

Krzysztof NOWACKI

Politechnika Śląska w Katowicach

Harald KANIA

Instytut Metalurgii Żelaza

EFEKTY OBRÓBKII AKUSTYCZNEJ CIEKŁEJ STALI WE WLEWNICY

Problemem podczas produkcji konwencjonalnych wlewków stalowych odlewanych do wlewnic jest uzyskanie odpowiedniej jednorodności chemicznej w całej objętości wlewka. Metodą zmniejszenia segregacji pierwiastków w procesie ciągłego odlewania stali jest zastosowanie mieszania elektromagnetycznego. Innym, lecz znacznie droższym sposobem poprawy jakości wewnętrznej półwyrobów przeznaczonych do dalszej przeróbki plastycznej jest zastosowanie procesu przetapiania elektrożuźlowego. Innowacyjną metodą oddziaływania na proces krzepnięcia konwencjonalnych wlewków stalowych może być wykorzystanie fal ultradźwiękowych o określonej mocy i częstotliwości. Wynikiem przeprowadzonych doświadczeń dot. oddziaływania ultradźwięków na stal krzepnącą we wlewnicy w skali półprzemysłowej, była poprawa jednorodności chemicznej wlewka, zwiększenie udziału kryształów równoosiowych w jego objętości oraz wzrost twardości stali.

Słowa kluczowe: obróbka akustyczna, krzepnięcie, wlewek stalowy, makrostruktura

EFFECTS OF ACOUSTIC TREATMENT OF LIQUID STEEL IN MOULD

The achievement of proper chemical homogeneity within the entire ingot volume during the manufacturing of conventional steel ingots cast into moulds is a problem. A method for reduction in segregation of elements during continuous casting of steel is the application of electromagnetic stirring. Another, but much more expensive method for improvement in internal quality of semi-products intended for further plastic working is the use of electroslag remelting process. An innovative method to affect the solidification of conventional steel ingots may be the use of ultrasound waves of specific power and frequency. The result of the experiments on the impact of ultrasounds on steel solidifying in the ingot mould in semi-industrial scale was the improvement in chemical homogeneity of ingot, increase in the share of equi-axed crystals in its volume and increase in steel hardness.

Key words: acoustic treatment, solidification, steel ingot, macrostructure

1. WSTĘP

Warunkiem uzyskania wlewków stalowych o założonej strukturze i właściwościach jest m.in. odpowiedni stopień ich jednorodności chemicznej. W praktyce, konwencjonalne wlewki stalowe nie są jednak jednorodne pod tym względem. Jakość wewnętrzna wlewków, jest zależna od składu chemicznego odlewanej stali, złożonych procesów likwacyjnych składników stali w czasie krzepnięcia oraz technologii odlewania. Sposobem poprawy jakości wewnętrznej wlewka podczas ciągłego odlewania stali jest zastosowanie mieszania elektromagnetycznego. Efektywność poprawy struktury wewnętrznej w tym przypadku, zależna jest od ilości i konfiguracji rozmieszczenia mieszadeł na zyle oraz właściwym doborze wartości parametrów EMS. Innym lecz znacznie droższym sposobem poprawy struktury wewnętrznej półwyrobów stalowych jest proces elektrożuźlowy. Po elektrożuźlowym przetapianiu uzyskuje się wlewek (rafinat) o zwartej strukturze, bez rzadziwej osiowej i kierunkiem krystalizacji pod kątem 45° w stosunku do płaszczyzny pionowej osi wlewka.

W praktyce przemysłowej, podczas odlewania i krzepnięcia stali we wlewnicy, nie stosuje się zabiegów mających na celu zmniejszenie segregacji.

Jednym ze sposobów zmniejszenia segregacji pierwiastków może być obróbka akustyczna ciekłej stali we wlewnicy. Do bezpośrednich efektów oddziaływania pola ultradźwiękowego zalicza się zmiany struktury w krzepnących metalach oraz ujednorodnienie składu chemicznego w odniesieniu do pierwiastków mających tendencje do segregacji. Ultradźwięki ograniczają rozwój strefy kryształów słupkowych i pozytywnie oddziałują na formowanie się ziaren równoosiowych, wpływając na homogeniczność metali zmniejszając ich niejednorodność. Zmiany struktury w metalach krzepnących spowodowane są zachodzącymi w ciekło-stałej strefie dwufazowej procesami, takimi jak powstawanie zarodków krystalizacji i mieszanie. Zmiany te następują na skutek dostarczenia do stali fal ultradźwiękowych o określonej mocy i częstotliwości. Propagacja fali ultradźwiękowej wywołuje takie zjawiska jak kawitacja, wiatr akustyczny czy oddziaływanie ciśnienia promieniowania [1–4].

2. METODYKA BADAŃ

Badania z zakresu obróbki akustycznej ciekłej stali prowadzono w Spółce Magnezy Baildon na wlewkach konwencjonalnych o masie ok. 130 kg. Do prób wykorzystano wlewnice o przekroju okrągłym, zbieżne ku dołowi, o wysokości 600 mm. Wytopy badawcze wykonano zgodnie ze standardową technologią – jak w przypadku wytopów przemysłowych w piecu elektrycznym indukcyjnym o pojemności 300 kg. Podczas wytopów odlewano po dwa wlewki, z których pierwszy w trakcie krzepnięcia poddano działaniu ultradźwięków, a drugi traktowano jako wlewki referencyjny.

Do obróbki akustycznej stali wykorzystano zbudowaną do tego celu głowicę piezoceramiczną zakończoną falowodem, zaizolowaną cieplnie, zasilaną generatorem mocy [5, 6]. Aby pobudzić ultradźwiękową głowicę mocy, zaprojektowano i zbudowano generator o mocy 1000 W. Projektując głowicę mocy założono częstotliwość rezonansową 20 kHz, uwzględniając właściwości ceramiki piezoelektrycznej mającej temperaturę Curie 893 K [7] oraz fakt, że obie części głowicy (bierna i czynna) są wykonane ze stali żaroodpornej. Głowicę zaopatrzono w stalowy koncentrator z eksponencjalnym karbem zastosowanym w celu zmniejszenia naprężeń wewnętrznych powstających przy nagłej zmianie przekroju. Do koncentratora dołączono walcowy falowód akustyczny, zaopatrzony w wymienną końcówkę zanurzaną w ciekłej stali. Głowicę zaopatrzono w układ chłodzenia, zaizolowano termicznie i zawieszono na wysięgniku [5]. Przeprowadzono dla tego egzemplarza głowicy następujące pomiary:

- statycznej pojemności elektrycznej, która wynosi 5,7 nF,
- charakterystyki modułu admitancji w funkcji częstotliwości f dla cieczy wzorcowej (woda w temp. pokojowej) i w ciekłej stali we wlewkach o masie 130 kg.

Pozwoliło to na wyznaczenie częstotliwości rezonansu elektromechanicznego w obu ośrodkach a przez to wielkość jej dryfu. Stwierdzono, że częstotliwość rezonansu elektromechanicznego dla głowicy zanurzonej w ciekłej stali była niższa od rezonansu w wodzie o 0,9 kHz. Zmiana częstotliwości rezonansowej spowodowana jest różnicą w impedancji akustycznej, która zależy od gęstości cieczy oraz prędkości propagującej w niej fali akustycznej. Doświadczenie to pozwoliło na określenie najbardziej efektywnej częstotliwości pracy głowicy, którą zadawano w kolejnych próbach. Podczas prowadzonych prób przemysłowych stwierdzono, że zmiana warunków fizycznych krzepnącej stali (temperatura, gęstość) oraz obciążenie głowicy i wzrost temperatury zarówno ceramiki piezoelektrycznej jak i części biernej i czynnej głowicy, powodują zmiany częstotliwości rezonansowej w zakresie 1,5 kHz.

Każdorazowo prowadzono obróbkę akustyczną z wykorzystaniem falowodu umieszczonego centralnie z góry, zanurzając go w ciekłej stali na ok. 20 cm w głowie wlewki (rys. 1). Odlane i poddane działaniu pola akustycznego wlewki poddano studzeniu swobodnemu na wolnym powietrzu.

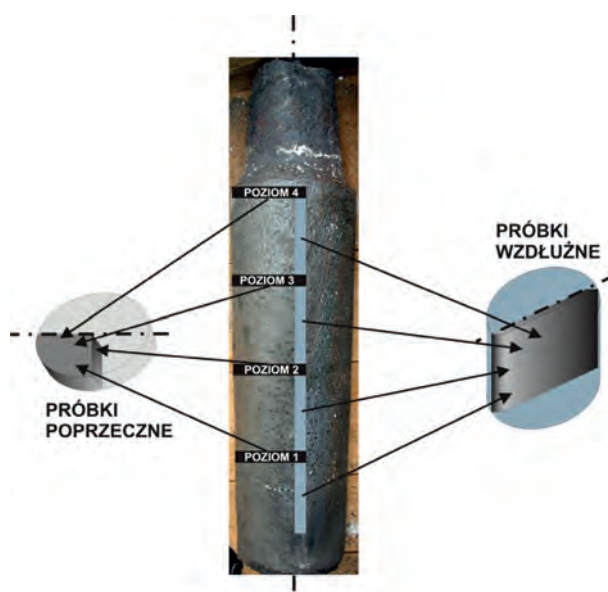
W celu przygotowania materiału do badań metalograficznych, z każdego wlewki obcięto głowę i stopę, a następnie wlewki pocięto na odcinki, z których pobrano tarcze wzdłużne i poprzeczne (rys. 2).

Rozmieszczenie obszarów z których pobrano próbki do badań wynikało z przyjętych założeń do prowadzonych



Rys. 1. Falowód głowicy ultradźwiękowej zanurzony w głowie wlewki podczas prób nadźwiękawiania

Fig. 1. Ultrasound waveguide immersed in ingot head during the sound amplification trials



Rys. 2. Schemat pobierania próbek do badań metalograficznych

Fig. 2. Flow chart of sampling for metallographic tests

badania, które pozwalały oczekiwać największych zmian związanych z oddziaływaniem fali akustycznej na krystalizującą stal w górnej połowie wlewki. W związku z powyższym, głowę i stopę wlewki, traktowano zgodnie z założeniami technologicznymi, jako odpad, natomiast tarcze z poziomów 1 i 4 stanowiły porównanie do tarcz z poziomów 2 i 3, w których spodziewano się najefektywniejszego oddziaływania pola akustycznego. Poziomy 1 i 4, jako obszary zewnętrzne, w których zgodnie z kinetyką procesu krzepnięcia, stal krzepnie w pierwszej kolejności, traktowano jako obszary, w których spodziewano się najmniejszych efektów oddziaływania na nie pola akustycznego. Tarcze przeznaczone

do prób Baumanna poddano obróbce mechanicznej przez struganie i szlifowanie. Odbitki Baumanna wykonano na oszlifowanych powierzchniach tarcz wzdłużnych i poprzecznych ($\frac{1}{4}$ części tarczy poprzecznej) pobranych w różnych częściach wlewka zgodnie z rys. 2. Sposób przeprowadzenia próby Baumanna był zgodny z wymaganiami normy PN-61/H-04502.

Pomiary makrostruktury wykonano na obrazach tarcz w kilku punktach, a udział procentowy (U) strefy kryształów równoosiowych obliczono ze stosunku pola powierzchni tej strefy do pola powierzchni próbki. Analizie poddano średnie parametry makrostruktury wlewków obliczone z uzyskanych wyników pomiarów.

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa. Pomijając skrajne wartości wynikające np. z pomiarów w przypowierzchniowym odwęglonym obszarze wlewka, obliczono średnią twardość próbek obejmujących

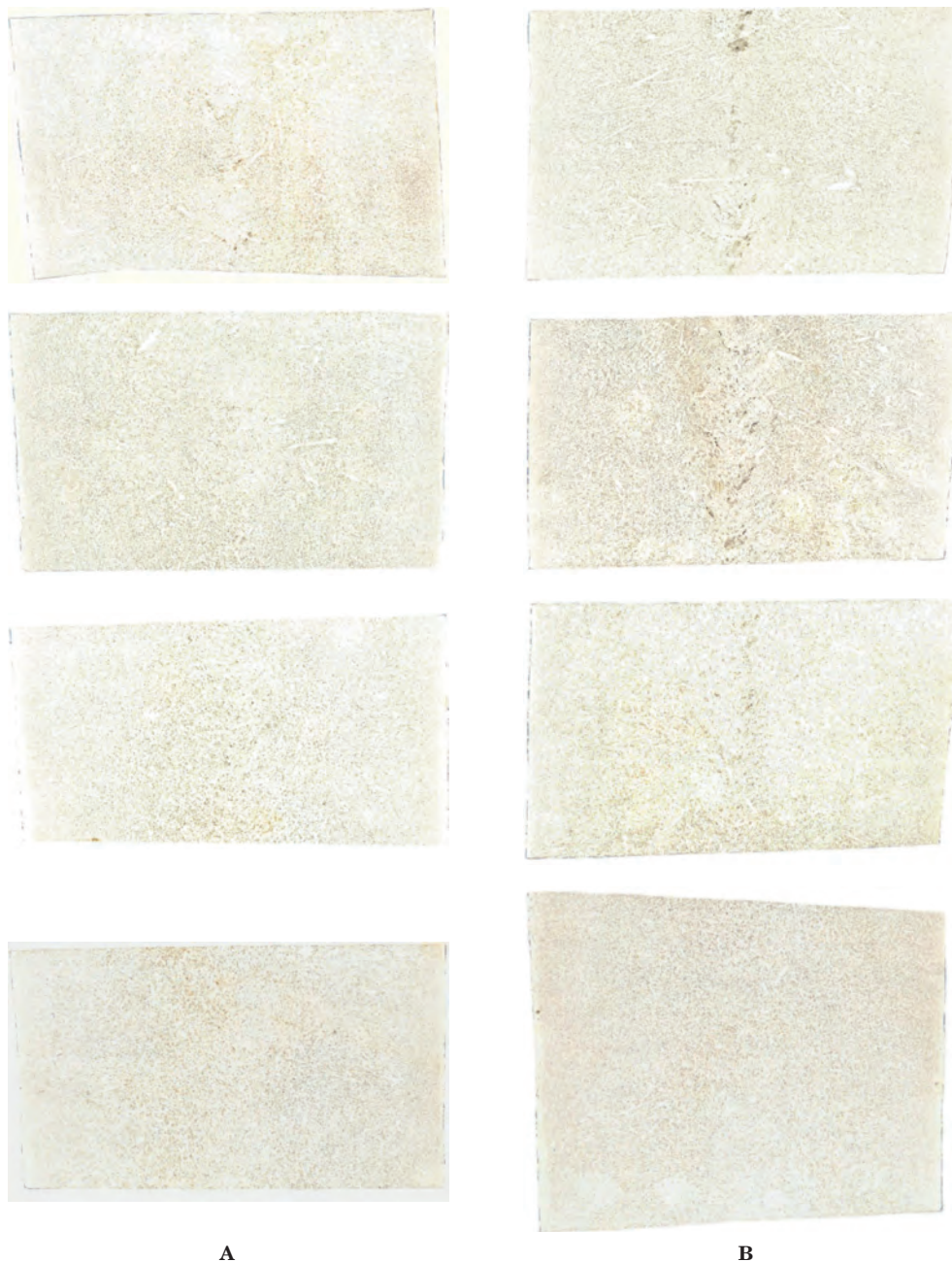
strefę kryształów zamrożonych, strefę kryształów słupkowych i strefę kryształów równoosiowych.

Wszystkie badania metalograficzne wykonano w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. ROZMIESZCZENIE SIARKI NA PRZEKROJACH WZDŁUŻNYCH I POPRZECZNYCH WLEWKÓW

W stali niskowęglowej zawierającej 0,013% S wystąpiła, ze względu na małą zawartość siarki, niewielka jej segregacja w obszarze środkowym, obejmującym strefę kryształów równoosiowych, przy czym najbardziej jest ona widoczna w górnej części wlewków. Na oryginal-



A

B

Rys. 3. Rozmieszczenie siarki na przekroju wzdłużnym wlewka: A – z obróbką akustyczną; B – bez obróbki akustycznej

Fig. 3. Distribution of sulphur on the longitudinal section of ingot: A – with acoustic treatment; B – without acoustic treatment

nych odbitkach Baumanna zmierzono szerokość środkowych (przyosiowych) obszarów, w których występuje segregacja siarki. Stwierdzono, że szerokość obszaru segregacji we wlewkach nadźwiękawianych zawierała się w zakresie 25÷28 mm, natomiast we wlewkach referencyjnych wynosiła ok. 35 mm. Na tej podstawie stwierdzono, że we wlewkach ze stali niskowęglowej poddanego działaniu ultradźwięków podczas krzepnięcia, segregacja siarki w środkowym obszarze występuje na większej odległości niż we wlewkach referencyjnych.

We wlewkach ze stali wysokowęglowej (0,60%C; 0,014%S) nie poddanemu obróbce akustycznej, na przekrojach wzdłużnych części środkowej i górnej wlewka, zaobserwowano segregację typu V, natomiast we wlewkach poddanemu obróbce akustycznej rozkład siarki był znacznie bardziej równomierny (rys. 3).

Makrostruktura wlewków ze stali wysokowęglowej, podobnie jak średniowęglowej, jest dendrytyczna, co wykazały także odbitki Baumanna. Widoczne na obrazach makrostruktury obszary segregacyjne odpowiadają segregacji siarki na odbitkach Baumanna. Porównując obrazy makrostruktury badanych stali, najbardziej widoczne efekty obróbki ultradźwiękowej zaobserwowano we wlewkach ze stali wysokowęglowej. We wlewkach referencyjnych występuje segregacja środkowa V, natomiast we wlewkach nadźwiękawianych segregacja środkowa została zmniejszona. Najbardziej widoczne tego efekty zaobserwowano w górnej części wlewka.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników uzyskanych z odbitek Baumanna stwierdzono, że obróbka ciekłej stali ultradźwiękami spowodowała, w większości przypadków, bardziej równomierny rozkład siarki w objętości wlewka.

3.2. MAKROSTRUKTURA PRÓBEK PO GŁĘBOKIM TRAWIENIU

Przeprowadzone badania i obliczenia makrostruktury pozwoliły na stwierdzenie, że:

- wielkość strefy kryształów zamrożonych uległa zmniejszeniu we wlewkach obrabianych akustycznie;
- wielkość strefy kryształów słupkowych we wlewkach stali węglowej poddanych obróbce akustycznej jest mniejsza niż we wlewkach referencyjnych. Najlepszy efekt zmniejszenia wielkości tej niekorzystnej strefy zaobserwowano we wlewkach stali wysokowęglowej poddanej obróbce akustycznej (średnio 34 mm dla wlewków poddanych obróbce akustycznej i 39 mm dla wlewków referencyjnych)

- korzystny wpływ obróbki akustycznej na wielkość strefy kryształów równoosiowych i udział tej strefy zaobserwowano, podobnie jak dla strefy kryształów słupkowych, przede wszystkim we wlewkach stali wysokowęglowej. Udział strefy kryształów równoosiowych wzrósł w każdym przypadku o 2 do 5%.

3.3. TWARDOŚĆ

Pomiary twardości HV10 wykazały, że na przekroju wlewka poddanemu obróbce akustycznej i wlewka odniesienia dla poszczególnych gatunków stali twardość jest zbliżona. Rozkład twardości wzdłuż promienia wlewków jest równomierny. Uzyskane wyniki twardości stali pozwoliły na stwierdzenie, że zastosowana obróbka ultradźwiękowa silniej oddziaływała na krystalizującą stal w obszarze z którego pobierano tarcze oznaczone nr 3 (ok. ¼ wysokości wlewka). W tym obszarze zaobserwowano nieznaczny wzrost twardości dla większości analizowanych przypadków, głównie w połowie promienia wlewka oraz w obszarze przypowierzchniowym. Największy wzrost twardości o 13% w stosunku do stali nie obrabianej ultradźwiękowo zaobserwowano dla próbek stali austenitycznej. W przypadku stali niskowęglowej, wzrost twardości sięgał 7%, dla stali średniowęglowej 2% a wysokowęglowej ponad 5%.

4. PODSUMOWANIE

Wiele prowadzonych w ostatnich dziesięcioleciach badań metalurgicznych miało na celu uzyskanie stali o jak najlepszej jakości. Wyniki tych prac mają dziś odzwierciedlenie w wielu procesach obróbki pozapiecowej, których celem jest uzyskanie stali ujednorodnionej, o jak najmniejszej zawartości zanieczyszczeń. W praktyce metalurgicznej brak technologii pozwalającej na kształtowanie jakości wlewków odlewanych konwencjonalnie do wlewnic. Przedstawione w artykule wyniki badań wskazują na możliwości wykorzystania technik akustycznych w końcowym etapie produkcji stali.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że obróbka akustyczna krzepnącej stali we wlewnicy, prowadzona za pomocą zanurzonego w stali falowodu pozwala na poprawę jednorodności chemicznej wlewka stalowego, wzrost udziału kryształów równoosiowych w jego objętości oraz wzrost twardości stali.

LITERATURA

1. Abramov O.V., High-Intensity Ultrasonics: Theory and Industrial Applications. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1998
2. Śliwiński A., Ultradźwięki i ich zastosowanie. WNT, Warszawa, 2001.
3. Orłowicz A., Krystalizacja metali i stopów. PAN, Katowice, 2000
4. Komarov S.V. et al., ISIJ International, 45 (2005) 1765–1782
5. Kasprzyk W., Nowacki K., IJoT, 31 (2010) 1, 97-102
6. Nowacki K., Kania H., Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 7 (2009) 470-473
7. www.ferroperm.com