

# Wpływ drobnoziarnistości struktury pierwotnej staliwa na prędkość fali ultradźwiękowej

D. Bartocha \*, J. Suchoń, C. Baron, J. Szajnar

Department of Foundry, Silesian University of Technology, Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

\* Kontakt korespondencyjny. E-mail: dariusz.bartocha@polsl.pl

Otrzymano 15.09.2013; zaakceptowano do druku 09.09.2013

## Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę określenia zależności między stopniem rozdrobnienia struktury pierwotnej staliwa, który jest wynikiem modyfikacji, i prędkością propagacji fali ultradźwiękowej w materiale. Znalezienie takiej zależności umożliwiłoby oszacowanie wielkości ziarna pierwotnej struktury wybranych fragmentów odlewów stalowych metodą nieniszczącą. Co w efekcie może doprowadzić do opracowania metod szacowania wartości właściwości mechanicznych przez pomiar prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w odlewaniu. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych w próbkach pobranych z niskostopowego staliwa konstrukcyjnego. Stopień rozdrobnienia struktury porównywano z pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych, a wyniki zostały przeanalizowane i omówione.

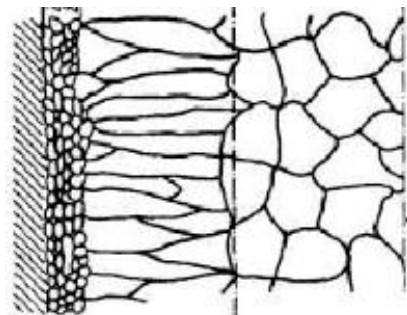
**Keywords:** Cast steel, Modification, Primary structure, Ultrasonic wave propagation

## 1. Wprowadzenie

Proces krystalizacji jest niewyalgicznym elementem powstawania odlewu, tworząca się struktura pierwotna odlewu decyduje o jego własnościach. Proces krystalizacji obejmuje dwa etapy, jakimi są zarodkowanie i wzrost ziaren.

W praktyce, w przypadku prawie wszystkich metali i stopów odlewniczych po zakrzepnięciu można zaobserwować występowanie w odlewie trzech typów kryształów (rys. 1.):

1. zamrożonych, występujących przy powierzchni formy
2. kolumnowych (słupkowych), wyrastających w głąb cieczy z tzw. naskórka odlewniczego, powstałego tuż po wlewniu ciekłego metalu do formy,
3. równoosiowych, występujące w głębi odlewu.



Rys. 1. Strefy kryształów w odlewie [1]

Podczas krystalizacji pierwotnej tworzą się różnego rodzaju kryształy o odmiennych wielkościach, które wpływają na własności mechaniczne i użytkowe stopu po zakrzepnięciu. Najbardziej niekorzystną strukturą jest struktura dendrytyczna

niestety w przypadku staliwa jest to najpospolitsza forma kryształów w odlewach. Zbyt duże dendryty wpływają niekorzystnie na jego własności, np. wytrzymałość, udurowienie, kruchość, obrabialność itp. Rozdrobnienie struktury jest istotnym aspektem z punktu widzenia użytkownika odlewu. Dlatego konieczne jest wpływanie na proces krystalizacji w celu zmiany struktury pierwotnej odlewu. Na proces krystalizacji można wpływać na kilka sposobów jednak najefektywniejszym jest modyfikacja. Mimo tego, że proces modyfikacji nie został jednoznacznie wytłumaczony, najbardziej skuteczną metodą rozdrobnienia struktury odlewu jest właśnie modyfikacja. Przez ten termin rozumie się wprowadzenie do ciekłego metalu specjalnych dodatków (modyfikatorów), które powodują zmianę procesu zarodkowania i/lub wzrostu ziaren struktury. Należy podkreślić, iż te zmiany nie powodowane są zmianą składu chemicznego, lecz są wynikiem bezpośredniej zmiany warunków krystalizacji [1].

Jeśli własności stopu są funkcją przede wszystkim struktury pierwotnej to prognozować można je badając jednorodność i stopień rozdrobnienia struktury odlewu w stanie surowym. Idealną metodą byłaby wykorzystująca jedną z technik badań nieniszczących, niewymagająca naruszania ciągłości struktury odlewu i minimalizująca przy tym pracochłonność i czas badania. Pod tymi względami godnym uwagi wydaje się wykorzystanie badań ultradźwiękowych.

Podstawowym zjawiskiem leżącym u podstaw badań ultradźwiękowych jest ruch falowy cząstek w cieple stałym. Fala mechaniczna powstaje na skutek wytrącenia cząstki ośrodka sprężystego z położenia równowagi. Taka cząstka staje się źródłem fali mechanicznej. Drgania źródła za pośrednictwem własności sprężystych ośrodka propagowane są na sąsiadujące cząstki tego ośrodka tworząc falę mechaniczną [2].

W ciałach nie będących doskonale sprężystymi wraz ze wzrostem przebytej przez falę odległości maleje jej amplituda. Zjawisko to nazywane jest tłumieniem fali i jest spowodowane przez rozpraszanie i pochłanianie fali. W materiałach niejednorodnych, o budowie krystalicznej, takich jak stopy techniczne metali, głównym źródłem tłumienia fal mechanicznych jest zjawisko rozpraszania. Składają się na nie odbicie i załamanie fal na granicach ziaren struktury, wtrąceniach, wydzieleniach oraz wadach wewnętrznych jak porowatości, mikropęknięcia czy rzadziny. Rozpraszanie rośnie wraz ze wzrostem anizotropii ośrodka w którym rozchodzą się fale. Podczas przejścia fali przez granice ośrodków, czyli powierzchnię rozdzielającą ośrodki różniące się akustyczną opornością falową oraz prędkością propagacji fali, może się w zależności od kąta padania i własności ośrodków dokonywać: odbicie, przenikanie, załamanie, transformacja, rozproszenie, dyfrakcja.

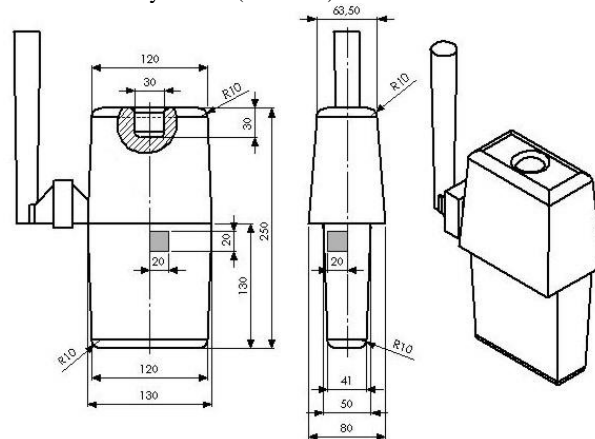
Granice ośrodków stanowią: płaszczyzna przyłożenia głowicy do materiału, wolne ściany badanych elementów, płaszczyzna połączenia w odlewie warstwowym oraz krawędzie nieciągłości wewnątrz badanego obiektu, ale również granice ziaren oraz granice ziarno – wtrącenia niemetaliczne, ziarno – wydzielenie. Podczas przejścia fali przez każdą taką granicę występuje szereg zjawisk wpływających na zmianę kierunku propagacji fali oraz zmniejszenie jej amplitudy.

Można zatem założyć, że stopień rozdrobnienia struktury pierwotnej staliwa będzie znacząco (mierzalnie) wpływał na

prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Celem niniejszej pracy jest ustalenie zależności między rozdrobnieniem struktury pierwotnej staliwa będącym skutkiem modyfikacji a parametrem propagacji fali ultradźwiękowej w materiale. Znalezienie takiej zależności umożliwiłoby ocenę struktury wybranych fragmentów odlewów stalowych metodami nieniszczącymi.

## 2. Materiał i przebieg badań

W prowadzonych, badaniach w warunkach laboratorium Katedry Odlewnictwa Politechniki Śląskiej starano się uzyskać jak to tylko możliwe parametry wytopu przemysłowego. Wykonano serię wytopów staliwa niskostopowego w laboratoryjnym piecu indukcyjnym tyglowym, poddawano je odfosforowaniu, odsiarczeniu i odtlenianiu osadowemu oraz przeprowadzono modyfikację dodatkami FeZr, FeTi. Wyniki dotychczasowych badań autorów wskazują na wysoką efektywność oddziaływania tych modyfikatorów wprowadzanych do ciekłego metalu jednocześnie [3-6]. W trakcie wytopów zostały pobrane próbki staliwa bezpośrednio z pieca oraz wykonano szereg odlewów próbnych (rys. 2). Określono skład chemiczny wytopionego staliwa przy użyciu spektrometru GDS 500A firmy LECO oraz zmierzono zawartość O, N aparatem TCHEN600 firmy LECO (Tabela 1).



Rys. 2. Geometria odlewu próbnego, miejsce pobrania i wymiary próbki

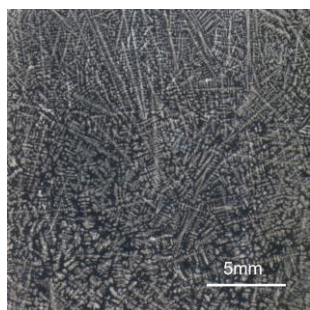
Wytopy przeprowadzono w indukcyjnym piecu próżniowym. Prowadzono je przy otwartej komorze próżniowej jedynie jako ostatni zabieg stosowano przetrzymanie pod obniżonym ciśnieniem w celu próżniowego odgazowania. W wytopach oznaczonych 3Bz 4Bz i 5Bz zwiększono zawartość odpowiednio Ni, Co oraz Ni i Co w porównaniu do wytopów 1Bz i 2Bz.

Z odlewów próbnych wykonanych ramach każdego wytopu pobrano próbki, na których wykonano zglądy metalograficzne. Zglądy wytrawiono odczynnikami Oberhofera w celu ujawnienia makrostruktury. Miejsce wycięcia i wymiary próbek pokazano na rysunku 2. Makrostruktury badanych staliw zaprezentowano na rysunkach 3 – 7.

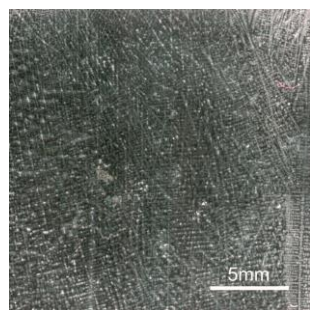
Tabela 1.

Skład chemiczny staliwa z poszczególnych wytopów

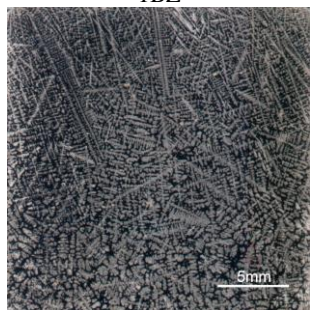
Wytop	C [Wt%]	Si [Wt%]	Mn [Wt%]	P [Wt%]	S [Wt%]	Cr [Wt%]	Mo [Wt%]	Ni [Wt%]	Al [Wt%]	Co [Wt%]	Ti [Wt%]	Zr [Wt%]	Nb [Wt%]	V [Wt%]	O [ppm]	N [ppm]
1Bz	0,24	1,44	1,16	0,014	0,029	0,9	0,73	1,14	0,015	0,034	0,067	0,034	0,009	0,023	52	159
2Bz	0,23	1,3	1,08	0,017	0,027	0,95	0,69	1,03	0,01	0,028	0,053	0,041	0,008	0,02	68	164
3Bz	0,32	1,52	1,17	0,018	0,024	0,97	0,78	3,02	0,01	0,03	0,064	0,051	0,015	0,025	74	133
4Bz	0,33	1,34	1,04	0,019	0,024	0,91	0,76	1,28	0,01	2	0,058	0,053	0,01	0,023	65	121
5Bz	0,35	1,37	1,26	0,022	0,032	0,94	0,83	1,75	0,009	1,9	0,057	0,047	0,026	0,024	60	108



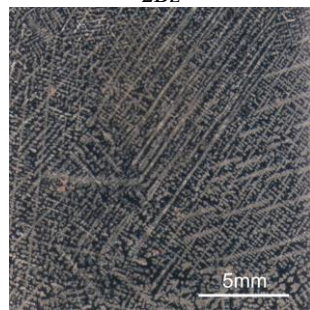
Rys. 3. Makrostruktura staliwa 1Bz



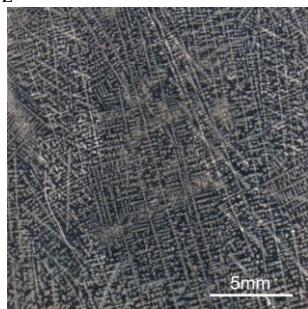
Rys. 4. Makrostruktura staliwa 2Bz



Rys. 5. Makrostruktura staliwa 3Bz



Rys. 6. Makrostruktura staliwa 4Bz



Rys. 7. Makrostruktura staliwa 5Bz

Pomiary grubości próbki niezbędne do obliczenia prędkości rozchodzenia fali zostały wykonane za pomocą mikrometru. Następnie wykonany został pomiar prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Badania ultradźwiękowe wykonane zostały z użyciem przenośnego cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego firmy Starmans, model Defectobook DIO 1000. Do badań użyta

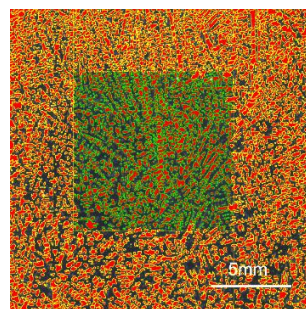
została głowica tego samego producenta, o oznaczeniu PN10-4C (4 MHz). Wartości średniej prędkości fali ultradźwiękowej z czterech pomiarów przedstawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2.

Prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

Staliwo	Grubość próbki [mm]	Średnia prędkość fali [m/s]
1Bz	20,87	6024
2Bz	20,40	5929
3Bz	21,35	6059
4Bz	19,66	5796
5Bz	18,90	6083

W miejscach pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej przeprowadzono analizę ilościową makrostruktury przy użyciu automatycznego analizatora obrazu NIS-ELEMENTS BR 3.10. Przykładowy wynik graficznej obróbki zdjęcia makrostruktury z oznaczonymi ziarnami w obszarze analizy przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zbinaryzowany obraz struktury

Dla każdego ziarna w polu pomiarowym wyznaczono wartości: długości, szerokości, pola powierzchni, obwodu, MaxFeret i MinFeret, podstawowych parametrów charakteryzujących makrostrukturę badanego staliwa. Uśrednione, dla pól pomiarowych, wartości wymienionych parametrów (tabela 3) wraz z wyznaczoną prędkością fali poddano analizie statystycznej metodą regresji krokowej poszukując zależności prędkości propagacji fali od parametrów struktury. Okazało się że wartość prędkości fali najsilniej zależna jest od średniej wartości szerokości, pola powierzchni i minimalnej średnicy Fereta (MinFeret) ziaren struktury pierwotnej badanego staliwa, zgodnie z uzyskaną zależnością (1).

$$V_{fu} = 4467 + 312 \cdot \ln(\text{Obwód}) + 91756 \cdot \text{Szerokość} - 47951 \cdot \text{MinFeret} \quad (1)$$

Parametry statystyczne:

Współczynnik korelacji  $R = 0,99$ ;

Poziomy istotności  $p$ : wyraz wolny 0,004, Obwód 0,038, Szerokość 0,002, MinFeret 0,003

Tabela 3.

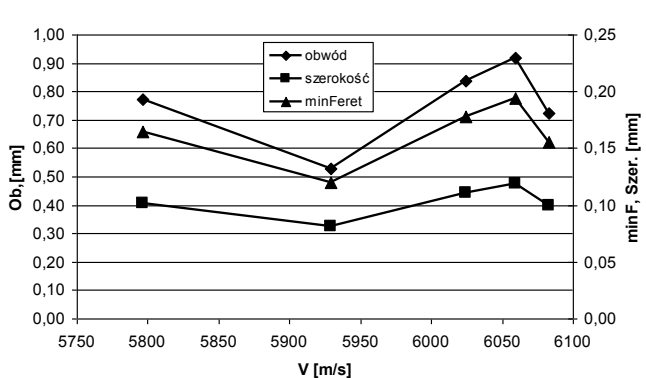
Średnie wartości parametrów struktury

Stalowo	Area [mm <sup>2</sup> ]	Perimeter [mm]	Length [mm]	Width [mm]	MaxFeret [mm]	MinFeret [mm]	MaxFeret90 [mm]
1Bz	0,040	0,837	0,321	0,111	0,303	0,178	0,196
2Bz	0,019	0,530	0,200	0,081	0,196	0,120	0,138
3Bz	0,048	0,918	0,352	0,119	0,334	0,194	0,214
4Bz	0,036	0,774	0,297	0,101	0,283	0,165	0,181
5Bz	0,031	0,723	0,275	0,100	0,267	0,156	0,173

### 3. Analiza wyników

Uzyskane w wyniku analizy statystycznej równanie regresji wskazuje na silną zależność prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w staliwie od wielkości ziaren jego struktury pierwotnej. Zależność ta jest szczególnie silna w przypadku trzech parametrów: obwodu, szerokości i minimalnej średnicy Fereta. Niestety żaden z tych parametrów nie opisuje jednoznacznie stopnia rozdrobnienia struktury pierwotnej.

W diagnostyce i badaniach stopów odlewniczych bardzo przydatna byłaby możliwość określania stopnia rozdrobnienia struktury (np. po zabiegu modyfikacji) defektoskopem ultradźwiękowym. Do tego celu niezbędna jest w miarę prosta zależność:  $P_{sp} = f(V_{fu})$ , gdzie  $P_{sp}$  – parametr jednoznacznie opisujący stopień rozdrobnienia struktury pierwotnej. Graficzne obraz zmian, wytypowanych na podstawie analizy statystycznej parametrów struktury, w funkcji prędkości propagacji fali ultradźwiękowej, przedstawiony na rysunku 9 uwidacznia, że zależność taka, mimo że istnieje, nie jest jednoznaczna.



Rys. 9. Zmiana wartości parametrów struktury w zależności od prędkości fali ultradźwiękowej

Prawdopodobnie powodem tego był niemal identyczny sposób wytopu i obróbki staliwa oraz zbyt skąpy zestaw badanych próbek, przez co nie był on w pełni reprezentatywny dla analizowanego typu staliwa.

### 4. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- zależność wartości prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w staliwie do stopnia rozdrobnienia struktury pierwotnej została wykazana, co było celem niniejszej pracy,
- określonej zależności ze względu na jej charakter i niejednoznaczność nie można wprost zastosować w diagnostyce i badaniach stopów odlewniczych,
- opracowanie nadającej się do aplikacji zależności wymaga określenia prostego parametru opisującego jednoznacznie drobnizarność struktury oraz analizy liczniejszego (reprezentatywnego) zbioru wyników pomiarów prędkości fali ultradźwiękowej i parametrów struktury.

### Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy N N508 585139.

### Literatura

- [1] Szymaszal, J., Krzemień, E., Zając, T. (1984). *Modyfikacja metali i stopów*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [2] Orłowicz, W. (2000). *Zastosowanie ultradźwięków w odlewnictwie*. Monografia. *Krzepnięcie metali i stopów*. 2(45).
- [3] Bartocha, D., Baron, C., Suchoń, J., Kilariski, J., Szajnar, J. & Sebzda, W. (2012). Assessment of the Low Alloy Cast Steel Inoculation Effects with Chosen Additives. *Archives of Foundry Engineering*. 12(2), 211-214.
- [4] Bartocha, D., Kilariski, J., Suchoń, J., Baron, C., Szajnar, J. & Janerka, K. (2011). Low-alloy constructional cast steel. *Archives of Foundry Engineering*. 11(spec. 3), 265-271.
- [5] Bartocha, D., Kilariski, J., Suchoń, J., Baron, C. & Szajnar, J. (2011). Effect of tempering temperature on the properties of low-alloy cast steel. *Archives of Foundry Engineering*. 11(spec. 3), 272-276.
- [6] Bartocha, D. & Suchoń, J. (2011). Structure of low-alloy constructional cast steel - a quantitative analysis of impurities. *Archives of Foundry Engineering*. 11(spec. 3), 5-14.

# **Effect of Fine-Grain Primary Structure of The Cast Steel on The Velocity of Ultrasonic Wave Propagation**

## **Abstract**

The work presents an attempt to determine the relationship between the refinement of the cast steel primary structure which is a result of modifying and the parameter of ultrasonic wave propagation in the material. Finding such a relationship would allow to on estimation of the grain size of the primary structure of selected fragments of cast steel castings with non-destructive methods. What in the long term can lead to the development of methods for estimating the value of the mechanical properties by measuring the velocity of ultrasonic wave propagation in the casting.

This paper presents the results of ultrasonic wave velocity measurements in samples taken from low-alloy structural cast steel. Cast steel was modified using different modifiers to obtain diversity refinement of the primary structure. The degree of refinement of the structure was compared with the ultrasonic wave velocity measurements and the results have been analyzed and discussed.