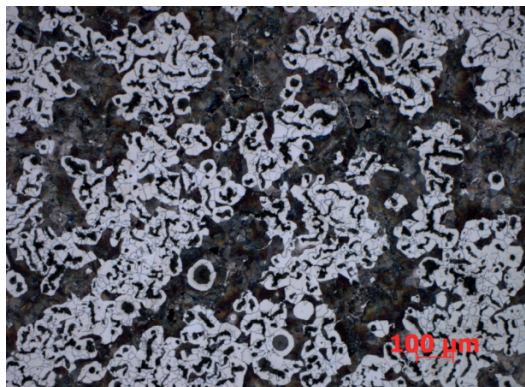
The results of spectrometric chemical composition determination are shown in Table 3. The microstructure of the samples in the as-cast state is shown in Figures 1–3.

Tabela 3. Skład chemiczny żeliwa z wytopów doświadczalnych określony analizą spektrometryczną

Table 3. Chemical composition of experimental heats as determined by spectrometry analysis

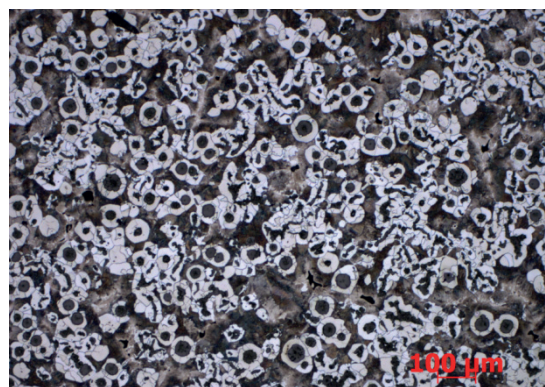
Nr wytopu żeliwa / Heat no.	Skład chemiczny, % wag. / Chemical composition, wt. %										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg	Cu	Mo	Al	CE
XXXII	3,70	2,4	0,5	0,048	0,01	0,61	0,018	0,64	0,23	0,013	4,32
XXXIV	3,62	2,15	0,39	0,046	0,01	0,01	0,013	1,02	0,27	0,013	4,18
XXXV	3,99	2,34	0,47	0,046	0,016	1,29	0,016	0,01	0,42	0,015	4,60





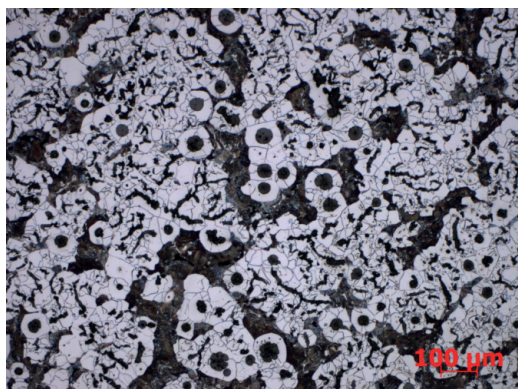
Rys. 1. Próbkę nr XXXII – żeliwo przed obróbką cieplną, pow. 100×, trawione nitałem

Fig. 1. Sample no. XXXII – cast iron before heat treatment, magnification: 100×, nital etch



Rys. 2. Próbkę nr XXXIV – żeliwo przed obróbką cieplną, pow. 100×, trawione nitałem

Fig. 2. Sample no. XXXIV – cast iron before heat treatment, magnification: 100×, nital etch

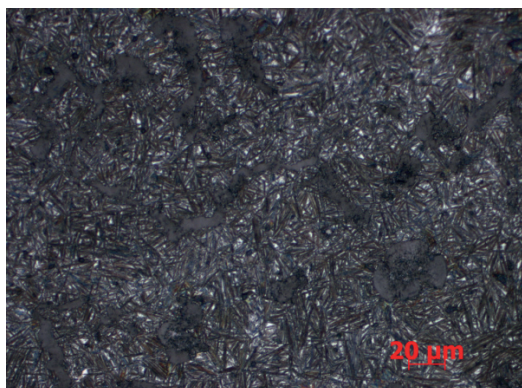


Rys. 3. Próbkę nr XXXV żeliwo przed obróbką cieplną, pow. 100×, trawione nitałem

Fig. 3. Sample no. XXXV – cast iron before heat treatment, magnification: 100×, nital etch

### 2.3. Badania struktury, właściwości mechanicznych i dylatometrycznych żeliwa po obróbce cieplnej

Fotografie struktury żeliwa po obróbce cieplnej zamieszczono na [rysunkach 4-6](#).

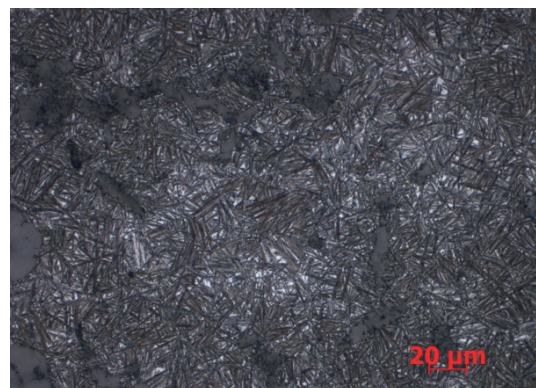


Rys. 4. Próbkę nr XXXII – żeliwo po obróbce cieplnej, pow. 500×, trawione nitałem, mieszanina ausferrytu

Fig. 4. Sample no. XXXII – cast iron after heat treatment, magnification: 500×, nital etch, ausferrite mix

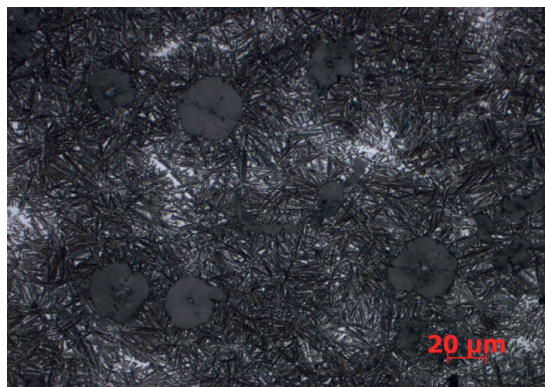
### 2.3. Examination of the AVCI structure, mechanical properties and dilatometric properties after heat treatment

The photographs of AVCI structure following heat treatment are shown in [Figures 4-6](#).



Rys. 5. Próbkę nr XXXIV – żeliwo po obróbce cieplnej, pow. 500×, trawione nitałem, mieszanina ausferrytu

Fig. 5. Sample no. XXXIV – cast iron after heat treatment, magnification: 500×, nital etch, ausferrite mix



Rys. 6. Próbkę nr XXXV – żeliwo po obróbce cieplnej, pow. 500×, trawione nitalę, mieszanina ausferytu  
 Fig. 6. Sample no. XXXV – cast iron after heat treatment, magnification: 500×, nital etch, ausferrite mix

#### 2.4. Badania właściwości mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych żeliwa AVCI realizowano na próbkach wykonanych z wlewków próbnych oddzielnie odlewanych (typ 2 wg PN-EN 1563) i poddanych obróbce cieplnej. Wyniki wytrzymałości i twardości zamieszczono w tabeli 4.

#### 2.4. Testing of mechanical properties

The AVCI testing of mechanical properties was conducted on the samples made of the test ingots from separate castings (PN-EN 1563 Type 2) and subjected to heat treatment. The strength and hardness test results are shown in Table 4.

Tabela 4. Wyniki badań właściwości mechanicznych

Table 4. Mechanical properties test results

Oznaczenie próbek / Sample ID	R <sub>m</sub> , MPa	Hardness, HB	Hardness, HB
	po hartowaniu izotermicznym / following austempering	stan lany / cast state	po hartowaniu izotermicznym / following austempering
XXXII	792	170	301
XXXIV	715	150	328
XXXV	798	175	237

#### 2.5. Badania dylatometryczne

Rozszerzalność żeliwa mierzono dylatometrem DIL 402C/4/G firmy NETZSCH, przeznaczonym do pomiarów rozszerzalności cieplnej metali i stopów, materiałów ceramicznych (włącznie z materiałami typu odlewniczych mas formierskich). Dylatometr pozwala między innymi na:

- identyfikację i analizę przemian fazowych zachodzących w stanie stałym, określenie wartości temperatur,
- wyznaczenie zmian wymiarowych w funkcji temperatury,
- wyznaczenie współczynników rozszerzalności liniowej w stanie stałym  $b = b(T)$  oraz  $b_m = b_m(T)$  (średni współczynnik rozszerzalności liniowej), z dokładnością  $0,03 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  i powtarzalnością  $0,01 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ .

#### 2.5. Dilatometric testing

The dilatibility of AVCI was tested with a DIL 402C/4/G dilatometer manufactured by NETZSCH, an instrument for the thermal expansion measurements in metals and alloys, as well as in ceramic materials (including moulding sand types). The dilatometer allows, among others, to:

- identify and analyse the phase transformations in solid state and determination of temperature values,
- determination of dimensional variations vs. temperature,
- determination of solid state linear expansion coefficients  $b = b(T)$  and  $b_m = b_m(T)$  (the mean coefficient of linear expansion), with the resolution of  $0.03 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  and the repeatability of  $0.01 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ .



Badania dylatometryczne przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu z szybkością nagrzewania 5 K/min w zakresie od temperatury otoczenia do 1000°C i z szybkością studzenia 5 K/min do temperatury około 500°C, a następnie – z wyłączonym piecem – do temperatury otoczenia. Rysunki 7–9 przedstawiają zarejestrowane dla badanych próbek względne zmiany rozszerzalności ( $dL/L_o$ )<sub>k</sub> i współczynniki rozszerzalności wyznaczone dla procesu nagrzewania i studzenia.

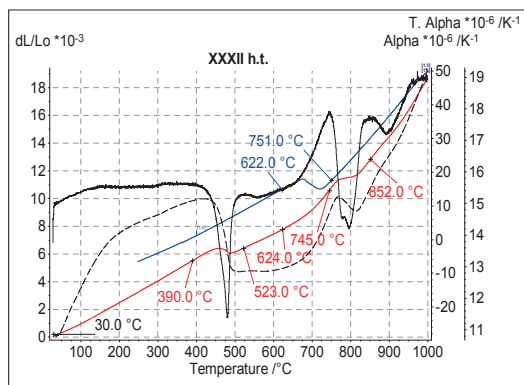
Na wykresach zaznaczono wartości temperatur przemiany eutektoidalnej. Wielkości termofizyczne zarejestrowane podczas nagrzewania oznaczono kolorem czerwonym.

W tabeli 5 zestawiono wartości temperatury przemiany eutektoidalnej, technicznego współczynnika rozszerzalności liniowej i wartości końcowego przyrostu odniesione do względnej zmiany rozszerzalności  $dL/L_o$ .

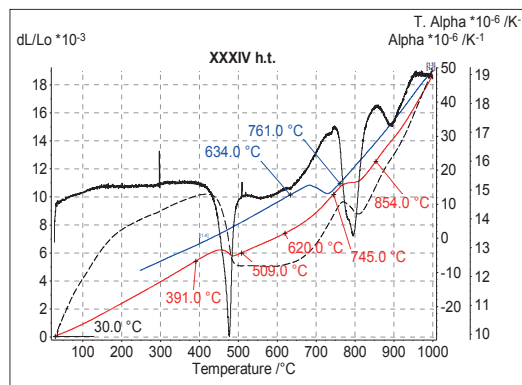
The dilatometry was carried out in a protective argon gas jacket at the heating rate of 5 K/min from the ambient temperature to 1000°C and the cooling rate of 5 K/min to ca. 500°C, followed by cooling with the shut down furnace to the ambient temperature. Figures 7–9 show the relative expansion variations ( $dL/L_o$ )<sub>k</sub> recorded for the tested samples with the coefficients of expansion determined in the heating and cooling processes.

The diagrams show the eutectoid reaction temperatures. The thermophysical magnitudes recorded during the heating cycle are shown in red.

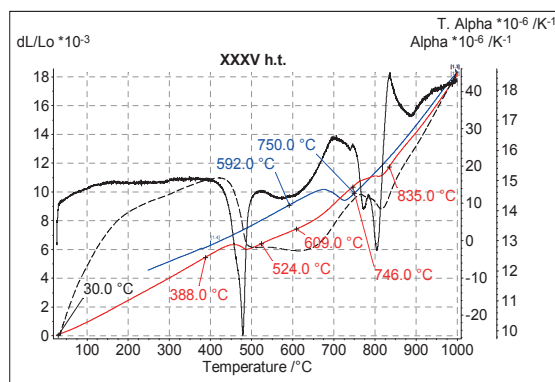
Table 5 lists the eutectoid reaction temperature values, the engineering coefficient of linear expansion and the final increment values vs. the relative expansion variation  $dL/L_o$ .



Rys. 7. Krzywa rozszerzalności liniowej stopu XXXII  
Fig. 7. Linear expansion curve of alloy XXXII



Rys. 8. Krzywa rozszerzalności liniowej stopu XXXIV  
Fig. 8. Linear expansion curve of alloy XXXIV



Rys. 9. Krzywa rozszerzalności liniowej stopu XXXV  
Fig. 9. Linear expansion curve of alloy XXXV

Tabela 5. Wyniki badań dylatometrycznych  
Table 5. Dilatometric test results

T, °C	XXXII h.t.	XXXIV h.t.	XXXV h.t.
T <sub>g</sub>	624	620	609
A <sub>c1</sub>	745	745	746
A <sub>c3</sub>	852	854	835
A <sub>r3</sub>	751	761	750
A <sub>r1</sub>	622	634	592
T <sub>p</sub>	390	391	388
T <sub>k</sub>	523	509	524
Δl/L <sub>0</sub>	0,0014	0,0013	0,0013

Oznaczenia/Legend:  
h.t. – po obróbce cieplnej (ausferrytyzacji) / h.t. – after heat treatment (ausferritizing)  
względna zmiana dylatacji dL/L<sub>0</sub> / relative dilatation change dL/L<sub>0</sub>  
nagrzewanie – kolor czerwony / heating – red  
studzenie – kolor niebieski / cooling – blue  
Alpha – współczynnik rozszerzalności cieplnej (fizyczny) (linia ciągła) / Alpha – coefficient of thermal expansion (physical) (solid line)  
T.Alpha – średni współczynnik rozszerzalności cieplnej (techniczny) (linia przerywana) / T.Alpha – mean coefficient of thermal expansion (engineering) (dashed line)  
T<sub>g</sub> – temperatura początku grafityzacji / T<sub>g</sub> – graphitization start temperature  
T<sub>p</sub> – temperatura początku odpuszczania ausferrytu / T<sub>p</sub> – ausferrite tempering start temperature  
T<sub>k</sub> – temperatura końca odpuszczania ausferrytu / T<sub>k</sub> – ausferrite tempering end temperature  
Δl/L<sub>0</sub> – przyrost końcowy / Δl/L<sub>0</sub> – final increment

## 2.6. Korekta obróbki cieplnej

Ponieważ, pomimo dość korzystnych wyników wytrzymałościowych uzyskanych w czasie prób (tabela 4), nie otrzymano jednak wydłużenia (A<sub>5</sub>), przeprowadzono korektę obróbki cieplnej dla dwóch badanych już rodzajów żeliwa (XXXII/2 i XXXV/2), podwyższając temperaturę austenitizowania i temperaturę hartowania izotermicznego.

Materiał w stanie lanim poddano ponownie procesowi hartowania z przemianą izotermiczną składającą się z dwóch operacji, przy zmienionych parametrach obróbki cieplnej:

- austenitizowania w piecu retortowym typu Multitherm N41/M, w atmosferze azotu w temperaturze t<sub>a</sub> = 900°C/2 h,
- hartowania izotermicznego w wannie solnej PEW-2, w kąpeli będącej mieszaniną azotanu potasu (KNO<sub>3</sub>) i azotynu sodu (NaNO<sub>2</sub>), w temperaturze 375°C/2 h.

Wyniki badań właściwości mechanicznych żeliwa przy zmienionych parametrach obróbki cieplnej zamieszczono w tabeli 6.

## 2.6. Heat treatment adjustment

Despite the relatively good strength results (Table 4) the elongation (A<sub>5</sub>). Therefore the heat treatment process was subsequently adjusted for two cast iron types (XXXII/2 and XXXV/2) which already had been tested. The adjustment involved increasing the austenitizing and austempering temperatures.

The cast material was reprocessed by austempering in two operations with modified HT parameters:

- the austenitizing in a Multitherm N41/M retort furnace in nitrogen gas at t<sub>a</sub> = 900°C/2 h,
- the austempering in a PEW-2 salt bath made of potassium nitrite (KNO<sub>3</sub>) and sodium nitrite NaNO<sub>2</sub> at 375°C/2 h.

Mechanical properties test results for the AVCI with the adjusted HT parameters are shown in Table 6.

Tabela 6. Wyniki badań właściwości mechanicznych żeliwa po korekcie obróbki cieplnej  
 Table 6. Mechanical properties test results of cast iron after heat treatment adjustment

Oznaczenie próbek / Sample ID	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	Z, %	Twardość, HB / Hardness, HB
XXXII/2	668	1,9	1,15	264
XXXV/2	715	1,7	1,25	237

### 3. Omówienie wyników

1. Próby otrzymania żeliwa wermikularnego hartowanego z przemianą izotermiczną należy uznać za zadawalające.
2. Otrzymano w strukturze żeliwa około 70–80% wydzieleń grafitu wermikularnego.
3. Uzyskano strukturę ausferytyczną (mieszanka ferrytu i austenitu).
4. Istnieje wyraźna różnica twardości żeliwa HB przed obróbką i po obróbce cieplnej.
5. Ze względu na brak wydłużenia żeliwa przy założonych początkowo parametrach obróbki cieplnej wykonano korektę temperatury astenizowania i hartowania izotermicznego dla dwóch rodzajów żeliwa (próbki XXXII, XXXV): temperaturę austenizowania podniesiono z 850°C na 900°C, a hartowania izotermicznego – z 300°C na 375°C.
6. Wydłużenie żeliwa po korekcie temperatury obróbki cieplnej uzyskano w granicach 1,7–1,9%, przy obniżeniu wytrzymałości R<sub>m</sub> z około 792 MPa do 668 MPa i twardości HB z 301 do 264 (próbka XXXII) oraz R<sub>m</sub> 798 MPa do 715 MPa i niezminionej wartości twardości (próbka XXXV).
7. Wyniki badań dylatometrycznych zostały wykorzystane do badania wpływu obróbki cieplnej stopów o zróżnicowanym składzie chemicznym na właściwości rozszerzalności cieplnej.
8. Ujemny wyraźny efekt na krzywej współczynnika rozszerzalności cieplnej odpowiadający rozpadowi struktury ausferytycznej wskazuje na jej stabilność do temperatury około 400°C.

### Podziękowania

Publikacja powstała w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w Instytucie Odlewnictwa realizowanych w ramach projektu pt. „Badania wybranych

### 3. Discussion of results

1. The test to produce austempered vermicular cast iron seems to be satisfactory.
2. Approximately 70–80% of vermicular graphite precipitates were obtained within the AVCI structure.
3. The ausferritic structure was produced (a mixture of ferrite and austenite).
4. There is an evident difference in the HB hardness of the cast iron before and after the heat treatment process.
5. Due to lack of elongation of the AVCI with the assumed initial HT parameters, the austenitizing temperature was elevated from 850°C to 900°C, and the austempering temperature was increased from 300°C to 375°C.
6. The AVCI elongation following the HT temperature adjustment was from 1.7% to 1.9%. The strength R<sub>m</sub> was reduced from ca. 792 MPa to 668 MPa. The HB hardness was reduced from 301 to 264 (in the sample XXXII) and with R<sub>m</sub> from 798 MPa to 715 MPa with no changes in hardness (in the sample XXXV).
7. The results of dilatometric measurements were used to investigate the effect of heat treatment of the alloys of different chemical composition on the thermal expansion properties.
8. The negative, sharp effect on the coefficient of thermal expansion dilatometric curve corresponding to the decomposition of alloys ausferritic structure, indicates its stability up to approx. 400°C.

### Acknowledgements

This publication was prepared from the results of the research carried out at the FRI under the project titled “Testing of selected properties in austempered



właściwości żeliwa wermikularnego z przemianą izotermiczną (AVCI)” (nr 3022/00) finansowanego przez Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, oraz projektu POIG.01.03.01-12-061/08 zrealizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007–2013.

vermicular cast iron (AVCI)” (no. 3022/00) and financed by the Polish Ministry of Science and Higher Education and the POIG.01.03.01-12-061/08 project entitled “Studies and development of an advanced technology for cast materials resistant to thermal fatigue” implemented under the Operational Programme Innovative Economy 2007–2013, Priority 1 Research and development of new technologies, Measure 1.

## Literatura/References

1. Campos-Cambranis R.E. et al. (1998). Effect of initial microstructure on the activation energy of second stage during austempering of ductile iron. *Scripta Mater.*, 38(8), 1281–1287.
2. Goryany V. et al. (2005). Die Gefuegeausbildung bei ADI. Einfluss der Abkuehlungsgeschwindigkeit nach der Waermebehandlung. *Giesserei*, 92(4), 20–28.
3. Riposan I., Chisamera M. (1992). Bainitisches Gusseisen mit Vermiculargraphit (GGV-B). *Giesserei Praxis*, (8), 131–137.
4. Riposan I., Chisamera M. (1991). Austempered Compacted Graphite Cast Iron. *Proceedings of 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron*, March 12–14, 1991, Indian Lakes Resort, Bloomington (Chicago). USA: American Foundrymen Society, 2, 437–455.
5. Sissener I. et al. (1972). Der Einsatz des Werkstoffs mit Vermiculargraphit aus technischer und wirtschaftlicher Sicht. *Giesserei-Rundschau*, 19(6), 59–65.
6. Kuch E.R., Straton L.R. (1979). Production of Compacted Graphite Iron at Gardner Denver. *Modern Casting*, (11).
7. Riposan I., Chisamera M. (1985). Legierte Gusseisen mit Vermiculargraphit. *Giesserei Praxis*, (11), 161–173.
8. Guzik E., Kapturkiewicz W., Lelito J. (2000). Zasady otrzymywania żeliwa ausferrytycznego. *Międzynarodowa Konferencja Naukowa. Żeliwo ADI – Oferta odlewnictwa dla konstruktorów i użytkowników odlewów*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
9. Guzik E. (2006). Wybrane zagadnienia kształtowania struktury i właściwości żeliwa ausferrytycznego. *Archiwum Odlewnictwa*, 6(21), 33–42.
10. Kowalski A., Pytel A. (2006). Nowoczesne odmiany żeliwa o strukturze ausferrytycznej. *Archiwum Odlewnictwa*, 6(18), 83–88.

