



**Dr hab. inż. Andrzej Zyska, prof. nadzw. PCz.**  
Zakład Odlewnictwa  
Instytut Metalurgii i Technologii Metali  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska  
ul. Armii Krajowej 19  
42-200 Częstochowa

Częstochowa 23.07.2019 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Poloczka pt.:

### **„Wpływ czynników produkcyjnych na jakość odlewów ze stopów Al-Si”**

zrealizowanej pod opieką:

promotora dr hab. inż. Andrzeja Kiełbusa, prof. PŚ  
oraz promotora pomocniczego dr inż. Haralda Kani

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Pana dr hab. inż. Jerzego Łabaja, prof. PŚ, Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej RM/388/2018/2019 z dnia 24.06.2019 roku, w którym poinformowano mnie, że decyzją Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii zostałem powołany na recenzenta w tym przewodzie oraz załączono komplet dokumentów wymaganych do dokonania oceny.

### 2. Ocena problematyki badawczej rozprawy

W postępującym okresie globalizacji i wzrostu stopnia złożoności procesów wytwórczych głównym wyzwaniem, przed którym stają przedsiębiorstwa, w tym Odlewnie, jest opracowanie strategii produkcyjnych i organizacyjnych zapewniających długookresowe powodzenie ekonomiczne. Makro- i mikrootoczenie w jakich funkcjonują współczesne podmioty gospodarcze podlegają ciągłym i turbulentnym zmianom, co w konsekwencji wymusza podejmowanie działań w zakresie systematycznej analizy procesów produkcyjnych oraz udoskonalania i adaptacji technik, instrumentów i mechanizmów zarządzania i inżynierii produkcji. O sukcesie przedsiębiorstw na trudnym i dynamicznie rozwijającym się rynku motoryzacyjnym decydują głównie: ich poziom technologiczny, innowacyjność i konkurencyjność, a w efekcie finalnym jakość i cena wywarzanych odlewów.

Podjęta w pracy problematyka badawcza dotyczy poprawy jakości i stabilności produkcji dość skomplikowanego odlewu jakim jest blok silnika samochodowego. Jego wielootworowa, uźebrowana konstrukcja oraz zróżnicowana grubość ścianki sprawiają, że jest on narażony, szczególnie w obszarach występowania węzłów cieplnych, na nadmierną porowatość skurczową i gazową. Jedną z najbardziej efektywnych metod wytwarzania odlewów ze stopów Al jest technologia odlewania wysokociśnieniowego. Metoda ta charakteryzuje się bardzo wysoką wydajnością i pozwala na produkcję odlewów o dużej dokładności wymiarowo-kształtowej, małej chropowatości powierzchni i wysokich właściwościach mechanicznych. W klasycznym rozwiązaniu posiada ona jednak istotną wadę – odlewy ciśnieniowe wykazują porowatość gazową, a w przypadku bardziej skomplikowanej geometrii wyrobów porowatość skurczowo-gazową, co dyskwalifikuje ich zastosowanie na konstrukcje, od których wymagana jest duża szczelność. Wadę tą można w bardzo znacznym stopniu ograniczyć stosując technologię odlewania wysokociśnieniowego ze wspomaganie próżniowym – VHPDC (Vacuum-assisted High Pressure Die Casting), uzyskując jeszcze większą wytrzymałość odlewów i gładkość powierzchni oraz możliwość przeprowadzania zabiegów obróbki cieplnej i spawania. Opracowanie metody VHPDC przyczyniło się do rozwoju masowej produkcji i udoskonalania konstrukcji bloków silnika o zapłonie samoczynnym i iskrowym odlewanych ze stopów Al-Si.

Produkcja odlewów wysokociśnieniowych jest złożonym procesem wieloetapowym, która wymaga synchronizacji działań pomiędzy głównymi fazami wytwórczymi oraz przestrzegania procedur i reżimu technologicznego w poszczególnych operacjach stanowiskowych. Synergicznym efektem nieprawidłowych działań jednostkowych jest wzrost zabrakownia odlewów spowodowany nasileniem występowania jednej lub jednocześnie kilku wad odlewniczych. Na tym tle, zapewnienie wysokiej jakości skomplikowanych odlewów bloku silnika wymaga zastosowania nowoczesnych metod zarządzania, które przy dostępnych możliwościach techniczno-ekonomicznych Odlewni, pozwalają na zintegrowane monitorowanie i kontrolę newralgicznych faz procesu produkcyjnego. W problematyką tą bardzo dobrze wpisuje się rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Poloczka. Jest ona wartościowym studium teoretyczno-praktycznym traktującym o doborze narzędzi zarządzania jakością i ich skuteczności w ograniczeniu wad odlewów wysokociśnieniowych.

Kluczowe pojęcia przedmiotu rozprawy jednoznacznie wykazują atrakcyjność podjętej tematyki badawczej i jednocześnie dowodzą dużej znajomości zagadnienia przez Doktoranta. Wybór tematu dysertacji podyktowany jest aktualnością problematyki i jej istotną wagą dla systemu zarządzania cyklem produkcyjnym w odlewniach aluminium wytwarzających wyspecjalizowane odlewy ciśnieniowe dla branży motoryzacyjnej. Inwestycje światowych koncernów takich jak Volkswagen, Volvo, MAN, Scania, Opel, Fiat spowodowały napływ nowych innowacyjnych technologii, a także stały się motorem rozwoju w zakresie spełnienia standardów i wysokich norm jakościowych przez krajowe zakłady współpracujące. W roku 2018 wartość eksportu przemysłu motoryzacyjnego przekroczyła 31 mld euro, co stanowi około 14 proc. polskiego eksportu towarowego ogółem, i uważa się, że branża

motoryzacyjna jest najnowocześniejszą i najlepiej funkcjonującą gałęzią przemysłu krajowego.

Podsumowując uważam, że wybór tematu rozprawy, jej przedmiot i zakres są ważne i aktualne zarówno z praktycznego jak i poznawczego punktu widzenia. Ponadto, przeprowadzone badania i ich analiza wzbogacają dotychczasową wiedzę z zakresu zarządzania jakością i inżynierii produkcji oraz charakteryzują się wysoką użytecznością dla praktyki przemysłowej dostarczając wsparcia teoretyczno-metodycznego ze strony nauki.

### 3. Ocena językowej i redakcyjnej formy Rozprawy

Przedłożona do oceny praca dysercyjna obejmuje 150 stron i została podzielona na dwie zasadnicze części: część literaturową i część badawczą. Część literaturowa obejmuje 56 stron, natomiast część badawcza pomijając spisy tabel, rysunków i wykaz literatury 78 stron. W większości rozdziałów wyróżniono podrozdziały, co korzystnie wpłynęło na czytelność pracy. W rozprawie zamieszczono 30 tabel i 89 rysunków. Studium literaturowe wraz z obszernym zakresem badań tworzą spójną całość i odpowiadają wymogom pracy naukowej. Rozdziały przedstawione są w hierarchicznej kolejności i logicznie ze sobą powiązane. Taki układ pracy pozwala czytelnikowi na prawidłowe zgłębianie się w problematykę badawczą pracy. Wysokie uznanie należy skierować za staranne opracowanie rysunków, zarówno w części literaturowej jak i badawczej. Graficzna interpretacja wyników badań ułatwia studiowanie tej wielowątkowej pracy. Całość dysertacji jest dobrze opracowana i napisana zrozumiałym językiem z użyciem właściwej terminologii. Oczywiście w tak dużym opracowaniu zawsze pojawiają się pewne uchybienia w zakresie precyzji sformułowań, opisu rysunków, czy też nadmiernych uproszczeń, ale nie wpływają one istotnie na czytelność przekazywanych treści. Poniżej przedstawiam kilka przykładów nieprawidłowości:

- spis treści, poz. 5.6 napisano: Wady jakościowych występujących w produktach odlewania ciśnieniowego;
- na str. 38, wers 9 napisano: Branża motoryzacyjnej w Polsce;
- na str. 38, wers 29 podano wartość eksportu polskiego przemysłu motoryzacyjnego – 15,7 mln euro zamiast 15,7 mld (miliarda) euro;
- na str. 45 wers 9, z kontekstu wynika, że Autor miał zapewne na myśli: *modyfikację strukturalną eutektyki krzemowej* zamiast *modyfikacji składu chemicznego*;
- na str. 49 wers 32 – skrót myślowy: „...średnia wielkość produkcji rocznej stopów aluminium w odlewniach ciśnieniowych...” zamiast produkcji rocznej odlewów ze stopów aluminium.
- nieprawidłowe przywołanie w tekście pracy rysunków od nr 35 do nr 44;
- na str. 63 wers 8 napisano: *W celu dokonania ilościowa analiza*;
- na str. 68, wers 10 napisano: *jakość wyrobku* zamiast *jakość wyrobu*;
- nieprawidłowy zapis wzorów chemicznych faz międzymetalicznych w podpisach rysunków 52, 53, 60 – brak indeksów;

- str. 80 , wers 1 – skrót myślowy: *mikrostruktura ciekłego stopu*;
- str. 123, wers 11 – nieprawidłowe określenie: *przechłodzenie krystalizacji* zamiast *przechłodzenie stopu (metal) podczas krystalizacji*;

#### 4. Ocena zawartości merytorycznej pracy

Pan mgr inż. Łukasz Poloczek, w części pierwszej rozprawy przedstawia obszerny przegląd stanu zagadnienia. Początkowe rozdziały dotyczą: planowania procesu produkcyjnego, systemów zarządzania jakością oraz istoty zapewnienia jakości wyrobów przemysłowych. Doktorant wyczerpująco omawia podstawowe pojęcia i zagadnienia z zakresu form i typów organizacji produkcji, struktury norm ISO serii 9000, zarządzania procesowego przedsiębiorstwem w oparciu o cykl Deminga, normatyw jakości oraz klasyfikacji produktów. Na szczególną uwagę zasługuje podrozdział 3.2, w którym zaprezentowano chronologiczny rozwój i integrację norm jakościowych w przemyśle samochodowym od lat 50 ubiegłego wieku do chwili obecnej, będących wynikiem restrykcyjnych wymogów na etapie projektowania, produkcji, montażu i serwisu produktów motoryzacyjnych. Znormalizowanie standardów i przepisów jakościowych przyczyniło się do powstania norm ISO 9001 i ISO 8402, na bazie których opracowano później jednolitą normę ISO/TS 16949, która aktualnie została wdrożona do systemów zarządzania jakością przez wszystkich znaczących, światowych producentów samochodów.

Bardzo ważnym z punktu widzenia głównego celu pracy jest rozdział 4 poświęcony metodom i instrumentom stosowanym do zarządzania jakością w przedsiębiorstwie. Doktorant w sposób syntetyczny sklasyfikował, a później opisał 14 narzędzi wykorzystywanych w zakładach produkcyjnych do gromadzenia i przetwarzania informacji, wykrywania błędów i niezgodności produktów, nadzorowania procesu zarządzania i diagnozowania nieprawidłowości w przebiegach wytwórczych, wskazując dla każdego narzędzia jego główne możliwości i ograniczenia. W rozdziale tym omówiono również istotne problemy wdrożonych systemów i narzędzi zarządzania jakością, których źródłem, jak wskazuje sam Autor jest niewłaściwa motywacja na etapie podejmowania decyzji o ich wdrożeniu do przedsiębiorstwa produkcyjnego. Ostatni rozdział pracy przedstawia charakterystykę sektora motoryzacyjnego (badawczego), zastosowanie stopów aluminium na odlewy części samochodowych oraz technologię odlewania ciśnieniowego. W podrozdziałach 5.1–5.3 Doktorant zamieścił wiele cennych informacji dotyczących rocznych produkcji samochodów w Polsce, dynamiki wzrostu, stanu zatrudnienia w sektorze motoryzacyjnym, ilości przedsiębiorstw wytwarzających części i komponenty dla motoryzacji, a także struktury produkcji w zależności od przeznaczenia pojazdów oraz rodzaju produkowanych podzespołów.

W podrozdziale 5.3 Doktorant dość ogólnie omówił grupę stopów aluminium, w tym stopy Al-Si, odnosząc się do ich klasyfikacji, przeznaczenia oraz podstawowych właściwości mechanicznych, fizycznych i technologicznych (odlewniczych). Zawarte treści są prawidłowe, ale wymagałyby uzupełnienia w zakresie opisu wieloskładnikowych siluminów, ich gatunków

wykorzystywanych w odlewnictwie ciśnieniowym oraz specyfiki krzepnięcia i tworzenia się struktur wielofazowych w kontekście właściwości eksploatacyjnych. Podrozdział ten należałoby również poszerzyć przedstawiając aspekty metalurgiczne ciekłych stopów aluminium; ich główne zanieczyszczenia: metaliczne i niemetaliczne, w tym gazy proste oraz złożone, źródła zanieczyszczeń oraz metody rafinacji. W kolejnym podrozdziale Doktorant interesująco, z dobrą oprawą graficzną zaprezentował wykorzystanie stopów aluminium na elementy podzespołów i konstrukcje w budowie samochodów osobowych. Właściwie pokreślił systematyczny trend wzrostu aplikacji stopów aluminium na części samochodowe, które do niedawna wykonywane były ze stali lub żeliwa oraz walory ekonomiczne odlewów ciśnieniowych ze stopów Al na tle wyrobów produkowanych innymi metodami. Dość dobrze, Doktorant poradził sobie również z opisem technologii odlewania wysokociśnieniowego zwracając uwagę na budowę i zasadę działania maszyn ciśnieniowych, jej dużą wydajność przy zachowaniu wysokiej jakości odlewów, a także jej ograniczeń wynikających z dynamiki przepływu ciekłego metalu podczas wypełniania wnęki formy, obciążeń cieplnych formy oraz gabarytów formy. Istotnym uzupełnieniem tego podrozdziału, w kontekście problematyki badawczej pracy, byłoby przedstawienie znanych związków pomiędzy technologicznymi parametrami procesu (temperaturą formy, temperaturą zalewania, grubością pokryć ochronnych, prawidłowością ukształtowania i położenia układu wlewowego, prędkością tłoka w II fazie wtrysku lub szerokością szczeliny wlewowej, itp.) a rodzajem wad odlewów ciśnieniowych. Doktorant mógł także wspomnieć o specjalnych metodach odlewania ciśnieniowego: Parashot, Acurad, PF a szczególnie VHPDC.

Opracowany na podstawie 121 pozycji literaturowych przegląd stanu zagadnienia jest wartościowym źródłem informacji nt. planowania i organizacji procesu produkcyjnego, normalizacji przepisów jakościowych, ze szczególnym uwzględnieniem standardów branży motoryzacyjnej oraz narzędzi zarządzania jakością w kontekście ich aplikacji do warunków produkcyjnych odlewni ciśnieniowych aluminium. Dobór i układ treści studium literaturowego są właściwie przemyślane, natomiast ich opracowanie należy uznać za dobre i bardzo dobre. Na podkreślenie i wysoką ocenę zasługują komentarze i krytyczne osądy Pana mgr inż. Łukasza Poloczka w poszczególnych rozdziałach przeglądu literaturowego, które świadczą o jego szerokiej i ugruntowanej wiedzy w tematyce problemu.

Drugą część rozprawy rozpoczyna teza, zgodnie z którą: *Określenie relacji przyczynowo-skutkowej występowania wad powstających podczas procesu produkcji bloków silnika metodą wysokociśnieniową, przy wykorzystaniu wybranych narzędzi zarządzania jakością pozwala na określenie działań, które wpłyną na poprawę jakości gotowego wyrobu.*

Teza pracy o charakterze poznawczym i aplikacyjnym została sformułowana jasno i jednoznacznie, a jej treść jest logicznym wynikiem krytycznego studium literaturowego oraz badań własnych Autora. Z tezą, powiązane są bezpośrednio, prawidłowo zdefiniowane cele i zakres pracy. Plan badań przedstawiono w formie schematu blokowego, który w sposób zwarty i poglądowy określa strukturę działań i dobrane narzędzia eksperymentalne. Następnie, Doktorant zwięźle opisuje poszczególne metody badawcze i zastosowaną

aparaturę pomiarową podając odpowiednie wytyczne realizacji prac oraz obowiązujące normy. Istotne opisy, ze względu na główny cel pracy, znajdują się w rozdziale 8.1 *Ocena jakości ciekłego metalu*. W analizowanej odlewni uwagę zwraca dość nietypowy sposób prowadzenia wytopu, w którym część wsadu stanowi ciekły metal dostarczany w termosach transportowych przez firmy zewnętrzne. Takie rozwiązanie, jak wykazał Doktorant, nie zapewnia dotrzymania wymagań normy PN EN 1706 oraz zawężonych norm zakładowych pomimo zastosowanych warunków odbioru i bieżącej weryfikacji składu chemicznego. Pozostałą część wsadu, podobnie jak w innych odlewniach aluminium, stanowią gąski oraz złom obiegowy pochodzących z odciętych układów wlewowych i próżniowych, zabrakowanych odlewów i reklamacji odbiorców. W dalszej części pracy Doktorant sumiennie przeanalizował skład chemiczny i strukturę złomu obiegowego mając świadomość, że może on być istotnym źródłem zanieczyszczeń zarówno tlenkowych jak i gazowych, głównie wodoru. Obecność warstewki samaru na powierzchniach odciętych układów wlewowych, pojawiająca się często w wyniku nieuszczelnienia układu smarowania maszyn ciśnieniowych skutkuje wprowadzeniem do kąpeli metalowej węglowodorów, które w wysokiej temperaturze ulegają rozpadowi z wydzielaniem cząsteczek wolnego wodoru. Nieusunięcie wodoru z ciekłego stopu skutkuje powstaniem mikroporowatości gazowej i pęcherzy gazowych w zakrzepłej strukturze odlewów, a ich ilość intensyfikuje się wraz z zawartością pary wodnej w atmosferze pieca topialnego lub podgrzewczego. Z obecnością wodoru wiąże się również wzmożona rozpuszczalność trudnych do separacji, drobnodispersyjnych wtrąceń tlenkowych. Dlatego też uważam za bardzo cenne przeprowadzenie przez Doktoranta szczegółowych analiz próbek stopu  $AlSi9Cu3(Fe)$  przed rafinacją barbotażową oraz po tym zabiegu. W podrozdziale 8.1.1. Doktorant w sposób właściwy omówił i zilustrował 6 głównych wad pojawiających się w odlewach ciśnieniowych bloku silnika, podając potencjalne przyczyny ich powstawania. W tym miejscu pracy wskazanym byłoby przedstawienie danych w zakresie: udziału procentowego poszczególnych wad w ogólnej ich liczbie, okresu produkcyjnego w jakim zostały określone, oraz liczności prób – szczególnie dla tych wad, które nie były badane bezpośrednio przez Doktoranta.

Dalsza część pracy przedstawia kluczowe wyniki badań i opisy, które potwierdzają słuszność postawionej tezy i stanowią oryginalny wkład własny Pana mgr inż. Łukasza Poloczka w zakresie implementacji narzędzi zarządzania jakością oraz doskonalenia standardów jakościowych odlewni z ujęciem aspektów technologiczno-materiałowych procesu odlewania wysokociśnieniowego. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- wykonanie kompleksowych badań składu chemicznego i porowatości w najważniejszych etapach procesu topienia i odlewania ciekłego metalu;
- opracowanie galerii mikrostruktur stopu  $AlSi9Cu3(Fe)$  wraz z jakościową identyfikacją faz międzymetalicznych oraz oceną morfologii wydzieleni faz żelazowych;

- określenie właściwości mechanicznych siluminu na próbkach pobranych bezpośrednio z odlewów bloku silnika;
- wnikliwe ustalenie i przeanalizowanie związków przyczynowo-skutkowych występowania wad odlewniczych w badanym odlewie na podstawie diagramów Ishikawy;
- opracowanie złożonych diagramów relacji pomiędzy czynnikami i parametrami procesu odlewania ciśnieniowego, z uwzględnieniem zjawisk fizycznych przebiegających w trakcie wypełniania formy ciekłym stopem, a wadliwością odlewów;
- zdefiniowanie w oparciu o analizę 5 Why? przyczyn występowania niezgodności w procesie produkcji odlewów, i sklasyfikowanie ich w trzech głównych kategoriach: technologiczne, ludzkie i organizacyjne;
- dokonanie oceny ryzyka wystąpienia przyczyn wad odlewniczych i określenie 10-ciu ważnych i stosunkowo łatwych do wdrożenia działań korygująco-naprawczych;
- przeprowadzenie serii badań weryfikacyjnych i przedstawienie charakterystyki porównawczej indeksów RWZ wraz z analizą skuteczności wdrożonych działań naprawczych.

Należy podkreślić, że wyżej wymienione osiągnięcia są efektem dobrze zaplanowanej konstrukcji pracy oraz obszernych pomiarów i analiz. Pan mgr inż. Andrzej Łukasz Poloczek w swojej pracy wykorzystał spektroskopię emisyjną, mikroskopię skaningową i świetlną, komputerową analizę obrazu, przeprowadził: pomiary właściwości wytrzymałościowych i wydłużenia oraz próby twardości. Realizacja tych prac w połączeniu z umiejętnym zastosowaniem narzędzi zarządzania jakością jest dowodem dobrego warsztatu badawczego i rozwiniętej wiedzy praktycznej jaką posiada Pan Doktorant. Wysoko oceniam syntetyczne i obiektywne komentarze do większości wyników badań, które świadczą o jego dojrzałości do pracy naukowej i samodzielnego prowadzenia eksperymentów.

Dysertację kończą podsumowanie i wnioski końcowe, które są rozwinięciem, potwierdzonej tezy pracy i jednocześnie systematyzują efektywność działań korygująco-naprawczych wdrożonych do odlewni ciśnieniowej. Główny cel pracy jaki założył Doktorant został osiągnięty i zapewne w najbliższej przyszłości, przy przestrzeganiu opracowanych wytycznych, przyniesie wymierne korzyści ekonomiczne odlewni.

#### **Uwagi krytyczne do rozprawy:**

- w części badawczej pracy nie przedstawiono, chociażby ogólnego, opisu maszyn ciśnieniowych stosowanych do produkcji bloków silnika, ich podstawowych parametrów, stopnia zautomatyzowania, rodzaju czynności wykonywanych przez operatora, które są istotne ze względu na jakość odlewów, systemu kontroli

parametrów odlewania, itp. O tym, że maszyny wyposażone są w układ próżniowy dowiadujemy się dopiero w rozdziale 8.1.3. *Ocena jakości złomu obiegowego.*

- w rozprawie, w różnych jej częściach, odczuwa się brak danych liczbowych, które w kategorii ilościowej opisywałyby takie wady jak: wtrącenie niemetaliczne, pęcherz zewnętrzny, zimne krople, zatarcie i stabilność wymiarowa. Na przykład: Po jakim czasie od wdrożenia działań naprawczych i na ilu próbach określono wskaźniki RWZ dla poszczególnych wad odlewniczych, jaki jest ich procentowy udział w analizowanym odlewie ?
- w tabeli 12 na str. 85 zestawiono pomiary porowatości, z których wynika, że porowatość skurczowa w próbkach pobranych z kadzi przed barbotażem wynosi 16-20 %. Czym tłumaczyć tak wysoką zawartość rzadziwn pochodzenia skurczowego ?
- W podsumowaniu i wnioskach stwierdzono, że do najważniejszych działań naprawczych zalicza się m.in. wykonanie rafinacji metalu dla każdej kadzi transportowej. Z jakich powodów zabieg ten przeprowadzany był wcześniej tylko dla wybranych kadzi ?

Powyższe krytyczne uwagi mają na celu umożliwienie Panu Doktorantowi zaprezentowanie w dyskusji publicznej swojej niewątpliwie wysokiej wiedzy merytorycznej, co stanowi jeden z ważniejszych elementów oceny w prowadzonym postępowaniu.

## 5. Wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Łukasza Poloczka spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z dn. 16 04 2003 r., poz. 595) z późniejszymi zmianami i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej.

