9

WPŁYW INNOWACYJNOŚCI WYROBÓW HUTNICZYCH NA JAKOŚĆ PROCESU PRODUKCYJNEGO

9.1 WPROWADZENIE

Innowacyjne wyroby wytwarzane w przemyśle ciężkim wymagają zastosowania wysokojakościowych procesów produkcyjnych.

Innowacyjność w przypadku produktów tego typu oznacza ingerencję w skład chemiczny (możliwość zastosowania nowych związków oraz pierwiastków chemicznych), mikrostrukturę, która poza składem chemicznym jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o właściwościach (mechanicznych, fizycznych, użytkowych itp.), a przez to również zastosowaniu danego tworzywa.

Zapotrzebowanie na nowoczesne, zaawansowane (innowacyjne) wyroby, wymaga od producentów wprowadzania zmian technicznych, infrastrukturalnych, organizacyjnych i logistycznych. Oczywiście częstokroć jest to związane w nakładami finansowymi.

Niniejsze opracowanie zawiera zbiór informacji na temat problemów produkcji wyrobów (walców hutniczych) ze szczególnym uwzględnieniem zabiegów odlewania odśrodkowego, stanowiącego jedną z metod, pozwalających na realizację produkcji innowacyjnych wyrobów dla przemysłu ciężkiego.

Jest to opracowanie oparte na jednym przykładzie, po to by uprościć analizowany problem. Jednak wg autora, temat opracowania wydaje się być dość uniwersalny i wymogi stawiane współczesnym procesom produkcyjnym można odnieść do wielu innowacyjnych wyrobów np. z zakresu obronności, medycyny, transportu itp.

Przedmiotem niniejszego opracowania jest proces odlewania wyrobów przemysłowych przy wykorzystaniu działania siły odśrodkowej działającej w maszynie wykorzystującej formę odlewniczą w kształcie walca. Prześledzono problemy technologiczne występujące podczas tego procesu. Analizowano warunki doboru urządzeń i materiałów potrzebnych do uzyskania wyrobu.

Odlewnictwo – to jedna z podstawowych technologii wytwarzania przedmiotów – odlewów – z metali i ich stopów, a także z innych materiałów, jak np. z bazaltu czy żywic polimerowych.

9.2 PRZEGLĄD METOD ODLEWANIA ELEMENTÓW O KSZTAŁCIE WALCA

Ogólna charakterystyka konwencjonalnej metody odlewania walców hutniczych.

Walce hutnicze należą do elementów pracujących w wyjątkowo trudnych warunkach. Podczas pracy walec jest poddawany zmiennym naprężeniom ściskającym, rozciągającym oraz naprężeniom skręcającym powstającym w wyniku przenoszenia momentu obrotowego. Dodatkowo powierzchnia robocza beczki walca poddawana jest silnemu działaniu ścierającemu. Powierzchniowa część robocza walca winna zatem cechować się znaczną odpornością na zmęczenie cieplne i zużycie ścierne w warunkach zmiennych obciążeń i podwyższonej temperatury. Tworzywo części środkowej walca oraz czopów winno cechować się dużą udarnością, dobrymi właściwościami ślizgowymi oraz dobrą skrawalnością. Możliwość taka istnieje w walcach bimetalowych [3]. Beczka walca wykonana jest z tworzywa o wysokiej twardości i odporności na ścieranie natomiast rdzeń i czopy z tworzywa o dobrej udarności i obrabialności. Walce są odlewane w formach metalowych. Najpierw odlewa się płaszcz walca przez wypełnienie formy wysokostopowym żeliwem do wysokości 100 mm ponad górną krawędź beczki walca. Wówczas przerywa się zalewanie formy i w wyniku dużej intensywności odprowadzania ciepła przez wlewnicę, krzepnie warstwa powierzchniowa z żeliwa stopowego. Następnie wlewa się do formy żeliwo na rdzeń walca. Żeliwo stopowe wypełniające rdzeń walca zostaje wypchnięte i wypływa rynienką do podstawionej wlewnicy.

Najstarszą metodą odlewania elementów w kształcie walca (np. walców, rur, tulei, pierścieni) jest *pojedyncze odlewanie*, które stosowano od XVIII wieku. Walce odlewano z jednego gatunku materiału. W jednej operacji otrzymywano walec z wysokoodporną powierzchnią beczki a miękkim rdzeniem i czopem, który mógł przenosić duże siły podczas procesu walcowania.

Druga metoda, *podwójne odlewanie*, wprowadzona została w końcu lat trzydziestych XX w. Powodem wprowadzenia nowej metody była potrzeba zwiększenia głębokości chłodzenia. Ponadto inne właściwości powinna mieć powierzchnia walca a inne rdzeń i czopy. Aby walce spełniały te wymagania stosowano dwa materiały różniące się składnikiem chemicznym. Wadą tej metody jest potrzeba wytopienia nadmiernej ilości żeliwa na powłokę. Jeśli na powłokę użyto np. żeliwa wysokochromowego to z kolei potrzebna jest nadmierna ilość żeliwa na rdzeń. Jednak w przypadku największych walców stosowanych w gorącej walcowni taśm szerokich, jako walce robocze w zgniataczach i walcowniach blach grubych, problemy te mogą być rozwiązane przez zastosowanie specjalnej odmiany metody podwójnego odlewania [4].

Trzecia to metoda *odlewania odśrodkowego*. Według niej forma o kształcie odpowiadającym beczce walca obraca się poziomo lub pionowo. Prędkość obrotowa formy jest tak dobrana, że siły odśrodkowe utrzymują równo rozłożone wzdłuż powierzchni formy żeliwo, dopóki nie zakrzepnie w grubościenną rurę. W przypadku stosowania *odlewania poziomego*, po zakrzepnięciu forma szybko przemieszczana jest do pozycji pionowej. W obu wariantach cylindryczna przestrzeń wewnątrz odlewu wypełniona jest następnie żeliwem przeznaczonym na rdzeń. Po odlaniu rdzenia następuje pełne spojenie obu materiałów.

Proces odlewania odśrodkowego, można również stosować do produkcji wyrobów ceramicznych, co przyczynia się do poprawy gęstości struktury oraz zmniejszenia ilości defektów, natomiast negatywnie może wpływać na problem segregacji cząstek stałych w wyrobie. Metodę odlewania ośrodkowego można również wykorzystywać w produkcji

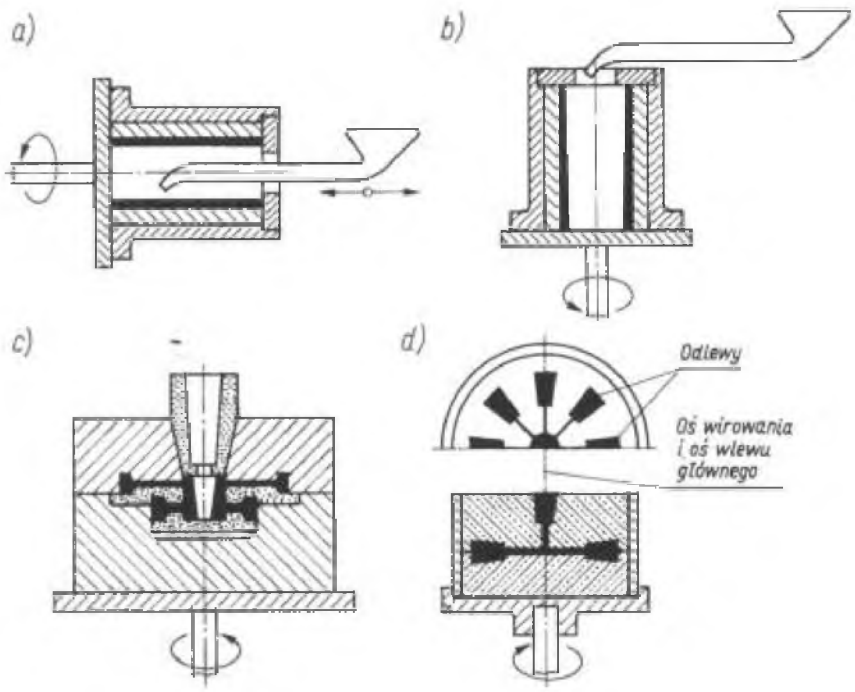
wyrobów z tworzyw sztucznych, wykorzystując do formowania wyrobu, materiał w postaci ciekłej lub w postaci proszku.

Główne zalety odlewania odśrodkowego, to zwiększona różnorodność zastosowań i ulepszone właściwości wyrobów. Oprócz walców można tą metodą wykonywać także pierścienie, tuleje, rury itp.

9.3 ODLEWANIE ODŚRODKOWE

Odlewanie odśrodkowe – polega na użyciu siły odśrodkowej do wypełnienia wnęki, a w niektórych odmianach – także do kształtowania jednej z powierzchni odlewu. Istnieje kilka odmian tego procesu:

- *odlewanie odśrodkowe właściwe* – służące do wykonywania odlewów w kształcie brył obrotowych typu tulei (rys. 9.1a i 9.1b). Powierzchnia zewnętrzna takiego odlewu jest odtwarzana przez wirującą formę, wewnętrzna zaś jest walcową powierzchnią swobodną kształtowaną przez siłę odśrodkową. Tego typu formy są wykonywane z metalu, jednak często stosuje się wyłożenie ich wnęki masą formierską,



Rys. 9.1 Zasady odlewania odśrodkowego:
a), b) odlewanie odśrodkowe właściwe z poziomą i pionową osią obrotu,
c) odlewanie półodśrodkowe, d) odlewanie pod ciśnieniem odśrodkowym [2]

- *odlewanie półodśrodkowe* – służące do wykonywania odlewów w kształcie brył obrotowych, w których wewnętrzna powierzchnia jest odtwarzana przez rdzeń, zwykle piaskowy (rys. 9.1c). Tego typu proces umożliwia uzyskanie dowolnych kształtów wewnętrznych odlewu,
- *odlewanie pod ciśnieniem odśrodkowym* – w którym wlew główny jest umieszczony w pionowej osi wirowania, a ciśnienie pochodzące od siły odśrodkowej pomaga w

wypełnieniu wnęk formy rozłożonych wokół wlewu głównego (rys. 9.1d). Forma może być wykonana z dowolnego materiału, ale zazwyczaj stosuje się formy jednorazowe.

Rozwój prac dotyczących materiałów do odlewania walców koncentruje się ostatnio na stosowaniu materiałów o wyższej zawartości składników stopowych. Przykładem może być wysokochromowe żeliwo. W wielu przypadkach, walców z tego materiału można nie odlewać w ogóle metodą podwójnego odlewania.

Optymalne właściwości fizyczne materiału powierzchniowego uzyskiwane są przez działanie sił odśrodkowych na metal przed i w czasie krzepnięcia. Gęstość materiału powierzchniowego w tej części walca wzrasta, spowodowane to jest zmniejszeniem mikroporowatości, ilości wtrąceń, itd.

Duże siły odśrodkowe działające na metal podczas krzepnięcia powodują, że wszystkie wtrącenia lżejsze od żeliwa, skierowane są w kierunku centrum walca poniżej roboczej części średnicy. Dzięki temu wtrącenia te nie oddziałują na walcowany materiał. Walce odlewane konwencjonalnie a nie odśrodkowo mogą zawierać szkodliwe wtrącenia znajdujące się blisko powierzchni roboczej.

Mechaniczne właściwości materiału powłoki są lepsze dzięki zmniejszeniu się wielkości wtrąceń, porowatości itd. Właściwości takie jak: wytrzymałość na rozciąganie, na zginanie czy udarność są około 10% wyższe niż odpowiednie dane dla konwencjonalnie odlanych wyrobów. Lepsze właściwości mechaniczne powodują, że wzrasta odporność materiału powłoki na zużycie, pękanie podczas nagrzewania i wykruszanie.

Spadek twardości walców odlewanych odśrodkowo jest nieco mniejszy niż takich samych odlewanych konwencjonalnie. Niektóre materiały, jak wysokochromowe żeliwo nie wykazują w ogóle spadku twardości.

Dzięki temu, że materiały, z którego wykonany jest rdzeń nie miesza się z materiałem powłoki, w czopach nie występuje kruche żeliwo połowiczne. Podnosi to właściwości walców otrzymanych metodą podwójnego odlewania.

Najbardziej istotne zjawiska występują przy odlewaniu odśrodkowym właściwym. Zostaną one opisane poniżej.

9.4 MODELE WIROWANIA CIEKŁEGO METALU PRZY ODLEWANIU ODŚRODKOWYM WŁAŚCIWYM

Metal wprowadza się do wnęki formy przez rynnę zalewową. W przypadku zalewania form wirujących wokół osi poziomej, w celu bardziej równomiernego rozłożenia metalu forma lub rynna wykonuje względny przesuw osiowy. Wprowadzony do formy ciekły metal ulega zawirowaniu.

W początkowym okresie wirowania występuje ruch względny ciekłego metalu w stosunku do wirującej formy; prędkość metalu ω_m jest mniejsza od prędkości formy ω_f. Taki rodzaj wirowania nosi nazwę *wirowania hydrodynamicznego*. Towarzyszyć mu może przepływ metalu o ruchu burzliwym (przy dużych różnicach prędkości) lub laminarnym. W końcowym etapie wirowania metalu ω_m i formy ω_f są sobie równe. Taki rodzaj wirowania ustalonego nosi nazwę *wirowania hydrostatycznego*.

Przejście metalu od stanu wirowania hydrodynamicznego do hydrostatycznego jest naturalne i występuje po upływie określonego czasu, kiedy temperatura metalu obniży się do

zakresu temperatury krzepnięcia.

Na wirujący w formie ciekły metal w rzeczywistości oddziałuje siła odśrodkowa

$$P_o = m \cdot \omega^2 \cdot r \tag{9.1}$$

siła ciężkości:

$$P = m \cdot g \tag{9.2}$$

siły tarcia τ (zewnętrznego i wewnętrznego w metalu) oraz siły krystalizacji P_{kr} (powstają na skutek naprężeń krystalizacyjnych w okresie krzepnięcia odlewu). Siły krystalizacji mają wpływ na właściwości odlewu, natomiast nie mają na kształtowanie odlewu w formie.

Przy analizie wirowania metalu w formie można przyjąć model wirowania hydrodynamicznego lub hydrostatycznego. Prostszy do analizy i łatwiejszy do opisania matematycznego jest model wirowania hydrostatycznego. Nie należy jednak zdawać sobie sprawę, że ten model wirowania jest modelem uproszczonym, w którym przyjęto następujące założenia:

- ciekły metal jest płynem doskonałym (nielepkim i nieściśliwym),
- ciekły metal znajduje się w stanie równowagi względnej; działa na niego tylko układ dwóch sił – siły odśrodkowej i ciężkości (pomija się siły tarcia),
- podczas wirowania metalu nie ma wymiany ciepła z otoczeniem (proces adiabatyczny),
- wirujący metal ma stałą temperaturę (proces izotermiczny).

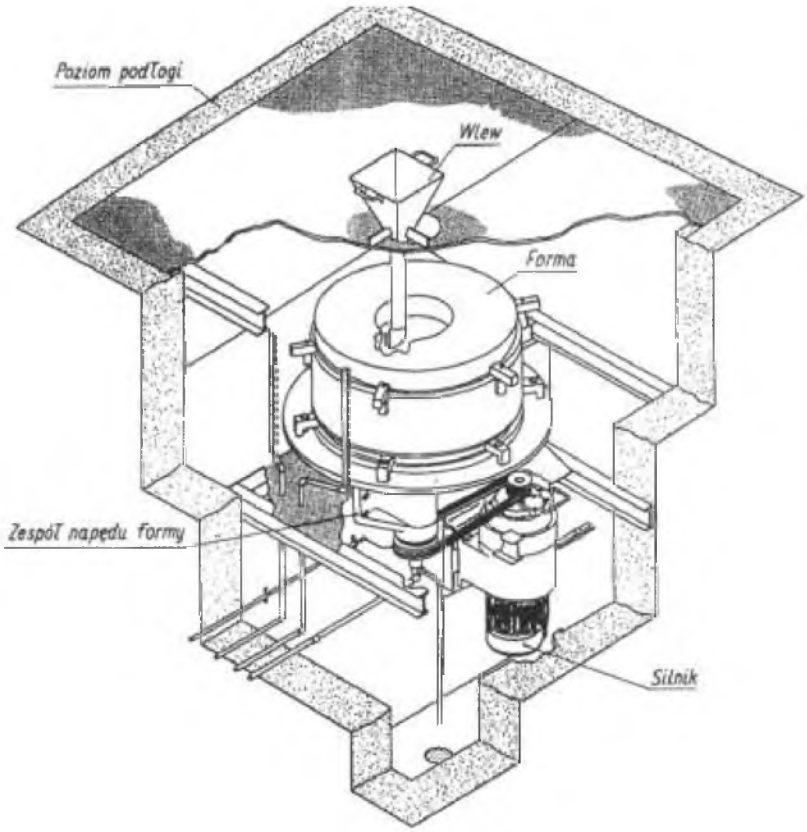
W rzeczywistości występuje hydrodynamiczne wirowanie ciekłego metalu w formie z jednoczesną wymianą ciepła (proces nieizotermiczny i nieadiabatyczny).

9.5 PRAKTYKA ODLEWANIA ODŚRODKOWEGO

Największe znaczenie przemysłowe mają dwie odmiany *odlewania odśrodkowego: właściwe i półodśrodkowe*. Istnieje bardzo wiele wariantów tych procesów, w których stosuje się różne położenie osi wirowania, różną konstrukcję i materiały form (metalowe i niemetalowe) oraz różnego rodzaju urządzenia wspomagające. Na rys. 9.2 pokazano typowe stanowisko do odlewania odśrodkowego o pionowej osi obrotu.

Odlewanie odśrodkowe daje wiele korzyści, wynikających z działania sił odśrodkowych, m. in. umożliwia:

- wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie porowatości , wskutek lepszego oddzielenia stałych i gazowych wtrąceń niemetalicznych,
- wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie układu wlewowego, co prowadzi do poważnego zwiększania uzysku odlewniczego,
- wyeliminowanie lub ograniczenie stosowania rdzeni.
- W przypadku odlewów ze stopów żelaza, dla których alternatywną metodą odlewania mogły być tylko formy piaskowe (np. ze względu na znaczne wymiary), dzięki odlewaniu odśrodkowemu można uzyskać lepsze własności mechaniczne, drobnoziarnistą strukturę bez porowatości skurczowej, zmniejszenie naddatków obróbkowych i zwiększenie wydajności.
- Główne ograniczenia procesu polegają na konieczności ścisłego dozowania metalu oraz możliwości występowania segregacji składników stopowych w odlewie.



Rys. 9.2 Typowe stanowisko do odlewania odśrodkowego o pionowej osi obrotu [1]

Podczas wirowania formy ciekły metal gromadzi się przy jej ściankach i tworzy płynną bryłę obrotową, która jest ograniczona zewnętrzną powierzchnią formy, a krzepnięcie odbywa się pod działaniem siły odśrodkowej. Z tego względu odlewy wykonane w tej technologii są ścisłe, a przez to mają wyższe właściwości wytrzymałościowe.

Ze względu na fakt dużej złożoności zjawisk cieplnych i dynamicznych towarzyszących odlewaniu do form wirujących, w praktyce do obliczenia potrzebnej liczby obrotów formy, niezbędnej do ukształtowania się geometrycznego odlewanego odśrodkowo odlewu, przyjmuje się uproszczony model dynamicznego wirowania cieczy bez uwzględnienia wymiany ciepła i różnic w prędkości wirowania formy i ciekłego metalu. Zakłada się więc wirowanie ciekłego metalu formą a wymianą ciepła uwzględnia się pośrednio przy ustalaniu doświadczalnych parametrów odlewania odśrodkowego [5]. Do najważniejszych parametrów odlewania odśrodkowego należy prędkość obrotowa formy, czyli liczba obrotów formy n_f na minutę. Można ją obliczyć z hydrostatycznego równania różniczkowego Eulera lub prościej – korzystając w przybliżonego wzoru:

$$n_f = 300\sqrt{\frac{k}{r_w}} \tag{9.3}$$

gdzie:

r_w – promień wewnętrzny odlewu,

k – współczynnik ciążenia, który dla określonej masy ciekłego stopu i stałej prędkości

kątowej wirowania jest stosunkiem przyspieszenia odśrodkowego do przyspieszenia ciążenia.

Właściwego doboru prędkości obrotowej formy, uwzględniającego dobre przybliżenie modelu do warunków rzeczywistych, można dokonać posługując się specjalistycznym oprogramowaniem lub korzystając z literatury specjalistycznej, w której można znaleźć wiele wykresów i tablic poświęconych temu zagadnieniu.

W przypadku wirowania cieczy wokół osi pionowej powierzchnia odlewu przyjmuje kształt paraboloidy obrotowej. Im większa jest wysokość odlewu, ze względu na naddatki obróbcze, tym większa jest prędkość obrotowa wirowania. Z tego powodu wirowanie wokół osi pionowej, przy odlewaniu półodśrodkowym i odśrodkowym, stosuje się do odlewów o niewielkiej wysokości, np. pierścieni. Do wykonywania odlewów o większych długościach stosuje się wirowanie wokół osi poziomej lub ukośnej. W procesie kształtowania się odlewu odśrodkowego ciśnienie w odlewanym stopie zmienia się zgodnie z dwoma niezależnymi procesami, określającymi dwa stadia odlewu, a mianowicie wypełnienie formy ciekłym stopem z równoczesnym procesem krzepnięcia i krzepnięcia stopu po zakończeniu wypełniania formy.

Odlewanie do form wirujących stosuje się najczęściej do wykonywania:

- walców i podobnych elementów (ślimaki, wały napędowe, półosie wagonowe, koła zębate),
- walców bimetalowych,
- odlewów rurowych (rury wodociągowe, kanalizacyjne, lufy armatnie itd.),
- różnego rodzaju tulei (na pierścienie tłokowe, ślimacznice, łożyska ślizgowe),
- kół (kopalnianych, suwnicowych, łańcuchowych i pasowych),
- pierścienia, cylindrów silników Diesla,
- wirników pomp.

Formy do odlewania odśrodkowego mogą być metalowe lub piaskowe w obudowie metalowej, grafitowe i z tworzyw sztucznych. Formy wirujące przeważnie wykonuje się z żeliwa szarego, staliwa, stali węglowych i stopowych. Do odlewania tulei ze stopów miedzi są stosowane formy ze stopu CuZn1,5 lub CuZnNi, CuCr i CuBe – wykonywane również w drodze odlewania odśrodkowego [2].

Formom metalowym, a szczególnie ich wymagania ze względu na znaczne obciążenie cieplne (spowodowane zmianami temperatury) i mechaniczne. Powierzchnię formy można dodatkowo chronić przez jej azotowanie. Stwierdzono, że azotowane formy stalowe, w których wykonuje się odlewy o bardziej złożonym kształcie, wytrzymują do 10000 zalań.

Ograniczenia zastosowania odlewania do form wirujących wynikają głównie z wysokiego kosztu maszyn i urządzeń, a także z kosztów ich eksploatacji, oprzyrządowania oraz kosztów ich eksploatacji, oprzyrządowania oraz urządzeń dozujących. Obserwuje się również zwiększoną tendencję do powstawania segregacji w odlewach.

Odlewy odśrodkowe są wykonywane prawie ze wszystkich stopów, tzn. ze staliwa, żeliwa, stopów metali nieżelaznych (szczególnie stopów Cu) oraz ze stopów żaroodpornych i żarowytrzymałych.

9.6 MATERIAŁY STOSOWANE DO PRODUKCJI WALCÓW

Walce z wysokochromowego żeliwa o podwyższonej trwałości

Powodem zastosowania odśrodkowego odlewania jako procesu produkcji walców hutniczych, była możliwość wytwarzania walców z nowych wysokostopowych materiałów, które w wielu przypadkach nie były poprzednio używane.

Wysokochromowe żeliwo, zawierające 2,6-3,2% Cr, 1,0-2,0% Ni oraz 0,5-4,0% Mo jest takim materiałem. Wykonane z niego walce szeroko stosowano w latach siedemdziesiątych, używając ich w takich typach walcowni jak: zgniatacze, klatki wstępne w półciągłych i ciągłych walcowniach gorących taśm wąskich, szerokich, w zimnych walcowniach tandem, walcarkach wygładzających i w walcowniach blach grubych.

Odporne na zużycie wysokochromowe żeliwo jest o wiele lepsze niż żeliwo zabielone lub stal wysokowęglowa z dodatkiem Ni i Cr obrabiana cieplnie. Czas pracy walca z wysokochromowego żeliwa, w porównaniu z czasem pracy walca wykonanego z żeliwa zabielonego lub stali, był dłuższy o 100%, a w kilku przypadkach nawet o 200-300% [2].

PODSUMOWANIE

Produkcja wysokojakościowych walców hutniczych, produkowanych metodą odlewania odśrodkowego jest stosowana w przypadku szczególnych wymagań odnoszących się do wyrobów, wobec których oczekuje się odpowiedniego rozkładu mikrostruktury na przekroju poprzecznym (miękką w rdzeniu a utwardzoną na powierzchni wyrobu). Istotną rolę odgrywa tu jednocześnie zastosowany, zaawansowany skład chemiczny. Z jednej strony przyczynia się on do poprawy wytrzymałości i trwałości wyrobu lecz w drugiej strony często podwyższa koszt finalny wynikający z ceny samych składników oraz stosowanych do ich aplikacji systemów produkcyjnych.

Artykuł powstał w ramach pracy statutowej pt. „Innowacyjność w Inżynierii Produkcji" o symbolu BK 249/ROZ3/2012 realizowanej w Instytucie Inżynierii Produkcji na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

1. Grosman F.: Technologia Metali. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 2010.
2. Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A.: Odlewnictwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2000.
3. Mazurkiewicz J., Szymszal J., Ścierski J.: Podstawy technologii przetwórstwa metali. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2003.
4. Szymszal J.: Sprawozdanie ze stażu przemysłowego w KUM BUMAR Zakład Maszyn Budowlanych w Zawierciu (materiały własne autora).
5. Praca zbiorowa: Odlewnictwo XXI w. Przykłady wykorzystania techniki komputerowej do opracowania technologii wytwarzania odlewów. Wyd. Instytut Odlewnictwa. Kraków 2002.

WPŁYW INNOWACYJNOŚCI WYROBÓW HUTNICZYCH NA JAKOŚĆ PROCESU PRODUKCYJNEGO

Streszczenie: *Artykuł prezentuje problem wpływu wymagań stawianych innowacyjnym wyrobom produkowanym przez przemysł ciężki. Zaawansowane oczekiwania wobec wyrobów wymuszają na producentach opracowywanie i wdrażanie nowoczesnych metod realizacji produkcji w systemach produkcyjnych, pozwalających wykonać określone zadanie. W artykule skupiono się na omówieniu przykładu produkcji walców hutniczych, przy użyciu metody odlewania ośrodkowego.*

Słowa kluczowe: *innowacyjność, przemysł, jakość, wyrób*

INFLUENCE THE INNOVATION OF SMELTING PRODUCTS ON QUALITY A PRODUCTION PROCESS

Abstract: *The article is introducing the problem of influence put requirements innovative products produced by the heavy industry. Advanced expectations towards products are forcing realization producers drawing up and implementing modern methods of production in production systems, allowing to perform a specific task. In article they concentrated on discussing example the production of smelting waltzes, using the method of central pouring out.*

Key words: *innovation, industry, quality, product*

dr inż. Jacek SITKO
Politechnika Śląska, Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Inżynierii Produkcji
ul. Roosevelta 26, 41-800 Zabrze
e-mail: JSitko@polsl.pl