

Bogdan ZDONEK, Ireneusz SZYPUŁA, Jarosław GAZDOWICZ, Piotr SKUPIEŃ

Instytut Metalurgii Żelaza

Stanisław BINEK, Piotr DUDKIEWICZ

Celsa „Huta Ostrowiec” Sp. z o.o.

Mirosław KARBOWNICZEK

Akademia Górniczo-Hutnicza

Andrzej PYTEL

Instytut Odlewnictwa

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA W TECHNOLOGII PRODUKCJI ODKUWEK O DUŻEJ MASIE ZE STALI ULTRA CZYSTYCH DLA PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO I NAFTOWEGO DO EKSPLOATACJI W EKSTREMALNYCH WARUNKACH

Prezentowano szereg innowacyjnych rozwiązań w metalurgii stali przeznaczonych na wlewki do kucia o dużej masie. Obejmują one: rafinację ciekłej stali we wlewnicy po odlaniu stali z zastosowaniem izotermicznej pokrywy i rafinacyjnej zasypki; syfonowe odlewanie stali przez kształtkę kierunkową w kanale wlotowym do wlewnicy; antyerozyjną powłokę materiałów ogniotrwałych syfonowego układu odlewania stali, odlewanie wlewków ciężkich w komorze próżniowej z kadzi z zamknięciem suwakowym oraz odlewanie wlewków do kucia o różnej masie i geometrii do jednej uniwersalnej wlewnicy. Rozwiązania te są unikalne w skali światowej i służą zmniejszeniu ilości i wielkości wtrąceń niemetalicznych w stali, wyeliminowaniu egzogenicznych wtrąceń niemetalicznych, pochodzących z procesu odlewania stali oraz optymalizacji procesu przeróbki plastycznej wlewków dla wyeliminowania rzadzisz. Dzięki zastosowaniu tych rozwiązań znacznej poprawie uległa czystość stali, spełniając wymagania odbiorców odkuwek o dużej masie dla przemysłu energetycznego (wały turbin wiatrowych, gazowych i wodnych, itp.) oraz wydobywczego ropy naftowej i gazu ziemnego (łączniki rurociągów i inne akcesoria), przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach niskich temperatur i dużych głębokości. Średnia wartość wskaźnika K4 (S+O) dla odkuwek z wlewków odlanych z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań wyniosła 3,9 przy wymaganej przez odbiorców odkuwek średniej wartości K4 (S+O) < 10. Praca przedstawia wyniki trzech projektów realizowanych w ramach konkursów Initech i Innotech.

Słowa kluczowe: ultra czysta stal, wlewek do kucia, pokrywa izotermiczna, kształtka wirowa, powłoka antyerozyjna, uniwersalna wlewnica

INNOVATIVE TECHNOLOGY SOLUTIONS FOR MANUFACTURING HEAVY ULTRA-CLEAN STEEL FORGINGS FOR THE OIL AND POWER INDUSTRIES TO OPERATE UNDER EXTREME CONDITIONS

A number of innovative solutions in metallurgy of steel for heavy forging ingots are presented. They include: 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 directional brick in inlet channel to a mould; erosion-proof coating on refractory materials of the system for uphill casting of steel; casting of heavy ingots in a vacuum chamber from a ladle with slide gate; and casting of forging ingots with different weights and geometries into a single universal mould. These are world-wide unique solutions used to reduce the amount and size of non-metallic inclusions in steel, eliminate exogenous non-metallic inclusions from the steel casting process and optimise the plastic working of ingots to eliminate microshrinkages. With these solutions, the purity of steel has been significantly improved, thus meeting the requirements of buyers of heavy forgings for the power industry (shafts of wind, gas and water turbines, etc.) and the oil and natural gas extraction industry (pipeline connectors and other accessories) to be operated under extreme low-temperature and high-depth conditions. The average value of K4 (S+O) index for forgings from ingots cast using the innovative solu-

tions was 3.9, while the average value of $K4 (S+O)$ required by forging buyers is < 10 . This paper presents the results of three projects carried out under Initech and Innotech competitions.

Key words: ultra-clean steel, forging ingot, isothermal cover, swirl brick, erosion-proof coating, universal mould

1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem przemysłu energetycznego, rosła moc urządzeń energetycznych, a w nich wielkości i masy części wykonywanych z stalowych odkuwek (wałów, wirników itp.). Wały turbin wiatrowych stają się coraz większe i dodatkowo przeznaczone są do pracy w warunkach coraz niższych temperatur, dochodzących nawet do -40°C (obszar polarny). Podobnie szybko rozwijający się przemysł wydobywczy ropy naftowej i gazu, szczególnie w warunkach przybiegunowych i coraz większych głębini wymaga elementów z odkuwek stalowych do pracy w tych ekstremalnych warunkach. 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. Prężnie działający na rynku odkuwek swobodnie kutych Zakład Wyrobów Kutyh Celsa „Huta Ostrowiec” Sp. z o.o. w Ostrowcu Świętokrzyskim zmierza się skutecznie z tymi problemami realizując projekty rozwojowo-badawcze w zakresie opracowania technologii produkcji wielkogabarytowych odkuwek ze stali ultra czystych dla przemysłu energetycznego oraz naftowego do eksploatacji w ekstremalnych warunkach podmorskich.

2. TECHNOLOGIA PRODUKCJI ODKUWEK O DUŻEJ MASIE

Zakład Wyrobów Kutyh (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.

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, następnie rafinowana wraz z korektą składu chemicznego w piecu kadziowym, odgazowana próżniowo i odlewana do wlewnic we wlewki kuźnicze sposobem syfonowym lub „z góry” do wlewnicy umieszczonej w komorze próżniowej. Masa odlewanych 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 przekazuje 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 do nagrzewania pionowego, do nagrzewania poziomego i w wannach hartowniczych, a następnie poddaje obróbce mechanicznej przed wysyłką do odbiorców

3. WYMAGANIA JAKOŚCIOWE PRODUKCJI WLEWKÓW DO KUCIA O DUŻEJ MASIE NA ODKUWKI DO PRACY W EKSTREMALNYCH WARUNKACH

Jakość odkuwek, które muszą spełniać wymagania urządzeń dla przemysłu energetycznego oraz naftowego do eksploatacji w ekstremalnych warunkach podmorskich zależy w głównej mierze od jakości odlanego wlewka, a ta z kolei od jakości ciekłej stali i procesu odlewania wlewka kuźniczego. Ciekła stal na wlewki kuźnicze, w miarę wzrostu masy odlewane 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, odwęglanie), rafinacji pozapiecowej (odtlenianie, odsiarczanie, usuwanie wtrąceń niemetalicznych, odgazowanie próżniowe) i odlewania wlewków (zapobieganie wtórnemu utlenianiu).

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 przed odlewaniem na poziomie mniejszym niż 0,8 ppm.

Generalnie uzyskuje się również bardzo małą zawartość wtrąceń niemetalicznych w stali, poniżej 0,10% udziału powierzchniowego przy średnicy równoważnej mniejszej niż $7\ \mu\text{m}$. Krytycznym obecnie parametrem jest obecność w stali nielicznych, pojedynczych wtrąceń niemetalicznych lub występujących w skupiskach, wykrywalnych w odkuwkach za pomocą rutynowych

Tabela 1. Wymagania składu chemicznego przykładowych gatunków stali na odkuwki w ramach zrealizowanych projektów [1, 2]

Table 1. Requirements for chemical composition of the example grades of steel for forgings in completed projects [1, 2]

Gatunek stali	Skład chemiczny, % masowy								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
34CrNiMo6 [1]	0,33	0,60	0,15	max.	max.	1,55	1,55	max.	0,22
	0,38	0,70	0,25	0,007	0,005	1,70	1,70	0,10	0,30
4130 [2]	0,28	0,50	0,15	max.	max.	0,90	max.	max.	0,20
	0,33	0,80	0,35	0,005	0,003	1,10	0,25	0,10	0,25
	V	Al	Sb	As	Sn	Ca	O	N	H [ppm]
34CrNiMo6 [1]	0,05	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
	0,08	0,02	0,003	0,01	0,015	0,005	0,0015	0,006	0,8
4130 [2]	max.	0,015	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
	0,03	0,018	0,008	0,01	0,015	0,005	0,0015	0,006	0,8

badania ultradźwiękowych. Badania tych wtrąceń za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect F wyposażonego w detektor EDS wykazały, że są to najczęściej skupiska Al_2O_3 , wtrącenia spinelowe typu MgO , Al_2O_3 oraz wtrącenia złożone, pochodzące z zasypki, głównie smarującej, jak również z materiałów ogniotrwałych syfonowego układu odlewania stali.

Występowaniu tego rodzaju egzogenicznym wtrąceniom niemetalicznym postanowiono przeciwdziałać realizując projekty rozwojowo-badawcze z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Przedmiotem zrealizowanych projektów były odkuwki wałów turbin urządzeń energetycznych [1] oraz odkuwki różnego rodzaju dla przemysłu naftowego, do eksploatacji w ekstremalnych warunkach podmorskich wykonywane ze stali konstrukcyjnych niskostopowych [2].

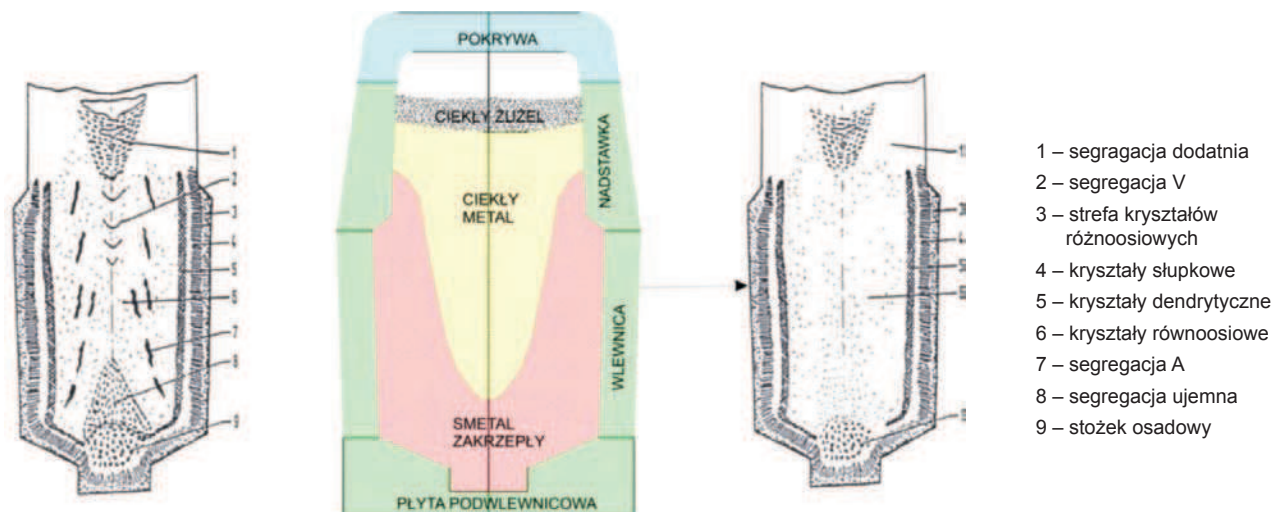
W tabeli 1 zestawiono wymagania składu chemicznego przykładowych gatunków stali na odkuwki w ramach zrealizowanych projektów [1, 2].

4. INNOWACJE TECHNOLOGICZNE

Biorąc pod uwagę, że oprócz składu chemicznego, krytycznym parametrem jakościowym wlewków kuźniennych są wtrącenia niemetaliczne egzogeniczne, zaproponowano innowacyjne rozwiązania technologiczne mające na celu zmniejszenie ich ilości oraz wielkości. Problem ten dotyczy szczególnie wlewków o dużej ma-

sie. Dotychczasowa praktyka wskazuje, że wtrącenia tego typu powstają w procesie technologicznym, głównie podczas odgazowania i odlewania stali w komorze próżniowej oraz podczas procesu odlewania wlewków metodą syfonową. W warunkach przemysłowych zbadano wpływ zaproponowanych innowacyjnych rozwiązań technologicznych na czystość stali. Badaniami objęto technologie służące do poprawy rafinacji stali we wlewnicy, złagodzenia burzliwego wpływu stali do wlewnicy przy odlewaniu syfonowym (powodującego wciąganie smarującej zasypki odlewniczej do objętości odlanej stali), antyerozyjną powłokę materiałów ogniotrwałych syfonowego układu odlewania stali oraz odlewanie wlewków w komorze próżniowej z kadzi z zamknięciem suwakowym.

Rafinacja ciekłej stali we wlewnicy. Zastosowano unikalny sposób, chroniony patentem [3], 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 korpu-



Rys. 1. Schemat ideowy układu docieplania głowy wlewka za pomocą izotermicznej pokrywy

Fig. 1. Schematic diagram of ingot head reheating system using isothermal cover

sie wlewka. Czas ten wynosi około jednej trzeciej całkowitego czasu krzepnięcia wlewka. Badania symulacji numerycznej [4] wykazały, że wytrzymywanie pokrywy do tego momentu nie wpływa na wydłużenie całkowitego czasu krzepnięcia wlewka.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy układu docieplania głowy wlewka za pomocą izotermicznej pokrywy.

Badania ilościowe wtrąceń niemetalicznych wykonanych za pomocą mikroskopu optycznego z komputerowym analizatorem obrazu firmy Nikon wykazały 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 μm [1,4].

Z porównania wyników ilościowej analizy wtrąceń z zastosowaniem izotermicznej pokrywy i żużła rafinacyjnego oraz bez pokrywy, z zastosowaniem zasyпки egzotermicznej wynika prawie dwukrotne zmniejszenie ilości wtrąceń i zmniejszenie o ponad 1/3 ich wielkości [4].

Pokrywę docieplającą stosuje się standardowo przy odlewaniu wlewków o masie od 15 do 130 ton.

W trakcie dotychczasowego stosowania pokrywy izotermicznej przy odlewaniu wlewków zmniejszeniu uległ również wymagany, przez licznych odbiorców odkuwek, wskaźnik wtrąceń ocenianych metodą K4 (ocena mikroskopowa ilości siarczków i tlenków) wg DIN 50602 z 1985 do poziomu mniejszego niż 10, dla najsurowszych wymagań przemysłu energetycznego [9].

Odlewanie z zastosowaniem kształtki kierunkowej

Szczegółowe badania zanieczyszczonych obszarów odkuwek, szczególnie od strony stopy wlewków wykazały występowanie nielicznych niedopuszczalnych egzogenicznych wtrąceń niemetalicznych, pochodzących od zasyпки smarującej (zawierających pierwiastki K, Na, Cl) lub z materiału ogniotrwałego syfonowego układu odlewania. Zasyпка była zaciągana przy odlewaniu we wczesnym stadium, co powodowało „uwieżenie” 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 wpływaniu do wlewnicy na początku odlewania.

Jak wynika z analizy literaturowej [5–7], do poprawy początkowych warunków napełniania stałą wlewnicy, zanim spali się torebka z zasypką smarującą, może służyć:

- zastosowanie wysoko ogniotrwałej i antyerozyjnej kształtki w końcowym etapie wypływu stali do wlewnicy [5],
- zastosowanie wysoko ogniotrwałej i antyerozyjnej wkładki wirowej, osadzonej w kanale wlotowym [6,7] lub poziomym kanale zasilającym [7].

Na potrzeby niniejszego projektu wybrano wkładkę wirową umieszczoną w kanale wlotowym wykonaną z materiału ogniotrwałego w postaci płaskownika, skróconego o pewien kąt wokół własnej osi [6]. Przy przepływie burzliwym przez płaszczyznę skrzywienia zmienia się on w przepływ laminarny z prędkością styczną do płaszczyzny płaskownika, a jego prędkość osiowa gwałtownie spada w miarę rozwidlania się wylotu. Rozwiązanie innowacyjne objęte Zgłoszeniem Paten-

towym nr P. 399331 [8] polega na opracowaniu konstrukcji kształtki kierunkowej zabudowanej w górnej części kształtki kanałkowej wraz z mocującym ją pierścieniem oporowym.

Na rysunku 2 przedstawiono widok kształtki wlewowej z zabudowaną w niej kształtką kierunkową w zestawie odlewniczym przed rozpoczęciem odlewania.



Rys. 2. Widok „z góry” kształtki wirowej w zestawie syfonowym przed odlewaniem

Fig. 2. „Top” view of the swirl brick in the uphill casting system before casting

Odlane z zastosowaniem tej kształtki 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.

Odlewanie wlewków o masie większej niż 70 t w komorze próżniowej

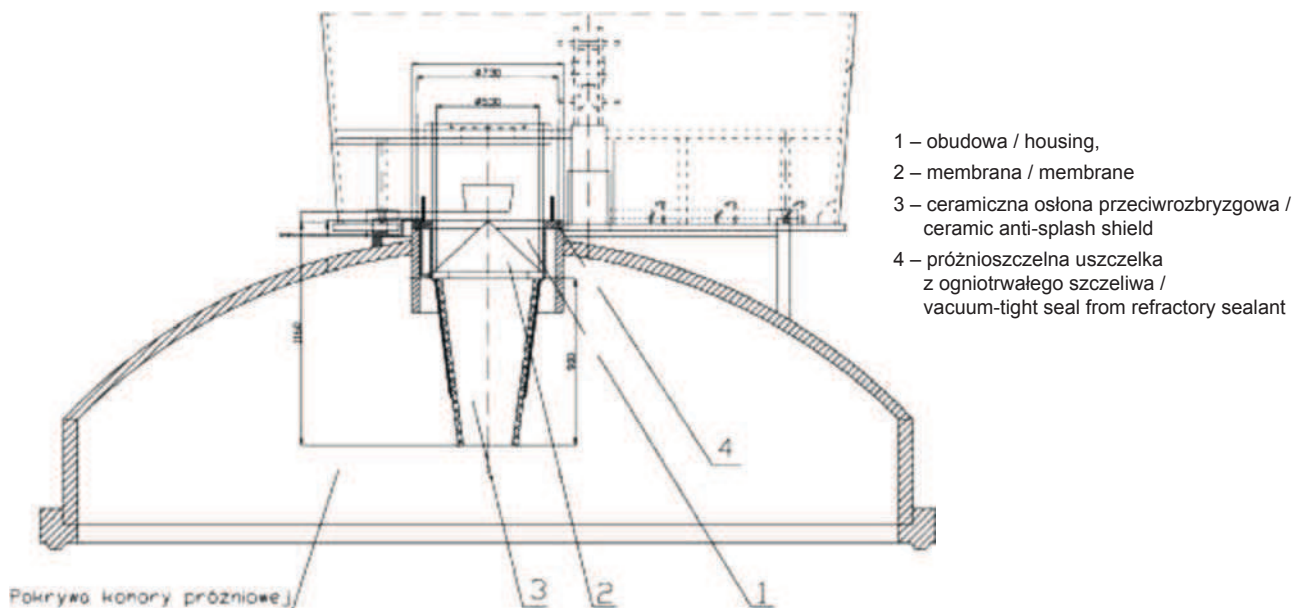
Opracowano stanowisko do odlewania wlewków o masie wymagającej odlewania stali z dwóch kadzi (wytopów) w celu zmniejszenia w stali zawartości wodoru oraz ilości wtrąceń niemetalicznych (brak kontaktu stali z wyłożeniem ogniotrwałym podczas odlewania).

Innowacja polegała na opracowaniu systemu uszczelniającego kadeł, posadowioną przed odlewaniem na komorze próżniowej. Na rysunku 3 przedstawiono przekrój poprzeczny pokrywy komory próżniowej z próżnioszczelną zabudową otworu wlewowego dla wlewków odlewanych w próżni w komorze próżniowej.

Rysunek 4 przedstawia widok zestawu po odlaniu wlewka w komorze próżniowej po zdjęciu pokrywy komory próżniowej z nakładaniem pokrywy docieplającej, do dalszej rafinacji stali we wlewnicy.

Antyerozyjna powłoka materiałów ogniotrwałych syfonowego układu odlewania stali

W układzie syfonowym stosuje się głównie kształtki ogniotrwałe wysokoglinowe (mullitowe) o zawartości 68÷72% mas. Al_2O_3 , charakteryzujące się bardzo zwartą strukturą, o dużej odporności na wstrząsy cieplne. Wśród mechanizmów zużywania się wyrobów ogniotrwałych w procesach metalurgicznych dominuje korozja chemiczna związana z penetracją ciekłych metali i żużli w głąb wyrobów oraz ich erozja spowodowana



Rys. 3. Pokrywa komory próżniowej z próznieuszczelną zabudową otworu wlewowego dla wlewków odlewanych w próżni
 Fig. 3. Vacuum chamber cover with vacuum-tight lining of the inlet for vacuum-cast ingots



Rys. 4. Nakładanie pokrywy izotermicznej po odlaniu w komorze próżniowej wlewka o masie 100 t
 Fig. 4. Placement of iso-thermal cover after casting of 100 t ingot in vacuum chamber

przepływającą stalą. Produkty erozji w postaci egzogenicznych wtrąceń niemetalicznych przedostają się do stali, pogarszając tym samym jej czystość. Ograniczenie korozji i erozji można osiągnąć stosując wyroby ogniotrwałe zupełnie pozbawione porów otwartych, albo wyroby ogniotrwałe zawierające pory otwarte o tak małych średnicach, że wnikanie do nich żużli i stopów jest niemożliwe. W związku z powyższym prowadzone są prace badawcze nad opracowaniem technologii wytwarzania wyrobów ogniotrwałych, w tym głównie wyrobów glinokrzemianowych, o strukturze mikroporowatej. Jedną z metod modyfikacji mikrostruktury wyrobów, prowadzącą do zmniejszenia wielkości porów otwartych oraz redukcji porowatości, jest impregnacja tworzyw ogniotrwałych z wykorzystaniem zawiesin i roztworów koloidalnych, w których osnową są wysoko ogniotrwałe tlenki o bardzo drobnym uziarnieniu poniżej 0,06 mm, tworzące z dodawanymi rozpuszczalnikami i cieczami jednorodne mieszaniny lub roztwory nieulegające sedimentacji. Charakter chemiczny takich roztworów i mieszanin jest zbliżony do składu chemicznego nasycanych lub powlekanych wyrobów ogniotrwałych. Przeprowadzono próby nasycania (im-

pregnacji) wysoko glinowych kanałków z zastosowaniem powłok ochronnych, a następnie zastosowano je do prób odlewania syfonowego stali, umieszczając w jednym zestawie z kanałkami standardowymi dla porównania [10]. Obserwacje mikrostruktury próbek glinokrzemianowych kanałków nasyconych powłoką antyerozyjną i nienasyconych, po pracy (po odlaniu i rozbrojeniu wlewków, na wysokorozdzielczym mikroskopie skaningowym, wyposażonym w system mikroanalizy rentgenowskiej) wykazały mniejszy stopień oddziaływania ciekłej stali na pracującą powierzchnię kanałka z powłoką antyerozyjną, niż kanałka porównawczego, bez powłoki antyerozyjnej. Wynika to stąd, że faza bogata w Al_2O_3 , impregnująca pierwotne pory otwarte obserwowane w części najmniej zmienionej wyrobu w próbce kanałka z powłoką antyerozyjną, z jednej strony utrudniała wnikanie stopu, a z drugiej strony „oddziaływała” na skład chemiczny fazy szklistej (międzykrystalicznej) w czasie pracy wyrobu.

Badania zglądów na powierzchni równoległej do długości korzeni po odlaniu wlewka z zastosowaniem kanałków nasyconych powłoką antyerozyjną i nienasyconych, przeprowadzone za pomocą mikroskopu skaningowego wykazały, że na powierzchni korzenia z kanałków z powłoką antyerozyjną występuje warstwa tlenkowa, w której dominują bardzo drobne wtrącenia niemetaliczne (iglaste) typu 1) – $CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot TiO_2 \cdot MnO \cdot K_2O$ oraz drobne skupiska wtrąceń typu 2) – $MgO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot TiO_2 \cdot MnO$ (Rys. 5).

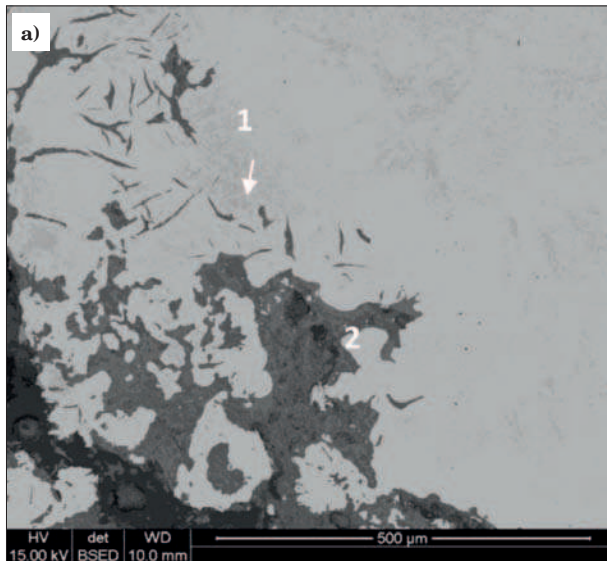
Wewnątrz korzenia występują natomiast bardzo drobne wtrącenia MnS oraz bardzo drobne wtrącenia typu $MgO \cdot Al_2O_3$ (Rys. 6).

W przypadku korzenia z kanałką standardowego bez powłoki antykorozyjnej powierzchnia korzenia była wolna od warstwy tlenkowej natomiast w wewnętrznej strukturze korzenia stwierdzono obecność pojedynczych, drobnych wtrąceń siarczkowych MnS oraz wtrąceń siarczkowych wydzielonych na spinelu $MgO \cdot Al_2O_3$ (Rys. 7).

Wyniki badania ilościowego wtrąceń niemetalicznych wykonanych za pomocą mikroskopu optycznego

z komputerowym analizatorem obrazu firmy Nikon próbek pobranych z korzeni kanałków z powłoką antyerozyjną i bez takiej powłoki, są porównywalne pod

względem udziału powierzchniowego (odpowiednio po 0,16%), jednakże w próbce pochodzącej ze stosowania kanałków standardowych (bez powłoki antykorozyjnej)

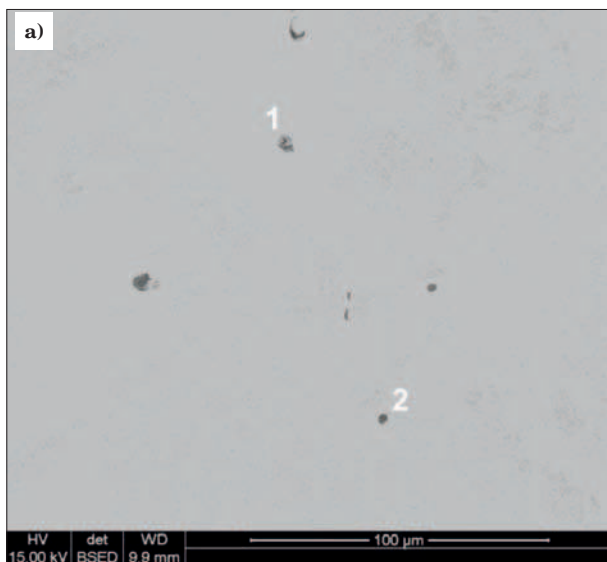


b)

Pierwiastek, % mas.	1	2
O	47,9	45,9
Mg	1,3	5,7
Al	29,9	36,2
Si	9,7	3,1
K	1,3	
Ca	5,0	
Ti	2,6	0,7
Mn	2,3	3,8
Fe		4,61

Rys. 5. Wtrącenia niemetaliczne w tlenkowej warstwie przy powierzchni korzenia z kanałką z powłoką antyerozyjną, a) kształt wtrąceń, b) skład chemiczny wtrąceń, w % masowych

Fig. 5. Non-metallic inclusions in the oxide layer at the surface of the root from bottom runner with erosion-proof coating, a) shape of inclusions, b) chemical composition of inclusions, % wt

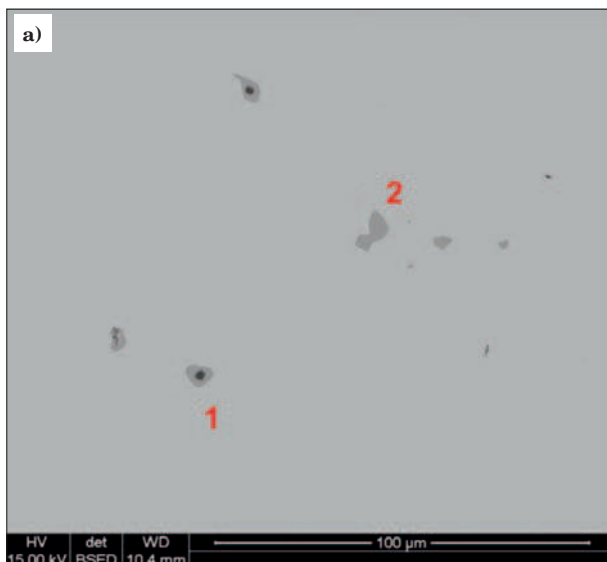


b)

Pierwiastek, % mas	1	2
O		43,8
Mg		11,3
Al		41,3
S	56,5	1,8
K		0,8
Ca		1,1
Mn	43,5	

Rys. 6. Wtrącenia niemetaliczne typu MnS (większe) i MgO Al₂O₃ (mniejsze) w środku korzenia z kanałką z powłoką antyerozyjną, a) kształt wtrąceń, b) skład chemiczny wtrąceń, w % masowych

Fig. 6. Non-metallic MnS (bigger) and MgO Al₂O₃ (smaller) inclusions in the middle of the root from bottom runner with erosion-proof coating, a) shape of inclusions, b) chemical composition of inclusions, % wt



b)

Pierwiastek, %mas.	1	2
O	23,2	
Mg	2,0	
Al	15,9	
Si	0,1	
S	30,5	55,3
Mn	24,0	44,7
Fe	4,4	

Rys. 7. Wtrącenia niemetaliczne typu MnS(2) i MgO·Al₂O₃-MnS(1) w środku korzenia z kanałką bez powłoki antyerozyjnej, a) kształt wtrąceń, b) skład chemiczny wtrąceń, w % masowych

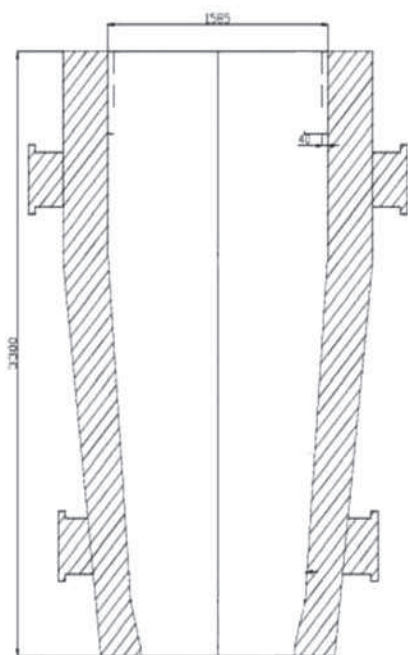
Fig. 7. Non-metallic MnS(2) and MgO·Al₂O₃-MnS(1) inclusions in the middle of the root from bottom runner without erosion-proof coating, a) shape of inclusions, b) chemical composition of inclusions, % wt

stwierdzono większą liczbę wtrąceń, niż w próbcie z stosowaniem kanałków standardowych (odpowiednio 128 i 102), aczkolwiek nieco drobniejszych (o średnicy równoważnej odpowiednio 2,66 i 3,12 μm).

Z porównania charakteru i występowania wtrąceń wynika, że powłoka antyerozyjna zabezpiecza przedostawanie się ciekłej stali do materiału ogniotrwałego kanałka, nie dopuszczając do pochłaniania materiału ogniotrwałego przez przepływającą ciekłą stal i przez to zmniejsza prawdopodobieństwo i ryzyko przedostawania się do wlewka wtrąceń egzogenicznych.

Innowacyjna technologia produkcji wlewków do kucia poprzez zastosowanie uniwersalnych zestawów odlewniczych

O jakości odkuwek do pracy w ekstremalnych warunkach decyduje nie tylko czystość metalurgiczna stali, ale także budowa i geometryczne parametry wlewka do kucia. W realizowanym obecnie projekcie [11] opracowano w tym celu uniwersalną wlewnicę, jak na rys. 8, do której można odlewać stal na wlewki o zróżnicowanej masie. Do wlewnicy, w jej cylindryczny obszar wstawia się specjalnie opracowane i odpowiednio mocowane po obwodzie izolacyjne wkładki (Rys. 9).



Rys. 8. Schemat wlewnicy uniwersalnej do odlewania prototypowych wlewków

Fig. 8. Diagram of universal mould for casting of prototype ingots

Do czterech prototypowych uniwersalnych wlewnic, zaprojektowanych do odlewania wlewków o masie od 12 do 15 t, odlano dwa wlewki doświadczalne o masie 14,5 t każdy, wypełniając ciekłą stalą wlewnice uniwersalne do pełna oraz dwa wlewki doświadczalne o masie 11,4 t każdy, wypełniając wlewnice uniwersalne do górnego poziomu wkładek izolacyjnych jak na rys. 9.

Ten drugi sposób odlewania zapewnia łagodne przejście pomiędzy korpusem i głową wlewka, nie powodując podczas kucia powstawania pęknięć powierzchniowych odkuwek, jak również zapewnia dla określonych odkuwek optymalny kształt wlewka, mierzony stosunkiem wysokości H wlewka do średnicy środkowej D wlewka.



Rys. 9. Widok „z góry” uniwersalnej wlewnicy z umieszczonymi wewnątrz wkładkami izolacyjnymi, do odlania w niej wlewka o masie 11,4 t

Fig. 9. "Top" view of the universal mould with insulation inserts mounted inside, for casting of 11.4 t ingot

Rysunek 10 przedstawia widok doświadczalnego wlewka o masie 11,4 t odlanego do uniwersalnej wlewnicy przed załadowaniem do pieca grzewczego w wydziale prasowni. Głowa wlewka doświadczalnego na rys.10 jest wielokątna tak samo jak korpus wlewka, z łagodnym przejściem pomiędzy korpusem i nadstawką, co zapewnia bezproblemowe kucie wstępne wlewka bez konieczności dodatkowych płukań w celu usuwania powstających w tym obszarze pęknięć, jak to ma miejsce przy kuciu klasycznych wlewków z wielokątnym korpusem i okrągłą głową wlewka. Zastosowanie wlewnic uniwersalnych wpłynie także na poprawę uzysku wlewek/odkówek oraz na zmniejszenie kosztu produkcji wlewków w wyniku zmniejszenia kosztu utrzymania „parku” wlewnic w stalowni.

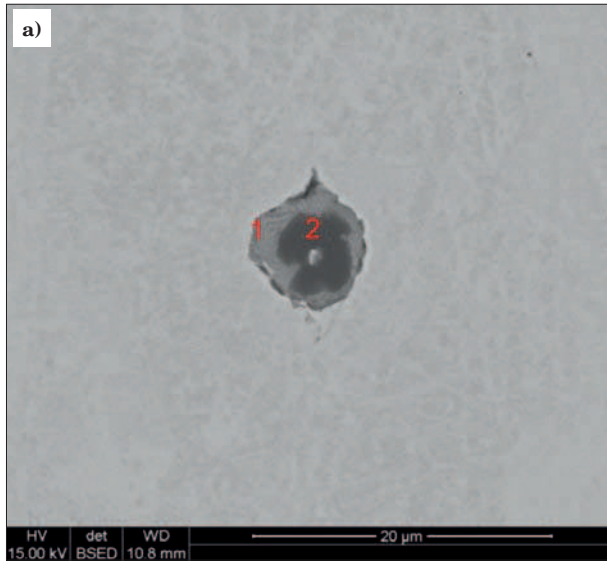


Rys. 10. Widok doświadczalnego wlewka o masie 11,4 t odlanego do uniwersalnej wlewnicy przed załadowaniem do pieca grzewczego w wydziale prasowni (wytop nr 36263, temp powierzchni: 792 (przy głowie), 712 (środek) i 691 (stopa), °C)

Fig. 10. View of 11.4 t experimental ingot cast into the universal mould before charging into the heating furnace at the press shop division (melt no. 36263, surface temp.: 792 (at the head), 712 (in the middle) and 691 (at the foot), °C)

Wyniki oceny czystości stali wg DIN 50602: 1985 met.K z próbek pobranych z odkutych prętów, z miejsc reprezentujących obszar od głowy i stopy wlewka wykazały, że sumaryczny wskaźnik $K4(S + O)$ dla siarczków i tlenków wynosił od 2 do 7, przy czym najmniej

szy jego rozrzut wystąpił we wlewkach o masie 11,4 t. Średnia wartość wskaźnika K4 (S+O) dla wszystkich wlewków wyniosła 3,9, przy wskaźniku K4 siarczków – 1 i tlenków – 2,9 przy wymaganej średniej wartości K4 (S+O) < 10.

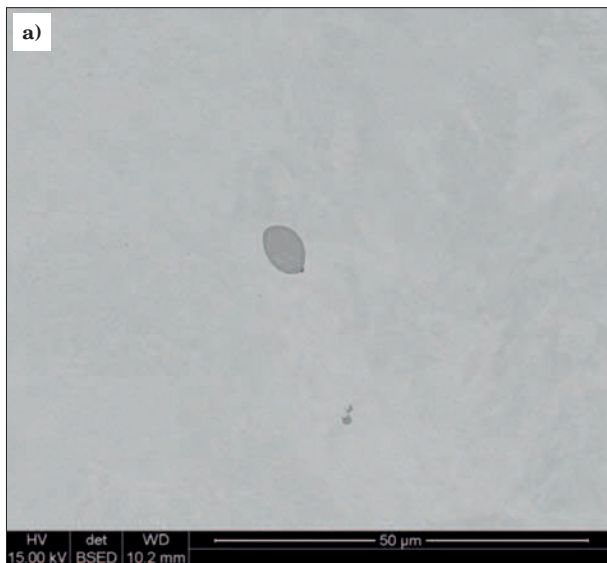


b)

Pierwiastek, % mas.	1	2
O	2,8	35,7
Mg	1,0	5,3
Al	3,9	53,3
Si	0,2	
S	30,9	3,7
Ca	18,9	1,8
Mn	22,4	
Fe	20,0	

Rys. 11. Wydzielenia MnS modyfikowane wapniem (obrzeż) na wtrąceniu tlenkowym typu $MgO \cdot Al_2O_3$ w próbce z odlewki z okolic stopy wlewk o masie 11,4 t, a) kształt wtrąceń, b) skład chemiczny wtrąceń, w % masowych

Fig. 11. Calcium-modified MnS inclusions (edges) on $MgO \cdot Al_2O_3$ oxide inclusion in the sample of forging taken from the foot area of 11.4 t ingot, a) shape of inclusions, b) chemical composition of inclusions, % wt



b)

Pierwiastek	% mas.
S	35,7
Mn	51,7
Fe	12,6

Rys. 12. Pojedyncze wtrącenia MnS w próbce z odlewki z okolic głowy wlewk o masie 14,5 t, a) kształt wtrącenia, b) skład chemiczny wtrącenia w % masowych

Fig. 12. Single MnS inclusions in the sample of forging taken from the head area of 14.5 t ingot, a) shape of inclusion, b) chemical composition of inclusion, % wt



b)

Pierwiastek	%mas.
O	26,1
Mg	10,0
Al	36,1
Fe	27,8

Rys. 13. Pojedyncze wtrącenia $MgO \cdot Al_2O_3$ w próbce z odlewki z okolic głowy wlewk o masie 14,5 t, a) kształt wtrącenia, b) skład chemiczny wtrącenia w % masowych

Fig. 13. Single $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions in the sample of forging taken from the head area of 14.5 t ingot, a) shape of inclusion, b) chemical composition of inclusion, % wt

nych. Średnia średnica równoważna tych wtrąceń wynosiła 1,65 μm , współczynnik kształtu – 0,97 a udział powierzchniowy – 0,07%. Ponad 90% tych wtrąceń mieściło się w przedziale od 0 do 4 μm , a największe pojedyncze wtrącenia, głównie MnS nie przekraczały długości 20 μm .

Mikroanaliza rtg wtrąceń, przeprowadzona z wykorzystaniem detektora EDS mikroskopu skaningowego Inspect F wykazała, że są to głównie zmodyfikowane siarczki wydzielone na wtrąceniach spineli typu $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$ (Rys. 11), pojedyncze siarczki manganu (Rys. 12) oraz pojedyncze tlenki typu $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (Rys. 13).

Wyniki przedstawione powyżej wskazują na bardzo dużą czystość stali, spełniającą najsurowsze wymagania odbiorców odkuwek zarówno dla potrzeb urządzeń dla energetyki jak i dla przemysłu wydobywczego w ekstremalnych warunkach ciśnienia i temperatury.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem poprawy czystości stali zastosowano rafinację ciekłej stali we wlewnicy, odlewanie z zastosowaniem kształtki kierunkowej, stanowisko do odlewania wlewków o masie większej niż 70 t w komorze próżniowej oraz pokryto antyerozyjną powłoką ogniotrwałą kanałki w syfonowym układzie odlewania stali. Zastosowane rozwiązania umożliwiły znaczącą poprawę czystości

stali. Uzyskane podczas wytopów testowych podstawowe parametry charakteryzujące czystość, tzw. wskaźnik K4 (sumaryczna ilość tlenków i siarczków) na poziomie 3,9÷6 – wartość znacznie mniejsza niż wymagana (< 10) dla zapewnienia wysokiej jakości odkuwek oraz udział powierzchniowy pojedynczych i zmodyfikowanych wtrąceń niemetalicznych o średnicy równoważnej 1,65 μm , wynoszący 0,07% umożliwiają produkcję ultra wysokiej jakości ciężkich wlewków kuźniczych na odkuwki urządzeń energetycznych (odkuwki wałów turbin wodnych z wlewków o masie do 130 ton, wałów turbin wiatrowych o mocy powyżej 4 MW, wały turbin gazowych) oraz na odkuwki różnego rodzaju łączników urządzeń wydobywczych i przesyłowych ropy naftowej i gazu ziemnego do pracy w ekstremalnych warunkach temperatury (minus 40°C) i głębokości (3000 m i niżej).

Odlewanie tych stali do uniwersalnej wlewnicy wpływa na poprawę warunków kucia wstępnego wlewka, uzysku odkuwka/wlewk, liczonego stosunkiem masy gotowej odkuwki do masy wlewka oraz na zmniejszenie kosztu utrzymywania parku wlewnic dzięki zmniejszeniu ilości formatów wlewnic.

Wyniki zamieszczone w publikacji zostały uzyskane w ramach badań współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: ZPB/3/65788/IT2/10, INNOTECH – K2/IN2/24/182026/NCBR/13, K2/IN2/24/182026/NCBR/13

LITERATURA

1. Zdonek B. i in.: Raport końcowy nr ZPB/3/65788/IT2/10, pt.: Technologia produkcji wielkogabarytowych odkuwek ze stali ultraczystych dla przemysłu energetycznego, 2013, Niepubl.
2. Karbowniczek M. i in.: Raport końcowy nr INNOTECH-K2/IN2/24/182026/NCBR/13, pt.: Uruchomienie kompleksowo monitorowanej produkcji wielkogabarytowych odkuwek dla przemysłu naftowego do eksploatacji w ekstremalnych warunkach podmorskich, 2015, Niepubl.
3. Patent PR Nr 207235: Sposób docieplania ciekłej stali w nadstawce wlewnicy i/lub w kadzi pośredniej urządzenia do ciągłego odlewania stali oraz pokrywa do tego celu
4. 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 kuźniczych – Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 58, 2006, 3, s. 1–12
5. 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
6. 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.
7. 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
8. Zgłoszenie Patentowe P. 399 331: Kształtka kierunkowa
9. Zdonek B., Szypuła I., Binek S., Kowalski J., Dudkiewicz P., Karbowniczek M. Barański J.: Innowacyjne rozwiązania w technologii produkcji wielkogabarytowych odkuwek z ultra czystych stali dla urządzeń energetycznych, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 65, 2013, 4, s. 53–59
10. Zdonek B., Szypuła I., Różański P.: Badania nad opracowaniem zależności przyczynowo-skutkowych procesu odlewania oraz modelu nadzorowania i operacyjnego sterowania; Sprawozd. IMŻ Nr PI-000506 (Projekt nr INNOTECH-K2/IN2/24/182026/NCBR/13), 2014, Niepubl.
11. Pytel A., Binek S., Karbowniczek M., Zdonek B. i in.: Innowacyjna technologia produkcji wlewków kuźniczych o zróżnicowanej masie poprzez zastosowanie uniwersalnych zestawów odlewniczych, Projekt NCBiR nr K2/IN2/24/182026/NCBR/13