

BADANIE WRAŻLIWOŚCI ŻELIWA NA SZYBKOŚĆ STYGNIECIA METODĄ ULTRADŹWIĘKOWĄ

Jerzy ZYCH

Dr inż., adiunkt, Katedra Technologii Form Odlewniczych, Wydział Odlewnictwa
Akademii Górniczo-Hutniczej, 30-059 Kraków, ul. Reymonta 23

1. Wprowadzenie

Żeliwo należy do stopów odlewniczych o szczególnie dużej wrażliwości na szybkość stygnięcia, co powoduje, że struktura w poszczególnych przekrojach odlewu często jest zróżnicowana [1, 2]. Im większa jest wrażliwość żeliwa oraz im bardziej jest zróżnicowana szybkość krzepnięcia w obszarze całego odlewu lub jego fragmentów tym bardziej zróżnicowana jest struktura. Niejednorodność struktury odlewu powoduje zróżnicowanie wszystkich właściwości żeliwa, w tym: technologicznych, mechanicznych, fizycznych i użytkowych.

Ocenę wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia prowadzi się zwykle poprzez pomiary twardości w próbkach o zróżnicowanej grubości ścianek. W warunkach przemysłowych, prawdopodobnie z uwagi na pracochłonność tej próby, jest ona rzadko wykonywana. Prowadzi się natomiast ocenę innych właściwości powiązanych z wrażliwością żeliwa na szybkość stygnięcia, np. ocenę skłonności do zabielen. Na podstawie przełomu próbek klinowych ocenia się skłonność żeliwa do zabielen. Pośrednio w oparciu o te próby oceniana jest również i wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia. I tak np. jeśli przełom próby klinowej jest w zdecydowanej większości szary, to przyjmuje się, że takie żeliwo jest mało wrażliwe na szybkość stygnięcia. Ocena pośrednia jest bardzo przybliżona.

W niniejszej pracy do badań wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia proponuje się metodę ultradźwiękową. Prędkość fali ultradźwiękowej w żeliwie zależy od jego struktury [3, 4, 5]. Ogólnie, im więcej jest w strukturze żeliwa grafitu i im większe są jego wydzielienia, tym prędkość fali jest mniejsza. Prędkość fali „podąża” więc za strukturą żeliwa. Ta cecha propagacji fal w żeliwie szarym została wykorzystana do opracowania ultradźwiękowej metody oceny wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia.

2. Wpływ podstawowych czynników

Wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia zależy od jego składu chemicznego, stanu fizykochemicznego i rodzaju obróbki pozapiecowej. Wpływ składu chemicznego można rozpatrywać przez analizę wpływu oddzielnie każdego pierwiastka lub wpływ składu ujętego sumarycznie w postaci takich wskaźników jak S_c , CE. W przedmiotowej literaturze wpływ ten rozpatrywany jest najczęściej w oparciu o współczynnik nasycenia eutektycznego S_c . Opracowano szereg empirycznych zależności, w których podstawowe właściwości mechaniczne żeliwa przedstawiane są w funkcji składu chemicznego (S_c) i grubości ścianki (g) lub średnicy wlewka (d). Często zamiast grubością czy średnicą próbki autorzy posługują się modułem krzepnięcia (M), który definiowany jest jako stosunek objętości odlewu lub wybranej jego części (V) do powierzchni stygnięcia (F). W literaturze spotyka się więc zależności typu: $HB = (S_c, M)$ lub $R_m = f(S_c, M)$ [6]. Na rysunku 1 przedstawiono graficznie zależność opracowaną przez W. Pattersona i F. Iske'go [6]:

$$\log HB = (0,4 * S_c - 0,17) * \log(F/V) + \log(-153 * S_c + 355) \quad (1)$$

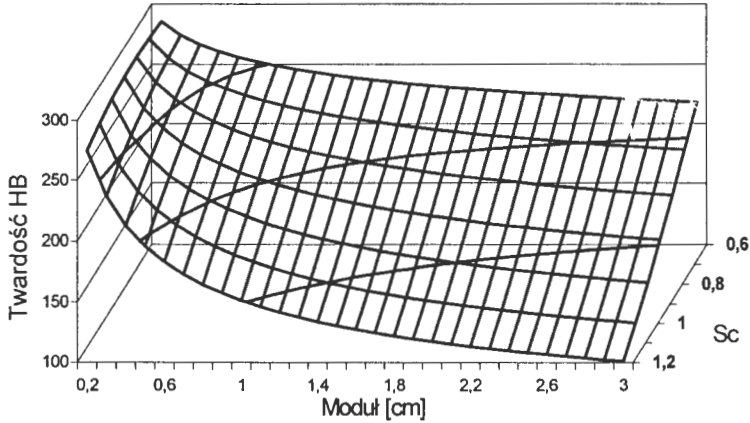
Miara wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia nie jest ściśle zdefiniowana. Można przyjąć, że miarą tej wrażliwości jest wielkość zmian wybranej właściwości mechanicznej (np. ΔHB , ΔR_m) przypadająca (odniesiona) do jednostkowej zmiany prędkość stygnięcia. Uproszczoną ocenę wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia można prowadzić odnosząc wielkość zmian HB czy R_m do zmian modułu krzepnięcia odlewu, co przedstawia rysunek 1. Szybkością stygnięcia odlewu jest odwrotnie proporcjonalna do jego modułu krzepnięcia, dlatego wielkości te mogą być wykorzystywane w rozważaniach zamiennie. Z analizy empirycznej zależności 1 i jej graficznego przedstawienia wynika, że:

- wrażliwość żeliwa szarego na szybkość stygnięcia maleje przy obniżaniu S_c
- szybkość stygnięcia będąca funkcją modułu szybko zmniejsza się przy jego zwiększaniu. W ściankach o module $M < 1,0-1,5$ cm szybkość krzepnięcia jest jeszcze na tyle duża, że nawet niewielkie zmiany wartości modułu wywołują istotne zmiany twardości (rys. 1), jako skutek zmiany struktury. Jednak dalsze zwiększanie modułu krzepnięcia nie wywołuje już tak wyraźnych zmian HB.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia łatwiej można oceniać na próbkach krzepnących z dużą prędkością, a więc posiadających mały moduł krzepnięcia. W takich próbkach zmiany mierzonej właściwości (np. HB) są znacznie większe, łatwiej można je uchwycić w pomiarach.

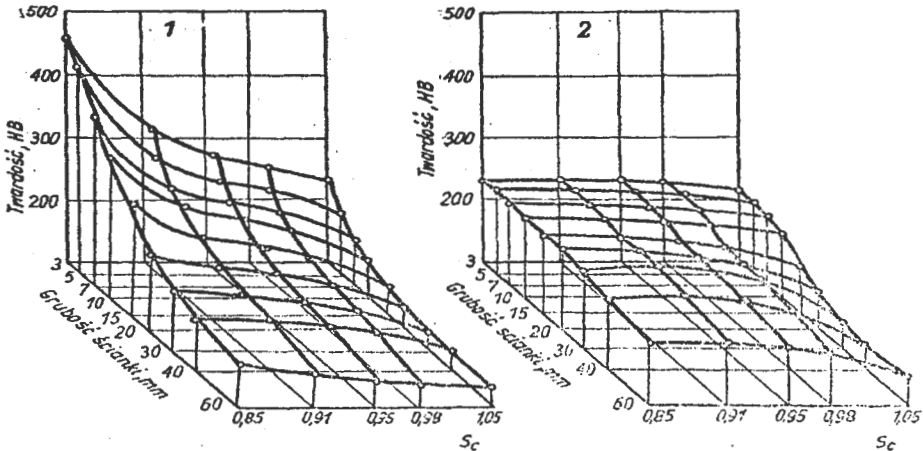
Proces modyfikacji zmienia wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia [2, 7, 8]. Odlewy z żeliwa modyfikowanego charakteryzują się większą jednorodnością struktury i właściwości, tak na przekroju pojedynczych ścianek, jak i w ściankach posiadających różne grubości. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań dotyczące porównania

wpływu grubości ścianek odlewu i S_c żeliwa na jego twardość [7]. Z nich również wynika, że żeliwo modyfikowane jest znacznie mniej wrażliwe na zmiany szybkości stygnięcia niż żeliwo szare. Podobne jakościowo wyniki uzyskano w pracy [8], gdzie oceniano wrażliwość żeliwa modyfikowanego na kilka sposobów.



Rys. 1. Zależność $HB = f(S_c, M)$ dla odlewów z żeliwa szarego (opracowane na podstawie [6])

Fig. 1. HB vs. S_c and M relationship elaborated for cast iron castings on the basis of [6]



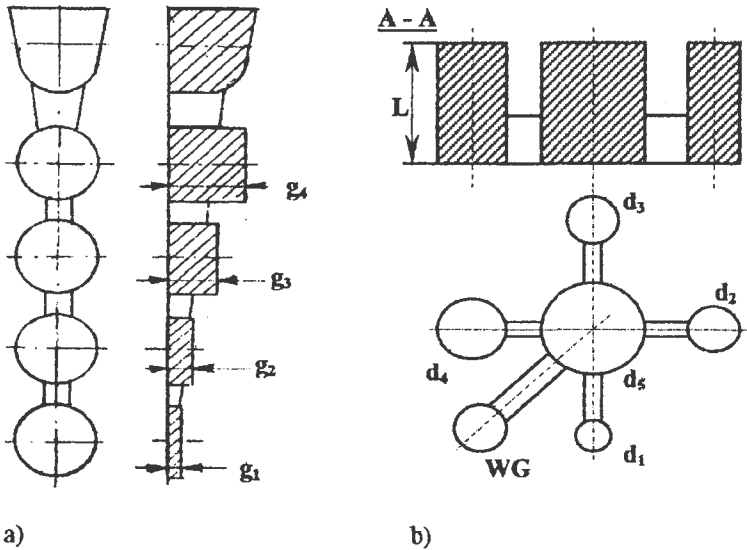
Rys. 2. Wrażliwość na szybkość stygnięcia żeliwa wyjściowego (1) i żeliwa modyfikowanego (2) [7]

Fig. 2. Susceptibility to cooling rate of the initial cast iron (1) and inoculated cast iron (2) [7]

3. Badania własne

3.1 Metodyka badań

Idea ultradźwiękowej metody badań wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia opiera się na zależności zachodzącej pomiędzy prędkością fali a strukturą żeliwa szarego. Zmiany struktury powodują zmiany prędkości fali. Dla wyznaczenia wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia, niezależnie od metody oceny, próbki do badań muszą składać się z segmentów krzepnących z różną prędkością. Tak jest przy ocenie wrażliwości przez pomiar zmian HB czy R_m [1, 2, 9]. Również do badań ultradźwiękowych opracowano próbki posiadające zróżnicowaną grubość. Projektując kształt i wymiary próbek do badań ultradźwiękowych uwzględniono specyfikę tej techniki pomiarów oraz wnioski co do wpływu szybkości krzepnięcia na strukturę.



Rys. 3. Próbkki do badań wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia: a- przy metodzie przepuszczania, b- przy metodzie echa.

Fig. 3. Samples for examination of the cast iron susceptibility to cooling rate: a) ultrasonic wave transmission method; b) ultrasonic wave echo method

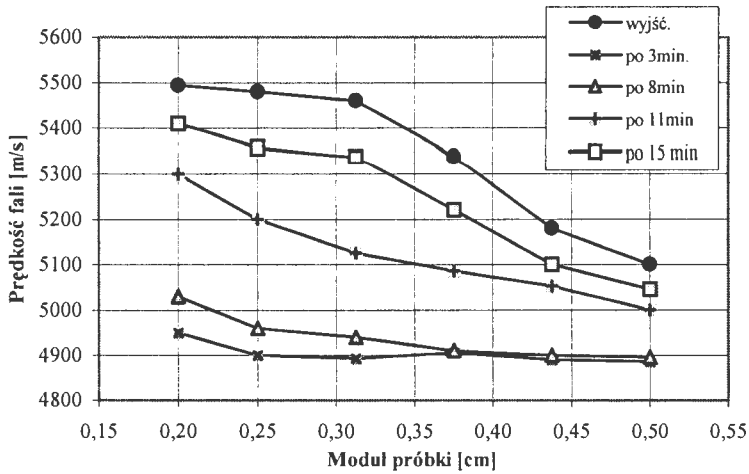
Z przeprowadzonej w punkcie 2 analizy wynika, że dla uzyskania silniejszego zróżnicowania struktury w segmentach próbki, poszczególne segmenty powinny posiadać moduł nie większy niż około $M < 1,0-1,5\text{cm}$. Przy badaniach na próbkach szybko krzepnących skraca się całkowity czas próby i stwarza warunki do opracowania pośpiesznej metody oceny wrażliwości żeliwa na szybkość krzepnięcia.

Pomiary prędkości fali mogą być wykonywane dwoma technikami tj. metodą przepuszczania lub metodą echa. Dla obu tych technik pomiarowych próbki powinny mieć nieco inny kształt. W badaniach opisanych poniżej stosowano dwa rodzaje próbek; pokazuje to rysunek 3. Ocena wrażliwości żeliwa metodą ultradźwiękową polega na porównywaniu prędkości fali w poszczególnych segmentach próbki, posiadających zróżnicowany moduł krzepnięcia. Żeliwo charakteryzujące się małą wrażliwością, krzepnąc w poszczególnych częściach próbki, uzyskuje mało zróżnicowaną strukturę co powoduje, że również i prędkość fali jest w obrębie całego odlewu-próbki mało zróżnicowana. Przy dużej wrażliwości żeliwa zróżnicowanie prędkości fali jest bardzo wyraźne.

3.2 Wyniki pomiarów

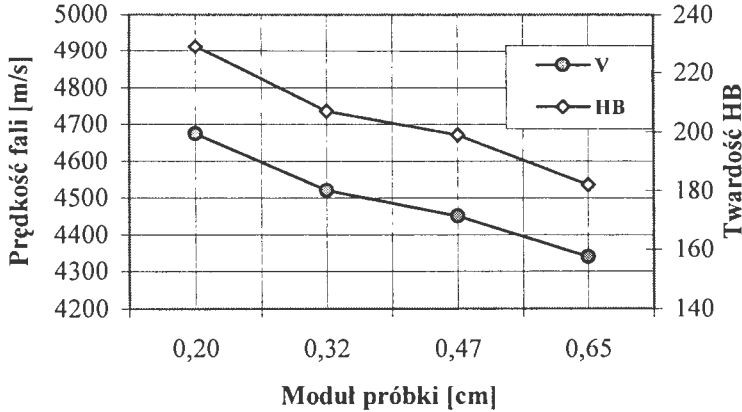
Wykonano badania polegające na ocenie wrażliwości na szybkość stygnięcia żeliwa poddanego zabiegowi modyfikowania. Badania dotyczyły żeliwa stosowanego na cienkościenne odlewy motoryzacyjne o składzie: C = 3,30–3,40%, Si = 1,85–1,95%, Mn = 0,55–0,65%, S = 0,10–0,12% i P = 0,12–0,15%. Żeliwo to poddawano zabiegowi modyfikowania przy użyciu modyfikatora typu Superseed dodawanego w ilości około 0,15–0,20%. Żeliwo topiono w piecu indukcyjnym, zabieg modyfikowania wykonywano techniką „na powierzchnię”. Próbki o kształcie walcowym (pokazanym w formie przykładu na rysunku 3) odlewano z żeliwa wyjściowego i po modyfikowaniu w wybranych odstępach czasowych. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych wykonanych metodą przepuszczania zamieszczono na rysunku 4. W poszczególnych segmentach próbki odlanej z żeliwa wyjściowego występuje duże zróżnicowanie prędkości fali co świadczy o zróżnicowaniu struktury. Żeliwo o składzie zbliżonym do eutektycznego (CE = 3,95–4,05%) w stanie wyjściowym charakteryzuje się podwyższoną wrażliwością na szybkość stygnięcia. Zabieg modyfikowania zmniejsza bardzo wyraźnie tę wrażliwość, co uwidacznia się zmniejszeniem rozpiętości prędkości fal w poszczególnych segmentach próbki. W miarę upływu czasu po zabiegu modyfikacji jej efekt stopniowo zanika. Znajduje to odbicie w rozkładzie prędkości fali w próbkach odlewanych po 8, 11 i 15 minutach, rysunek 4.

Wykonano również serię pomiarów z zastosowaniem próbek pokazanych na rysunku 3a, stosując w pomiarów metodę echa. W tej próbie dokonano oceny wrażliwości żeliwa opartej na pomiarach twardości i prędkości fali równolegle. Przykład wyników takich badań przedstawia rysunek 5. Ze zwiększaniem modułu krzepnięcia obserwuje się obniżanie wartości obu kontrolowanych wielkości- HB i V. Tak więc pomiędzy twardością i prędkością fali ultradźwiękowej istnieje zależność, im większa prędkość fali tym większa twardość. Jest to zależność liniowa [11,12]. Ocena wrażliwości na szybkość stygnięcia może być wykonywana zamiennie, w oparciu o pomiar HB lub pomiar prędkości fali. Metoda ultradźwiękowa jest technicznie bardziej wygodna, gdyż próbki po odlaniu praktycznie nie wymagają dodatkowego przygotowania powierzchni. Pomiar jest szybki i może być wykonywany w dowolnym miejscu w odlewni. Pomiary twardości wykonuje się raczej w laboratorium na próbkach wstępnie szlifowanych.



Rys. 4. Wpływ modyfikacji na wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia. Ocena wykonana w oparciu o pomiar prędkości fali ultradźwiękowej.

Fig. 4. Effect of the inoculation process on cast iron susceptibility to cooling rate. The estimation made on basis of the ultrasonic wave speed measurement



Rys. 5. Wpływ szybkość stygnięcia (modułu próbki) na prędkości fali i twardości HB

Fig. 5. Effect of the cooling rate (solidification modules) on the ultrasonic wave speed and HB.

4. Podsumowanie

Ultradźwiękowe badania żeliwa znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko do wykrywania wad i oceny struktury w gotowych odlewach ale i do oceny jakości samego metalu. W przypadku żeliwa tą metodą kontrolowany jest proces sferoidyzacji żeliwa, wdrożony w kilku odlewniach [10]. Badanie wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia jest kolejnym obszarem kontroli metalu, w którym technika ultradźwiękowa powinna znaleźć zastosowanie. Rozwój elektroniki sprawia, że aparatura ultradźwiękowa jest coraz mniej zawodna i pozwala dokładnie określać wielkości opisujące propagację fali, głównie jej prędkość. Ponadto aparatura ultradźwiękowa wykorzystywana w opisywanym zakresie zastosowań jest już na tyle zminiaturyzowana, że sam pomiar można wykonywać w dowolnym miejscu w odlewni, czy na dowolnym stanowisku. Wszystko to sprzyja rozwojowi zastosowań tej nieniszczącej metody badań.

Ocena wrażliwości żeliwa metodą ultradźwiękową jest technicznie bardziej wygodna niż ocena przez pomiar twardości czy wytrzymałości. Pokazane na przykładzie żeliwa modyfikowanego zastosowanie tej metody potwierdza jej przydatność do oceny jakości żeliwa. W oparciu o stopień zróżnicowania prędkości fali w segmentach próbek pokazanych na rysunku 3 można wnioskować o wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia. Ponadto, na podstawie prędkości fali wyznaczonej w segmencie próbki posiadającej moduł krzepnięcia zbliżony do modułu standardowej próbki (wlewka Ø30) można wnioskować o gatunku żeliwa (jego wytrzymałości). Przy określaniu wytrzymałości korzysta się z opracowanych wcześniej empirycznych zależności typu: $R_m = f(v)$ lub $R_m = f(v, HB)$ [11,12].

LITERATURA

1. Podrzucki Cz.: *Żeliwo – struktura, właściwości, zastosowanie*. Wydawnictwo ZG STOP, Kraków 1991.
2. Fraś E., Podrzucki Cz.: *Żeliwo modyfikowane*. Skrypt AGH Nr 675; Kraków 1978.
3. Ziegler R., Gerstner R.: *Die Schallgeschwindigkeit als kennzeichnende Größe für beureteilung von Gußeisensn*. Giesserei, v.45, (1958) nr 8, s. 185–193.
4. Fałęcki Z., Pyka M.: *Ocena ultradźwiękami struktury żeliwa szarego*. Przegląd Odlewnictwa, T 36 (1986) Nr 2, s. 75–78.
5. Orłowicz W.: *Ocena właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego metodą ultradźwiękową*. Zeszyty Nauk. Polit. Rzesz.; Mechanika, z. 20. Rzeszów 1990.
6. Patterson W., Iske F.: *Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften im Gusstück und im getrennt gegossenen Probestab*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen (1961), Nr 964, s. 80.
7. Nikonow N.I.: *Wlijanie silikomizmetalla na svojstwa sierogo czuguna w rozlicznych sieczenijach otliwok*. Litiejn. Proizw. (1973), Nr 3, s. 43.
8. Konowałow O.M. i inni.: *Kompleksnoje modyficirowanije sierogo czuguna*. Litiejn. Proizw. (1971) Nr 4 s. 4.

9. Girszowicz N.G.: *Krystalizacja i swojstwa czuguna w otlivkach*. Maszynostrojenije, Moskwa-Leningrad 1966.
10. Zych J.: *Ultradźwiękowa metoda kontroli procesu sferoidyzacji żeliwa* Przegląd Odlewnictwa (1997) Nr 3, s. 77–80.
11. Zych J., Fałęcki Z.: *Testing of Grey Cast Iron Mechanical Properties after the Ultrasonic Non-Destructive Method*, Zeszyty .Nauk. AGH, Metalurgia i Odlew, T 18 (1991) Nr.2; s. 221–233.
12. Lopez-Vazquez L.B.: *Determination of Mechanical Casting Characteristic by Ultrasund Aplication*, 46th International Fondry Congres, Madryt 1979.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Czesław Podrzucki