

Częstochowa, dn.15.04.2023 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Konopka, emeryt
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra Metalurgii i Technologii Metali
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kowalczyka pt.: "Wpływ parametrów procesu odlewania pod wysokim ciśnieniem na wady i mikrostrukturę wybranych odlewów ze stopów Al-Si"

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa
Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

1. Ocena przedmiotu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Kowalczyka reprezentuje dyscyplinę Inżynieria Materiałowa i dotyczy badania i opracowania technologii ciśnieniowego odlewania pięciu zróżnicowanych co do kształtu, grubości ścianki i masy odlewów ze stopu EN-AC 46000 AlSi9Cu3(Fe). Praca o charakterze aplikacyjnym przedstawia wyniki badań wpływu fazy wypełniania wnęki formy ciekłym metalem i fazy doprasowania na strukturę i wadliwość badanych odlewów. Wymienione wyżej dwa najistotniejsze etapy procesu odlewania ciśnieniowego są sterowane wieloma różnymi, nastawialnymi parametrami w funkcjonalnych zespołach maszyny ciśnieniowej jak: stopień wypełnienia komory prasowania, prędkości tłoka prasującego w fazie I i II z czasowymi momentami załączania jego poszczególnych faz ruchu oraz wartość i intensywność narastania ciśnienia doprasowania. W mierzalnych wielkościach jakość odlewów jest określona w funkcji czasu wypełniania i ciśnienia doprasowania. Badania wykonano w różnych odlewniach polskich, na 5 różnych co do wielkości i wyposażenia zimnokomorowych, poziomych maszynach ciśnieniowych tego

samemu wytwórcy. Opisano wymagane procedury technologiczne, infrastrukturę produkcyjną i stosowane materiały.

W teorii i praktyce odlewania wysokociśnieniowego metali wykorzystywane są od dawna zależności hydrauliczne i cieplne pozwalające obliczyć związek między ciśnieniem prasowania w fazie wypełniania (II faza) i objętościowym natężeniem przepływu metalu w szczelinie wlewowej (wykresy pQ^2) oraz czas wypełniania wnęki formy w funkcji temperatury metalu, formy, grubości ścianki odlewu i założonego udziału fazy stałej w odlewie na końcu wypełniania. Zagadnienie oddziaływania ciśnienia doprasowania na krzepnięcie i kształtowanie struktury odlewu w procesie odlewania wysokociśnieniowego jest mniej zbadane. Rozwinięte w ostatnich latach metody numerycznej symulacji procesów wypełniania formy i krzepnięcia w niej odlewu istotnie udoskonaliły proces odlewania pozwalając na identyfikację potencjalnych miejsc w odlewie zagrożonych wadami. Nie opisują one jednak ilościowych związków stosowanych parametrów odlewania z określonymi typami wad w odlewie, co jednoznacznie wskazuje na konieczność prowadzenie badań eksperymentalnych w tym zakresie.

Powyższe przesłanki i szybki postęp w konstrukcji maszyn ciśnieniowych wskazują na możliwości takiego doboru parametrów odlewania, który pozwoli opisać ich wpływ na jakość odlewów, co ma niewątpliwie także aspekt ekonomiczny polegający na potencjalnym zmniejszeniu kosztów produkcji odlewów. Uwzględniając powyższe stwierdzam, że Autor zaproponował innowacyjne rozwiązanie polegające na wykonaniu równoległych badań w pięciu różnych odlewniach, a wyniki przedstawione w pracy mogą służyć jako algorytm poprawy jakości odlewów ciśnieniowych w stworzonej bazie danych, która może być wykorzystana do budowania algorytmów sztucznej inteligencji sterowania procesem ciśnieniowego odlewania metali. Z uwagi na specyfikę ciśnieniowego odlewania wynikającą z dużej różnorodności asortymentowej wykonywanych odlewów, szerokiego zakresu zmian parametrów odlewania i dużej liczby kryteriów jakościowych odbioru, wyniki pracy mogą być wykorzystane do badania i sterowania jakością konkretnego odlewu. Jest to zagadnienie naukowo-badawcze o dużej wartości poznawczej i innowacyjnej z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej.

Wybór tematyki badań uznaję za trafny i celowy, a praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych. Proponowane w pracy rozwiązanie wynika z rosnącej konkurencji i potrzeby rynkowej, które stawiają coraz większe wymagania jakościowe odlewom ze stopów aluminium, co w pełni uzasadnia podjęcie badań w tym zakresie.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 240 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 178 pozycji literaturowych i streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono bardzo obszerny (146 stron) przegląd literatury dotyczący: ogólnej charakterystyki wysokociśnieniowego odlewania metali z opisem zalet, wad, ograniczeń i możliwości tej technologii wzbogaconej o aktualne dane statystyczne struktury produkcji odlewów w Polsce i na świecie, budowy maszyn ciśnieniowych, szczegółowej charakterystyki parametrów odlewania, wybranych aspektów budowy form ciśnieniowych, elementów projektowania gniazd odlewniczych z uwzględnieniem ich automatyzacji oraz krótkiej charakterystyki stopów aluminium stosowanych w odlewnictwie ciśnieniowym z wyróżnieniem zagadnienia wadliwości i jakości odlewów ciśnieniowych.

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ Autor dokonał trafnego, pod względem zakresu, doboru materiału źródłowego informacji naukowej, przedstawiony opis jest skoncentrowany na tematyce pracy, bez zbędnych, nieistotnych dla badanej tematyki informacji, opis jest wnikliwy i jasny a ważne treści odpowiednio wzbogacono odpowiednimi wykresami i równaniami. Przełożyło się na wysoką jakość opracowania tej części pracy pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. Przegląd literatury kończy podsumowanie (rozdział I.13) przedstawiające zespół czynników technologii odlewania wysokociśnieniowego metali decydujących o możliwościach sterowania jakością odlewów. co stanowi odpowiednie uzasadnienie podjęcia badań własnych Autora. W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiony w pracy przegląd literatury odpowiada wymogom pracy doktorskiej na poziomie wyróżniającym.

W drugiej części pracy zatytułowanej „Część badawcza” Autor przedstawia wyniki badań własnych formułując dwa cele pracy. Celem naukowym było określenie wpływu czasu wypełniania formy i ciśnienia doprasowania na mikrostrukturę, porowatość i jakość powierzchni odlewów. Celem użytkowym było opracowanie i wdrożenie procesu wytwarzania odlewów w różnych odlewniach ciśnieniowych wyposażonych w maszyny tego samego producenta, w których zrealizowano badania własne.

Na podstawie jasno określonych celów pracy przedstawiono zakres badań pracy i tezy. W tezie pierwszej sformułowano istnienie związku między czasem wypełniania formy i ciśnieniem doprasowania a porowatością odlewów i jakością ich powierzchni. W tezie określono hipotetyczny kierunek wpływu badanych parametrów odlewania na jakość

odlewów. W tezie drugiej sformułowano ogólnie możliwość minimalizacji porowatości w odlewie przy spełnieniu warunku kierunkowego krzepnięcia odlewu. W tezie trzeciej dopuszcza się wyznaczenie empirycznej zależności między parametrami odlewania a grubością ścianki odlewu. Teza czwarta formułuje potencjalną korelację między czasem wypełniania formy i ciśnieniem doprasowania a mikrostrukturą odlewu.

Wszystkie tezy w pełni odpowiadają na postawione cele pracy mające określić zależności między parametrami odlewania i jakością odlewów i stanowią nowe podejście do rozwiązania postawionego zagadnienia w skali przedsiębiorstwa. Poszukiwanie zależności między parametrami odlewania ciśnieniowego a jakością odlewów uznaję za innowacyjny element pracy.

Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy obejmujący:

- wykonanie 5 różnych rodzajów odlewów (płytki okładzin hamulcowych, rozdzielacz instalacji układu hamulcowego, klamka drzwiowa, korpus pompy wersja 10 i korpus pompy wersja A) na 5 różnych stanowiskach testowych (DAK580-62, DAK450-54, QC210-25, DAK720-62DD i DAK720-62RC), w różnych odlewniach. W każdym przypadku wartości zmiennych prędkości tłoka prasującego w II fazie odlewania (czas wypełniania formy) i ciśnienia doprasowania (III faza) ustalano na podstawie wartości referencyjnych stosowanych standardowo w produkcji każdego typu odlewu w danej odlewni. Wartości zmiennych rejestrowano w postaci wykresów charakterystyki pracy maszyny,
- badanie porowatości odlewów,
- symulację krzepnięcia odlewu w formie z analizą krzywych stygnięcia,
- badanie i analizę mikrostruktury odlewów.

W szczegółowo opisanej metodyce badań przedstawiono: stosowane materiały, procedury wykonania pomiarów z zastosowanymi parametrami, rysunki i zdjęcia wykonanych odlewów oraz dokumentację zdjęciową procesu odlewania. Zastosowane metody pomiarowe, zaplanowany zakres badań i metody obliczeniowe i weryfikacji są adekwatne do osiągnięcia oczekiwanego celu pracy.

W rozdziale II.4.3.1 przedstawiono wyniki badań i analizę odlewania odlewów płytki okładzin hamulcowych. W wyniku zrealizowanych badań i obliczeń wyznaczono równania opisujące wpływ czasu wypełniania, prędkości metalu w szczelinie wlewowej i ciśnienia doprasowania na gęstość oraz przedstawiono dokumentację zdjęciową badania RTG tych odlewów. Zwiększenie czasu wypełniania formy, co odpowiada zmniejszeniu prędkości metalu w szczelinie wlewowej powoduje zwiększenie gęstości metalu odlewu równoznaczne ze zmniejszeniem jego porowatości. Gęstość odlewu zwiększa się ze zwiększeniem ciśnienia

doprasowania. Uzyskane wyniki dowodzą pierwszą tezę pracy i potwierdzają znane z teorii i praktyki relacje.

W rozdziale II.4.3.2 przedstawiono wyniki badań i analizę odlewania odlewów rozdzielacza instalacji układu hamulcowego. W wyniku zrealizowanych badań i obliczeń wyznaczono równania wpływu czasu wypełniania, prędkości metalu w szczelinie wlewowej i ciśnienia doprasowania na masę odlewów, która pośrednio reprezentuje ich gęstość. Na podstawie wyników pomiarów ewentualnych defektów odlewów metodą tomografii komputerowej (współczynnik DVR Defect Volume Ratio) określono zależności między DVR oraz czasem wypełniania i ciśnieniem doprasowania. Wykazane zmniejszenie porowatości ze zwiększeniem ciśnienia doprasowania potwierdza tezę pierwszą, natomiast zmniejszenie czasu wypełniania zmniejsza porowatość i poprawia jakość powierzchni odlewów ale w połączeniu ze zwiększeniem wartości ciśnienia doprasowania, co stanowi pośredni dowód tezy drugiej pracy. Nie przedstawiono jednak bezpośredniej zależności między czasem wypełniania i ciśnieniem doprasowania

W rozdziale II.4.3.3 przedstawiono wyniki badań i analizę odlewania odlewów kłamki drzwiowej. Na podstawie wyników badań i obliczeń wyznaczono równania wpływu czasu wypełniania, prędkości metalu w szczelinie wlewowej i ciśnienia doprasowania na masę odlewów. Uzyskano taki sam charakter zmian gęstości odlewów jak w przypadku wyników badania dwóch pierwszych typów odlewów, przy czym, w odróżnieniu do poprzednich, zależności te nie są liniowe.

Wyniki badań porowatości odlewów korpusów pompy wersja "10" metodą tomografii komputerowej (współczynnik DVR Defect Volume Ratio) przedstawione w rozdziale II.4.3.4 pokazują odmienną zależność od poprzednio uzyskanych ponieważ wartość współczynnika DVR (porowatość) zwiększa się ze zwiększeniem czasu wypełniania. Autor poprawnie zinterpretował uzyskane wyniki wpływem złożonego kształtu i zróżnicowanej grubości ścianki odlewu, które powodują nierównomierne rozmieszczenie porowatości a uśredniony wynik nie jest w tym przypadku miarodajny.

W badaniach porowatości odlewów korpusów pompy "A" (rozdział II.4.3.5) Autor podjął próbę określenia rozmieszczenia porowatości w objętości odlewu mierząc gęstość fragmentów odlewu, na które został on podzielony dla zadanych wartości czasu wypełniania i ciśnienia doprasowania. Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ pola prędkości przepływu metalu w formie podczas jej wypełniania na gęstość odlewu, przy czym istnieje optymalny obszar zmiany prędkości, dla którego uzyskuje się najmniejszą porowatość odlewu.

Zaobserwowano zmniejszenie gęstości odlewu w miejscach o większej grubości ścianki dla danych ustalonych wartości czasu wypełniania i ciśnienia doprasowania.

Analiza mikrostruktury odlewów korpusów pompy "A" potwierdziła występowanie rzadziej (porowatości) skurczowej, a także porowatości gazowej w całym badanym zakresie zmian czasów napełniania. Nieliniowa zależność udziału porów zmienia się od 4% dla wolnego zapełniania ($t_2=0,235s$) do 45% dla $t_2=0,129s$ by osiągnąć wartość 3% dla czasu $t_2=0,035s$. Uzyskane wyniki nie wskazują na istnienie silnej korelacji między prędkością metalu we wlewie (czas wypełniania) a porowatością odlewu. Ciśnienie doprasowania istotnie zmniejsza porowatość odlewu do poziomu 0,8-7,9% wykazując istnienie ekstremum na funkcyjnej zależności. Wpływ ciśnienia doprasowania na porowatość odlewów jest istotnie silniejszy od wpływu prędkości metalu we wlewie. Istotny wpływ na wielkość i rozmieszczenie porowatości w odlewie ma jego kształt.

Ocenę stygnięcia i krzepnięcia odlewu w formie przeprowadzono w oparciu o badania symulacji komputerowej odlewów korpusów pompy "A" dla różnych prędkości zapełniania formy ($t_2=0,196s$ $t_2=0,035s$). W wytypowanych 3 miejscach odlewu o różnych grubościach ścianki 3,6,11mm wykonano krzywe stygnięcia. Potwierdzono spodziewany wpływ grubości ścianki na szybkość stygnięcia (grubsza ścianka mniejsza szybkość). Czas zapełniania formy istotnie wpływa na szybkości stygnięcia metalu w fazie ciekłej (mniejsza szybkość stygnięcia dla $t_2=0,196s$ ale tylko w fazie przejścia metalu w stan stały, większa szybkość dla $t_2=0,235s$). W dalszej fazie krzepnięcia krzywe wykazują podobny przebieg (brak wpływu czasu wypełniania). Stwierdzono istotny wpływ grubości ścianki na udział fazy stałej w odlewie w czasie krzepnięcia. Ważnym naukowo wynikiem jest wyznaczenie empirycznej zależności szybkości stygnięcia i czasu krystalizacji od grubości ścianki odlewu w technologii odlewania wysokociśnieniowego.

Podsumowując wyniki badań własnych stwierdzam, że:

- potwierdzono doświadczalnie wpływ czasu wypełniania formy i ciśnienia doprasowania na porowatość odlewów i możliwość optymalizacji parametrów odlewania,
- wyznaczono modele matematyczne opisujące wpływ czasu wypełniania formy i ciśnienia doprasowania na porowatość odlewów,
- określono warunki uzyskania najlepszej jakości powierzchni odlewów ciśnieniowych,
- wyznaczono empiryczne zależności szybkości stygnięcia i czasu krystalizacji odlewu ciśnieniowego od grubości jego ścianki,
- potwierdzono doświadczalnie wpływ czasu wypełniania formy, ciśnienia doprasowania i grubości ścianki odlewu na zmiany mikrostruktury określane wielkością komórki

dendrytycznej, udziałem fazy pierwotnej oraz wielkością wydzielen krzemu eutektycznego.

Przedstawione wyniki badań dowodzą, że możliwe jest sterowanie mikrostrukturą i właściwościami odlewów tak, że dla określonego poziomu jakości odlewu można dobrać odpowiednie parametry technologiczne odlewania. Wyniki badań pracy mają duże znaczenia praktyczne, a uzyskane wyniki są nowatorskie i wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę odlewania ciśnieniowego stopów Al-Si.

Sekwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz użytkarne. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej i dużej wiedzy praktycznej Doktoranta, a także jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorowi udało się osiągnąć cel pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń, odpowiednie zastosowanie naukowej metodyki badań i realizację praktyczną wykonanych eksperymentów.

3. Uwagi

1. Moim zdaniem nie jest możliwa analiza porównawcza odlewania na 5 różnych maszynach, a wyznaczone modele matematyczne (równania) opisujące wpływ czasu wypełniania formy i ciśnienia doprasowania na porowatość odlewów nie mogą być uogólnione na całą populację odlewów ciśnieniowych ze względu na przyjętą metodykę badań (różne zakresy zmian prędkości tłoka w II fazie i ciśnienia doprasowania oraz różne odlewy). Jaką korzyść zakładano uzyskać wykonując badania na 5 różnych maszynach i 5 różnych odlewach?,
2. Czy możliwe byłoby takie zaplanowanie badań aby można było określić jednoczesny wpływ czasu wypełniania formy i ciśnienia doprasowania na porowatość odlewów dla danego typu odlewu (równania z dwoma zmiennymi)?,
3. Czy lepszym rozwiązaniem byłoby określenie porowatości całego odlewu metodą tomografii (wskaźnik DVR) czy mierzaniem gęstości próbek wyciętych z różnych miejsc odlewu?,
4. Jak wyjaśnić duże różnice wartości porowatości odlewów uzyskane w pomiarze metodą tomografii ($DVR < 1,36\%$) i metodą metalografii ilościowej obrazu mikroskopowego struktury (3-45%)?,
5. Jakie parametry odlewania ciśnieniowego i ich wartości decydują o wypełnieniu formy zdyspergowanym metalem?. Czy jest to korzystne dla jakości odlewu?

6. Na podstawie jakiego wyniku stwierdzono kierunkowe krzepnięcie odlewu ciśnieniowego?,

4. Ocena końcowa

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji pracy i prezentacji wyników. Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Wojciecha Kowalczyka spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem badawczy i określono jego cel,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań, co dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta,
- zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski na gruncie znanej teorii, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata,
- Doktorant osiągnął cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę odlewania ciśnieniowego stopów aluminium.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Kowalczyka pt.: **”Wpływ parametrów procesu odlewania pod wysokim ciśnieniem na wady i mikrostrukturę wybranych odlewów ze stopów Al-Si”** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Wojciecha Kowalczyka do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Kowalczyk Wojciech