

Harald KANIA

Instytut Metalurgii Żelaza

Krzysztof NOWACKI

Politechnika Śląska

POPRAWA JAKOŚCI WEWNĘTRZNEJ WLEWKA KONWENCJONALNEGO METODĄ OBRÓBK AKUSTYCZNEJ

Bezpośrednim efektem oddziaływania energii akustycznej podczas krzepnięcia wlewka we wlewnicy jest zmiana struktury metalu. Dotychczasowe badania i eksperymenty przeprowadzone w ramach współpracy naukowej pomiędzy Politechniką Śląską w Katowicach i Instytutem Metalurgii Żelaza w Gliwicach nad zastosowaniem technologii obróbki akustycznej do poprawy jakości wewnętrznej wlewków ze stali wysokowęglowej dały pozytywne wyniki. W strefie oddziaływania fali akustycznej we wlewkach, uzyskano rozdrobienie struktury stali i równomierny rozkład pierwiastków, a także wzrost twardości, która może być postrzegana jako wskaźnik obrabialności akustycznej stali. W celu określenia przydatności opracowanej technologii w warunkach przemysłowych, zawiązano konsorcjum składające się z partnerów polskich i niemieckich. Liderem konsorcjum jest grupa przemysłowa Alchemia S.A. (Huta Batory), ponadto w jego składzie znajdują się następujący partnerzy: Politechnika Śląska Katowice, Instytut Metalurgii Żelaza z Gliwic, TU Bergakademie Freiberg, BGH Edelmetall Freiberg GmbH oraz wrocławska firma PBP OPTEL S.A. Założonym efektem prowadzonych badań jest redukcja segregacji pierwiastków w objętości wlewka konwencjonalnego oraz zwiększenie udziału strefy kryształów równoosiowych za pomocą fali akustycznej dostarczonej bezpośrednio do objętości ciekłego, krzepnącego wlewka, a poprzez to poprawa właściwości fizycznych przerobionego plastycznie materiału.

Słowa kluczowe: obróbka akustyczna, wlewek konwencjonalny, segregacja pierwiastków, struktura dendrytyczna

IMPROVING THE INTERNAL HOMOGENEITY OF THE CONVENTIONAL INGOT USING ACOUSTIC TREATMENT METHOD

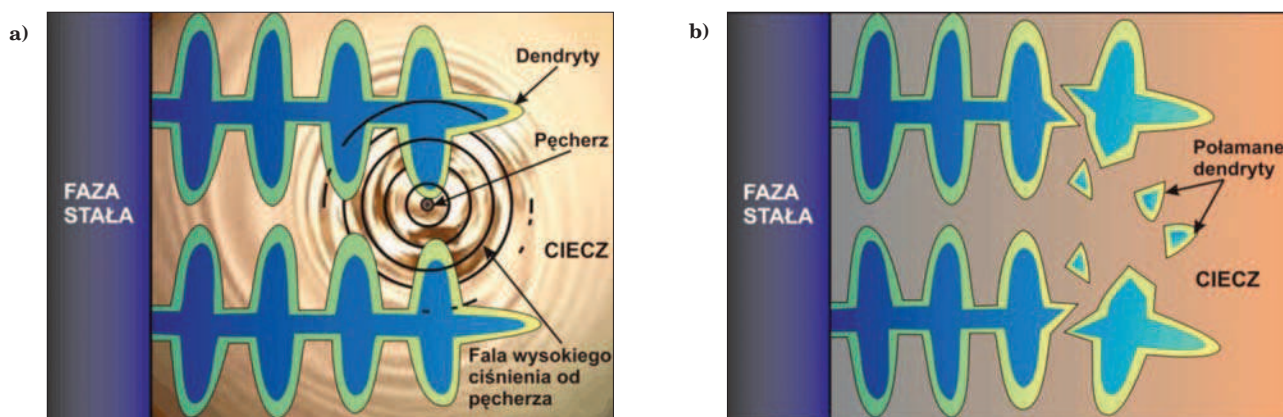
The direct effect of exposure to acoustic energy during the solidification of ingot in a mould is the change in metal structure. The research and experiments carried out so far as a part of scientific cooperation on application of the acoustic treatment technology for improving the internal homogeneity of high-carbon steel ingots between the Silesian University of Technology in Katowice and the Institute for Ferrous Metallurgy in Gliwice yielded positive results. Within the acoustic wave influence area in the ingot, the refinement of steel structure and uniform distribution of elements as well as increase in hardness, which can be perceived as the steel acoustic treatability index, were obtained. To determine the applicability of the developed technology under industrial conditions, the consortium consisting of Polish and German partners has been set up. The leader of the consortium is the industrial group Alchemia S.A. (Huta Batory). In addition, it comprises the following partners: Silesian University of Technology in Katowice, Institute for Ferrous Metallurgy in Gliwice, TU Bergakademie Freiberg, BGH Edelmetall Freiberg GmbH and PBP OPTEL S.A. in Wrocław. The assumed effect of conducted research is the reduction in segregation of elements within the volume of conventional ingot and increase in the share of the area of equiaxed crystals by means of the acoustic wave supplied directly to the volume of solidifying liquid ingot, and thus the improvement in physical properties of plastically worked material.

Key words: acoustic treatment, conventional ingot, segregation of elements, dendritic structure

1. WPROWADZENIE

Przemysł metalurgiczny, którego częścią jest przemysł stalowy, od lat poszukuje rozwiązań technologicznych umożliwiających ujednorodnienie struktury wlewków. Rozwiązania te ukierunkowane są na poprawę jakości rozumianej jako ujednorodnienie składu chemicznego w objętości wlewka, jego struktury pierwotnej oraz eliminację wad wewnętrznych i powierzchniowych. Rezultatem tych poszukiwań był intensywny rozwój technologii, szczególnie w obszarze obróbki pozapiecowej i ciągłego odlewania stali. Obróbka pozapie-

cowa umożliwia kontrolę i regulację składu chemicznego oraz ograniczenie ilości wtrąceń niemetalicznych, natomiast odlewanie ciągle pozwoliło na zmniejszenie wad powierzchniowych i wewnętrznych. Poprawę jednorodności stali odlewanej w procesie ciągłym uzyskuje się przez stosowanie mieszadeł elektromagnetycznych (M-EMS, S-EMS, F-EMS) lub łagodnego dogniatania wlewka (Soft Reduction). Technologia ciągłego odlewania została upowszechniona z powodu dużej wydajności urządzeń, możliwości mechanizacji i automatyzacji, redukcji kosztów jednostkowych oraz poprawy warunków pracy. Możliwość oddziaływania na strukturę krystal-



Rys. 1. Oddziaływanie pulsującego pęcherza kawitacyjnego na tworzące się struktury kolumnowe (dendryty); (a) – oddziaływanie ciśnienia promieniowania, (b) – kruszone ramiona kryształów kolumnowych [5]

Fig. 1. Effect of pulsating cavitation bubble on formation of columnar structures (dendrites); (a) – effect of radiation pressure, (b) – crushed arms of columnar crystals [5]

zacji przy jednoczesnej redukcji kosztów spowodowała, że obecnie ponad 90% stali odlewane jest w sposób ciągły.

Posiadany park technologiczny oraz zapotrzebowanie rynku, powodują jednak, że wciąż kilka procent stali odlewane jest w sposób tradycyjny, do wlewnic. Technologia ta stosowana jest zazwyczaj w odniesieniu do dużych wlewków kuziennych bądź jednostkowych zamówień stali specjalnych. Technologia ta, choć udoskonalana na przestrzeni lat, poprzez np. dostosowanie wymiarów wlewnic (ich smukłości) dla określonych grup gatunkowych stali czy też stosowanie wyłożenia ogniotrwałego o lepszej izolacyjności cieplnej, nie przewiduje dodatkowych działań mających na celu ujednorodnienie odlewanych stopów żelaza. Funkcję mieszadeł EMS, w przypadku odlewania wlewków konwencjonalnych, może zastąpić obróbka ultradźwiękowa, zwana również obróbką akustyczną. Technologia ta, polega na oddziaływaniu na krystalizujący stop żelaza ultradźwiękową falą akustyczną o określonej częstotliwości, wywołując w ciekłym metalu zjawisko kawitacji, stanowiące źródło lokalnych fal udarowych i powstawania ruchów wirowych wewnątrz krzepnącej stali. Powoduje to kruszenie narastających ramion dendrytów (Rys. 1), łamanie powstałych mostów i ujednorodnienie termiczne ciekłego metalu we wlewnicy, a w konsekwencji poprawę jakości wlewka stalowego postaci rozdrobnienia struktury [1–4].

Badania nad zastosowaniem obróbki akustycznej ciekłych stopów żelaza, prowadzone w drugiej połowie XX wieku potwierdziły możliwość zastosowania obróbki akustycznej do tych stopów. Jednym z problemów był jednak poziom ówczesnej techniki, wymuszający stosowanie przetworników magnetostrykcyjnych, mających relatywnie niską, sięgającą 40%, sprawność. Między innymi z tego powodu technologia obróbki akustycznej nie znalazła ówczesnie zastosowania w praktyce przemysłowej. Drugą istotną barierę stanowiły duże gabaryty przetworników magnetostrykcyjnych oraz konieczność ich chłodzenia. Rozwój inżynierii materiałowej, a szczególnie materiałów ceramicznych, umożliwia konstrukcję przetworników ultradźwiękowych, w których elementy magnetostrykcyjne zastępuje się ceramiką piezoelektryczną, charakteryzującą się znacznie większą sprawnością (>80%) oraz wyższą temperaturą Curie [6–8].

2. BADANIA WŁASNE

Aktualnie, jak wskazują nieliczne publikacje naukowe, badania z zakresu obróbki akustycznej ciekłej stali, swym zasięgiem obejmują jedynie fazę laboratoryjną pozwalającą na obróbkę maksymalnie kilku kilogramów ciekłej stali. Postęp w dziedzinie materiałów funkcjonalnych pozwolił na podjęcie badań nad możliwością zastosowania obróbki akustycznej do modyfikacji struktury wlewków krzepnących stopów żelaza z użyciem piezoceramicznej głowicy mocy w skali półprzemysłowej. Wyniki przeprowadzonych badań w Spółce Magnezy Baildon pod kierunkiem pracowników Politechniki Śląskiej i Instytutu Metalurgii Żelaza, wskazują na możliwość stosowania obróbki akustycznej ciekłej stali w warunkach półprzemysłowych [9].

Próby półprzemysłowego zastosowania obróbki akustycznej prowadzono na stanowisku badawczym składającego się z generatora mocy wyposażonego w analizator częstotliwościowy oraz zaizolowanej termicznie głowicy mocy (Rys. 2). Część obciążająca oraz promieniująca głowicy mocy zbudowane zostały ze stali, a elementem drgającym był stos płytek piezoceramicznych. Część promieniująca wyposażona była w stalowy falowód oraz wymienny rezonator, zanurzany w ciekłej stali od strony głowy wlewka.

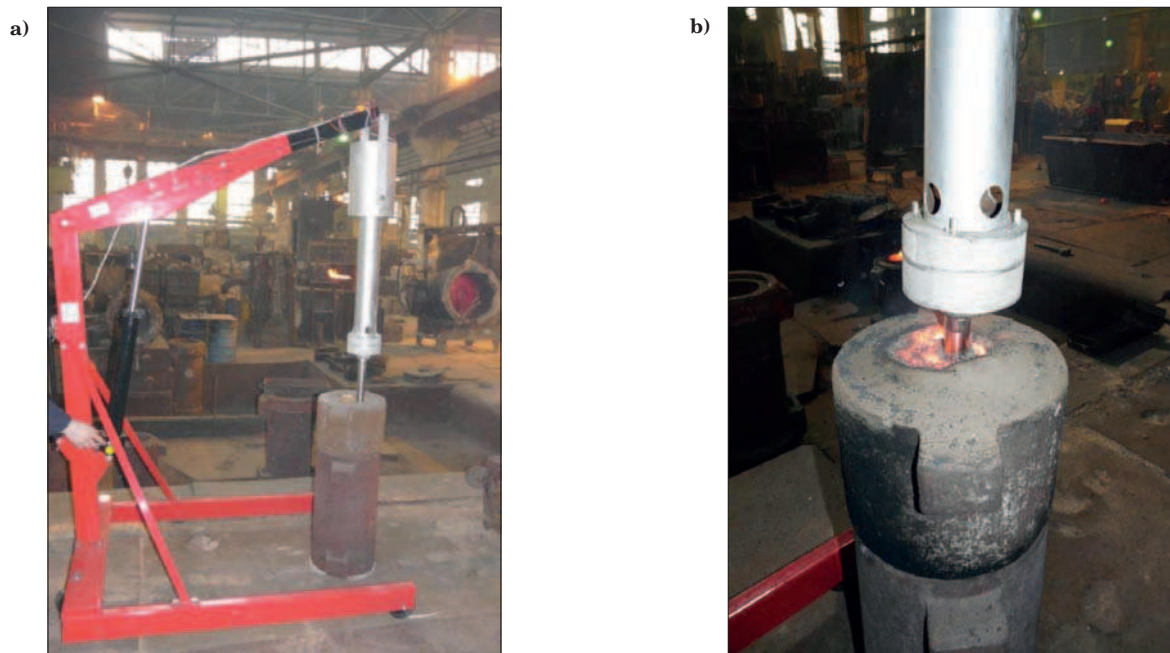
3. METODYKA BADAŃ

Wytopy stali prowadzono w elektrycznym piecu indukcyjnym. W ramach doświadczeń przemysłowych odlano i obrabiano akustycznie wlewki ze stali niskowęglowej, wysokowęglowej oraz wysokostopowej (autenitycznej).

Badania prowadzono na wlewkach okrągłych o masie 130 kg. Rejestrowana moc czynna na wyjściu z generatora wynosiła 200 W, częstotliwość fali akustycznej 17,5÷18,5 kHz, a czas obróbki akustycznej 69÷300 s.

Na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych i analizy porównawczej z wlewkami referencyjnymi stwierdzono, że:

- stal obrabiana akustycznie charakteryzowała się bardziej równomiernym rozmieszczeniem siarczków w objętości wlewka oraz że obróbka akustyczna



Rys. 2. Stanowisko do obróbki akustycznej ciekłej stali o masie ok. 130 kg we wlewnicy: (a) – widok ogólny, (b) – rezonator zanurzony w ciekłej stali

Fig. 2. Work-stand for acoustic treatment of liquid steel of approx. 130 kg in a mould:(a) – general view, (b) – resonator submerged in liquid steel

wpływa na zmniejszenie lub zanik występowania segregacji typu V,

- we wlewkach stali węglowej poddanych obróbce akustycznej zaobserwowano zwiększenie udziału strefy kryształów równoosiowych,
- obróbka akustyczna wlewków spowodowała rozdrobnienie struktury stali austenitycznej oraz zanik struktury dendrytycznej w części środkowej wlewków stali wysokowęglowej,
- wzrosła twardość i gęstość stali obrabianej akustycznie.

4. PERSPEKTYWY STOSOWANIA OBRÓBK AKUSTYCZNEJ W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

Udane doświadczenia wykonane w skali półprzemysłowej pozwoliły na podjęcie działań zmierzających do zaimplementowania niniejszej technologii do warunków przemysłowych.

Projektowanie takiej technologii wymaga jednak prowadzenia dalszych badań w zakresie doboru różnych wariantów konstrukcyjnych wykorzystywanej aparatury oraz dokładnego określenia parametrów pola akustycznego i prowadzenia procesu w zastosowaniu do różnych grup gatunkowych stali.

Podstawowym warunkiem, który należy uwzględnić przy budowie stanowiska do nadźwiękowania ciekłej stali na skalę przemysłową, jest wielkość mocy przekazywanej z generatora do głowicy. Projektowanie mocy głowicy piezoceramicznej związane jest z liczbą warstw i rodzajem stosowanej piezoceramiki. Dalsze badania powinny uwzględniać możliwość konstrukcji głowicy z wykorzystaniem stosu kilku piezoceramik w głowicy pojedynczej, a w przypadku nadźwiękowania większej masy ciekłej stali, na stosach piezoceramiki w tzw. gło-

wicy mozaikowej, zbudowanej z kilku stosów piezoceramiki.

Innym rozwiązaniem technologicznym, szczególnie dedykowanym dla wlewków o dużym przekroju (np. kuziennych), może być obróbka akustyczna prowadzona przez kilka głowic jednocześnie wprowadzonych do głowy wlewka. Istotnym problemem badawczym w tym zakresie jest określenie liczby głowic oraz punktów zanurzenia falowodów (rezonatorów), tak aby miała miejsce synergia dostarczonej energii. Osobnym problemem badawczym jest określenie częstotliwości rezonansowej takiego układu głowic piezoelektrycznych. Możliwe jest zastosowanie wariantu o częstotliwości takiej samej dla wszystkich głowic jak i różniacej się w określonym zakresie.

Przeprowadzone badania półprzemysłowe, potwierdziły założenia, że skuteczna izolacja cieplna piezoceramicznej głowicy mocy pozwoli na wyeliminowanie negatywnego wpływu promieniowania cieplnego krzepnącej stali. Zastosowane rozwiązanie dotyczyło wlewków o masie ok. 130 kg. W przypadku wlewków o większej masie, negatywny wpływ promieniowania termicznego może się spotęgować. Dlatego kolejnym ważnym obszarem badawczym jest określenie możliwości zastosowania falowodu zagiętego, który umożliwi umiejscowienie głowicy piezoceramicznej poza osią wlewnicy oraz zaprojektowanie skutecznego układu chłodzenia głowicy mocy.

Najważniejszym obszarem badawczym, jest jednak konieczność określenia zakresów parametrów procesu obróbki akustycznej dla poszczególnych grup gatunkowych stali. Wyniki prowadzonych badań o porównywalnych parametrach procesu obróbki akustycznej wskazują na znaczne różnice w osiągniętych efektach dla poszczególnych stali. Koniecznym jest dokładne określenie mocy, czasu, amplitudy i częstotliwości fali akustycznej dla poszczególnych grup gatunkowych oraz masy ciekłej stali i kształtu wlewnicy, z uwzględ-

nieniem temperatury odlewania. Określenie wpływu parametrów akustycznych na skuteczność obróbki akustycznej pozwoli na precyzyjne prowadzenie procesu, którego efektem końcowym będzie rozdrobnienie struktury oraz ujednorodnienie składu chemicznego wlewka stalowego.

5. PLANOWANE BADANIA PRZEMYSŁOWE

Perspektywa możliwości zastosowania obróbki akustycznej w procesie produkcji wlewków stalowych, doprowadziła do utworzenia międzynarodowego konsorcjum naukowo-przemysłowego w ramach którego kontynuowane będą dalsze badania. Skład konsorcjum naukowo-przemysłowego tworzą następujący partnerzy:

- Politechnika Śląska w Katowicach,
- Instytut Metalurgii Żelaza,
- TU Bergakademie Freiberg,
- Firma PBP OPTEL Sp. z o.o.,
- Alchemia S.A. (Huta Batory),
- BGH Edelstahl Freital GmbH.

Przewidziano, że realizacja dalszych badań odbywać się będzie w trzech etapach:

- badań laboratoryjnych,
- badań przemysłowych,
- badań właściwości stali po odlaniu i przeróbce plastycznej.

Celem badań laboratoryjnych na modelach fizycznych i numerycznych jest dobór:

- rozwiązań konstrukcyjnych głowicy mocy,
- najlepszych parametrów obróbki akustycznej dla wlewków przemysłowych.

Badania fizyczne i numeryczne zostaną prowadzone na zbudowanym modelu numerycznym opartym o równania falowe. Budowa modelu wymaga poznania szeregu parametrów fizycznych ciekłej stali, z których najważniejszym jest prędkość propagacji w niej fali akustycznej.

Analizy prowadzone będą pod kątem mocy przekazywanej do cieczy oraz zasięgu oddziaływania fali akustycznej w objętości wlewka. Uzyskane wyniki pozwolą na przeprowadzenie analizy porównawczej zaprojektowanych, niżej wymienionych rozwiązań konstrukcyjnych, oraz wybór najbardziej optymalnego rozwiązania, które zostanie zastosowane podczas badań przemysłowych.

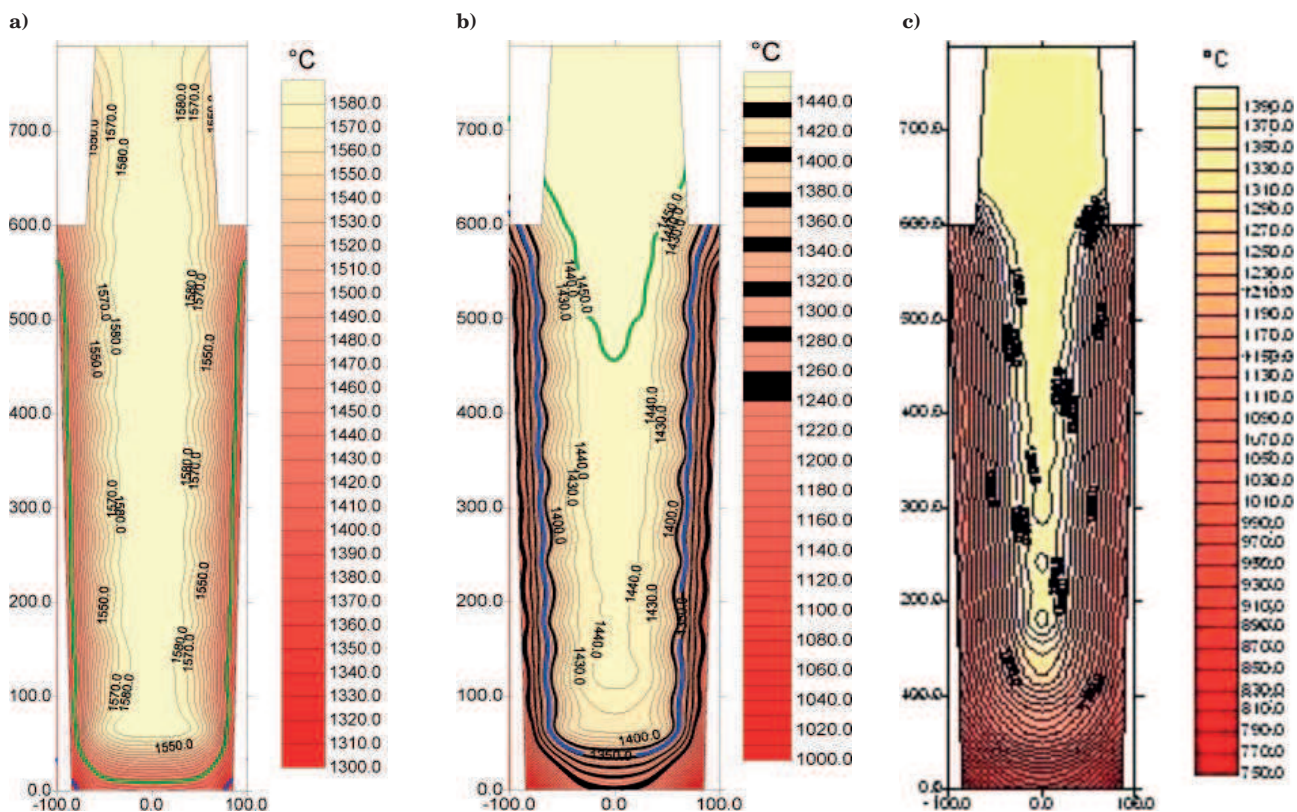
Badania obejmowały będą możliwość zastosowania zarówno jednej jak i jednocześnie kilku głowic mocy, pracujących w wariantach:

- tej samej częstotliwości rezonansowej (ok. 20 kHz),
- różnych częstotliwościach rezonansowych.

Zbadane zostaną warianty rozmieszczenia głowic mocy:

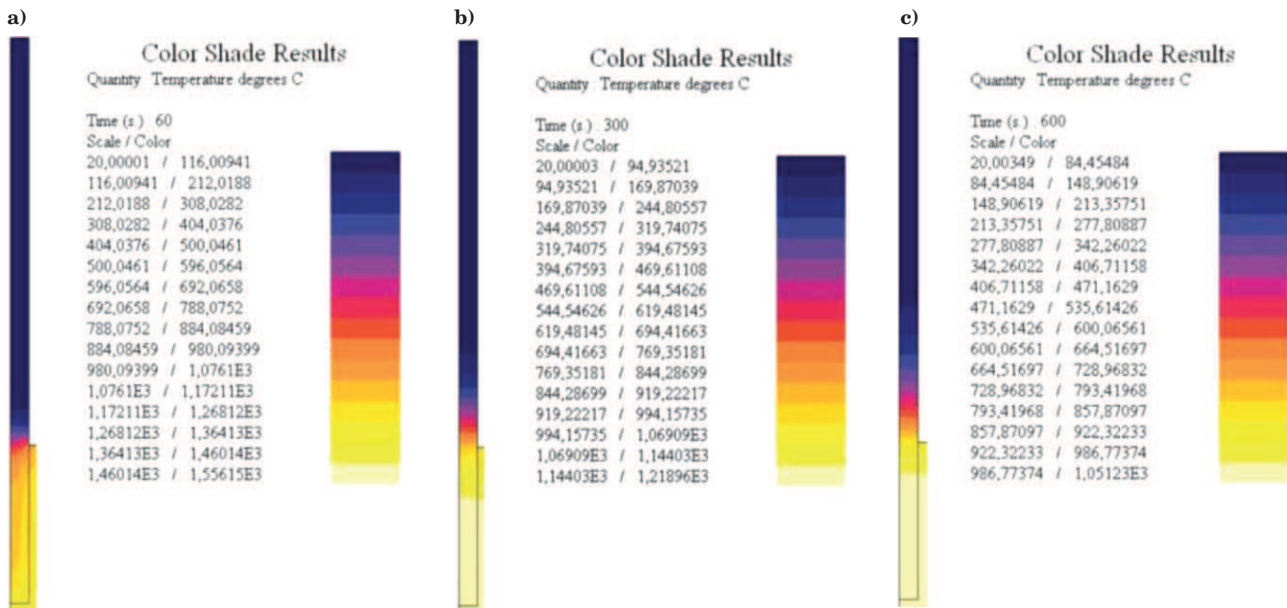
- wzdłuż osi wlewnicy,
- umiejscowionych pod określonymi kątami, celem skupienia dostarczonej energii.

W ramach badań przemysłowych planuje się realizację programu badawczego dla dwóch gatunków stali specjalnych odlewanych jednostkowo do wlewnic o masie stali ok. 1 t.



Rys. 3. Rozkład temperatur we wlewkę stali wysokowęglowej o masie 130 kg przedstawiający przyrost fazy stałej w czasie: a – 1 min., b – 7 min., c – 18 min.)

Fig. 3. Distribution of temperatures in 130 kg high-carbon steel ingot showing the solid phase growth during: a – 1 min, b – 7 min, c – 18 min)



Rys. 4. Rozkład temperatur w falowodzie ze stali żaroodpornej zanurzonym w krzepnącym wlewk o masie ok 130 kg: a) 60 s, b) 300 s, c) 600 s

Fig. 4. Distribution of temperatures in heat-resisting steel waveguide submerged in solidifying ingot of approx. 130 kg: a) 60 s, b) 300 s, c) 600 s

Badania prowadzone będą na zaprojektowanych i zbudowanych stanowiskach przemysłowych.

W ramach realizacji zadania przewiduje się przeprowadzenie wizji lokalnej hali odlewniczej Huty Batory S.A. oraz BGH w celu rozplanowania stanowiska badawczego do obróbki akustycznej wlewków wraz z niezbędnymi osłonami termicznymi, pomiarów warunków termicznych panujących na halach odlewniczych przy użyciu kamery termowizyjnej.

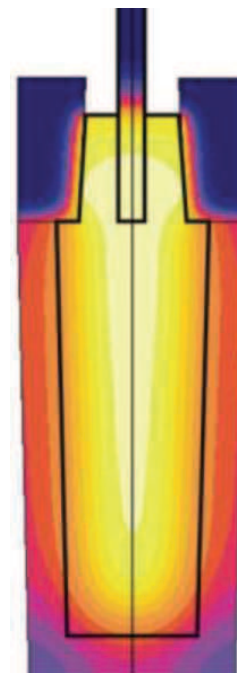
Pomiary termowizyjne uzupełnione zostaną pomiarami temperatury ciekłej stali w głowie wlewka podczas jego krzepnięcia przy użyciu termopar zanurzeniowych oraz symulacjami numerycznymi rozkładu temperatury wewnątrz krzepnącego wlewka z uwzględnieniem zanurzonego do głębokości nadstawki falowodu oraz symulacje numeryczne nagrzewania falowodu zanurzonego w głowie krzepnącego wlewka. Przykładowe wyniki symulacji dla wlewka 130 kg przedstawiono na rys. 3 i 4.

Obróbka akustyczna stali gat. 40NiCrMo6 prowadzona będzie w Hucie Batory w Chorzowie, natomiast stali gat. S6-5-2 w BGH Edelmetall Freital GmbH.

Badania prowadzone będą na wlewnicach przemysłowych. Stal topiona będzie w elektrycznych piecach łukowych a następnie odlewana syfonowo do wlewnic. Wzdłuż osi pionowej wlewnicy, umiejscowiona zostanie ultradźwiękowa głowica mocy lub zestaw głowic stanowiących źródło fal akustycznych. Po zalaniu wlewnicy ciekłą stalą i jednoczesnym zanurzeniu falowodu/ów głowicy prowadzona będzie obróbka akustyczna zgodnie z wynikami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych. Schemat jednej głowicy zanurzonej w głowie wlewka przedstawiono na rys. 5.

Z wlewków poddanych obróbce akustycznej i wlewków odniesienia pobrane zostaną próbki, które poddane zostaną w BGH Freital GmbH przekute i poddane obróbce plastycznej (walcowaniu).

W ramach badań właściwości stali planuje się badania:



Rys. 5. Umieszczenie falowodu we wlewnicy

Fig. 5. Position of waveguide in the mould

- makrostruktury wlewków,
- segregacji pierwiastków tzw. metodą Baumanna oraz próbą iskrową,
- twardości,
- właściwości plastycznych.

Zakres oceny jakości wlewków obrabianych akustycznie i wlewków odniesienia będzie obejmował pomiary i klasyfikację wad wewnętrznych (segregacja środkowa, pustka środkowa, rzadzizna, mikropęknięcia przypowierzchniowe, pęknięcia w obszarze kryształów kolumnowych, udział kryształów równoosiowych, symetria struktury krzepnięcia).

Na podstawie wyników badań zostanie wykonana ocena jakości wlewków odlewanych w standartowych warunkach (bez UD) i w warunkach zmodyfikowanych (z UD). Na tej podstawie zostaną również sporządzone korelacje pomiędzy parametrami nadźwiękawiania a jakością wlewków. Ocenie poddany zostanie również efekt wpływu ww. procesu na charakterystyczne cechy makro i mikrostruktury wlewków, w tym na morfologię i udział objętościowy poszczególnych typów dendrytów i ziaren austenitu pierwotnego.

6. PODSUMOWANIE

Propagacja fali ultradźwiękowej wywołuje takie zjawiska jak kawitacja, „wiatr akustyczny” oraz oddziaływanie ciśnienia promieniowania, które powodują przechłodzenie stężeniowe krzepnącej stali. Dotychczasowe badania wykazały, że na skutek dostarczenia do stali fal ultradźwiękowych o określonej mocy i częstotliwo-

ści, można uzyskać zmianę struktury krzepnącej stali, które są spowodowane procesami zachodzącymi w ciekło-stalej strefie dwufazowej, takimi jak powstawanie zarodków krystalizacji i mieszanie.

Obróbka akustyczna stali stanowi odpowiednik mieszania elektromagnetycznego w urządzeniu COS. Dlatego badając możliwość przemysłowej aplikacji tej technologii, do dalszych badań wyselekcjonowano gatunki stali standardowo nie odlewane na urządzeniach COS ze względu na problemy jakościowe jakie one powodują. Również odlewanie konwencjonalne – do wlewnic tych stali, nie zawsze gwarantuje uzyskanie dobrego jakościowo wlewka. Na obecnym etapie trudno ocenić czy spodziewany wzrost jakości wewnętrznej wlewków poddanych obróbce akustycznej zrekompensuje koszty jej stosowania.

Dotychczasowe eksperymenty przemysłowe prowadzone na wlewkach o masie 130 kg pozwalają na aplikację tej technologii na wlewki o masie co najmniej 1 t.

LITERATURA

1. Coulson A.: J. Inst. Metals, 1967, 95 (5), 159
2. Crum L., Prosperetti A.: J. Acoust. Soc. Am., 73, 1983, 121-127
3. Errata J.: J. Acoust. Soc. Am., 75 (6), 1984, 1910-1912
4. Holland Ch., Apfel R.: IEEE Transactions on Ultrasonic's, Ferroelectrics and Frequency Control, 36 (2), 1989, 204-208
5. Nowacki K.: Współczesne możliwości obróbki akustycznej, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
6. Abramov V.O.: High-Intensity Ultrasonics: Theory and Industrial Applications Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam 1998
7. Lis T., Nowacki K., Kania H.: Wykorzystanie zjawiska kawitacji w stali przeznaczonej do COS. Materiały konferencyjne „Ciągłe odlewanie stali”, Krynica 2004
8. Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowanie. WNT, Warszawa 2001
9. Nowacki K., Kania H. i inni: Kształtowanie struktury pierwotnej stali falą akustyczną” Projekt Rozwojowy nr R15 001 02