



WPŁYW CZYNNIKÓW PRODUKCYJNYCH NA JAKOŚĆ WYSOKOCIŚNIENIOWYCH ODLEWÓW WYKONANYCH ZE STOPÓW Z GRUPY Al-Si – ANALIZA Z WYKORZYSTANIEM DIAGRAMU ISHIKAWY

Łukasz Poloczek, Andrzej Kiełbus

Faculty of Materials Engineering and Metallurgy, Silesian University of Technology, Poland

Corresponding author:

Łukasz Poloczek

Silesian University of Technology

Faculty of Materials Engineering and Metallurgy

Department of Production Engineering

Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

phone: (+48) 662093038

e-mail: lukasz.poloczek@polsl.pl

INFLUENCE OF PRODUCTION FACTORS ON THE QUALITY OF THE HIGH PRESSURE DIE CASTINGS MADE OF Al-Si ALLOYS – ANALYSIS WITH THE ISHIKAWA DIAGRAM

ABSTRACT

Production of products required by the customer quality is one of the most important issues related to the management company. So far, quality control of the product was carried out at the end of the production process. It is increasingly giving way to projects aimed at bringing about a situation in which the number of defective products will be significantly reduced. In this situation, it becomes necessary to take action to identify the causes of major importance for the final result of the production process. For this purpose they are increasingly used quality management tool. The article presents the use of Ishikawa cause-effect diagram to identify the causes of casting defects in high pressure die casting Al-Si alloys.

KEYWORDS

high quality castings, high pressure die casting, Al-Si alloys casting defects, Ishikawa diagram.

1. Wprowadzenie

Odlewanie jest technologią polegającą na kształtowaniu ciekłego metalu w gotowy wyrób.

W porównaniu do klasycznych metod odlewania takich jak np. odlewanie grawitacyjne, technologia odlewania wysokociśnieniowego (HPDC) charakteryzuje się dużo większą dokładnością, lepszą jakością powierzchni i dobrym odwzorowaniem kształtu. Technologia ta umożliwia wytwarzanie gotowego wyrobu, głównie ze stopów metali nieżelaznych takich jak Al, Mg, Zn. Proces odlewania przy wykorzystaniu wysokiego ciśnienia polega na wymuszonym ruchu metalu wypełniającego wnękę formy, ciśnieniem wywołanym ruchem tłoka prasującego maszyny odlewniczej. Dzięki uzyskaniu w procesie drobnziarnistej struktury technologia ta zapewnia dobre właściwości mechaniczne produkowanych odlewów. Jedną z jej charakterystycznych cech jest bardzo duża prędkość posuwu tłoka (do 100 m/s) oraz wartość ciśnienia roboczego panującego w maszynie dochodząca do 150 MPa, co jest nie spotykane w innych technologiach odlewniczych. Taki sposób wypełnienia wnęki formy przebiega w sposób turbulentny, któremu to-

warzyszą zjawiska rozpylania, zawirowania, rozbijania i mieszania się strug ciekłego metalu [5].

Proces odlewania wysokociśnieniowego jest wieloetapowym, skomplikowanym procesem charakteryzującym się szeregiem parametrów technologicznych mogących wpłynąć na jakość gotowego wyrobu. Wykorzystanie technologii odlewania wysokociśnieniowego wiąże się ze zwiększoną skłonnością do powstawania niezgodności w strukturze odlewu. Zastosowanie technologii HPDC może powodować zwiększenie porowatości gazowej (spowodowanej zamknięciem powietrza w metalu) lub skurczowej lub też wtrąceń (wynikających z przechłodzenia cząstek metalu przed wypełnieniem wnęki formy). Niezależnie od typu, wszystkie niezgodności naruszają ciągłość i zwartość struktury, która w istotny sposób wpływa na właściwości użytkowe wytworzonego wyrobu [3]. Stąd konieczny jest odpowiedni dobór parametrów technologicznych w celu ustabilizowania procesu. W artykule przedstawiono i omówiono wykorzystanie diagramu przyczynowo-skutkowego Ishikawy do identyfikacji przyczyn występowania niezgodności w wysokociśnieniowych odlewach wykonanych ze stopów aluminium z grupy Al-Si.

2. Materiał do produkcji odlewów wysokociśnieniowych

Obecnie jednym z najczęściej stosowanych materiałów do produkcji odlewów wysokociśnieniowych są odlewnicze stopy aluminium z krzemem i innymi dodatkami stopowymi [3]. Stopy Al-Si są bardzo szeroko stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym czy też w przemyśle medycznym. Szerokie zastosowanie tych stopów determinowane jest ich bardzo dobrymi właściwościami fizycznymi. Stopy te charakteryzują się małą gęstością, stosunkowo niską temperaturą topnienia, dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi. Ponadto siluminy te cechują się dobrymi właściwościami odlewniczymi (dobra lejność, mały skurcz), dobrą obrabialnością oraz znaczną odpornością korozyjną [1, 4]. Największą ich wadą jest jednak obecność dużych, kruchych kryształów krzemu w strukturze stopu, które mają wpływ na poziom właściwości mechanicznych. Z tego powodu konieczna jest modyfikacja struktury m.in. strontem. Zabieg ten powoduje zmianę morfologii wydzielen krzemu eutektycznego z dużych listew na znacznie drobniejsze płytki, powodując między innymi wzrost właściwości wytrzymałościowych odlewu [8, 9, 12].

3. Czynniki wpływające na jakość odlewu wysokociśnieniowego

Proces produkcji odlewów wysokociśnieniowych wykonanych ze stopów Al-Si, jest procesem skomplikowanym, na który wpływa wiele czynników. Do najważniejszych, decydujących o pojawieniu się niezgodności w procesie HPDC zalicza się: odpowiedni dobór parametrów odlewania (szybkość wtrysku, czas i wartość osiągnięcia wymaganego ciśnienia, długość fazy wtrysku, czas i siłą posuwu tłoka, siła doprasowania, temperatura formy), typ maszyny (maszyna z zimną komorą, maszyna z gorącą komorą), czynniki metalurgiczne (skład chemiczny stopu, temperatura topienia materiału wsadowego, temperatura odlewania) oraz czynnik ludzki. Nie wszystkie z tych czynników mogą być kontrolowane w danej chwili, stąd też problem z całkowitym ustabilizowaniem procesu produkcyjnego.

Podstawowym aspektem wpływającym na jakość wyrobu wysokociśnieniowego, a tym samym na jego konkurencyjność jest stwierdzenie iż jest on wolny od wad [6, 7]. 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 [15]. Wadliwy odlew zostaje odrzucony bądź poddany dodatkowym zabiegom, umożliwiającym tym samym jego dalszą eksploatację w cyklu produkcyjnym. Poprzez warunki techniczne określamy dalsze postępowanie z wadliwym odlewem.

Do głównych wad odlewów wysokociśnieniowych powstających w trakcie procesu produkcji zaliczyć można [2, 11]:

- Wady kształtu: uszkodzenia mechaniczne, niedolewy, guzy, zalewki, wypchnięcia, wypaczenia.
- Wady powierzchni surowej: chropowatość, pęcherze zewnętrzne, ospowatości, nakłucia, obciążnięcia, fałdy, strupy, blizny, rakowatości, wgniecenia, zanieczyszczenia, zatarcia, nadtopienia, pocenia, naloty kwieciste, wżarcia, żyłki, zaprószenia, utlenienia.
- Przerwy ciągłości: pęknięcia na gorąco, pęknięcia na zimno, naderwania, pęknięcia żarzeniowe, pęknięcia międzykrystaliczne.
- Wady wewnętrzne: pęcherze, porowatość, jamy skurczowe, rzadzizny, zimne krople, obce metale, segregacje, niejednorodności.

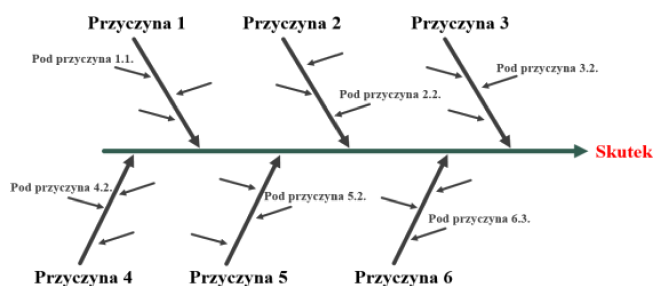
Zapewnienie procesu produkcyjnego charakteryzującego się całkowitą eliminacją wystąpienia niezgodności jest praktycznie niemożliwe. Dlatego też zakłady metalurgiczne w swoich analizach zakładają pewien dopuszczalny procent wystąpienia wadliwych produktów, który nie obniża ich rentowności. W zależności od asortymentu produkcji (materiału, stopnia jego skomplikowania, warunków technicznych odbioru, wyposażenia technologicznego i wielkości wytwarzanych serii) dopuszczalna ilość wadliwych odlewów w procesie wysokociśnieniowym nie może przekraczać 2–5% produkcji całkowitej [2, 10]. Jednakże niezależnie od poziomu wadliwości produkowanych odlewów, odlewy zabrakowane zawsze powodują zwiększanie kosztów produkcji, stąd dążenie do obniżenia ilości wad występujących w odlewach.

4. Zastosowanie diagramu Ishikawy w procesie odlewania wysokociśnieniowego

Jednym z głównych celów zakładów metalurgicznych jest doprowadzenie do stanu, w którym powstawanie produktów wadliwych będzie zdecydowanie ograniczone. Kontrola jakości wyrobu powstającego w procesie HPDC, przeprowadzana jest po zakończeniu procesu produkcyjnego. Wymusza to ustalenie przyczyn powstawania wad odlewów o największym znaczeniu dla końcowego efektu procesu produkcyjnego. W tym celu coraz częściej stosuje się narzędzia zarządzania jakością [16].

Duża liczba parametrów oraz skomplikowanie procesu HPDC powoduje, iż określenie przyczyn oraz skutków powstania problemu nie jest zadaniem prostym i wymaga usystematyzowania. W tym celu stosuje się narzędzia zarządzania jakością, które pozwalają na analizowanie i monitorowanie z równoczesnym oddziaływaniem na proces w całym cyklu produkcji wyrobu. Jednym z najpopularniejszych i najczęściej stosowanych narzędzi zarządzania jakością jest diagram przyczynowo-skutkowy Ishikawy. Diagram ten pozwala na zidentyfikowanie i rozpoznanie najczęściej pojawia-

jących się niezgodności oraz na określenie przyczyn ich powstania. Diagram Ishikawy jest to graficzna prezentacja powiązań pomiędzy przyczynami danego problemu, a ich hierarchią. Jego budowa ma strukturę hierarchiczną (rysunek 1), która porządkuje w sposób chronologiczny i logiczny czynności lub przyczyny związane z zaistniałym problem [14].



Rys. 1. Schemat diagramu przyczynowo-skutkowego Ishikawy.

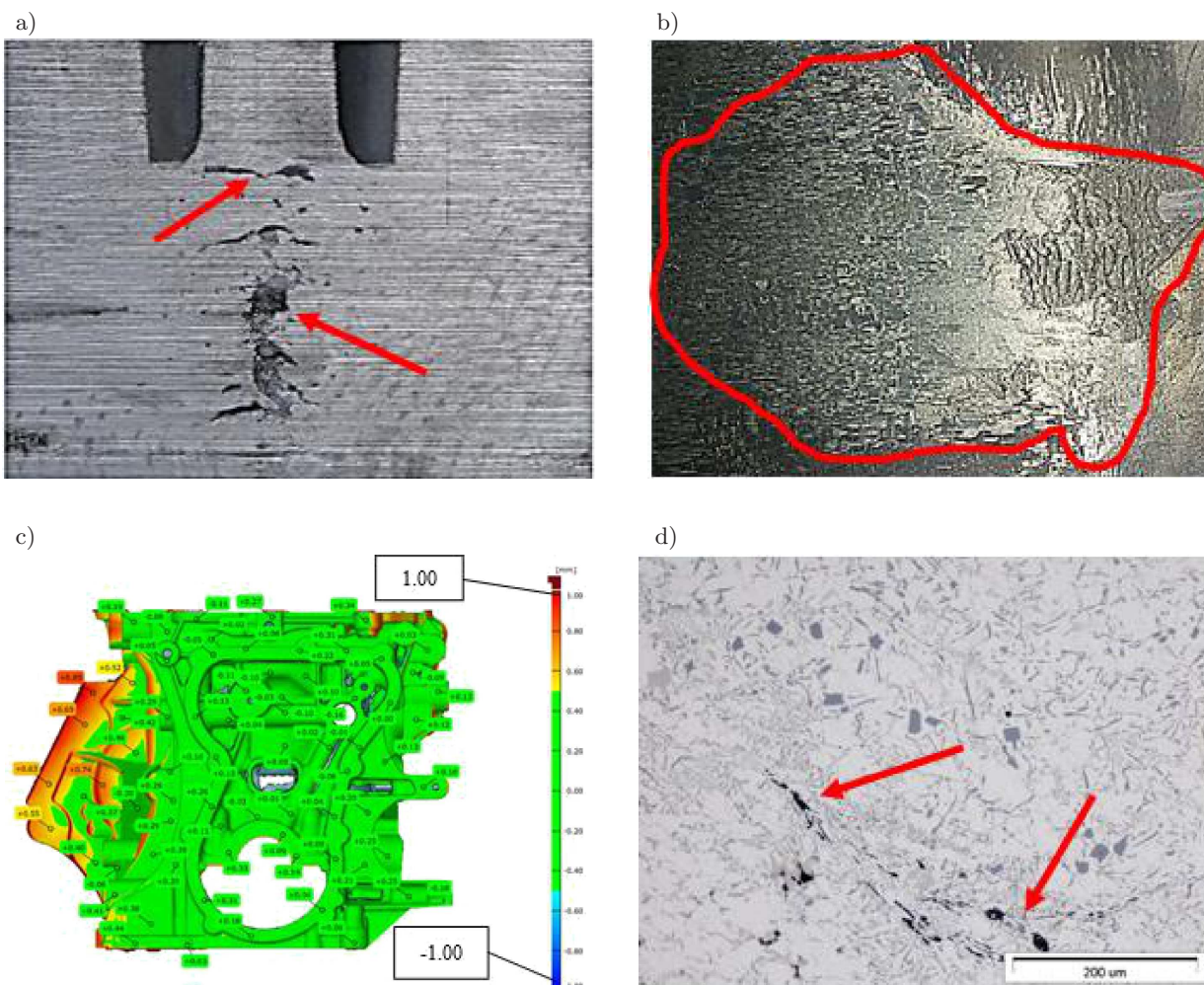
Jedną z możliwości określenia najistotniejszych przyczyn w diagramie Ishikawy jest zastosowanie tak zwanego podejścia 6M, lub 6M+E, polegającego na

przyporządkowaniu przyczyn wystąpienia niezgodności do czynników głównych: czynnik ludzki (manpower), wykorzystanie maszyny (machine); wykorzystanie materiałów i tworzyw (material); metoda wytwarzania (method); kierowanie, zarządzanie (management); sposób pomiaru (measurement), czynniki środowiskowe (environment) [13].

5. Wspomaganie diagnostyki wad odlewów przy zastosowaniu diagramu Ishikawy

Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań wytypowano 4 rodzaje wad odlewniczych najczęściej występujące w odlewach ciśnieniowych wykonanych ze stopów z grupy Al-Si.

W celu sporządzenia diagramu przyczynowo-skutkowego Ishikawy w układzie 6M dla każdej z wytypowanych wad (nadmierna porowatość, zatarcie odlewu, zachowanie stabilności wymiarowej, wtrącenia niemetaliczne występujące w strukturze) przedstawionych na rysunku 2 określono przyczyny główne a następnie pośrednie (rysunki 3–6).



Rys. 2. Wytypowane wady odlewnicze: a) porowatość; b) zatarcia; c) brak stabilności wymiarowej; d) wtrącenia niemetaliczne występujące w strukturze

5.1. Nadmierna porowatość

W odlewach rozróżnia się dwa rodzaje porowatości: porowatość skurczową oraz gazową.

Porowatość gazowa powstaje na skutek „zamknięcia” powietrza w metalu. Z kolei porowatość skurczową opisuje się jako wewnętrzne pęknięcie występujące w strukturze odlewu, powstałe na skutek zmniejszenia się objętości metalu podczas krystalizacji.

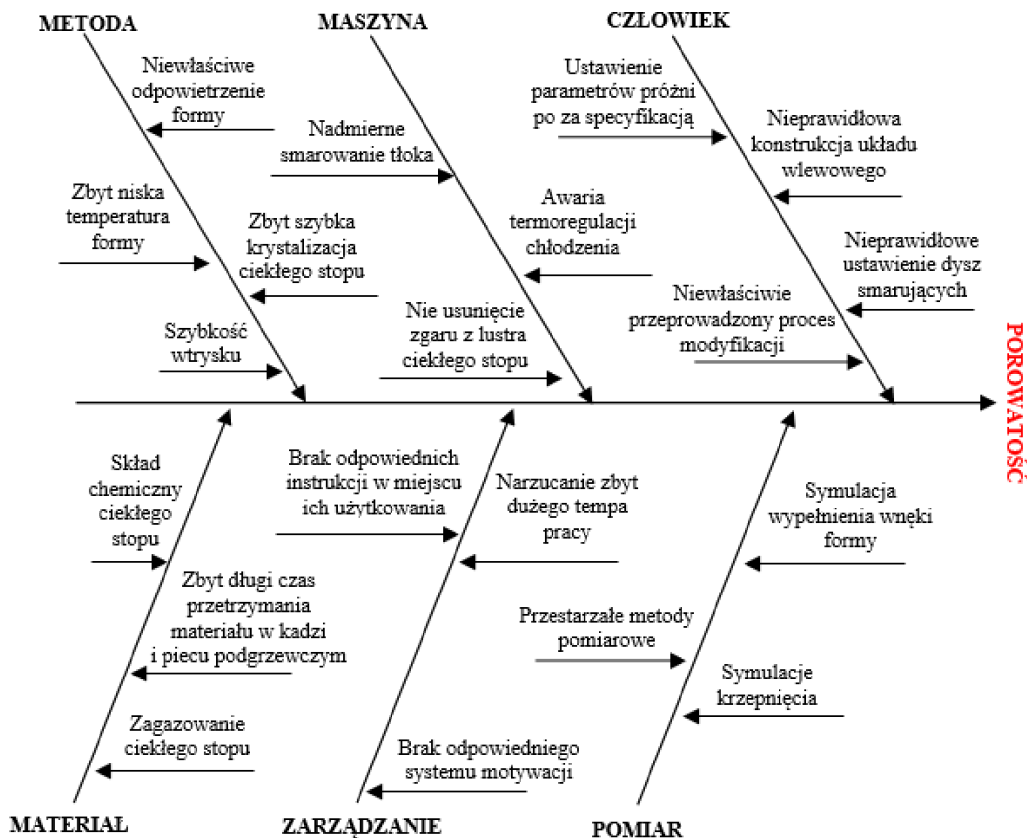
W obu przypadkach zwiększona zawartość porów w strukturze odlewu powoduje pogorszenie właściwości użytkowych gotowego wyrobu. Diagram Ishikawy dla wady odlewniczej typu nadmierna porowatość przedstawiono na rysunku 3.

W trakcie sporządzania diagramu Ishikawy wytypowano szereg czynników wpływających na zwiększenie porowatości w odlewie. Pozostawiony zgar na lustrze ciekłego stopu może doprowadzić do powstania nieciągłości w strukturze odlewu, wokół których występuje zwiększona porowatość lub spowodować zwiększone zagazowanie ciekłego stopu. Również zbyt długie przetrzymanie ciekłego stopu w kadzi lub piecu podgrzewczym może doprowadzić do zwiększenia jego stopnia zagazowania. Zbyt niska temperatura formy ma wpływ na czas krystalizacji. Powolne krzepnięcie zwiększa porowatość stopu. Niewłaściwy dobór parametrów pró-

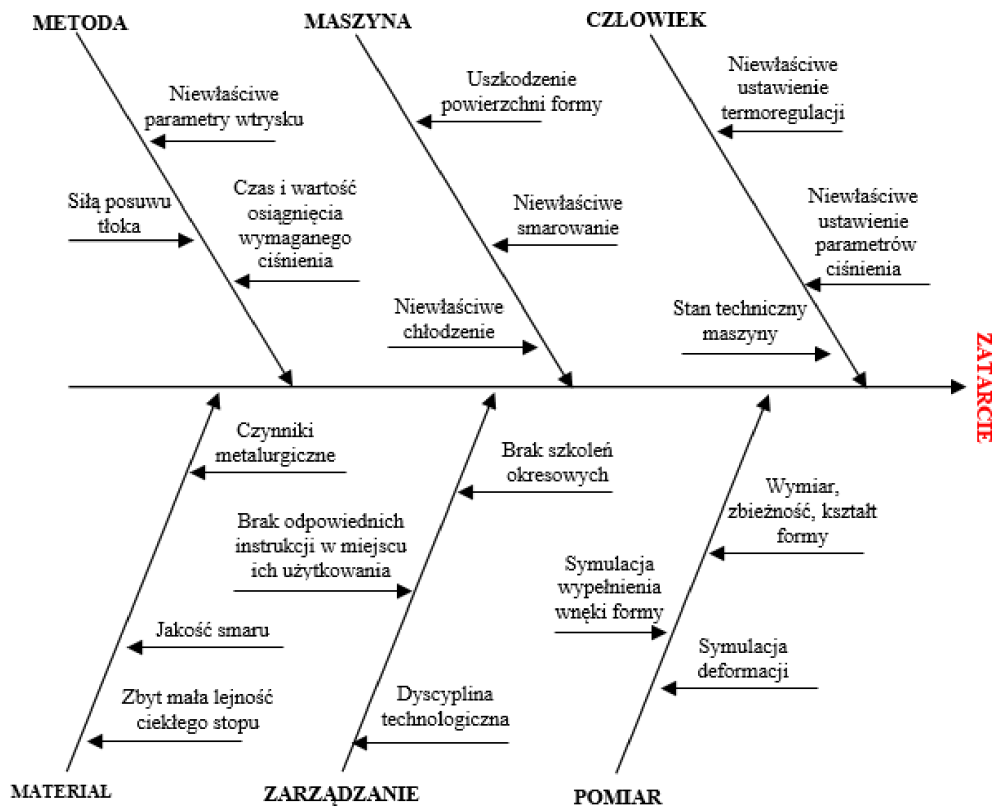
ni powoduje niewłaściwe odpowietrzenie formy, co „zamyka” powietrze w odlewie, tym samym zwiększając porowatość gazową. Bardzo istotną rolę odgrywa również konstrukcja układu wlewowego. Jego nieprawidłowa konstrukcja, zwłaszcza w odlewach charakteryzujących się skomplikowaną geometrią i zróżnicowaną grubością ścianek sprzyja zwiększeniu porowatości w bardziej masywnych partiach odlewu. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie symulacji wypełnienia wnęki formy i krzepnięcia oraz dobór odpowiednich parametrów procesu. Właściwy dobór parametrów odlewania, składu chemicznego ciekłego stopu (niektóre dodatki stopowe jak np. Sr również mogą powodować zwiększenie porowatości) w połączeniu z odpowiednim zarządzaniem procesem produkcji zapewnia stabilizację procesu.

5.2. Zatarcie

Zatarcie czyli naruszenie powierzchni odlewu zaliczane jest do wad powierzchni surowej. Niezgodność ta prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych gotowego wyrobu lub w przypadku elementów pasowanych do braku szczelności lub uszkodzenia drugiego elementu. Diagram Ishikawy dla zatarcia przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Diagram Ishikawy dla porowatości.



Rys. 4. Diagram Ishikawy dla zatarcia.

Zatarcie najczęściej spowodowane jest niepełnym przyleganiem ciekłego stopu do powierzchni formy odlewniczej lub niewłaściwym usunięciem odlewu z formy. W związku z tym do najważniejszych czynników wpływających na powstanie zatarcia zaliczamy: uszkodzenie powierzchni formy, zbyt małą leżność ciekłego stopu, niewłaściwy dobór parametrów i jakości smaru, odstępstwa w wymiarach, zbieżności oraz kształcie formy, nieprawidłową pracę tłoka i wypychaczy oraz niewłaściwy dobór ciśnienia. W przypadku zatarcia jedną z najistotniejszych kwestii jest zachowanie dyscypliny technologicznej oraz stan techniczny maszyny.

5.3. Stabilność wymiarowa

Kolejnym, poddanym analizie typem niezgodności jest stabilność wymiarowa odlewu, a właściwie jej brak. W porównaniu do innych technologii odlewniczych, odlewanie pod wysokim ciśnieniem zapewnia dużo lepsze odwzorowanie elementu i znacznie większą stabilność wymiarową. Jednakże i w tym przypadku istnieje szereg czynników mogących spowodować jej pogorszenie (rysunek 5).

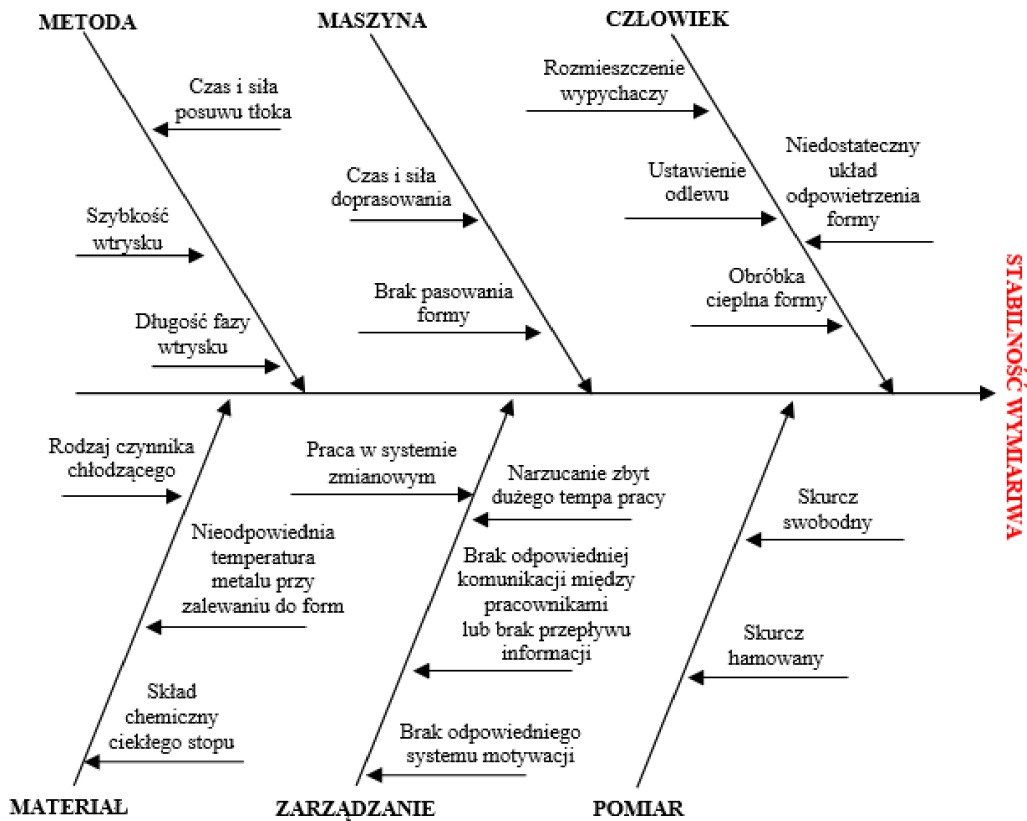
Właściwe zachowanie stabilności wymiarowej jest bardzo ważne szczególnie w przypadku konstrukcji bloków silnika, gdzie geometria i pasowanie elementu musi być bardzo dokładne. W przeciwnym razie może dojść do jego uszkodzenia. Jednym z najważniejszych czynników decydujących o zachowaniu stabilności wymiarowej jest szybkość wtrysku i siła doprasowania. Im większe szybkość wtrysku i siła doprasowania tym wierniej odwzorowany jest element. Kolejnym ważnym czynnikiem

jest pasowanie formy. Nieodpowiednie pasowanie może spowodować wypatrzenie geometrii odlewu. Z kolei właściwy dobór parametrów obróbki cieplnej pozwoli na usunięcie części naprężeń z odlewu.

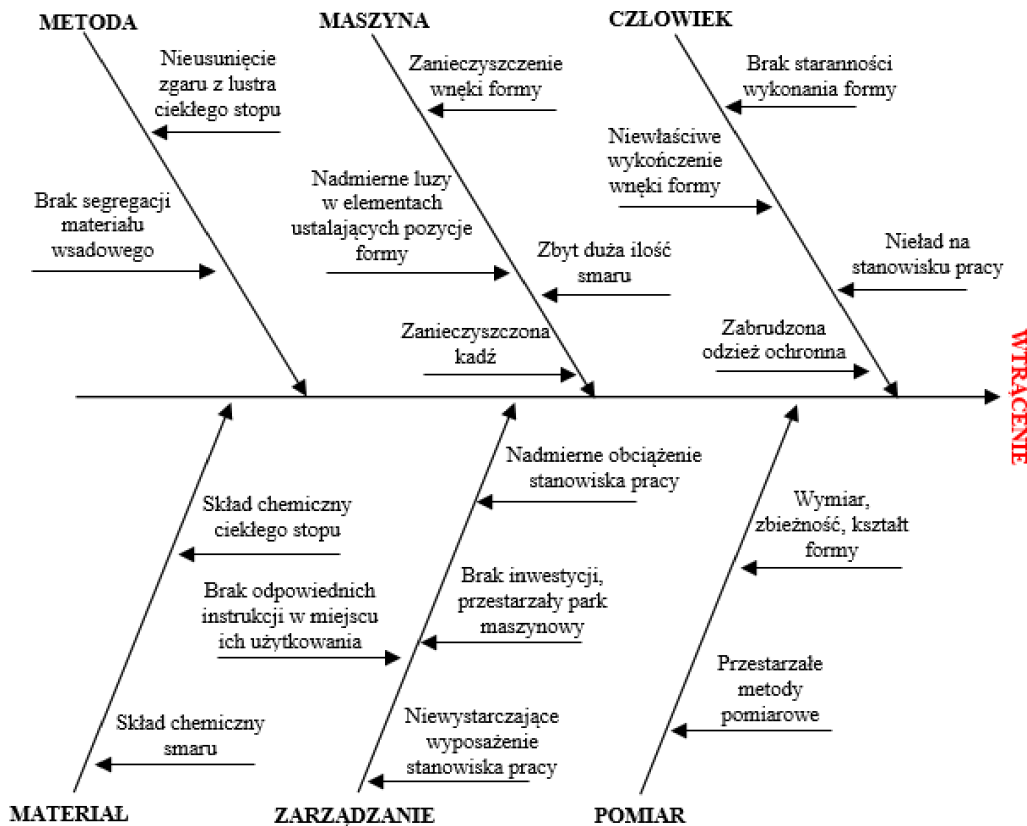
5.4. Zanieczyszczenia – wtrącenie niemetaliczne

Do jednej z najczęściej występujących wad odlewniczych w procesie HPDC zalicza się wtrącenia niemetaliczne. W procesie odlewania wysokociśnieniowego najczęściej występują: wtrącenia wynikające z przechłodzenia cząstek metalu przed wypełnieniem wnęki formy lub wtrącenia niemetaliczne (zanieczyszczenia). Zanieczyszczenie występujące w strukturze odlewu prowadzi do zaburzenia jednorodności mikrostruktury, tym samym powodując znaczne pogorszenie właściwości mechanicznych odlewu. Diagram Ishikawy dla wtrąceń niemetalicznych przedstawiono na rysunku 6.

Zgar na lustrze ciekłego stopu prowadzi do pojawienia się tlenków w mikrostrukturze stopu. Brak przestrzegania dyscypliny technologicznej oraz brak segregacji materiału wsadowego prowadzi do przedostania się do komory topielnej pieca materiału o niewłaściwym składzie chemicznym. Również nieprawidłowe wykonanie formy odlewniczej w dużym stopniu przyczynia się do obecności zanieczyszczeń w strukturze odlewu. Odpowiedni dobór parametrów odlewania oraz właściwa konstrukcja formy odlewniczej pozwala na zminimalizowanie obecności wtrąceń niemetalicznych powstałych na skutek przechłodzenia cząstek stopu przed całkowitym wypełnieniem wnęki formy.



Rys. 5. Diagram Ishikawy dla stabilności wymiarowej odlewu.



Rys. 6. Diagram Ishikawy dla niezgodności typu wtrącenie.

6. Podsumowanie

Wykorzystanie diagramu przyczynowo-skutkowego Ishikawy do identyfikacji niezgodności występujących w odlewach wykonanych ze stopów Al-Si odlewanych wysokociśnieniowo do form metalowych potwierdziło, że proces HPDC jest skomplikowany, wieloetapowym procesem charakteryzującym się szeregiem parametrów technologicznych mogących w znaczącym stopniu wpłynąć na jakość gotowego wyrobu. Zastosowanie diagramu Ishikawy w dużym stopniu ułatwia analizę procesu HPDC w układzie przyczyna–skutek. Diagram ten jednak nie zawiera informacji o charakterze ilościowym. Stanowi on wyłącznie podstawę do dalszych badań i analiz. Jednakże pomimo swoich ograniczeń wykres Ishikawy pozwala w praktyce inżynierskiej na podstawie analizy współzależnych powiązań określić skutek oraz najbardziej prawdopodobne przyczyny wystąpienia danej niezgodności co zilustrowano na przedstawionych wykresach (Rys. 3–6). Szczególną korzyścią z zastosowania tego narzędzia zarządzania jakością jest ujęcie danego problemu w sposób całościowy, czytelny, prosty i łatwy do opracowania, co na etapie diagnozowania przyczyn problemu jest bardzo ważne. Najważniejszą zaletą diagramu przyczynowo-skutkowego Ishikawy jest możliwość hierarchizacji i klasyfikacji przyczyn wystąpienia wad odlewniczych.

Literatura

- [1] Cais J., Weiss V., Svobodova J., *Relation between Porosity and Mechanical Properties of Al-Si Alloys Produced by Low- Pressure Casting*, Archives of Foundry Engineering, V14-SI1 20, 97–102, 2014.
- [2] Chabowski W., *Poradnik Inżyniera*, Odlewnictwo, WNT, Warszawa, 1972.
- [3] Czekał E., Dudek P., *Stopy metali nieżelaznych stosowane do odlewania ciśnieniowego. Wybrane zagadnienia technologii odlewania ciśnieniowego*, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 2002.
- [4] Davis J.R., *ASM handbook*, ASM, Metals Park, OH, 123–151, 166–168, 1990.
- [5] Fajkiel A., *Wybrane zagadnienia technologii odlewania ciśnieniowego*, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 2002.
- [6] Fałęcki Z., *Analiza wad odlewów*, WNT, Warszawa, 1997.
- [7] Górny Z., Lech Z., *Odlewanie kokilowe stopów metali nieżelaznych*, WNT, Warszawa 1975.
- [8] Haro-Rodríguez S., Goytia-Reyes R.E., Dwivedi D.K., Baltazar-Hernández V.H., Flores-Zúñiga H., Pérez-López M.J., *On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al-Si-Mg alloy*, Materials and Design, 32, 1865–1871, 2011.
- [9] Hegde S., Prabhu K.N., *Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys*, J. Mater. Sci., pp. 3009–3027, 2008.
- [10] Kluska-Nawarecka S., *Metody komputerowe wspomaganie diagnostyki wad odlewów*, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 1999.
- [11] Kozakowski S., *Badanie odlewów: technologie odlewnicze, typowe dla nich wady i metody ich ujawniania*, Biuro Gamma mgr Bogusław Osuchowski, Warszawa, 2001.
- [12] Li J.H., Albu M., Ludwig T.H., Matsubara Y., Hofer F., Arnberg L., Tsunekawa Y., Schumacher P., *Modification of eutectic Si in Al-Si based alloys*, Materials Science Forum, 794–796, 130–136, 2014.
- [13] Łunarski J., *Zarządzanie jakością. Standardy i zasady*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [14] Łybacki W., Zawadzka K., *Wspomaganie diagnostyki wad odlewów narzędziami zarządzania jakością*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 28, 1, 89–101, 2008.
- [15] PN-85/H-83105, *Odlewy – podział i terminologia wad*.
- [16] Szczęśniak B., Zaszadzień M., Wapienik Ł., *Zastosowanie analizy pareto oraz diagramu ishikawy do analizy przyczyn odrzutów w procesie produkcji silników elektrycznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie, z. 63a, Nr kol. 1891, s. 125–147, 2012.