

## Rozprawa doktorska – streszczenie

### ***Mechanizm regeneracji zużytej masy zawierającej żywicę fenolową utwardzaną estrami w wybranym regeneratorze dynamiczno-ściernym***

mgr inż. Przemysław Czapła

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

W rozprawie zostały wyodrębnione cztery główne części, z których pierwsza ozn. I, będąca opracowaniem kompilacyjnym jest poprzedzona wykazem ważniejszych oznaczeń oraz wstępem. Drugą część rozprawy ozn. II stanowią opisy przeprowadzonych badań własnych, zarówno w sferze badań modelowych mechanizmu regeneracji osnowy masy zużytej z żywicą Alphaset w urządzeniu ugniatająco-ścierającym USR5-1, jak również badań stanowiskowych związanych z doświadczalną weryfikacją modelu teoretycznego w kilku aspektach jego wykorzystania. Część trzecia ozn. III zawiera podsumowanie i wnioski końcowe, natomiast ostatnia część ozn. IV jest suplementem materiałów uzupełniających.

We wstępie nakreślono ogólny cel rozprawy, za który uznano poznanie istoty mechanizmu obróbki ugniatająco-ściernej regeneratu determinującego optymalizację efektu oczyszczania osnowy piaskowej, zachodzącej w toku obróbki sprężysto-plastycznej materiału ziarnistego. Zaznaczono, że ważnym komponentem opisu mechanizmu badanego procesu jest wykorzystanie modelu plastyczności Druckera-Pragera, w połączeniu z wyselekcjonowanymi wielkościami determinującymi efekty użytkowe urządzenia w warunkach długookresowego cyklu eksploatacji jego zespołów w wybranej odlewni staliwa.

W części kompilacyjnej rozprawy, która zawiera 6 rozdziałów i szereg podrozdziałów, omówiono wyniki analizy aktualnego stanu zagadnienia w obszarze badań poznawczych procesu obróbki regeneracyjnej suchej mechanicznej osnowy kwarcowej zużytych mas formierskich. W rozdziale I.3.1. dokonano krytycznej analizy poglądów na mechanizm usuwania otoczek zużytego materiału wiążącego z powierzchni ziaren osnowy w wyniku jej obróbki regeneracyjnej na przykładzie znanych hipotez energetycznych (P. Rittingera, F. Kicka, F. C. Bonda, R.J. Charlesa oraz I. Bracha), eksponujących znaczenie sił tarcia w procesie uwalniania osnowy z otoczek zużytego materiału wiążącego.

W charakterze przykładu, dokonano w rozdz. I.3.2. opisu przykładowych modeli teoretycznych obróbki regeneracyjnej z wykorzystaniem sił tarcia i/lub udaru w zespołach urządzeń odśrodkowych wg założeń: I.B. Zajgerowa (z wykorzystaniem sił tarcia i udaru), A. Pająka (siły tarcia w bezударowym zepole misowym), M. Łucarza (kompozycja układu talerzowego i bezударowego wykorzystania sił tarcia na obwodnicy o specjalnym profilu roboczym).

W podsumowaniu istniejących modeli teoretycznych (rozdz. I.3.3 ) uwypuklono te ich charakterystyczne cechy, jak również zaproponowane przez autorów sposoby określania parametrów konstrukcyjnych oraz roboczych prezentowanych urządzeń pod kątem możliwości ich pewnej aplikowalności do zamieszczonych dalej rozważań zmierzających do budowy systemu obróbki regeneracyjnej ugniatająco-ścierającej. Stwierdzono, że pomimo pewnego postępu w teoretycznym opisie procesu regeneracji suchej mechanicznej, której rezultatem były opracowane zależności geometryczne, takie jak wzory do kształtowania powierzchni roboczych talerzy, profilowania przekroju wneli obliczania wartości prędkości kątowej zespołu talerzy czy wydajności, głównym niedostatkim tych modeli jest odniesienie rozważań teoretycznych do pojedynczych cząstek, zbyt upraszczającym występujące w rzeczywistości zjawiska i oddziaływania.

Kolejną treścią omawianej części rozprawy (rozdz. I.4) jest omówienie zasad oceny skuteczności obróbki regeneracyjnej na sucho sposobem mechanicznym, w której zużyta masa formierska ulega konwersji na zregenerowaną osnowę kwarcową i pyły będące produktami obróbki ścierniej (ubytkowej). Podano zdefiniowane wskaźniki do bezpośredniego porównania efektów regeneracji przyjmując, że za ogólne kryterium regenerowalności zużytej masy należy przyjąć stopień zbliżenia składu chemicznego oraz ziarnowego, morfologię powierzchni, i innych właściwości regeneratu uzyskanego w realnych warunkach obróbki regeneracyjnej, w odniesieniu do wartości tych samych parametrów wyjściowych osnowy piaskowej, Wskazano główne metody badań instrumentalnej oceny jakości osnów ziarnowych, pozyskanych w wyniku regeneracji, wg hierarchii ich ważności dla mas formierskich z określonym materiałem wiążącym.

W kontekście regenerowalności i oceny jakości odzyskanej jakości regeneratu przedstawiono ogólną charakterystykę mas zużytych ze spoiwami na bazie żywic alkaliczno-fenolowych (rozdz. I.5), w odniesieniu do których obowiązują zwiększone wymagania stopnia oczyszczenia osnowy z zużytego materiału wiążącego, w celu spełnienia roli

częściowego zamiennika świeżego piasku i uzyskania masy formierskiej odpowiednich parametrach dla danego stopu.

Zakończenie części kompilacyjnej stanowi rozdział I.6, zwracający uwagę na aspekt ekonomiczny odzysku materiałów z procesu regeneracji i zagospodarowania odpadów z nawiązaniem do obowiązujących unijnych dyrektyw dotyczących procesu recyklingu. Zamieszczona analiza porównawcza kosztów recyklingu zużytej masy formierskiej wskazuje, że sucha regeneracja mechaniczna wymaga najmniejszych nakładów inwestycyjnych, kosztów operacyjnych i zużycia energii dla 1 tony odzyskiwanego materiału.

Podsumowując, w części kompilacyjnej dokonano uogólnienia całokształtu przedstawionych zagadnień, które determinują przebieg i wyniki procesu mechanicznej regeneracji mas zużytych chemoutwardzalnych oraz analizy istniejących poglądów na podstawy teoretyczne obróbki regeneracyjnej w stanie suchym. W ogólnym ujęciu omówione zostały zagadnienia związane z inżynierią procesów obróbki regeneracyjnej mas zużytych z wykorzystaniem istniejących hipotez energetycznych procesu kruszenia i ścierania opisujących znaczenie sił tarcia w procesie uwalniania osnowy z otoczek zużytego materiału wiążącego.

W zakresie doboru literatury, wykorzystano 115 pozycji źródłowych, koncentrując się przede wszystkim na pozycjach bibliograficznych, związanych z przedmiotem rozprawy, wydanych w ostatnim dwudziestoleciu, traktowanych jako reprezentatywne dla istniejącego w tym okresie czasu stanu opisu mechanizmu usuwania otoczek zużytego spoiwa z powierzchni ziaren osnowy i do tego służących rozwiązań technicznych. W tym aspekcie uwzględnione zostały także współautorskie prace autora rozprawy.

Realizacja części kompilacyjnej uzasadniła sprecyzowanie ogólnej projekcji celu i programu własnych badań modelowych i stanowiskowych mechanizmu regeneracji masy zużytej z żywicą Alphaset w urządzeniu ugniatająco-ścierającym USR5-1.

Część własną rozprawy otwiera rozdział II.1, stanowiący wprowadzenie do obróbki regeneracyjnej ugniatająco-ścierającej o wielokrotnym generowaniu naprężeń ściskających oraz deformacji sprężysto – plastycznych zużytych mas ze spoiwami na bazie żywic alkaliczno-fenolowych, w których uzyskanie wysokiej skuteczności uwalniania osnowy z otoczek trudnego do usunięcia zużytego spoiwa stanowi ważną przeszkodę w ich szerokim stosowaniu, pomimo relatywnie mniej niekorzystnego oddziaływania na otaczające środowisko.

Czynnikiem, który przeważał o nowym podejściu do regeneracji mas na bazie żywic alkaliczno-fenolowych było wykazanie przez firmę Omega Sinto Ltd, w trakcie wdrażania innowacyjnego urządzenia USR5-1 nowych, potencjalnych możliwości wysokiego stopnia oczyszczenia osnowy tych mas, potwierdzonych podczas pracy w warunkach długookresowej eksploatacji w odlewni staliwa. Potrzebę badań skoncentrowaną na kontroli efektów regeneracji (stopień oczyszczenia osnowy, zmiana składu granulometrycznego, zużycie osnowy) rozszerzono na badanie wpływu stopnia zużycia wybranych elementów konstrukcyjnych i ruchowych urządzenia na jakość regeneratu i efekty ekonomiczne.

Przedstawiona została w tym rozdziale charakterystyka systemu obróbki regeneracyjnej nowego typu (rozd. II.1.1), opis przebiegu procesu regeneracji oraz budowy i działania zespołów funkcjonalnych regeneratora misowego typu USR5-1 (rozd. II.1.2) o działaniu ciągłym, z krążnikowymi elementami ugniatająco-ścierającymi i regulowanej sile nacisku na warstwę podlegającej regeneracji masy zużytej, poddanej uprzednio regeneracji I stopnia w innym regeneratorze typu przesiewacza wibracyjnego.

Identyfikacja zespołów konstrukcji oraz czynników procesowych decydujących o efektywności uwalniania osnowy z otoczek zużytego materiału a także o hipotetycznym ich wpływie na przebieg procesu (rozd. II.1.3), stanowiła przesłankę do sformułowania problemu naukowego, celu oraz tezy rozprawy (rozd. II.2.3).

W rozdziale II.2 zawarto charakterystykę problemu naukowego, cel oraz tezy rozprawy. Jako cele rozprawy przyjęto:

1. Przeprowadzenie rozważań teoretycznych stanu naprężeń materiału ziarnistego i procesu deformacji plastycznej i w oparciu o model opisany kryterium wyężeniowym Druckera-Pragera [90–92], w celu ilościowego określenie czynników, od których zależy skuteczność procesu regeneracji podlegającego obróbce ugniatająco-ściernej.
2. Weryfikacja modelu przez określenie wpływu regulacji parametrów konstrukcyjnych układu realizującego regenerację właściwą na zużycie wybranych elementów konstrukcyjnych i ruchowych urządzenia USR5-1 podczas jego pracy w warunkach długookresowej eksploatacji.
3. Realizacja stanowiskowych i laboratoryjnych badań mechanizmu regeneracji osnowy masy zużytej w urządzeniu USR5-1 obejmująca analizę wpływu zmian dostępnych w urządzeniu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na efekty regeneracji osnowy zużytej z technologii masy ze spoiwami na bazie żywic alkaliczno-fenolowych

(ALPHASET) oceniane przez stopień oczyszczenia osnowy, zmianę składu granulometrycznego, zużycie osnowy, zawartość pyłów, odczynu chemicznego i morfologię powierzchni ziaren.

4. Porównawcze badania efektu regeneracji masy z technologii ALPHASET w urządzeniu USR5-1 oraz w bezударowym regeneratorsze wirnikowym RD-6, w celu wykazanie roli ugniatająco -ściernego oddziaływania krążników i ich wpływu na efekt końcowy oraz energochłonność.

W rozprawie postawione zostały następujące tezy ( rozdz. II.2.3):

I. Określenie dopuszczalnej skali deformacji plastycznej i naprężeń wywieranych na ziarna osnowy stanowiące obrabianą warstwę w oparciu o model fenomenologiczny piasku opisany kryterium wytężeniowym Druckera-Pragera umożliwia dobór najkorzystniejszego dla jakości regeneratu stosunku ich udziału w pojedynczym cyklu obróbki regeneracyjnej oraz prognozę wpływu długookresowej eksploatacji na zmianę efektów regeneracji, w wyniku zużycia wybranych elementów konstrukcyjnych urządzenia.

II. Opracowany model numeryczny i jego weryfikacja pozwalają zmniejszyć niekorzystny wpływ zużycia wykładziny poboczniczy zespołu ugniatająco-ściernego, powodujące zmniejszenie efektu procesu obróbki udarowo-ściernej, realizowanej w regeneratorsach

o wielokrotnym generowaniu naprężeń ściskających oraz deformacji sprężysto-plastycznych poprzez dobór optymalnego ciśnienia w układzie docisku krążników oraz najkorzystniejszej dla danej masy zużytej liczby elementarnych operacji obróbczych.

III. Pomiary strat prażenia, analiza ziarnowa, ocena morfologii powierzchni i wybrane badania fizykochemiczne zregenerowanej osnowy, umożliwiają określenie optymalnie wysokiego stopnia jej oczyszczenia oraz określenie technologicznych wskaźników oceny procesu i jego energochłonności w typowych przebiegach mechanicznej obróbki regeneracyjnej.

W rozdziale II.3 pt. *Określenie dopuszczalnej skali deformacji plastycznej i naprężeń wywieranych na ziarna osnowy stanowiące obrabianą warstwę regeneratu w oparciu model fenomenologiczny piasku opisany kryterium wytężeniowym Druckera-Pragera*, zawarto kluczowe dla rozprawy rozważania, spełniające zadania wynikające z dwóch pierwszych

celów ( rozdz. II.2.1.), a jednocześnie stanowiących podstawę do sformułowania tezy I i II. Pod względem formalnym opracowany model fenomenologiczny piasku zawiera w kolejności następujące elementy składowe:

- Kryterium plastyczności Druckera-Pragera ( rozdz. II.3.1).
- Stowarzyszone prawo płynięcia. Postulat stateczności Druckera-Pragera (rozdz.II.3.2).
- Równania konstytutywne procesu odkształcenia procesu deformacji sprężysto-plastycznej (rozd. II.3.3).
- Wyznaczenie we własnym zakresie charakterystycznych stałych fizycznych uwzględnione w równaniach konstytutywnych w obliczeniach numerycznych modelu deformacji( rozdz. II.3.4).
- Metoda Punktów Materialnych- MPM (rozdz.II.3.5) , w tym: Charakterystyka ogólna (II.3.5.1), MPM – Opis teoretyczny metody (II.3.5.2),. MPM – Opis algorytmu (II.3.5.3),
- Założenia modelu obliczeniowego. Model CAD. Opis modelu w programie *MPMsim*. (II.3.6), w tym:.Model geometryczny CAD układu (II.3.6.1), Model w programie *MPMsim* (II.3.6.2), Symulowany wskaźnik jakości regeneracji piasku (II.3.6.3), Podsumowanie -wytyczne zadań badawczych (II.3.6.4).

Znaczną część rozprawy stanowi rozdział II.4. Porównawcze badania efektu regeneracji masy zużytej z technologii ALPHASET w urządzeniu USR 5-11 oraz w bezударowym regeneratorsze wirnikowym RD- 6, w którym w ramach prób procesowych w danym urządzeniu wyodrębnione zostały analogiczne badania takich wielkości jak: straty prażenia regeneratu, wyniki analizy sitowej, analiza odczynu w skali pH, wytrzymałość na rozciąganie mas formierskich z osnową po II stopniu obróbki, Analiza pyłów uzyskanych w procesie regeneracji w warunkach typowej realizacji prób procesowych.

Przeprowadzono także zaawansowane badania materiału ceramicznego stosowanego na wyłożenie poboczniczy regeneratora USR5-1 stosując metody: rentgenograficzne (XRD), mikroskopowe (SEM), analizę chemiczną w mikroobszarach EDS, a także badania porównawcze ścieralności materiału ceramicznego z poboczniczy regeneratora USR oraz komercyjnego spieku korundowego.

W podsumowaniu badań porównawczych (rozd. II.4.4.6) stwierdzono, że zwyczajowa ocena porównawcza uzyskanego efektu regeneracji w oparciu o indywidualnie traktowany

wskaźnik  $W_{SR}$  nie jest jednak pełna i wymaga uwzględnienia wpływu na wynik dwóch innych ważnych czynników a mianowicie:

- różnej wydajności urządzeń do regeneracji RD-6 i USR5-1 objętych badaniami,
- różnych nakładów energii zużywanej w każdym z nich na uwolnienie ziaren zregenerowanej osnowy przez starcie z niej określonej ilości otoczki .

Spełnienie tego postulatu pozwoliło wykazać całkowitą dominację mechanizmu obróbki regeneracyjnej ugniatająco-ścierającej o wielokrotnym szybkozmiennym generowaniu naprężeń ściskających oraz deformacji sprężysto – plastycznych w urządzeniu USR5-1 nad obróbką ocierająco-ścierającą realizowaną w bezударowym regeneratorsie RD-6. Dla zbliżonych wartości strat prażenia oraz skuteczności regeneracji w obu badanych sposobach obróbki regeneracyjnej, istotna różnica zostaje ujawniona gdy dokona się przeliczenia i porównania uzyskiwanej w danym obiekcie wydajności ubytku straty prażenia, gdzie wyniki dla urządzenia przemysłowego USR5-1 są o 3 rzędy wielkości większe od obliczonych dla RD-6. Podobnie dokonane przeliczenie uwzględniające wartości zużycia energii na uwalnianie 1 kg otoczki materiału wiążącego są dla USR5-1 od kilku do kilkudziesięciu razy mniejsze od uzyskiwanych w regeneratorsie RD-6.

Ta część badań pozwoliła także na wykazanie słuszność tezy III, że pomiary strat prażenia, analiza ziarnowa za pomocą metody laserowej (Analissette 22 NanoTec) i wybrane badania fizykochemiczne umożliwiają określenie optymalnego stopnia oczyszczenia zregenerowanej osnowy, określenie technologicznych wskaźników oceny procesu i jego energochłonności w typowych przebiegach mechanicznej obróbki regeneracyjnej.

W rozdziale II.5. pt. *Podstawowe założenia teoretycznego modelu kontroli parametrów pracy urządzenia typu USR 5-1.* oraz w rozdziale II.5.2. *Aplikacja opracowanego modelu do obliczeń numerycznych optymalnego ciśnienia w systemie docisku krążników oraz deformacji plastycznej warstwy regeneratu na styku krążnika i pobocznicy o różnym stopniu jej zużycia* a także w rozdziale II.5.3. *Badania weryfikujące obliczenia modelowe odnośnie do możliwości utrzymania na stałym poziomie wymaganego dla danej masy efektu procesu obróbki ugniatająco-ścierającej* doświadczalnie potwierdzona została aplikatywność opracowanego modelu numerycznego do obliczeń optymalnego ciśnienia w systemie docisku krążników oraz prognozy wpływu długookresowej eksploatacji na zmianę efektów regeneracji w wyniku zużycia wybranych elementów konstrukcyjnych urządzenia oraz sposoby zapewnienia stałej jego jakości.

Badania weryfikujące przeprowadzono w celu potwierdzenia obliczeń modelowych, które wykazały, że przy określonym poziomie zużycia poboczniczy obwodowej urządzenia regenerującego jest możliwe zwiększenie oddziaływania regenerującego poprzez zwiększenie wartości ciśnienia zasilania siłowników dociskających krażnik do powierzchni obrabianego regeneracyjnie materiału na poboczniczy misy.

**Trzecią część rozprawy** stanowi podsumowanie i wnioski końcowe, w których dokonano oceny realizacji szczegółowych celów rozprawy w kontekście zamieszczonych tez.

Stwierdzono, że podsumowaniem rozważań wynikających z opracowanego modelu i przeprowadzonych prób jego weryfikacji była realizacja stanowiskowych i laboratoryjnych badań mechanizmu regeneracji osnowy masy zużytej w urządzeniu USR5-1. W ich następstwie dokonano identyfikacji elementów konstrukcji oraz czynników procesowych decydujących o efektywności uwalniania osnowy z otoczek zużytego materiału a także określono skalę ich wpływu na przebieg procesu. Procesowa zmiana dostępnych w urządzeniu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych wywiera istotny wpływ na efekty regeneracji osnowy zużytej z technologii masy ze spoiwami na bazie żywic alkaliczno-fenolowych (ALPHASET) oceniane przez stopień oczyszczenia osnowy, zmianę składu granulometrycznego, zużycie osnowy, zawartość pyłów, odczynu chemicznego i morfologię powierzchni ziaren.

Przeprowadzone badania analizowane w kontekście oceny wpływu elementarnych operacji regeneracyjnych na efekty oczyszczenia osnowy regeneratu I stopnia w porównywanych sposobach obróbki regeneracyjnej II stopnia, przy uwzględnieniu tzw. wydajności ubytku straty prażenia, dokumentują znaczną przewagę mechanizmu obróbki regeneracyjnej ugniatająco-ścierającej o wielokrotnym szybkozmiennym generowaniu naprężeń ściskających oraz deformacji sprężysto – plastycznych nad swobodną obróbką ocierająco-ścierającą realizowaną w bezudarowym regeneratorze RD-6.

Badania wykazały ponadto, że pomiary strat prażenia, analiza ziarnowa za pomocą metody laserowej (Analissette 22 NanoTec), wytrzymałość masy na zregenerowanej osnowie oraz wybrane badania fizykochemiczne umożliwiają w satysfakcjonującym stopniu określenie optymalnego stopnia oczyszczenia zregenerowanej osnowy, określenie technologicznych wskaźników oceny procesu i jego energochłonności w typowych przebiegach mechanicznej obróbki regeneracyjnej, co potwierdza trafność sformułowania tezy III.



## Wniosek Końcowy

Przeprowadzone doświadczenia weryfikujące obliczenia modelowe odnośnie do możliwości utrzymania na stałym poziomie wymaganego dla danej masy efektu procesu obróbki udarowo-ścierniej opisane w rozdz. II.5.3. potwierdzają aplikatywność opracowanego modelu numerycznego do obliczeń optymalnego ciśnienia w systemie docisku krążników oraz prognozy wpływu długookresowej eksploatacji na zmianę efektów regeneracji w wyniku zużycia wybranych elementów konstrukcyjnych urządzenia oraz sposoby zapewnienia stałej jego jakości co pozwala na znaczące wydłużenie czasu eksploatacji.

Opracowany model matematyczny jest uniwersalny i pozwala na opracowanie typoszeregu urządzeń o większych wydajnościach.