

Częstochowa, dn.5.09.2023 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. Michała Angreckiego**

**pt.: "Zastosowanie regeneratu z mas wiązanych żywicą furfurylową  
jako materiału posypki w technologii wykonywania  
wielowarstwowych form ceramicznych"**

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

### **1. Ocena przedmiotu rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Angreckiego reprezentuje dyscyplinę Inżynieria Materiałowa w dziedzinie materiałoznawstwo i dotyczy badania przydatności zastosowania regeneratu z mas wiązanych żywicą furfurylową jako materiału posypki w technologii wykonywania wielowarstwowych form ceramicznych. Praca o charakterze aplikacyjnym przedstawia wyniki badań wpływu, odzyskanego w procesie regeneracji piasku kwarcowego (regeneratu) ze zużytej masy formierskiej, na właściwości wielowarstwowych form ceramicznych w technologii wytapianego modelu, kinetykę suszenia, mechanizm zwilżania w procesie sporządzenia formy i jakość odlewu.

Praca wpisuje się w aktualny trend związany z zastosowaniem materiałów pochodzących z odzysku na potrzeby odlewnictwa metali i stoi w zgodzie z polityką zrównoważonego rozwoju wprowadzoną do prawodawstwa Unii Europejskiej, a także w Polsce.

Rocznie w Polsce wytwarza się ok. 600 tys. ton odpadów odlewniczych, w tym ok. 500 tys. ton pochodzi z odlewni żeliwa. Głównie są to zużyte piaski formierskie i rdzeniowe, które stanowią blisko 80% wszystkich powstających odpadów. W Polsce i na świecie tylko część tych odpadów jest ponownie wykorzystywana jako wartościowy surowiec. Duża część tych odpadów deponowana jest na składowiskach, co ma negatywny wpływ na środowisko naturalne oraz powoduje zwiększenie kosztów produkcyjnych odlewów. Powyższe dane jednoznacznie wskazują na konieczność poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych w technologii mas formierskich z szerszym wykorzystaniem materiałów w recyklingu, co wiąże się także z oszczędnością energii i ograniczeniem szkodliwego oddziaływania na środowisko.

W odlewnictwie metali znane są i stosowane od wielu lat metody regeneracji mas formierskich i rdzeniowych. Odzyskany piasek kwarcowy jest głównie stosowany jako dodatek do świeżych mas formierskich. Wykorzystanie regeneratu ze zużytych mas na żywicy furfurylowej na posypkę w budowie wielowarstwowych form ceramicznych w technologii wytapianego modelu nie było do tej pory badane, co wskazuje na innowacyjny charakter pracy. Powyższe przesłanki wskazują na możliwości takiego doboru składu masy formierskiej i technologii formy, które pozwolą opisać wpływ regeneratu 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 opracowaniu i wytworzeniu nowej masy formierskiej przydatnej do odlewania w technologii wytapianego modelu. Wyniki pracy mogą być wykorzystane do badania i sterowania właściwościami i 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, co w pełni uzasadnia podjęcie badań w tym zakresie.

## **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Tekst rozprawy liczy 118 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 141 pozycji literaturowych, wstęp i spisy rysunków i tabel. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono przegląd literatury dotyczący: charakterystyki metody wytapianych modeli, sypkich mas samoutwardzalnych z żywicą

furfurylową, charakterystyki metod regeneracji mas formierskich oraz metod badania zwilżania materiałów ceramicznych metalami oraz badania właściwości fizykochemicznych materiałów stosowanych w odlewnictwie.

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ Autor dokonał trafnego, pod względem zakresu, doboru materiału źródłowego światowej informacji naukowej. Przedstawiony opis jest wnikliwy, a jednocześnie w jasny sposób charakteryzuje najistotniejsze wątki teoretyczne i praktyczne rozwiązywane w pracy. Przełożyło się na wysoką jakość opracowania tej części pracy pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. Przegląd literatury kończy sformułowanie celu i tezy, co stanowi odpowiednie uzasadnienie podjęcia badań własnych Autora. W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiony w pracy przegląd literatury odpowiada wymogom pracy doktorskiej na poziomie wyróżniającym.

Celem naukowym pracy było określenie wpływu regeneratów z mas samoutwardzalnych, wiązanych żywicami furfurylowymi, jako substytutu świeżych materiałów ceramicznych na właściwości i technologię wielowarstwowych form w technologii wytapianych modeli oraz jakość odlewów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz dotychczasowych badań własnych przyjęto następujące tezy:

- 1. Masa formierska pochodząca z technologii mas samoutwardzalnych wiązanych żywicą furfurylową po wstępnej regeneracji, może znaleźć zastosowanie w procesie produkcyjnym wielowarstwowych form ceramicznych jako materiał posypki kolejnych warstw formy.*
- 2. Zastosowanie regeneratów pochodzących z technologii mas samoutwardzalnych wiązanych żywicą furfurylową, jako materiału ceramicznego posypki poszczególnych warstw form ceramicznych pozwala na uzyskanie wymaganych właściwości wytrzymałościowych form zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturach podwyższonych.*
- 3. Zastosowanie regeneratu z mas samoutwardzalnych wiązanych żywicą furfurylową jako materiału na posypkę kolejnych warstw formy nie wpływa na kinetykę suszenia wielowarstwowych form ceramicznych.*
- 4. Wykorzystanie regeneratu jako substytutu świeżego materiału ceramicznego na kolejne warstwy formy ceramicznej nie wpływa na jakość powierzchni odlewu.*

W mojej ocenie tezy 1 i 2 można było połączyć w jedną formułując związek przyczynowo-skutkowy. Wówczas brzmienie nowej tezy byłoby następujące:

*Regeneraty pochodzące z technologii mas samoutwardzalnych wiązanych żywicą furfurylową mogą znaleźć zastosowanie w produkcji jako materiał posypki kolejnych warstw wielowarstwowych form ceramicznych ponieważ pozwalają na uzyskanie wymaganych właściwości wytrzymałościowych i technologicznych form w temperaturze otoczenia i w temperaturach podwyższonych.*

W tezach 3 i 4 Autor niefortunnie sformułował brak wpływu regeneratu na kinetykę suszenia wielowarstwowych form ceramicznych i na jakość powierzchni odlewu. Faktycznie materiał regeneratu musiał wpływać na kinetykę suszenia, a także w następstwie na jakość powierzchni odlewu, natomiast jego dodatek zamiast świeżego materiału nie spowodował zmiany kinetyki suszenia i jakości powierzchni odlewu w porównaniu z technologią stosującą świeże materiały ceramiczne. Zapewne o to chodziło.

Niezależnie od moich uwag tezy w pełni odpowiadają na postawiony cel pracy i stanowią nowe podejście do rozwiązania postawionego zagadnienia w skali przedsiębiorstwa. Poszukiwanie zależności między właściwościami masy i jakością odlewów a składem masy, parametrami technologii masy i formy uznaję za innowacyjny element pracy.

W drugiej części pracy zatytułowanej „Część badawcza” Autor przedstawia wyniki badań własnych. Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy obejmujący:

- badania właściwości materiałów stosowanych na formy wielowarstwowe w technologii wytapianego modelu,
- badania właściwości stosowanych na posypkę regeneratów,
- badania właściwości reologicznych ciekłych mas ceramicznych,
- badania zwilżania wosku modelowego i utwardzonej żywicy furanowej ciekłymi masami ceramicznymi,
- badania porównawcze kinetyki suszenia form ceramicznych sporządzonych ze świeżych materiałów (materiał referencyjny) i z dodatkiem regeneratów,
- badania zwilżalności form ceramicznych ciekłym żeliwem,
- badania procesu spiekania form ceramicznych metodami TGA/TG, TG/DTG,
- badania wytrzymałości, przepuszczalności i struktury form ceramicznych,
- wykonanie odlewów testowych i badania wytrzymałości na rozciąganie, twardości, chropowatości powierzchni i 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. Podkreślam uwzględnienie w badaniach wpływu wszystkich zmiennych niezależnych kluczowych w kształtowaniu właściwości masy i odlewu.

W rozdziale 2.1 przedstawiono kompleksowe wyniki badań materiałów zastosowanych do sporządzenia form wielowarstwowych w technologii wytapianego modelu. Wyznaczono krzywe rozkładu wielkości cząstek spoiwa koloidalnego Ludox PX30, mączki kwarcowej MK.056/001 pełniącej rolę wypełniacza, świeżych piasków kwarcowych stosowanych na posypkę i trzech regeneratów z różnych odlewni uzyskanych w procesach regeneracji wyjściowej i dwucyklowych regeneracjach talerzowych. W badanych recyklatkach określono straty prażenia, zawartość lepiszcza, wskaźnik kształtu ziarna i morfologię powierzchni ziaren.

Z badanych materiałów sporządzono ciekłe masy ceramiczne i określono ich lepkość w funkcji udziału fazy stałej w masie (mączki kwarcowej MK.056/001). Zmierzono kąty zwilżania wosku modelowego i utwardzonej żywicy furanowej ciekłymi masami ceramicznymi o dwóch lepkościach 25 i 32 sekund, mierzonych czasem wypływu z kubka Forda.

W rozdziale 2.2 przedstawiono wyniki badań procesu suszenia form w postaci krzywych kinetycznych dla różnych warstw formy wielowarstwowej i różnej wilgotności powietrza. Na podstawie analizy badań kinetyki suszenia stwierdzono, że zastosowanie różnych materiałów posypki, tj. świeżego materiału ceramicznego lub regeneratu z masy typu furanowego, nie wpływa na czas wysychania danej warstwy jak również całej formy.

Dużą wartość naukową i poznawczą mają wyniki badania zwilżania ścianek formy ceramicznej ciekłym żeliwem w temperaturze do 1450<sup>0</sup>C. Obserwacje mikroskopowe leżącej kropli pozwoliły na opis kinetyki zwilżania i wyznaczenia wartości kąta zwilżania. Na podstawie przeprowadzonych badań zwilżalności wywnioskowano, że wykorzystanie regeneratu jako materiału ceramicznego posypki na warstwę drugą oraz warstwy kolejne form ceramicznych nie wpływa negatywnie na zwilżalność tego materiału ceramicznego. Wykorzystanie regeneratu z masy furanowej jako materiału posypki nie powoduje pęknięć powierzchniowych jak i wewnętrznych materiałów ceramicznych.

Pomiary właściwości cieplnych (ciepło właściwe, współczynnik przewodności cieplnej, współczynnik przewodzenia temperatury i rozszerzalności cieplnej) regeneratu i świeżego piasku kwarcowego o zbliżonym do regeneratu uziarnieniu jako materiału referencyjnego wykazały, że zastosowanie regeneratu z masy furanowej jako materiału

posypki nie wpływa na zmiany wymiarowe w porównaniu z materiałem referencyjnym. Wyższa wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału ceramicznego wykonanego na bazie regeneratu o średniej wielkości ziaren  $D_{50}=0.26$  w stosunku do materiału referencyjnego o średniej wielkości ziaren osnowy  $D_{50}=0.23$  wynika z większą gruboziarnistość i pozostaje w zgodności z wynikami badań zamieszczonych w literaturze.

W badaniach procesu wyżarzania regeneratów i materiału referencyjnego potwierdzono znacznie większy ubytek masy dla materiałów doświadczalnych na bazie regeneratów niż w przypadku próbek ceramicznych referencyjnych. Związane to było z wypalaniem pozostałości żywicy typu furanowego znajdującej się na powierzchni ziaren regeneratu.

W badaniach właściwości wytrzymałościowych mas (rozdział 2.3) stwierdzono, że materiał ceramiczny referencyjny posiadał najwyższe właściwości wytrzymałościowe dla wszystkich założonych warunków prowadzenia procesu suszenia. Pomimo tego materiały wykonane na bazie regeneratów posiadały wytrzymałość na zginanie (MOR) na poziomie około 5,0 MPa w temperaturze 1000°C, która jest wystarczająca do przeniesienia ciśnienia metalostatycznego podczas procesu zalewania form i otrzymania odlewów bez wad.

Badania przepuszczalności form potwierdziły brak skłonności form ceramicznych do pęknięć podczas wyżarzania, szczególnie dla doświadczalnych materiałów ceramicznych wykonanych z udziałem regeneratów z mas furanowych ponieważ wartości przepuszczalności były porównywalne do form wykonanych z materiału referencyjnego.

W rozdziale 2.4 przedstawiono wyniki badań odlewów (koniczynki) z żeliwa GGG-NiSiCr20-5-2 wykonanych w technologii wytapianego modelu w formach z posypką z regeneratu. Wyniki badań wytrzymałościowych żeliwa odlanego do form referencyjnych oraz doświadczalnych wykonanych na bazie regeneratu, nie wykazały znaczących różnic wartości. Jakość powierzchni odlewów oceniono na podstawie pomiaru parametrów chropowatości powierzchni :  $R_a$ ,  $R_{max}$ ,  $R_z$ . Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że zastosowanie regeneratu ze zużytej masy furanowej nie wpływa negatywnie na wartość parametru  $R_a$ . Chropowatość powierzchni odlewów wykonanych w formach referencyjnych była porównywalna z jakością powierzchni odlewów wytworzonych w formach doświadczalnych na bazie regeneratu.

Podsumowując wyniki badań własnych stwierdzam, że:

- zbadano i opisano mechanizm wpływu regeneratu z mas furfurylowych na zmianę charakteru żelowania ciekłej masy ceramicznej,

- kompleksowo zbadano właściwości wytrzymałościowe i technologiczne nowych mas dla technologii wytapianego modelu z zastosowaniem posypki z regeneratów mas furfurylowych,
- potwierdzono jednoznacznie w badaniach laboratoryjnych i przemysłowych przydatność nowych mas do wytwarzania form na odlewy z żeliwa niklowego,

Sekwencję badań własnych kończą podsumowanie i wnioski. Autor poprawnie zinterpretował uzyskane wyniki. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz użyteczne. 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. Wyniki badań pracy mają duże znaczenia praktyczne, a uzyskane wyniki są nowatorskie i wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę mas formierskich do odlewania stopów żelaza.

### **3. Uwagi**

1. Regenerat F różni się od pozostałych M i S większą stratą prażenia, większą wielkością ziarna i ich kształtem bardziej odbiegającym od kulistego. Regeneraty są z różnych odlewni i uzyskane zostały w tej samej technologii regeneracji masy na spoiwie furanowym. Czy istnieje związek i jaki on jest między rodzajem materiału sporządzonego regeneratu a jego zwilżaniem przez ciekłe żeliwo Nicrosilal (kął zwilżania regeneratu F wynosi  $112^{\circ}$  a pozostałych: regenerat M- $138^{\circ}$ , S- $140^{\circ}$  i świeży piasek kwarcowy- $146^{\circ}$ )?
2. Dlaczego w badaniach właściwości cieplnych zrezygnowano z materiałów wytworzonych na bazie regeneratów F i M, a także odlewy wykonano w formach z regeneratem S?
3. Proszę oszacować emisyjność szkodliwych substancji i związków nowych mas z regeneratami podczas zalewania i stygnięcia odlewów,
4. Proszę o komentarz dotyczący opłacalności ewentualnego wdrożenia nowych mas.

### **4. Ocena końcowa**

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji pracy i prezentacji wyników. Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Michała Angreckiego 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 udowodnił postawione w pracy tezy.
- Doktorant osiągnął cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę mas formierskich i rdzeniowych w odlewnictwie metali.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Angreckiego pt.: **”Zastosowanie regeneratu z mas wiązanych żywicą furfurylową jako materiału posypki w technologii wykonywania wielowarstwowych form ceramicznych”** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Angreckiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

*Krawczyk Elżbieta*