

Częstochowa, dn.15.02.2022 r.

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

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Jurczyka**

**pt.: "Wpływ składu chemicznego i warunków obróbki cieplnej  
na mikrostrukturę oraz wybrane własności użytkowe staliwa  
wysokostopowego typu duplex GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3"**

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa  
Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej

### 1. Ocena przedmiotu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Jurczyka reprezentuje dyscyplinę **Inżynieria Materiałowa** i dotyczy badania i opracowania technologii odlewów z wysokostopowego staliwa typu duplex GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3. Praca o charakterze wdrożeniowym przedstawia wyniki badań struktury i właściwości badanego staliwa oraz opis wymaganych procedur technologicznych, infrastruktury produkcyjnej i stosowanych materiałów do uruchomienia produkcji odlewów w warunkach odlewni Zakładów Mechanicznych WIROMET S.A.

Badane w pracy staliwo jest ujęte w normie PN-EN 10283, która określa skład chemiczny, właściwości mechaniczne i zalecane parametry wymaganej obróbki cieplnej. W literaturze opisano szeroko i szczegółowo wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na kształtowanie się struktury i właściwości staliwa wysokostopowego. Staliwo ferrytyczno-austenityczne GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 charakteryzuje się najlepszym stosunkiem

właściwości wytrzymałościowych do plastycznych oraz wysoką odpornością na pękanie, również w obniżonych temperaturach, w porównaniu z innymi gatunkami wysokostopowych staliw odpornych na korozję. Relację tą można zmieniać sterując wzajemnym udziałem ferrytu i austenitu w mikrostrukturze odlewu przez zmianę składu chemicznego i optymalizację parametrów obróbki cieplnej w zakresie określonym przez normę. Staliwo to zawiera istotnie mniej kosztownego niklu w składzie w porównaniu z innymi, znormalizowanymi gatunkami staliwa odpornego na korozję, co przekłada się na zmniejszenie kosztów produkcji odlewów i zwiększenie konkurencyjności odlewni na rynku. Przesłanki o możliwości sterowania składem chemicznym, doбором parametrów obróbki cieplnej i aspekt ekonomiczny polegający na potencjalnym zmniejszeniu kosztów produkcji odlewów uzasadniają celowość podjęcia badań w tym zakresie.

Mniej zbadanym obszarem są zagadnienia wpływu technologii odlewania uwzględniające kształt odlewu, grubość ścianki, stosowane masy formierskie i rdzeniowe, procesy metalurgiczne i warunki odlewania na krzepnięcie odlewów i kształtowanie ich struktury i właściwości. Wyzwaniem technologicznym jest proces metalurgiczny badanego staliwa zapewniający utrzymanie bardzo niskiej zawartości węgla, poniżej 0.03% masowo. Właśnie nie zbadane elementy technologii odlewów, stanowiące cel pracy, oceniam jako innowacyjną próbę uruchomienia produkcji w skali odlewni.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że Autor dokonał trafnego wyboru materiału do badań własnych, a zrealizowana w pracy koncepcja opracowania technologii odlewów ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 i wdrożenia jej do praktyki w odlewni stanowi znacząco ulepszoną metodę produkcji i wprowadzenie na rynek nowych, wysokojakościowych odlewów.

Zagadnieniem naukowo-badawczym pracy o dużej wartości poznawczej i innowacyjnej w skali przedsiębiorstwa, z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej jest opracowanie i zastosowanie nowoczesnych rozwiązań technicznych w zakresie technologii odlewów ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 gwarantujących istotnie lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu z danymi w normie PN-EN 10283 oraz bardzo dobrą odpornością na korozję i zużycie ściernie. Opis matematyczny wpływu składu chemicznego i obróbki cieplnej na właściwości odlewów uznaję za kluczowe rozwiązanie stanowiące podstawę zaplanowanego wdrożenia. Tym samym 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 staliwa wysokostopowego, co w pełni uzasadnia podjęcie badań w tym zakresie.

## 2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 164 strony, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 235 pozycji literaturowych i streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono przegląd literatury dotyczący: ogólnej charakterystyki staliw odpornych na korozję w zakresie wpływu składu chemicznego i obróbki cieplnej na kształtowanie mikrostruktury i właściwości odlewów wykonanych z różnych znormalizowanych w normie PN-EN 10283 gatunków. Szczególną uwagę poświęcił Autor opisowi zagadnień technologii topienia, odlewania i obróbki cieplnej, badanemu w pracy, staliwu ferrytyczno-austenitycznemu. Szczegółowo opisano nowoczesne procesy i piece do topienia tego gatunku staliwa (m.in. konwertor argonowo-tlenowy AOD), wymagane warunki zalewania form oraz najkorzystniejsze z punktu widzenia jakości odlewów technologie formowania i masy formierskie i rdzeniowe. Podano optymalne składki stosowanych mas formierskich. Jasno opisano i uzasadniono stosowanie korzystnych parametrów obróbki cieplnej odlewów wraz z opisem nowoczesnych urządzeń stosowanych do tego zabiegu. W podsumowaniu części literaturowej pracy opisano znane w teorii mechanizmy krystalizacji staliwa duplex i kształtowania struktury odlewu w wyniku obróbki cieplnej. Szczegółowo opisano wpływ wszystkich pierwiastków w składzie chemicznym staliwa duplex, a w szczególności gatunku GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 na skład fazowy i mechanizm odporności na korozję.

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ: Autor dokonał prawidłowego, 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 2.3) przedstawiające zalety staliwa duplex w porównaniu z innymi gatunkami staliwa odpornego na korozję, 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 „Badania własne” Autor przedstawia wyniki badań własnych formułując dwa cele pracy. Celem naukowym było określenie wpływu składu chemicznego i parametrów obróbki cieplnej na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i użytkowe, w tym, odporność na korozję i na zużycie ściernie staliwa wysokostopowego typu duplex GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3. Celem użytkowym było opracowanie i wdrożenie procesu wytwarzania odlewów ze staliwa stopowego typu duplex w warunkach odlewni ZOiŚ ZM Wiromet S.A., poprzez aplikację do praktyki przemysłowej wiedzy pozyskanej w oparciu o analizę wyników przeprowadzonych badań dotyczących technologii staliwa ferrytyczno - austenitycznego GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3.

Na podstawie jasno określonych celów pracy przedstawiono zakres badań pracy i tezy. W tezie 1 określonej przez Autora jako naukowa wyrażono możliwość istnienia najkorzystniejszego składu chemicznego i obróbki cieplnej odlewów ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 zapewniających uzyskanie wymaganych właściwości. Teza nie formułuje związku przyczynowo-skutkowego, co byłoby moim zdaniem, bardziej odpowiednie. Ogólne sformułowanie tezy 1 pracy, nie określono wymaganej mikrostruktury i właściwości użytkowych, uniemożliwia sformułowanie takiego związku. Prawdopodobnie wymagania normy PN-EN 10283 dla badanego staliwa były dla Autora kryterium wystarczającym do osiągnięcia zaplanowanego celu naukowego pracy.

W tezie 2, o charakterze wdrożeniowym, sformulowano pełną przydatność uzyskanych wyników badań do wdrożenia produkcji odlewów ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 w wybranej odlewni. Ta teza w pełni odpowiada na postawione cele pracy mające określić zależności między parametrami odlewania i jakością odlewów i stanowiące nowe podejście do rozwiązania postawionego zagadnienia w skali przedsiębiorstwa.

Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy obejmujący:

- wykonanie odlewów próbnych ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 o zmiennym składzie chemicznym, z zakresu wg normy PN-EN 10283 i przesyconych z temperatury 1100, 1125 i 1150°C w warunkach przemysłowych (etap I),
- badanie właściwości mechanicznych ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ , HB, A i KV) odlewów w stanie przesyconym zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 10283 (etap I),
- określenie korelacji pomiędzy właściwościami mechanicznymi, a składem chemicznym badanego staliwa stopowego (etap I),
- badanie procesu krystalizacji metodą ATD odlewów o różnych grubościach ścianek oraz prognozowanie składu fazowego mikrostruktury odlewów z użyciem programu ThermoCalc (etap II),

- badanie właściwości mechanicznych odlewów ze staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 o zoptymalizowanym składzie chemicznym i po obróbce cieplnej opracowanej na podstawie wyników analizy przemian fazowych i symulacji procesu krzepnięcia i stygnięcia odlewu w formie wykonanej z użyciem programu MAGMA Soft (etap II),
- badania metalograficzne mikroskopowe staliwa w zakresie mikroskopii świetlnej wraz z analizą ilościową udziału poszczególnych faz w mikrostrukturze oraz w zakresie mikroskopii elektronowej skaningowej z analizą EDS (etap II),
- wyznaczenie modeli matematycznych korelacji pomiędzy właściwościami mechanicznymi a temperaturą przesycania staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 (etap II).
- badania odporności na zużycie ścierne i odporności na korozję opracowanego staliwa stopowego (etap II).

W szczegółowo opisanej metodyce badań przedstawiono: składy stosowanych materiałów, procedury wykonania pomiarów z zastosowanymi parametrami, rysunki i zdjęcia wykonanych odlewów próbek 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 3.4 przedstawiono wyniki badań i ich analizę. W wyniku zrealizowanych badań (etap I) i obliczeń wyznaczono równania wpływu składu chemicznego wyrażonego za pomocą równoważników chromu ( $Cr_e$ ) i niklu ( $Ni_e$ ) oraz temperatury przesycania na badane właściwości mechaniczne. Ten ważny dla teorii wynik potwierdza wytworzenie odlewów z badanego staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 o wyjątkowo wysokich właściwościach (średnie uzyskane z 10 wytopów staliwa  $R_m=867$  MPa,  $R_{p0,2}=710$  MPa,  $A=23.5\%$ ,  $HB=258$ , i  $KV=155J$ ). Na podstawie równań określono optymalny skład chemiczny staliwa i temperaturę przesycania  $1100^{\circ}C$  dla najlepszego zespołu właściwości mechanicznych.

W II etapie badań wykonano symulacje komputerowe tworzenia struktury odlewów, doświadczalne pomiary kinetyki krzepnięcia odlewów (metoda ATD) oraz analizę mikrostruktury odlewów wytworzonych w warunkach laboratoryjnych (mała masa metalu) o grubości ścianki 10, 20, 40 i 60 mm w stanie surowym. Analiza mikrostruktury badanych odlewów w stanie surowym, potwierdzona bogatym materiałem zdjęciowym, jednoznacznie dowodzi, że mikrostruktura badanego staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 składa się z ferrytu  $\delta$ , austenitu  $\gamma$  i fazy międzymetalicznej  $\sigma$  rozmieszczonej na granicach ziaren  $\gamma$  bez względu na grubość ścianki odlewu. Stwierdzono natomiast wpływ grubości ścianki odlewu na wielkości ziarna, którą wyrażano szerokością wydzieleni austenitu. Średnia szerokość wydzieleni austenitu wynosi 16, 17, 20 i  $25\mu m$  odpowiednio dla grubości ścianki odlewu

10, 20, 40 i 60 mm. Nie stwierdzono istotnego wpływu grubości ścianki na ilość fazy  $\sigma$ , a jej ilość nie przekraczała 3÷5%. W wyniku zabiegu przesycania uzyskano ujednorodnienie mikrostruktury na grubości ścianki odlewu do wartości 10, 13, 14 i 13 $\mu$ m odpowiednio dla grubości ścianki 10, 20, 40 i 60 mm. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie mikrostruktury dwufazowej  $\delta+\gamma$  wolnej od wydzielenia fazy  $\sigma$ .

Wyniki badań w skali laboratoryjnej zweryfikowano na wykonanych odlewach w skali przemysłowej. Na podstawie wykonanych szczegółowych badań metaloznawczych (analiza EDS) potwierdzono znany negatywny wpływ fazy  $\sigma$  na zmniejszenie właściwości mechanicznych, co jednoznacznie potwierdziło konieczność wykonania zabiegu przesycania. Próba przesycania odlewu bezpośrednio usuniętego z formy (eliminacja nagrzewania i wygrzewania) nie dała pozytywnego wyniku ze względu na generowanie niedopuszczalnych, zbyt dużych naprężeń w odlewie. W badaniach temperatury przesycania wyznaczono wartość 1075<sup>0</sup>C jako optymalną dla odlewów przemysłowych w klasycznie przeprowadzonym zabiegu. W weryfikacji badaniami przemysłowymi potwierdzono bardzo dobre właściwości mechaniczne, odporność na korozję i zużycie ściernie opracowanego staliwa.

W rozdziale 4 przedstawiono charakterystykę wdrożenia wyników badań własnych w proces wytwarzania staliwa duplex w warunkach ZOiŚ ZM WIROMET S.A. Opisano szczegółowo wszystkie etapy technologii odlewu, przedstawiono autorską instrukcję technologiczną i wykaz zakupów niezbędnej infrastruktury produkcyjnej. W rozdziale 5 przedstawiono analizę ekonomiczną wdrożenia wyników badań własnych. Wykazano oszczędności w wysokości 1410 zł na materiałach wsadowych do jednego wytopu (istniejący piec indukcyjny średniej częstotliwości, dwutyglowy o pojemności 2 x 500kg) i 190 zł na energii w procesie obróbki cieplnej (pojemność pieca 2 Mg).

Podsumowując wyniki badań własnych stwierdzam, że:

- potwierdzono możliwość optymalizacji składu chemicznego i temperatury wygrzewania do procesu przesycania realizowanych odpowiednio w ramach normy PN-EN 10283,
- w badaniach zastosowano plan badań ekstremalnych eksperymentu, co umożliwiło pełną analizę statystyczną uzyskanych wyników włącznie z wyznaczeniem modeli matematycznych),
- uzyskane wyniki badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych staliwa GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3 potwierdzają zwiększenie Rm o 24%, Rp0,2 o 29%, A o 24%, KV o 256%, w stosunku do minimalnych wymagań określonych w normie PN-EN 10283.

- ocena warunków wytwarzania w ZOIŚ ZM Wiromet S.A., pod względem istniejących procesów technologicznych, dostępnych maszyn i narzędzi oraz oprzyrządowania odlewniczego pozwala na opracowanie wytycznych do przygotowania zaplecza produkcyjnego dla staliwa stopowego typu duplex gatunku GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3, w zakresie topienia, odlewania oraz obróbki cieplnej.

Przedstawione wyniki badań dowodzą, że możliwe jest sterowanie mikrostrukturą i właściwościami odlewów tak, że dla określonego poziomu jakości odlewu można dobrać odpowiednie skład chemiczny, parametry technologiczne odlewania i obróbki cieplnej. Wyniki badań pracy mają duże znaczenia praktyczne, a cała praca ma charakter pracy wdrożeniowej. Uzyskane wyniki są nowatorskie i wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę odlewania staliwa wysokostopowego.

Sekwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz użytkowe. 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**

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji pracy i prezentacji wyników. W sekwencji badań krystalizacji staliwa metodą ATD nie zarejestrowano wszystkich oczekiwanych efektów cieplnych. W związku z powyższym chciałbym uzyskać od Doktoranta odpowiedź na następujące pytania:

1. Jakie informacje o krzepnięciu odlewu można uzyskać z pomiaru metodą ATD?,
2. Jaki wpływ ma przechłodzenie krystalizującego metalu na kształtowanie się struktury odlewu?,
3. Proszę wyjaśnić jaki jest mechanizm szybkości stygnięcia odlewu na jego mikrostrukturę.

### **4. Ocena końcowa**

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Pawła Jurczyka spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem badawczy o charakterze wdrożeniowym 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 odlewnictwa w zakresie odlewania metali.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Jurczyka pt.: **”Wpływ składu chemicznego i warunków obróbki cieplnej na mikrostrukturę oraz wybrane własności użytkowe staliwa wysokostopowego typu duplex GX2CrNiMoCuN 25-6-3-3”** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Jurczyka do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.

*Krzysztof Uligma*