

## WPLYW SKŁADU CHEMICZNEGO I STOPNIA SFEROIDYZACJI GRAFITU NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE ŻELIWA

S. JURA<sup>1</sup>, Z. JURA<sup>2</sup>.

Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechniki Śląskiej  
ul. Towarowa 7 44-100 GLIWICE

### STRESZCZENIE

Na podstawie licznych doświadczeń, przedstawiono wpływ pierwiastków oraz stopnia sferoidyzacji grafitu w żeliwie jego właściwości mechaniczne. Opracowane zależności eksperymentalne mają wysokie testy statystyczne i mogą być wykorzystywane w technologii żeliwa sferoidalnego.

*Key words: ductile cast iron, graphite spheroidization, mechanical properties*

### 1. WSTĘP

Żeliwo szare jest tworzywem powszechnie stosowanym w gospodarce. To szerokie zastosowanie zawdzięcza łatwej technologii wytwarzania, a dzięki wydzieleniom grafitu, tłumieniu drgań, zwiększonej odporności na ścieranie w układzie par trących metal-metal oraz zwiększonej odporności na korozję atmosferyczną. Żeliwo szare eutektyczne (CE=4,3%) posiada wytrzymałość na rozciąganie  $R_m=150$  [MPa]. Natomiast żeliwo podeutektyczne (CE<4,3) posiada wytrzymałość na rozciąganie  $R_m=200\div 300$  [MPa]. Uzyskanie wyższych właściwości jest możliwe przez modyfikację kształtu wydzielań grafitu. Technologia żeliwa wermikularnego powoduje, że grafit wydziela się w postaci „robaczków” o zaokrąglonych końcówkach. Taki kształt w sposób istotny zmniejsza koncentrację (spiętrzenie) naprężeń na wierzchołkach wydzielań grafitu, co zwiększa wytrzymałość żeliwa. Żeliwo to posiada wytrzymałość

---

<sup>1</sup> prof. dr hab. inż. [sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl](mailto:sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl)

<sup>2</sup> dr inż. [zjura@silesia.pik-net.pl](mailto:zjura@silesia.pik-net.pl)

$R_m=350-400$  [MPa] i charakteryzuje się względnie dobrym tłumieniem drgań, jednak mniejszym jak żeliwo szare.

Technologia wytwarzania żeliwa sferoidalnego powoduje, że grafit wydziela się w postaci kulek. Kształt taki w najmniejszym stopniu wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych żeliwa. Wytrzymałość tego żeliwa zależy w głównej mierze od osnowy, a więc od składu chemicznego i technologii obróbki cieplnej. Można uzyskać wytrzymałość na rozciąganie  $R_m=400\div 1200$  Mpa. Żeliwo sferoidalne właściwościami mechanicznymi zbliżone jest do właściwości staliwa [1,2]. Charakteryzuje się również właściwościami plastycznymi wynoszącymi  $A_5= 2\div 25$  %. Oczywiście, zależy to od struktury osnowy (perlit, ferryt).

Tak więc, żeliwo sferoidalne może z powodzeniem zastępować staliwo, co obserwuje się obecnie w zastosowaniach technicznych również w przemyśle samochodowym.

Podjęto próbę oceny wpływu stopnia sferoidyzacji grafitu na właściwości mechaniczne żeliwa. Podstawą do badania były wyniki prób 24 wytopów żeliwa sferoidalnego, wykonane w warunkach przemysłowych. Badania wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , wydłużenia  $A_5$  i twardości HB były wykonane zgodnie z normami. Skład chemiczny żeliwa zawierał się w następujących granicach: C % = 3,7÷4,05; Si % = 2,72÷3,16; Mn % = 0,24÷0,68; P % = 0,06÷0,1; S % = 0,01÷0,022; Mg % = 0,057÷0,09. We wszystkich przypadkach żeliwo charakteryzowało się składem chemicznym nadeutektycznym.

## 2. OPIS KSZTAŁTU GRAFITU SFEROIDALNEGO

W literaturze spotyka się różne arytmetyczne (liczbowe) opisy kształtu grafitu (3). W pracy przyjęto dla pierwszego rozpoznania wpływu grafitu sferoidalnego na właściwości żeliwa, wskaźnik kształtu grafitu „C”. Wskaźnik ten to stosunek obwodu koła „Ok” do obwodu wydzielenia grafitu „Ow” rzeczywistego dla tej samej powierzchni koła  $F_k$  i wydzielenia grafitu  $F_w$ . Arytmetycznie można to zapisać następująco:

$$C = \frac{O_k}{O_w} \quad (1)$$

dla warunku:

$$F_k = F_w$$

Dla uproszczenia przyjęto, że grafit sferoidalny podlega deformacji na kształt eliptyczny. Zmiana kształtu grafitu jest nieznaczna, jednak wpływ ten powinien się odzwierciedlać we wzorach eksperymentalnych. Zastępcza elipsa dla kryterium kształtu

$$C = 0,9$$


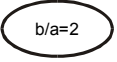


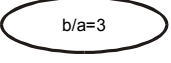
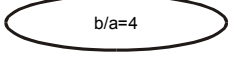
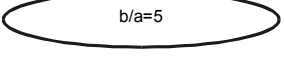


będzie się charakteryzowała stosunkiem pól:

$$e = \frac{b}{a} = 2 \tag{2}$$

gdzie:  $a$  i  $b$  to półosie elipsy.

Dla zobrazowania takiej klasyfikacji grafitu w żeliwie sferoidalnym kształty grafitu oraz współczynniki kształtu „C” przedstawiono w tabeli 1

Tabela 1. Klasyfikacja grafitu w żeliwie sferoidalnym wg współczynnika kształtu „C”  
Table 1. Classification of graphite in ductile cast iron by using shape coefficient „C”

Kształt grafitu	Kryterium kształtu "C"	Gatunek żeliwa
 	1  0,9	 żeliwo sferoidalne 
	0,8	
 	0,72  0,66	 żeliwo wermikularne 

Umownie, w pierwszym przybliżeniu przyjęto, że bardzo dobre żeliwo sferoidalne będzie charakteryzować się współczynnikiem kształtu

$$0,9 < C < 1$$

Natomiast żeliwo wermikularne powinno posiadać współczynnik kształtu:

$$0,66 < C < 0,9$$

Oczywiście, granica w obu przypadkach może być przesunięta do wartości  $C = 0,8$  lub też może zachodzić na siebie, co jest charakterystyczne dla zbiorów rozmytych. Rozkład współczynnika  $C$  w żeliwie należy traktować jako zbiór rozmyty.

### 3. WPLYW SKŁADU CHEMICZNEGO I KSZTAŁTU GRAFITU NA WYTRZYMAŁOŚĆ $R_m$

Zgodnie z poprzednimi rozważaniami o wytrzymałości żeliwa decyduje osnowa. Wpływ kształtu grafitu sferoidalnego jest mniejszy. Kryterium  $C = 0,9$  zgodnie z tabelą wskazuje, że kształt sferoidów niewiele odbiega od kształtu kół. Oczywiście, ilość grafitu o kształcie  $0,9 - 1,0$  będzie wpływać na wytrzymałość. Analizie statystycznej poddano 25 wytopów z żeliwa sferoidalnego. Pomiarów grafitu dokonano metodą komputerowej analizy obrazu, uzyskując względną liczbę  $N_a$ , objętość grafitu  $V_v$  o wskaźniku  $C = 0,9$ , oznaczając je symbolem odpowiednio  $Na09$  i  $Vv09$ .

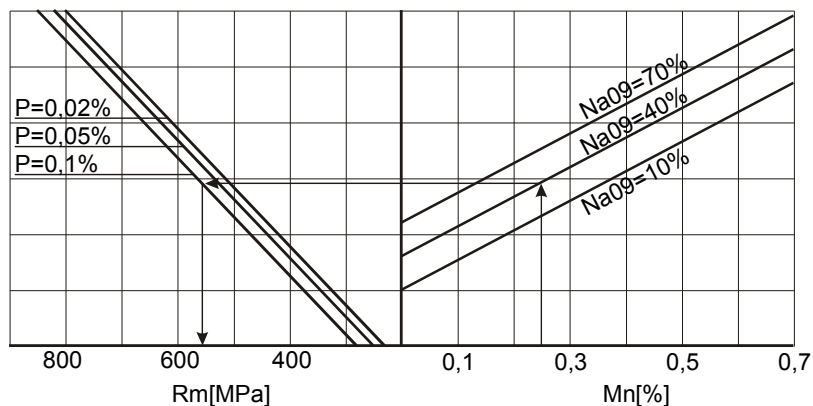
W wyniku analiz statystycznych uzyskano następującą zależność eksperymentalną:

$$R_m = 267 + 527Mn + 773P + 2,25Na09 \quad (3)$$

o parametrach statystycznych:

- odchylenie standardowe:  $dR_m = 35 \text{ MPa}$ ,
- wartość średnia  $R_{ms} = 527 \text{ MPa}$
- wsp. korelacji  $R = 0,95$
- test Fishera-Snedecora  $F = 53$
- test wiarygodności  $W = 9,2$

Zależność tę przedstawiono w postaci nomogramu planarnego na rys.1. Jak to wynika ze wzoru 3, najistotniejszy wpływ na wytrzymałość  $R_m$  żeliwa ma mangan. Pierwiastek ten wpływa w sposób decydujący na strukturę żeliwa. Mała zawartość manganu sprzyja powstawaniu struktury ferrytycznej, natomiast duża powstawaniu struktury perlitycznej. Wpływ fosforu jest nieznaczny a to głównie ze względu na małą jego zawartość. Istotny wpływ na wytrzymałość  $R_m$  posiada stopień sferoidyzacji grafitu. Udział względny liczby wydzieleni grafitu  $10 \div 70$  o współczynniku kształtu  $C=0,9 \div 1$  zmienia wytrzymałość w zakresie:  $\Delta R_m = 22 \div 157 [\text{Mpa}]$



Rys. 1. Wpływ manganu (Mn), udziału względnego liczby wydzieleni grafitu o współczynniku kształtu  $C=0,9\div 1,0$  i zawartości fosforu (P) na wytrzymałość  $R_m$  żeliwa sferoidalnego  
 Fig. 1. Influence of manganese (Mn), relative share of graphite separations with shape coefficient  $C=0,9-1,0$  and phosphor contents (P) on  $R_m$  ductile cast iron strength

#### 4. WPLYW SKŁADU CHEMICZNEGO I STOPNIA SFEROIDYZACJI GRAFITU NA WYDŁUŻENIE ŻELIWA

Wykorzystując te same zbiory danych doświadczalnych co poprzednio, stosując metodę regresji krokowej wyznaczono dla wydłużenia plastycznego następującą zależność eksperymentalną:

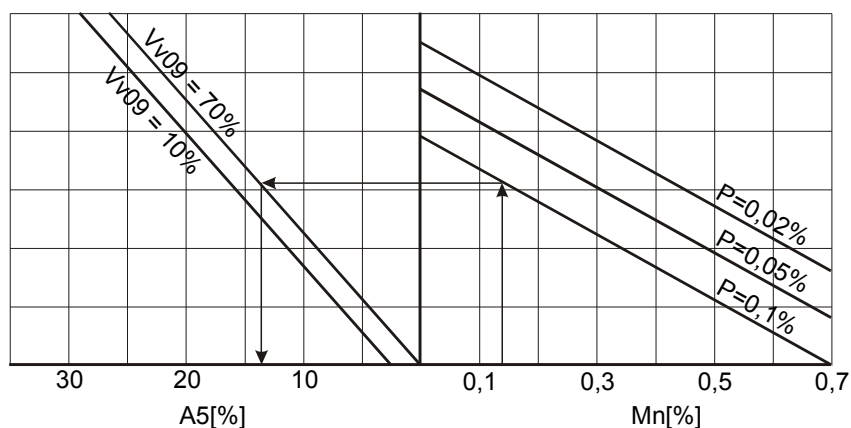
$$A_5 = 31,4 - 42,7 \text{ Mn} - 91,9 \text{ P} - 0,043 \text{ Vv09} \quad (4)$$

o parametrach statystycznych:

$$dA_5 = 1,9\%; \quad A_5s = 13,7\%; \quad R = 0,98; \quad F = 146; \quad W = 27$$

Zależność tę przedstawiono na rys. 2.

Istotny wpływ na wydłużenie żeliwa sferoidalnego ma mangan (Mn), fosfor (P) oraz względny, objętościowy udział wydzieleni grafitu ( $Vv09$ ) o współczynniku kształtu  $C= 0,9\div 1,0$ . Wszystkie te parametry obniżają wydłużenie plastyczne żeliwa sferoidalnego. Warto zauważyć, że im większa jest ilość grafitu, tym mniejsze  $A_5$ . Należałoby przypuszczać, że istnieje związek między zawartością węgla a względną objętością kulistych wydzieleni grafitu ( $C>0,9$ ). Przypuszczenie to należałoby udowodnić nowym eksperymentem, odpowiednio przygotowanym.



Rys. 2. Wpływ zawartości manganu (Mn) i fosforu (P) oraz względnej objętości wydzielań grafitu (Vv09) o dobrym współczynniku kształtu ( $C > 0,9$ ) na wydłużenie plastyczne żeliwa

Fig. 2. Influence of manganese (Mn) contents and phosphor (P) and relative capacity of graphite separations (Vv09) with proper shape coefficient ( $C > 0,9$ ) on cast iron plastic extension

## 5. WPLYW SKŁADU CHEMICZNEGO I STOPNIA SFEROIDYZACJI GRAFITU NA TWARDOŚĆ ŻELIWA

Dla praktyki przemysłowej ważną jest informacja o tym, co wpływa na twardość żeliwa sferoidalnego. Informacja taka pozwoli na podejmowanie właściwych decyzji dla uzyskania wymaganej jakości odlewu. Korzystając z tego samego zbioru danych opracowano następującą zależność eksperymentalną:

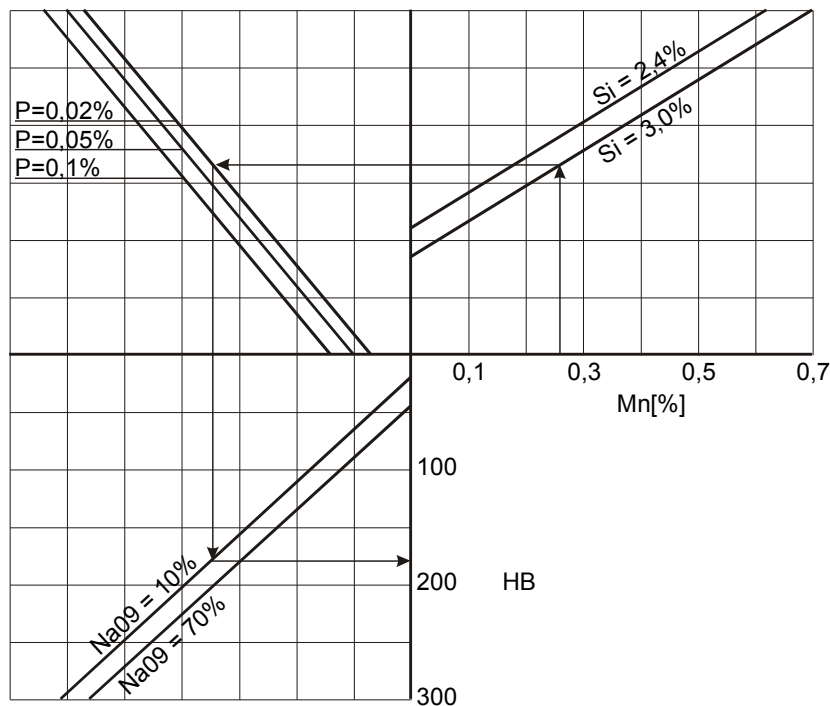
$$HB = 193 + 257 \text{ Mn} - 31,5 \text{ Si} + 418 \text{ P} + 0,36 \text{ Na09}$$

o parametrach statystycznych:

$$dHB = 12; HB_s = 206; R = 0,98; F = 98; W = 21$$

Wzór powyższy przedstawiono graficznie na rys.3

Bardzo intensywnie podnosi twardość żeliwa dodatek manganu, który sprzyja tworzeniu struktury perlitycznej. Podobnie wpływa fosfor, który tworząc roztwór wzmacnia osnowę żeliwa. Krzem sprzyja grafityzacji, a więc zwiększa ilość ferrytu w żeliwie. Na granicy istotności wpływu na twardość oddziałuje względna liczba wydzielań grafitu (Na09) o dobrym współczynniku kształtu ( $C > 0,9$ ).



Rys. 3. Wpływ zawartości manganu (Mn), krzemu (Si) i fosforu (P) oraz względnej liczby wydzielań grafitu (Na09) o dobrym współczynniku kształtu ( $C > 0,9$ ) na twardość żeliwa  
 Fig. 3. Influence of manganese (Mn) contents, silicon (Si) and phosphorus (P) and relative number of graphite separations (Na09) with proper shape coefficient ( $C > 0,9$ ) on cast iron hardness

## 6. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz statystycznych można stwierdzić, że na właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego, tj. na wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  i na twardość HB wpływają mangan, fosfor i względny udział grafitu o bardzo dobrym kształcie. Zwiększanie tych parametrów powoduje zwiększenie tych właściwości. Natomiast zwiększanie zawartości krzemu powoduje zmniejszenie twardości. Ogólną zależność między wytrzymałością na rozciąganie a twardością żeliwa opisuje wzór (6):

$$R_m = 1289 - 7,35 \cdot HB + 0,02 \cdot HB^2 - \frac{490}{HB} \quad (6)$$

o parametrach statystycznych:

$$dR_m = 15\text{Mpa}; R_{ms} = 497\text{Mpa}; R = 0,99; F = 190; W = 32$$

Korzystając z tej zależności można na podstawie badania twardości oceniać szacunkowo wytrzymałość na rozciąganie.

Wydłużenie plastyczne A5 zmniejszają mangan, fosfor oraz względny udział objętościowy grafitu o bardzo dobrym współczynniku kształtu. Wszystkie te przedstawione zależności (wzory 3,4,5,6) mają uzasadnienie teoretyczne a możliwość wykorzystania ich w praktyce potwierdzają wysokie testy statystyczne.

#### **LITERATURA**

- [1] Podrzucki C.; Żeliwo. Wyd. STOP – Kraków, 1999
- [2] Angus H.T.: Cast Iron: Physical and Engineering Properties. Edit Butterworth a.Co.London-Boston, 1978.
- [3] Soiński M.S.: Application of Shape Measurement of Grafite Precipitates in Cast Iron in Optimizing the Spheroidizing Process. Acta Sterologica, 1986, no2, s.311-317.

#### **INFLUENCE OF CHEMICAL CONSTITUTION AND GRAPHITE SPHEROIDIZATION GRADE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON**

#### **SUMMARY**

Taking into account many tests, the influences of elements and graphite spheroidization grade in cast iron as well as its mechanical properties have been presented in this article. Elaborated experimental dependencies obtained high statistical tests and can be used in technology of ductile cast iron.

Recenzował Prof. Józef Gawroński