

Bogdan ZDONEK, Ireneusz SZYPUŁA

Instytut Metalurgii Żelaza

Stanisław BINEK, Józef KOWALSKI, Piotr DUDKIEWICZ

Celsa „Huta Ostrowiec” Sp. z o.o.

Mirosław KARBOWNICZEK

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Józef BARAŃSKI

Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach

## INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA W TECHNOLOGII PRODUKCJI WIELKOGABARYTOWYCH ODKUWEK Z ULTRACZYSTYCH STALI DLA URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH

*Przedstawiono trzy innowacyjne rozwiązania – rafinacji ciekłej stali we wlewnicy po odlaniu stali z zastosowaniem izotermicznej pokrywy i rafinacyjnej zasyпки, syfonowego odlewania stali przez kształtkę kierunkową w kanale wlotowym do wlewnicy, służące zmniejszeniu lub wyeliminowaniu egzogenicznych wtrąceń niemetalicznych, pochodzących z procesu odlewania stali oraz odlewanie wlewków w komorze próżniowej z kadzi z zamknięciem suwakowym. Dzięki zastosowaniu tych rozwiązań znacznej poprawie uległa czystość stali, osiągając poziom wynoszący 0,06% mierzony udziałem powierzchniowym wtrąceń niemetalicznych, wielkość wtrąceń – mierzoną średnicą równoważną – mniejszą niż 4 μm oraz wskaźnik K4, mniejszy niż 10. Stworzyły one realne szanse produkcji ciężkich odkuwek na wały turbin wiatrowych, wodnych i parowych o coraz większej mocy dla nowoczesnej energetyki.*

*Słowa kluczowe:* ultra czysta stal, wlewek do kucia, pokrywa izotermiczna, kształtka wirowa

## INNOVATIVE SOLUTIONS IN THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING LARGE-SIZE FORGINGS FROM ULTRA-CLEAN STEELS FOR POWER EQUIPMENT

*Three innovative solutions are presented: refining of liquid steel in an ingot mould after casting of steel using an isothermal cover and refining casting powder; uphill casting of steel through a swirl blade in inlet channel to a mould directional brick, which is used for reduction or elimination of exogenous non-metallic inclusions from the steel casting process; and casting of ingots in a vacuum chamber from a ladle with slide gate. The use of these solutions has resulted in significant improvement of steel purity, reaching the level of 0.06% as measured by surface fraction of non-metallic inclusions, size of inclusions – as measured by equivalent diameter – less than 4 μm, and K4 coefficient – less than 10. They have provided real chances of manufacturing heavy forgings for wind, water and steam turbine shafts with higher and higher power for the modern power industry.*

*Keywords:* ultra-clean steel, ingot for forging, isothermal cover, directional brick

### 1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem przemysłu energetycznego, rosną moce urządzeń energetycznych, a w nich wielkości i masy części wykonywanych z stalowych odkuwek (wałów, wirników itp.). Wały turbin wodnych stają się coraz większe i dodatkowo przeznaczone są do pracy w warunkach coraz niższych temperatur, dochodzących nawet do -40°C (obszar polarny). Rosną również gabaryty wałów turbin wodnych, parowych czy też gazowych. Stawia to przed producentami odkuwek coraz większe

wyzwania w zakresie odlewania coraz cięższych wlewków, ze stali o coraz większych wymaganiach jakościowych, a w szczególności o bardzo wysokiej czystości metalurgicznej. Oznacza to jak najmniejszą ilość gazów w stali, wtrąceń niemetalicznych oraz pierwiastków szkodliwych i niepożądanych. To z kolei zmusza przemysł hutniczy do ciągłego wprowadzania do technologii produkcji odkuwek nowoczesnych badań, opartych na symulacji matematycznej i numerycznej procesów cząstkowych i wprowadzania innowacyjnych rozwiązań w procesie technologicznym. Prężnie działający na

rynku odkuwek swobodnie kutych Zakład Wyrobów Kutek Celsa „Huta Ostrowiec” Sp. z o.o. w Ostrowcu Świętokrzyskim zmierzył się skutecznie z tymi problemami realizując projekt rozwojowo-badawczy w zakresie opracowania technologii produkcji wielkogabarytowych odkuwek ze stali ultra czystych dla przemysłu energetycznego.

## 2. TECHNOLOGIA PRODUKCJI WIELKOGABARYTOWYCH ODKUWEK

Zakład Wyrobów Kutek (ZWK) Celsa „Huta Ostrowiec” Sp. z o.o. w Ostrowcu Świętokrzyskim wytwarza odkuwki o masie od kilkuset kg do kilkudziesięciu ton, ze stali konstrukcyjnych węglowych, nisko i średniostopowych do szerokiego rodzaju specjalistycznych zastosowań, w tym głównie:

- w przemyśle energetycznym: wały napędowe turbin,
- okrętowym: wały korbowe monolityczne i składane do silników okrętowych,
- hutniczym: walce hutnicze,
- wydobywczym – pierścienie, tuleje, itp.

Na rysunku 1 przedstawiono technologiczny schemat produkcji w ZWK.

Proces technologiczny produkcji odkuwek obejmuje: wytapianie, rafinację pozapiecową, odgazowanie próżniowe i odlewanie wlewków do kucia; kucie swobodne wlewków na prasach hydraulicznych i obróbkę cieplną oraz mechaniczną odkuwek.

Stal wytapiana jest w nowoczesnym piecu elektrycznym łukowym (EAF) o pojemności 75 ton (poz. 2), następnie rafinowana wraz z korektą składu chemicznego w piecu kadziowym (poz. 3), odgazowana próżniowo i odlewana do wlewnic jako wlewki kuźnicze sposobem syfonowym (poz. 5a) lub „z góry” do wlewnicy umieszczonej w komorze próżniowej (poz. 5b). Masa odlanych wlewków wynosi od 3 do 130 t. Wlewki o masie większej niż pojemność pieca łukowego i kadzi (75 ton) odlewa się metodą zlewania dwóch wytopów z dwóch kadzi przy zastosowaniu pierwszej kadzi jako pośredniej do odlewania stali z drugiego wytopu. Wlewki te po zakrzepnięciu i „rozbrojeniu” z wlewnic przekazują się w stanie „gorącym” przy temperaturze powierzchni

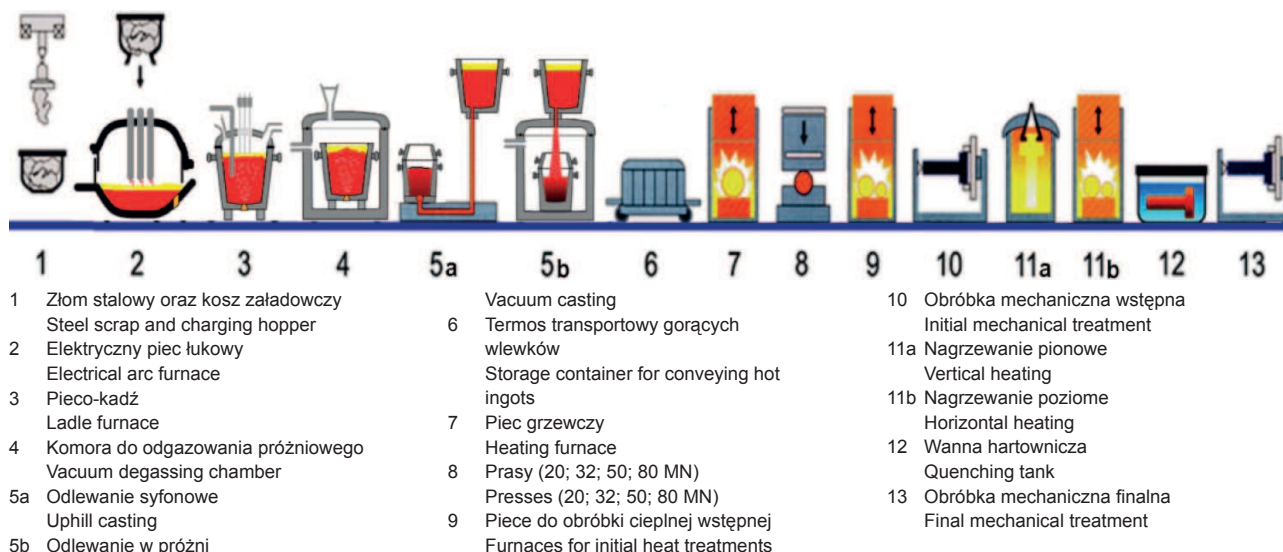
większej niż 690°C do prasowni, gdzie po dogrzaniu do wymaganej temperatury kucia, kuje się odpowiednio na jednej z czterech pras hydraulicznych, o sile nacisku 20, 32, 50 i 80 MN. Odkuwki obrabia się cieplnie w urządzeniach 11a, 11b i 12 a następnie poddaje obróbce mechanicznej przed wysyłką do odbiorców (poz. 13).

## 3. ZAŁOŻENIA JAKOŚCIOWE PRODUKCJI WLEWKÓW DO KUCIA

Jakość odkuwki, która musi spełniać wymagania urządzeń energetycznych zależy w głównej mierze od jakości odlanego wlewka, a ta z kolei od jakości stali w poszczególnych etapach procesu przygotowania ciekłej stali i odlewania wlewka kuźniczego. Ciekła stal na wlewki kuźnicze, w miarę wzrostu masy odlanego wlewka, musi spełniać coraz surowsze wymagania pod względem zawartości fosforu, siarki i pierwiastków resztkowych (Cu, Sn, Pb, As, Sb); gazów (O, N, H) oraz wielkości i zawartości wtrąceń niemetalicznych. Niskie zawartości pierwiastków resztkowych zapewnia się poprzez dobór odpowiedniej jakości wsadu (surówka wielkopiecowa, żelazo z redukcji bezpośredniej rud, złom konwertorowy, itp.), natomiast zawartości pozostałych pierwiastków osiąga się w procesie technologicznym wytapiania (odfosforowanie, odsiarczanie, odtlenianie, rafinacja, zapobieganie wtórnemu utlenianiu, odgazowanie próżniowe), rafinacji pozapiecowej i odlewania wlewków.

Zawartości fosforu i siarki w stali, zgodnie z najostrzejszymi wymaganiami, osiąga się obecnie na poziomie odpowiednio 0,005 i 0,002%. Zawartości tlenu w stali, mierzone zawartością tlenu całkowitego (suma tlenu rozpuszczonego w stali oraz związanego w postaci wtrąceń niemetalicznych), uzyskuje się na poziomie mniejszym niż 15 ppm, a w szczególnych przypadkach – nawet i mniejszym niż 10 ppm. Odgazowanie stali w próżni zapewnia uzyskanie wodoru w ciekłej stali przed odlewaniem na poziomie mniejszym niż 0,8 ppm.

Generalnie uzyskuje się również bardzo małą zawartość wtrąceń niemetalicznych w stali, mierzoną udziałem



Rys. 1. Schemat produkcyjny w Zakładzie Wyrobów Kutek

Fig. 1. Manufacturing diagram at the Forged Products Plant (Zakład Wyrobów Kutek)

łem powierzchniowym wtrąceń i wynosi ona mniej niż 0,10% przy średnicy równoważnej mniejszej niż 7  $\mu\text{m}$ . Krytycznym obecnie parametrem jest obecność w stali pojedynczych wtrąceń niemetalicznych w skupiskach, występujących rzadko, jednakże wykrywalnych w odkuwkach za pomocą rutynowych badań ultradźwiękowych. Badania tych wtrąceń za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect F wyposażonego w detektor EDS wykazały, że są to skupiska  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , wtrącenia spinelowe typu  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz wtrącenia złożone, pochodzące z zasypek, głównie smarującej.

Występowaniu tego zjawiska postanowiono przeciwdziałać realizując projekt rozwojowo – badawczy z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Przedmiotem projektu były odkuwki wałów turbin urządzeń energetycznych ze stali konstrukcyjnych niskostopowych, których głównym reprezentantem jest gatunek 34CrNiMo6, o następującym składzie chemicznym, w % masy: C –  $0,43 \pm 0,38$ ; Mn –  $0,60 \pm 0,70$ ; Si –  $0,15 \pm 0,25$ ; P – max. 0,007; S – max. 0,005; Cr –  $1,55 \pm 1,70$ ; Ni –  $1,55 \pm 1,70$ ; Cu – max. 0,10; Mo –  $0,22 \pm 0,30$ ; V –  $0,05 \pm 0,08$ ; Al – max. 0,02; Sb – max. 0,003; As – max. 0,01; Sn – max. 0,015; Ca – max. 0,005; O – max. 0,0015; N – max. 0,006; H – max. 0,00008.

#### 4. INNOWACJE TECHNOLOGICZNE

Biorąc pod uwagę, że krytycznym parametrem jakościowym wlewków kuziennych są wtrącenia egzogeniczne, zaproponowano innowacyjne rozwiązania technologiczne mające na celu zmniejszenie ich ilości. Problem ten dotyczy szczególnie wlewków o dużych rozmiarach. Dotychczasowa praktyka wskazuje, że wtrącenia tego typu powstają w procesie technologicznym, głównie w komorze próżniowej oraz podczas procesu odlewania wlewków, zarówno metodą syfonową jak i z góry. W warunkach przemysłowych zbadano wpływ zaproponowanych innowacyjnych rozwiązań technologicznych na czystość stali. Badaniami objęto technologie służące do poprawy rafinacji stali we wlewnicy oraz do złagodzenia burzliwego wpływu stali do wlewnicy przy odlewaniu syfonowym (powodującego wciąganie smarującej zasypki odlewniczej do objętości odlanej stali).

#### 4.1. RAFINACJA CIEKŁEJ STALI WE WLEWNICY

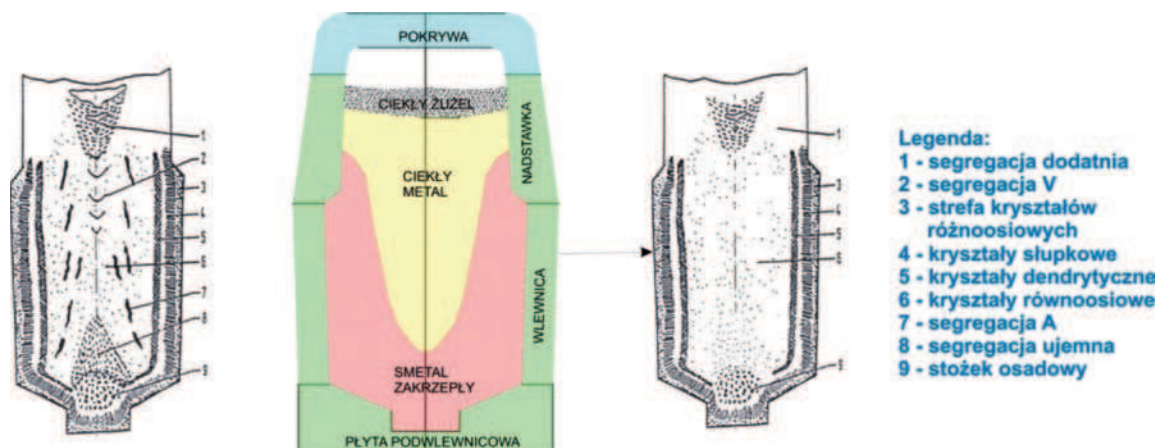
Zastosowano unikalny sposób, chroniony patentem [1], w którym do rafinacji stali po odlaniu zastosowano żużel rafinacyjny (kwaśny lub zasadowy), dobrany pod względem składu chemicznego i temperatury topienia, a zapewnienie warunków temperaturowych do procesu rafinacji uzyskano poprzez wykorzystanie jawnego ciepła krzepnięcia stali. W procesie tym ciekłą stal w nadstawce wlewnicy po odlaniu wlewka „dociepla” się po zakończeniu odlewania, nakładając na nią izotermiczną pokrywę, z wysoko ogniotrwałą izolacją cieplną na taki czas, aby wytworzony z zasypki żużel rafinacyjny utrzymać w stanie ciekłym do momentu zakończenia skurczu objętościowego metalu krzepnącego w korpusie wlewka. Czas ten wynosi około jednej trzeciej całkowitego czasu krzepnięcia wlewka. Badania symulacji numerycznej [2] wykazały, że wytrzymywanie pokrywy do tego momentu nie wpływa na wydłużenie całkowitego czasu krzepnięcia wlewka.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy układu docieplania głowy wlewka za pomocą izotermicznej pokrywy.

Z wyników badań ilościowych wtrąceń niemetalicznych wykonanych za pomocą mikroskopu optycznego z komputerowym analizatorem obrazu firmy Nikon wynika, że uzyskano bardzo dużą czystość stali w próbkach pobranych zarówno od strony głowy jak i stopy wlewka (o masie 50 t). Udział powierzchniowy wtrąceń nie przekraczał 0,06%; przy średnicy równoważnej wtrąceń mniejszej niż 4  $\mu\text{m}$ .

Z porównania wyników ilościowej analizy wtrąceń z zastosowaniem izotermicznej pokrywy i żużla rafinacyjnego oraz bez pokrywy, z zastosowaniem zasypki egzotermicznej wynika prawie dwukrotne zmniejszenie ilości wtrąceń i zmniejszenie o ponad 1/3 wielkości wtrąceń. Pokrywę docieplającą stosuje się od ponad 3 lat przy odlewaniu wlewków o masie już powyżej 15 ton, a obowiązkowo we wlewkach o masie większej niż 40 ton, aż do 130 ton.

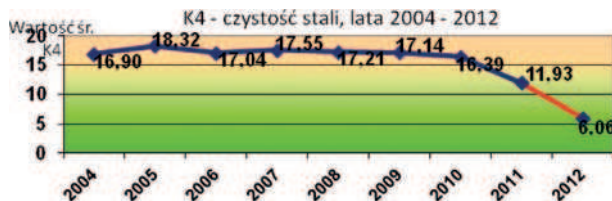
W trakcie dotychczasowego stosowania pokrywy izotermicznej przy odlewaniu wlewków zmniejszeniu uległ również wymagany, przez licznych odbiorców odkuwek, wskaźnik wtrąceń typu K4 wg DIN 50602 z 1985. Uzyskany poziom jest mniejszy niż 12, nawet dla najsurowszych wymagań przemysłu energetycznego. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian wskaź-



Rys. 2. Schemat ideowy układu docieplania głowy wlewka za pomocą izotermicznej pokrywy

Fig. 2. Schematic diagram of ingot head reheating system using isothermal cover

nika czystości stali – K4 w procesie produkcji wlewków kuźniczych z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych, w tym rafinacji stali we wlewnicy.



Rys. 3. Przebieg zmian wskaźnika czystości stali – K4  
Fig. 3. Changes in steel purity index – K4

#### 4.2. ODLEWANIE Z ZASTOSOWANIEM KSZTAŁTKI KIERUNKOWEJ

Szczegółowe badania zanieczyszczonych obszarów odkuwek, szczególnie od strony stopy wlewków wykazały występowanie nielicznych i niedużych egzogenicznych wtrąceń niemetalicznych, pochodzących prawie na pewno od zasyпки smarującej (zawierających pierwiastki K, Na, Cl). Zasyпка była zaciągana przy odlewaniu we wczesnym stadium, co powodowało „uwięzienie” wtrąceń w szybko krzepnącym metalu przy płycie podwlewnicowej i w dolnej części wlewnicy.

Przeciwdziałając temu zjawisku, należało głównie złagodzić zjawisko powstawania „fontanny” stali przy jej wpływniu do wlewnicy na początku odlewania.

Jak wynika z analizy literaturowej [3–5], do poprawy początkowych warunków napełniania stałą wlewnicy, zanim spali się torebka z zasypką smarującą, może służyć:

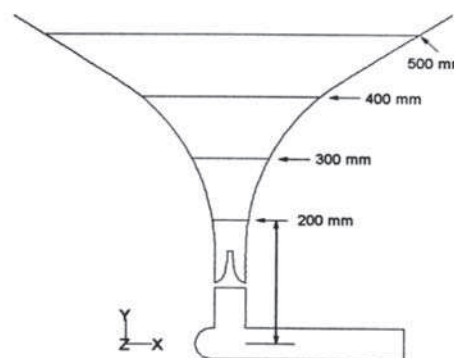
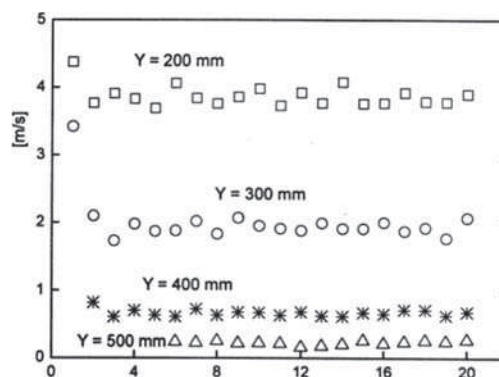
- wzmocnienie w wysoko ogniotrwałe i antyerozyjne kształtki w końcowym etapie wypływu stali do wlewnicy [3],
- zastosowanie wysoko ogniotrwałej i antyerozywnej wkładki wirowej, osadzonej w kanale wlotowym [4, 5] lub poziomym kanale zasilającym [5].

Na potrzeby niniejszego projektu wybrano wkładkę wirową umieszczoną w kanale wlotowym. Uznano, że będzie to korzystniejsze rozwiązanie dla syfonowego zasilania stali. Do jej wykonania zastosowano najlepsze dostępne na rynku wyroby ogniotrwałe.

Wkładka wirowa jest wykonana z materiału ogniotrwałego w postaci płaskownika, skrzyżowanego o pewien kąt wokół własnej osi [4]. Przy przepływie burzliwym przez płaszczyznę skrzyżowania zmienia się on w przepływ laminarny z prędkością styczną do płaszczyzny płaskownika, a jego prędkość osiowa gwałtownie spada w miarę rozwidlania się wylotu.

Jedną z najważniejszych funkcji wkładki wirowej jest utworzenie bardzo równomiernego rozkładu prędkości, co prowadzi do kontrolowanego przepływu, zapewniającego spokojne napełnianie ciekłą stalą wlewnicy, bez tworzenia „garbu” (fontanny). Z rysunku 4 można zauważyć, że przy tym samym czasie napełniania, maksymalne prędkości zmieniają się znacznie na różnych poziomach. Na odcinku 300 mm zmniejsza się ona z około 3,85 m/s, na poziomie 200 mm od kanałka poziomego zasilającego, do 0,22 m/s na poziomie 500 mm od tego kanałka [4]. Bardzo równy i stabilny przepływ ciekłej stali do wlewnicy następuje już po 6 sekundach.

Rozwiązanie innowacyjne objęte Zgłoszeniem Patentowym nr P. 399331 [6] polega na opracowaniu konstrukcji kształtki kierunkowej zabudowanej w górnej



Rys. 4. Maksymalna składowa pionowa prędkości w obszarze wlotu stali przy różnych czasach napełniania początkowego [4]

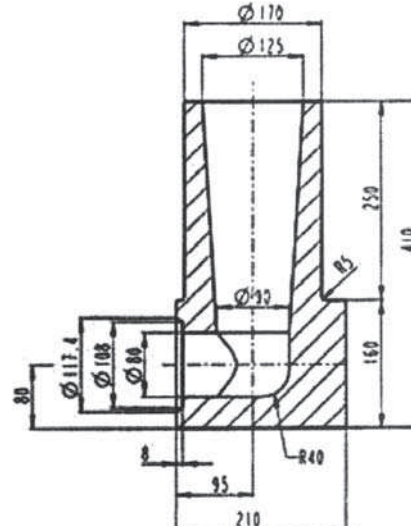
Fig. 4. Maximum vertical rate component within the area of steel inlet at different times of initial filling [4]

części kształtki kanałkowej wraz z mocującym ją pierścieniem oporowym.

Na rysunku 5 przedstawiono przekrój kształtki końcowej układu syfonowego do odlewania wlewków o masie większej niż 30 ton.

Na rysunku 6 przedstawiono widok kształtek końcowych z kształtkami kierunkowymi i pierścieniami oporowymi.

Na rysunku 7 przedstawiono widok kształtki wlewowej z zabudowaną w niej kształtką kierunkową w zestawie odlewniczym przed rozpoczęciem odlewania.



Rys. 5. Kształtka końcowa układu syfonowego  
Fig. 5. Final brick of the uphill casting system



Rys. 6. Widok kształtek końcowych z kształtkami wirowymi i pierścieniami oporowymi

Fig. 6. View of final bricks with directional bricks and stopper rings



Rys. 7. Widok kształtki wirowej w zestawie syfonym przed odlewaniem

Fig. 7. View of directional brick in the uphill casting set before casting

Podczas odlewania wlewka, od samego początku nie zauważono zachłapań, następował spokojny i równomierny wypływ stali do wlewnicy przez cały okres odlewania (rys. 8), przy czym wypływ ten był styczny do powierzchni ciekłej stali we wlewnicy.



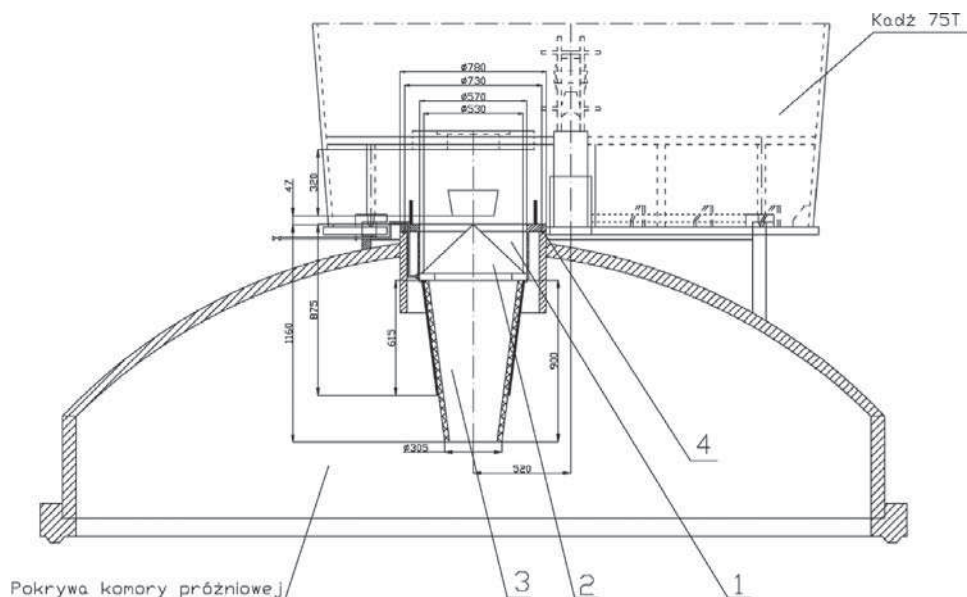
Rys. 8. Widok stali wpływającej do wlewnicy z zastosowaniem innowacyjnej kształtki kierunkowej

Fig. 8. View of steel flowing into mould using the innovative directional brick

Odlane wlewki o masie większej niż 30 ton odznaczały się bardzo dobrą jakością powierzchni, jak również wskaźnikiem K4 próbek z odkuwek, mniejszym niż 10. Takie parametry spełniają najsurowsze wymagania odbiorcze odkuwek dla energetyki.

#### 4.3. STANOWISKO DO ODLEWANIA WLEWKÓW O MASIE WIĘKSZEJ NIŻ 70 T W KOMORZE PRÓŻNIOWEJ

Opracowano stanowisko do odlewania wlewków o masie wymagającej odlewania stali z dwóch kadzi (wytopów) w celu zmniejszenia w stali zawartości wodoru oraz ilości wtrąceń niemetalicznych (brak kon-



Rys. 9. Pokrywa komory próżniowej z próznouszczelną zabudową otworu wlewowego dla wlewków odlewanych w próżni, 1 - obudowa, 2 - membrana, 3 - ceramiczna osłona przeciwrozbrzydowa, 4 - próznouszczelnka z ogniotrwałego szczeliwa

Fig. 9. Vacuum chamber cover with vacuum-tight lining of the inlet for vacuum-cast ingots, 1 - housing, 2 - membrane, 3 - ceramic anti-splash shield, 4 - vacuum-tight seal from refractory sealant

taktu stali z wyłożeniem ogniotrwałym podczas odlewania. Innowacją polegała na opracowaniu systemu uszczelniającego kadź, posadzoną przed odlewaniem na komorze próżniowej. Na rysunku 9 przedstawiono przekrój poprzeczny pokrywy komory próżniowej z próznioszczelną zabudową otworu wlewowego dla wlewków odlewanych w próżni w komorze próżniowej, a na rysunkach 10 i 11 – odpowiednio widok kadzi posadzonej na pokrywie oraz widok zdejmowania pokrywy komory próżniowej po odlaniu wlewków.



**Rys. 10.** Widok kadzi posadzonej na pokrywie komory próżniowej przy odlaniu wlewków o masie 75 Mg

**Fig. 10.** View of the ladle seated on vacuum chamber cover during vacuum casting of 75 Mg ingot



**Rys. 11.** Zdejmowanie pokrywy komory próżniowej wlewków po odlaniu

**Fig. 11.** Removing the vacuum chamber cover after casting

Dla uzyskania możliwie największej czystości stali, na odlany wlewek po zdjęciu pokrywy komory próżniowej nakładana się pokrywa izotermiczna, do dalszej rafinacji stali we wlewnicy, rys. 12.



**Rys. 12.** Nakładanie pokrywy izotermicznej po odlaniu wlewków o masie 100 t

**Fig. 12.** Putting on the iso-thermal cover after vacuum casting of 100 t ingot

## 5. PODSUMOWANIE

Celem poprawy czystości stali we wlewkach, opracowano i wdrożono do produkcji innowacyjne rozwiązania techniczne i technologiczne podczas odlewania. Głównym zadaniem było wyeliminowanie skutków zanieczyszczeń stali wtrąceniami egzogenicznymi z wtórnego utleniania stali. Zaproponowano rafinację ciekłej stali we wlewnicy, odlewanie z zastosowaniem kształtki kierunkowej oraz stanowisko do odlewania wlewków o masie większej niż 70 t w komorze próżniowej. Zastosowane rozwiązania umożliwiły znaczącą poprawę czystości stali. Uzyskany podczas wytopów testowych podstawowy parametr charakteryzujący czystość, tzw. wskaźnik K4 był na poziomie 6, co jest wartością znacznie mniejszą od wymaganego dla zapewnienia wysokiej jakości odkuwek. Dzięki temu możliwe jest wdrożenie do produkcji ultra wysokiej jakości ciężkich wlewków kuźniczych na odkuwki do pracy urządzeń energetycznych w ekstremalnych warunkach. Zastosowane rozwiązania umożliwiają obecnie wytwarzanie odkuwek wałów turbin wodnych z wlewków o masie do 130 ton (rys. 13), wałów turbin wiatrowych o mocy powyżej 4 MW oraz wały turbin gazowych (rys. 14).



**Rys. 13.** Odkuwka wału turbiny wodnej wykonana z wlewków o masie 130 Mg odlanych w próżni

**Fig. 13.** Water turbine shaft forging made from 130 Mg vacuum-cast ingot



**Rys. 14** Odkuwka bezpośrednio po kuciu wału turbiny gazowej z wlewka o masie 18 t odlanego sposobem syfonowym z zastosowaniem kształtki kierunkowej

**Fig. 14** Forged component immediately after forging of gas turbine shaft from 18 t ingot cast by uphill method using the directional brick

#### LITERATURA

1. Zdonek B., Żyła F., Hoderny B., Zatwardnicki A., Bulkowski L., Paszta J., Binek S., Pichór J., Lisiecki W., Ochab K.: Sposób docieplania ciekłej stali w nadstawce wlewnicy i/lub w kadzi pośredniej urządzenia do ciągłego odlewania stali oraz pokrywa do tego celu, patent nr 207235
2. Zdonek B., Szypuła I., Hoderny B., Zięba-Glińska M., Bulkowski L., Żyła F., Wiedermann J., Paszta J., Pogorzałek J., Pichór J., Binek S., Lisiecki W., Dutkiewicz P., Żurek W., Martynowski R., Okręt M., Ostatek A., Zarzycki D.: Opracowanie i wdrożenie technologii dogrzewania i rafinacji stali w nadlewach wlewków kuziennych, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 58, 2006, 3, s. 1-12
3. Zan T., Ersson M., Jönsson P.G.: Mathematical Modeling of Initial Filling Moment of Uphill Teeming Process Considering a Trumpet; ISIJ International, 51, 2011, 9, s. 1461-1467
4. Zhang Z., Yokoya S., Tilliander, Jönsson P.G.: A Numerical Study of Swire Blade Effects in Uphill Teeming Casting, ISIJ International, 50, 2010, 12, s. 1756-1762
5. Hallgren L., Tilliander A., Yokoya S., Jönsson P.G., Hagman S.: A First Attempt to Implement a Swirl Blade in Production of Ingots, ISIJ International, 50, 2010, 12, s. 1763 - 1769
6. Zdonek B., Szypuła I., Watoła M., Barański J., Binek S., Dutkiewicz P., Okręt M., Kowalski J., Karbowiczek M.: Kształtka kierunkowa, zgłoszenie patentowe nr: P. 399 331

**Projekt został dofinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju**