

PODSTAWOWE ASPEKTY PRODUKCJI WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW DLA PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO

Łukasz POLOCZEK, Bartłomiej DYBOWSKI, Andrzej KIELBUS, Robert JAROSZ

Streszczenie: Na wyprodukowanie odlewu charakteryzującego się wysoką jakością przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości użytkowych wpływa wiele etapów procesu produkcyjnego. Etapy te są od siebie zależne i w końcowym efekcie produkcji decydują o konkurencyjności wytwarzanych elementów. Podstawowym aspektem wpływającym na wysoką jakość, a tym samym na konkurencyjność odlewu jest stwierdzenie iż odlew jest wolny od wad. Znaczna różnorodność wad występujących w odlewach wynika z technologii wytwarzania odlewów, na którą wpływa szereg operacji technologicznych, w tym: zaprojektowanie i wykonanie formy odlewniczej, technologii wytapiania i zalewania ciekłego metalu do formy oraz przeprowadzenie obróbki poodlewniczej. W niniejszym artykule przedstawiono sposób opracowania technologii wytwarzania wielkogabarytowych odlewów dla przemysłu energetycznego.

Słowa kluczowe: Odlew wielkogabarytowy, Stopy Al-Si, Przemysł energetyczny

1. Wprowadzenie

Bezustanny rozwój branży energetycznej zmusza producentów elementów układów elektroenergetycznych do spełniania coraz wyższych wymagań nie tylko konstrukcyjnych, ale także ekonomicznych [1, 2]. Wyprodukowanie innowacyjnego wielkogabarytowego odlewu o skomplikowanym kształcie charakteryzującego się wysoką jakością przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości użytkowych wiąże się przeprowadzeniem wielu etapów procesu produkcyjnego. Etapy te są od siebie zależne i w końcowym efekcie produkcji decydują o konkurencyjności wytwarzanych elementów. Podstawowym aspektem wpływającym na wysoką jakość, a tym samym na konkurencyjność odlewu jest stwierdzenie iż odlew jest wolny od wad [3, 4]. Wadą odlewu zgodnie z normą PN-85/H-83105 "Odlewy - Podział i terminologia wad" jest zmiana kształtu, jakości powierzchni surowej, naruszenie ciągłości oraz nieprawidłowość struktury wewnętrznej odlewu [5]. Produkcja odlewów bez pewnej ilości wad jest praktycznie niemożliwa. Dlatego też odlewnie w swoich analizach techniczno-ekonomicznych zakładają pewien dopuszczalny procent wadliwych odlewów, który nie obniża ich rentowności. W zależności od asortymentu produkcji (materiału, stopnia jego skomplikowania, warunków technicznych odbioru, wyposażenia technologicznego i wielkości wytwarzanych serii) dopuszczalna ilość wadliwych odlewów nie powinna przekraczać 2-5 % całkowitej produkcji. Wyjątkami dla dolnej granicy wadliwych odlewów są pozycje bezrdzeniowe produkowane na liniach automatycznych, gdzie wskaźnik ten nie powinien przekraczać 1% oraz średnie i duże odlewy jednostkowe lub małoseryjne, gdzie dla konkretnych pozycji zadawalający jest poziom nieprzekraczający 7-10% braków [6, 7].

2. Zapewnienie jakości odlewom wielkogabarytowym

Do głównych etapów wpływających na jakość wielkogabarytowych odlewów podczas procesu produkcji zalicza się:

- dobór składu chemicznego;
- właściwy dobór technologii formy i rdzenia;
- przygotowanie, topienie i uszlachetnianie ciekłego stopu (modyfikatory);
- przeprowadzenie obróbki poodlewniczej tj. usuwanie układów wlewowych, obróbka cieplna, obróbka wykańczająca (zaczyszczanie, polerowanie, śrutownie) powierzchni surowej odlewów, operacje kontrolne i odbiorcze;
- kontrola jakości gotowego produktu.

W celu minimalizacji wad odlewniczych, w procesie opracowywania technologii odlewania stosuje się wspomaganie komputerowymi metodami projektowania [7]. Jednakże zawsze należy mieć na uwadze to, że jak sama nazwa wskazuje wszystkie istniejące programy komputerowe służą jedynie wspomaganie projektowania wszystkich etapów wytwarzania odlewu i nie zastąpią w pełni konstruktora, technologa, czy metalurga. Nawet niewielkie odchylenia od założonych (rzeczywistych) parametrów technologicznych mogą wprowadzić przekłamanie w wynikach symulacji komputerowej poszczególnych etapów wytwarzania. Stwierdza się, że 1/4 przyczyn powstawania braków wpływa na 2/3 skutków ich powstawania, czyli jedna przyczyna może wywołać kilka różnych braków [4].

W przypadku wystąpienia wady odlewniczej konieczne jest przeprowadzenie analizy związanej z klasyfikacją wady oraz w celu określenia przyczyny jej wystąpienia. Prawidłowe postępowanie przy analizie wad odlewów przedstawiono poniżej:

1. Ustalenie rodzaju wady – identyfikacja i nazwanie wady zgodnie z normą PN-85/H-83105.
2. Wytypowanie kilku najbardziej prawdopodobnych przyczyn. Celem określenia przyczyn występowania wad odlewniczych stosowane są różne metody analityczne. Coraz częściej stosuje się metody polegające na wyodrębnianiu przyczyn powstawania wad w zależności od charakteru czynnika mogącego wpływać na wady (6M, lub 6M+E). Czynniki te to [8,9]:
 - MANPOWER (czynnik ludzki);
 - MACHINE (wykorzystanie maszyny);
 - MATERIAL (wykorzystanie materiałów i tworzyw);
 - METHOD (metoda wytwarzania);
 - MEASUREMENT (sposób pomiaru);
 - MANAGEMENT (kierowanie, zarządzanie);
 - ENVIRONMENT (czynniki środowiskowe- otoczenie).
3. Działania korygujące i naprawcze.

3. Wielkogabarytowe odlewy o skomplikowanym kształcie

W przypadku odlewów wielkogabarytowych o dużej masie własnej proces opracowania technologii jest dość skomplikowany i pracochłonny. Odlewy te charakteryzują się rozwiniętą powierzchnią i zmienną grubością ścianek w obszarach występowania węzłów cieplnych (kołnierze, żebra), które utrudniają lub całkowicie uniemożliwiają stworzenie warunków krzepnięcia objętościowego. W takich przypadkach głównym celem jest dążenie do kierunkowego krzepnięcia odlewów, polegającego na przebiegu frontu krystalizacji od ścian cienkich poprzez węzły cieplne odlewu do elementów zasilających (nadlewów).

Głównym materiałem odlewniczym stosowanym na wielkogabarytowe odlewy dla przemysłu energetycznego jest stop $AlSi7Mg0,3$, który należy do podeutektycznych stopów z grupy Al-Si. Stopy aluminium-krzem charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami technologicznymi, dobrą odpornością korozyjną i dobrymi właściwościami trybologicznymi [10]. Największą ich wadą jest obecność dużych, kruchych, kryształów krzemu w strukturze stopu, które znacznie obniżają właściwości mechaniczne [11]. Stopy te charakteryzują się dużą skłonnością do tworzenia porowatości gazowo-skurczowej, w przypadku nieodpowiedniego systemu technologicznego opartego na nieefektywnym zasilaniu i sekwencyjnym chłodzeniu [12]. Dodatkowym utrudnieniem w technologii odlewania stopów Al-Si jest duże powinowactwo do tlenu i skłonności do tworzenia tlenków pochodzenia pierwotnego (proces metalurgiczny) i wtórnego (w formie podczas odlewania). Kluczem do sukcesu jest odpowiednie zaprojektowanie układu wlewowego, układu filtrującego, systemu odpowietrzenia oraz wspólnego systemu zasilanie-chłodzenie realizowanego poprzez nadlewy zasilające i elementy chłodzące – ochładzalniki (żeliwne, aluminiowe).

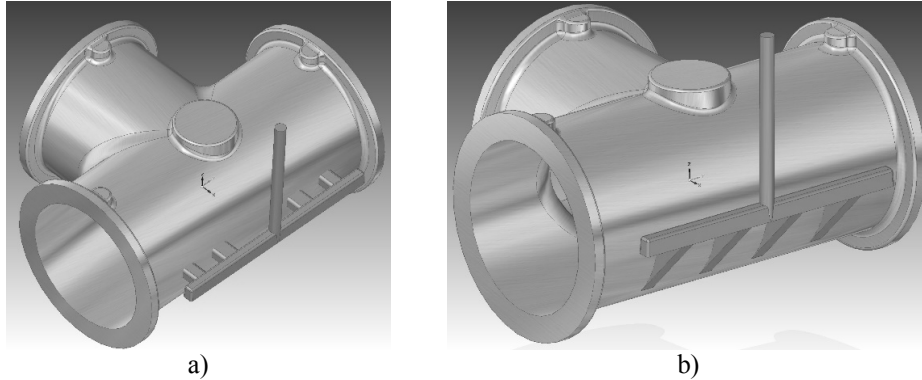
3.1. Technologia odlewania odlewów wielkogabarytowych

Układy wlewowe stosowane w odlewnictwie stopów aluminium są układami otwartymi tzn. każdy następnny przekrój w układzie jest większy od swojego poprzednika. Takie rozwiązanie umożliwia stopniowe zmniejszanie szybkości płynięcia strugi ciekłego stopu, a dodatkowe zabiegi związane z filtracją (filtry ceramiczne, siatki stalowe) i „łamaniem” poszczególnych belek rozprzodających pod różnymi kątami skutecznie wyhamowuje szybkość zalewania.

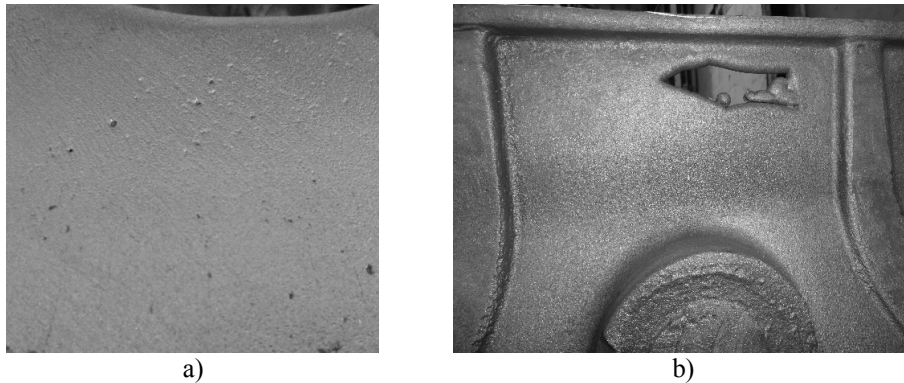
Szybkość wypełniania wnęki formy jest bardzo istotna, gdyż nadmierna szybkość strugi ciekłego stopu powoduje różnego rodzaju turbulencje i zawirowania, które w efekcie końcowym powodują powstawanie wtrąceń pochodzenia wtórnego. Przekroczenie krytycznej szybkości prowadzi również do zjawiska rozbijania głównej (zwartej, jednolitej) strugi ciekłego stopu na mniejsze („języki”, krople), które są znacznie bardziej podatne na zjawisko utleniania.

Sama konstrukcja układu wlewowego nie jest gwarantem uzyskania dobrych wyników jakościowych, równie ważnym jest miejsce i sposób doprowadzenia ciekłego stopu do odlewu (rys. 1).

Dla pierwszego rozwiązania pokazanego na rysunku 1a widać, że wlewy doprowadzające są usytuowane w podziale odlewu. Sposób ten w przypadku odlewów o dużych gabarytach, gdzie wysokość od podziału może wynosić do 500 mm jest niewskazany z uwagi na spadek strugi ciekłego stopu z dużej wysokości i tworzenia zjawiska „wodospadu”. W drugim przypadku przedstawionym na rysunku 1b, front zalewania doprowadzony jest w dolne obszary odlewu. Zapewnia to spokojniejsze wpływanie ciekłego stopu do wnęki odlewniczej. Podczas wypełniania formy, czoło strugi sukcesywnie wynosi powietrze na zewnątrz formy poprzez inne elementy układów technologicznych (odpowietrzenia, wnęki odlewów). Ten efekt zapobiega zamykaniu w „pułapki” porcji powietrza w wyniku czego mogą występować wady takie jak: pęcherze, niespawy, niedolewy, porowatość gazowa, wtrącenia niemetaliczne itp. (rys. 2).

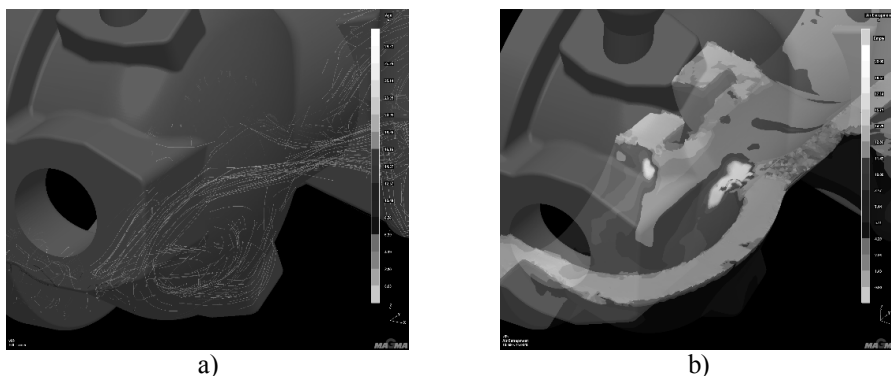


Rys. 1. Przykładowe rozwiązania układów wlewowych: a) doprowadzenie ciekłego stopu na podziale formy, b) doprowadzenie ciekłego stopu wlewami szczelinowymi w obszary dolne odlewu



Rys. 2. Przykładowe wady odlewnicze: a) nakłucia na powierzchni surowej odlewu powstałe poprzez usunięcie wtrąceń tlenkowych w operacji śrutowania, b) niedolew na ścianie odlewu.

Nawet w przypadku poprawnej geometrii i właściwie dobranych przekrojów układu wlewowego, może dochodzić do takiej sytuacji, w której nieodpowiednie miejsce doprowadzenia strugi ciekłego stopu do odlewu spowoduje zaburzenie przepływu laminarnego. Zdarzają się przypadki, w których pomimo optymalnego doprowadzenia ciekłego stopu z prędkością niższą od krytycznej, sama konstrukcja odlewu np. zmienna grubość ścianek, węzły cieplne, żebra, mogą powodować lokalne przyśpieszenie strugi ciekłego stopu i być powodem powstawania wad odlewniczych. Dlatego analizując możliwe rozwiązania układów technologicznych, które będą odpowiednim wyborem dla konkretnej geometrii odlewu, należy brać pod uwagę kombinację wlewów rozprowadzających i doprowadzających z elementami filtracji wraz z odpowiednim miejscem ich doprowadzania do wnętrza odlewu (rys.3).



Rys. 3. Przykładowa symulacja wypełniania wnęki odlew w programie MAGMASOFT:
 a) wektory zalewania z widocznymi obszarami turbulencji strugi ciekłego metalu,
 b) zawartość powietrza w ciekłym stopie wynikająca z zasysaniem przez elementy układu wlewowego.

Oprócz laminarnego rozprowadzania ciekłego stopu, układy wlewowe powinny zapewniać jak najmniejszy gradient temperatury ciekłego stopu w różnych obszarach formy. Lokalne przegrzania wywołane nieodpowiednim przekrojem wlewów, punktowym doprowadzaniem, sprzyjają powstawaniu mikroporowatości skurczowej, rozrostowi ziarna w procesie krzepnięcia, a to z kolei prowadzi do obniżenia właściwości mechanicznych i użytkowych. W przypadku nadmiernego przechłodzenia strugi z powodu długich dróg płynięcia ciekłego stopu występują problemy z niedolewami, niespawami, porowatością skurczową wynikającą z niskiej temperatury wpływania ciekłego stopu do wnęk zasilaczy.

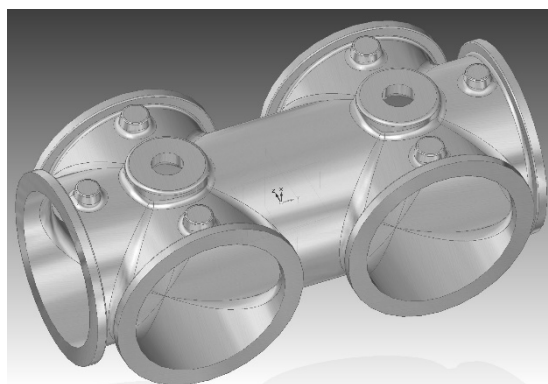
Zagrożenia te powiązane są z odlewami wielkogabarytowymi złożonymi z wielu brył elementarnych, których długości sięgają nawet powyżej 2000 mm (rys. 4).

Układy technologiczne w takich przypadkach składają się z wielu elementów dodatkowych, które będą mogły w sposób powtarzalny zapewniać prawidłowy przebieg procesów wypełniania i krzepnięcia odlewów w formach piaskowych. Konstrukcje układów technologicznych muszą zapewniać laminarne wypełnianie wnęki formy w miejscach doprowadzenia ciekłego stopu, niejednokrotnie wielopunktowego w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatury.

Otrzymanie optymalnego rozwiązania jest bardzo często związane z przeprowadzeniem wielu wariantów symulacji komputerowej (rys. 5).

Nieodpowiedni dobór materiałów np. otulin, ochładzalników i ich niewłaściwe umiejscowienie prowadzi do powstawania porowatości skurczowej, a w skrajnych przypadkach skupionych rzadzisz oraz jam skurczowych (rys. 6).

Proces krzepnięcia odlewów wielkogabarytowych o zmiennej grubości ścianki jest procesem złożonym, dlatego na etapie opracowywania technologii należy uwzględnić zjawiska związane z ewentualnym formowaniem się obszarów odlewu charakteryzujących się nadmiernym przegrzaniem lub nadmiernym przechłodzeniem ciekłego stopu. Przykładową rozwiązaniem odpowiedniego rozmieszczenia elementów chłodzących, zasilających i odpowietrzających przedstawiono na rys. 7 i rys. 8.

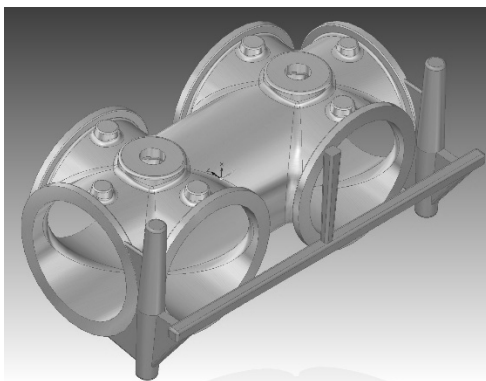


a)

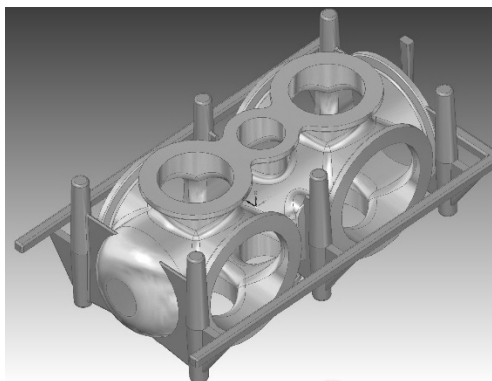


b)

Rys. 4. Przykładowe konstrukcje złożonych odlewów monolitycznych: a) korpus podwójnego czwórnika łącznika, b) korpus podwójnego czwórnika łącznika z dodatkowymi wylotami środkowymi.

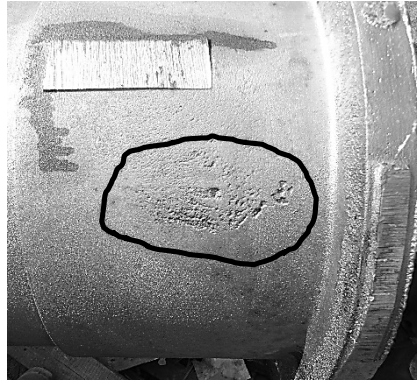


a)

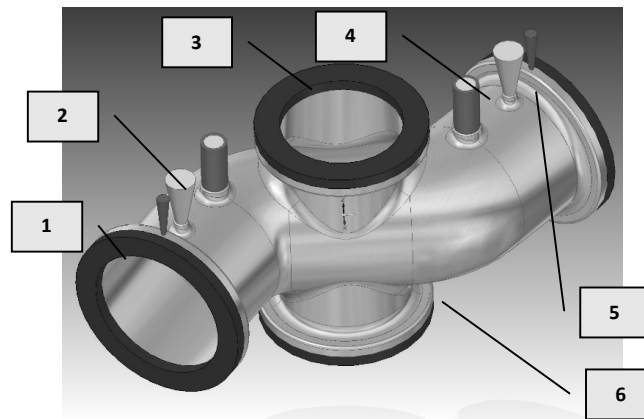


b)

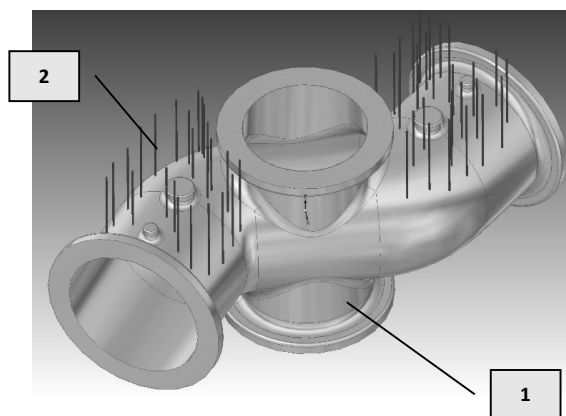
Rys. 5. Przykładowe rozwiązania układów wlewowych: a) doprowadzenia szczelinowe w dwa kołnierze boczne odlewu, b) doprowadzenia szczelinowe dwustronne w kołnierze boczne i w ścianki odlewu.



Rys. 6. Wady odlewnicze typu skurczowego: rozległe rzadzizny na powierzchni odlewu.



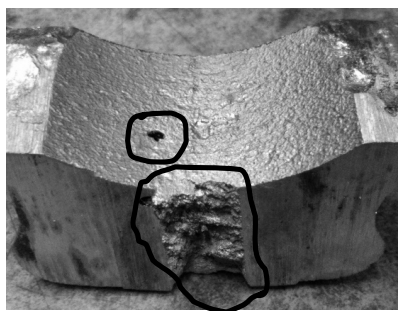
Rys. 7. Przykładowy system zasilania i chłodzenia odlewu: 1 – odlew monolityczny; 2 – ochładzalniki żeliwne; 3 – otuliny izotermiczne; 4 – nadlewy w otulinie izotermicznej; 5 – nadlewy standardowe; 6 – przelewy.



Rys. 8. Przykładowy system odpowietrzania formy odlewu: 1 – odlew; 2 – siatka odpowietrzania wykonana w formie piaskowej.

Obszary węzłów cieplnych o dużych powierzchniach (kołnierze), które trudno zasilić lub ich zasilenie może powodować powstawanie porowatości skurczowej (odkrywanej w późniejszej obróbce mechanicznej), powinny być mocno przechładzane stosując ochładzalniki o odpowiedniej grubości, wykonane z odpowiedniego materiału (żeliwo, aluminium, stal). W przypadku mniejszych węzłów cieplnych (lokalne pogrubienia ścian, żebra) poprawnie przebiegający proces krzepnięcia zapewnia się poprzez umieszczanie standardowych nadlewów zasilających (w masie formierskiej) lub nadlewów w specjalnych otulinach izotermicznych.

Ważnym elementem każdej formy piaskowej jest system odpowietrzania, który odpowiada za usunięcie gazów poreakcyjnych z formy, powstających na skutek zgazowania przez ciekły stop składników masy formierskiej (rys. 9).

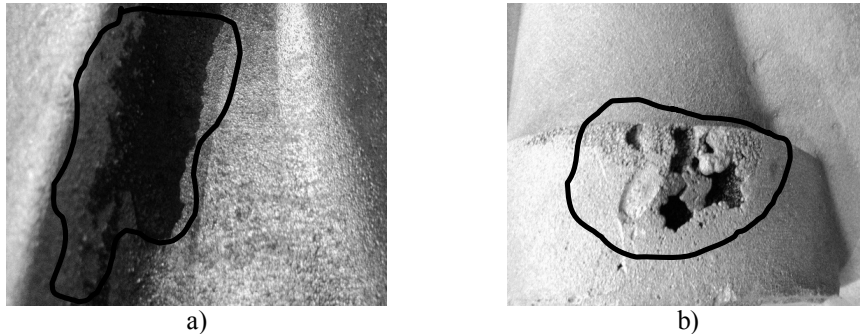


Rys. 9. Przykładowy wycinek odlewu z penetracją gazów poreakcyjnych.

Równie ważnym elementem wpływającym na jakość wykonywanych odlewów jest rodzaj i skład chemiczny masy formierskiej. Właściwości masy formierskiej wpływają na opór formy, wytrzymałość, gazotwórczość, przepuszczalność. Również sposób przygotowania formy w zakresie odpowiedniego zagęszczania masy formierskiej ma odzwierciedlenie w jakości wykonywanych odlewów. W przypadku dużego stopnia zagęszczenia formy zmniejsza się współczynnik przepuszczalności własnej masy formierskiej, z równoczesną poprawą szybkości odprowadzenia ciepła z jednostki powierzchni (mała ilość pustek i kanałów pomiędzy strukturą masy formierskiej). Natomiast lokalne niedogęszczenia z jednej strony mogą powodować bardzo dobry naturalny system kanałów odpowietrzających (polepszenie przepuszczalności masy formierskiej), jednakże z drugiej strony mogą powodować znaczne spowolnienie szybkości odprowadzania ciepła w czasie krzepnięcia odlewu.

Odpowiednia technologia wykonania masy i formy, wiąże się z wyeliminowaniem innego typu wad odlewniczych takich jak np. przypalenia, przywarcia, naderwania, erozja materiału formy, które powiązane są z powstawaniem wad powierzchniowych (rys. 10).

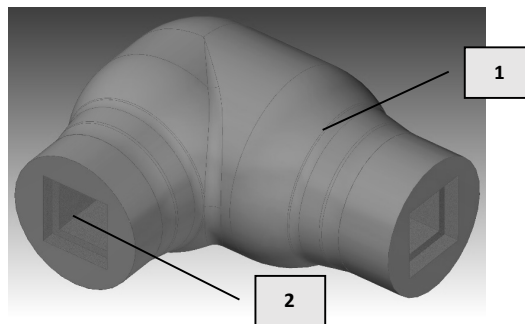
Oprócz zabiegów dotyczących konstrukcji układów wlewowych, wady pochodzące od masy formierskiej są minimalizowane poprzez stosowanie dodatkowych materiałów pokrycia powierzchni wnek formy (pokrycia wodne, alkoholowe). Wpływają one na poprawę jakości powierzchni zewnętrznej odlewów, ograniczają emisyjność gazów poreakcyjnych w procesie zalewania i krzepnięcia odlewu (ograniczenie bezpośredniego styku ciekłego stopu ze składnikami zawartymi w masie formierskiej). Dodatkowo pokrycia te stanowią barierę dla powstających gazów.



Rys. 10. Przykładowe wady powierzchniowe: a) przywarcia masy formierskiej do powierzchni surowej odlewu, b) zaproszenie masą formierską powierzchni surowej odlewu.

W procesie krzepnięcia i późniejszego stygnięcia zachodzi zjawisko powstawania naprężeń wewnętrznych odlewu. Naprężenia wynikające z procesu krystalizacji, przy której z roztworu ciekłego w zakresie temperatury krzepnięcia wydzielają się różne fazy, mogą powodować poważne odkształcenia odlewu prowadzące niekiedy do propagacji pęknięć.

Obecnie stosowane masy formierskie (chemoutwardzalne), są po utwardzeniu dość sztywne, mało podatne w procesie kurczenia się odlewu (krzepnięcie, stygnięcie), ale z drugiej strony charakteryzują się bardzo dobrym odwzorowaniem kształtu poprzez wprowadzenie różnego rodzaju „wyszczuplenia” wewnątrz rdzeni, części formy (rys. 11.).



Rys. 11. Rdzeń piaskowy z wyszczupleniem wewnętrznym: 1 – rdzeń; 2 – przestrzeń „wyszczuplenia” polepszająca podatność rdzenia, zmniejszająca masę, wykorzystywana do transportu i składania formy

Większość tego typu naprężeń uwalnianych jest po wybiciu odlewu z formy oraz po odcięciu układów technologicznych. Dodatkowo wprowadza się naprężenia i tym samym deformacje kształtu podczas procesu obróbki cieplnej odlewu. W tym jednak przypadku można to zminimalizować stosując: specjalną obróbkę odprężającą, specjalne przyrządy lub mechaniczny proces prostowania.

5. Podsumowanie

W całościowym ujęciu zaprojektowanie technologii odlewniczej dla wielkogabarytowego monolitycznego odlewu, wymaga umiejętności powiązania ze sobą

wielu zjawisk metalurgicznych i ich wpływu na późniejszy efekt jakościowy odlewu. Dlatego poszczególne etapy realizacji projektu uruchamiania nowego produktu, wymuszają dokładną analizę zagrożeń uwzględniającą wszystkie poszczególne etapy procesu produkcyjnego. Na podstawie takiej analizy wprowadza się zabezpieczenia, które wyeliminują lub zminimalizują występowanie czynników mających wpływ na powstawanie odchyłek mających w efekcie wpływ na właściwości użytkowe odlewów. Sposób takiego podejścia do opracowania technologii na etapie wdrażania pozwala na wyeliminowanie wielu problemów w późniejszej seryjnej produkcji odlewów.

Praca naukowa finansowana ze środków NCBiR z projektu nr PBS2/B5/28/2013.

Literatura

1. Łucki Z., Misiak W., Energetyka a społeczeństwo, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
2. Zator S., Tomaszewski M., Wybrane zagadnienia gospodarki remontowej energetyki, Wybrane zagadnienia gospodarki remontowej energetyki, Nowa Energia, Racibórz, 2012.
3. Górny Z., Lech Z., Odlewanie kokilowe stopów metali nieżelaznych, WNT 1975.
4. Fałęcki Z., Analiza wad odlewów, WNT Kraków, 1997.
5. Odlewy – podział i terminologia wad, PN-85/H-83105.
6. Poradnik Inżyniera. Odlewnictwo, WNT 1972.
7. Kluska-Nawarecka S.: Metody komputerowe wspomaganie diagnostyki wad odlewów, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 1999.
8. Łunarski J., Zarządzanie jakością. Standardy i zasady, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008
9. Łybacki W., Zawadzka K., Wspomaganie diagnostyki wad odlewów narzędziami zarządzania jakością, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji Vol. 28 nr 1 (2008), 89 - 101
10. Liu Y.L., Kang S.B., Kim H.W., The complex microstructures in an as-cast Al–Mg–Si alloy, Materials Letters 41 (1999) 267–272
11. Rana G., J.E., Zhou Wang Q.G., Precipitates and tensile fracture mechanism in a sand cast A356 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology 207 (2008) 46-52.
12. Poniewierski Z., Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów, WNT Warszawa (1989).

Mgr inż. Łukasz POLOCZEK

Katedra Inżynierii Produkcji, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Politechnika Śląska,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska

Mgr inż. Bartłomiej DYBOWSKI

Dr hab. inż. Andrzej KIELBUS prof. nzw. w Politechnice Śląskiej
Instytut Nauki o Materiałach, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii,
Politechnika Śląska,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska

Dr inż. Robert JAROSZ

Zakład Metalurgiczny „WSK Rzeszów”
ul. Hetmańska 120, 35-078 Rzeszów, Polska
e-mail: lukasz.poloczek@polsl.pl