



Rafał DAŃKO<sup>1</sup>

## MECHANICZNO-KRIOGENICZNA REGENERACJA WYBRANYCH, ZUŻYTYCH MAS FORMIERSKICH

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań prowadzonych na Wydziale Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, zmierzających do intensyfikacji oraz udoskonalenia znanego sposobu regeneracji mechanicznej-ścierniej przez poddanie masy zużytej oziębianiu podczas jej regeneracji mechanicznej do temperatury około  $-70^{\circ}\text{C}$ . Przedstawiono opis stanowiska doświadczalnego oraz uzyskane w tej temperaturze wyniki badań regenerowalności masy z bentonitem oraz masy typu floster, a także porównawczo wyniki uzyskane w temperaturze otoczenia. Uzyskane dane wskazują, że znaczne obniżenie temperatury masy zużytej wpływa korzystnie na efekty uwolnienia ziaren osnowy z otoczek zużytego materiału wiążącego.

### 1. WPROWADZENIE

Regeneracja zużytych mas formierskich jako metoda recyklingu odpadów własnych odlewni pochodzących z cyklu produkcyjnego odlewu stanowi bardzo istotne zagadnienie dla każdego zakładu odlewniczego związane przede wszystkim z ochroną środowiska naturalnego, lecz również z racjonalnym prowadzeniem gospodarki materiałowej [1].

Próby odzysku osnowy kwarcowej, z zużytych mas formierskich i rdzeniowych, z zastosowaniem zakresu niskich temperatur są podejmowane zarówno w odniesieniu do mas klasycznych (z bentonitem), jak i do mas wiązanych metodami chemicznymi. Proces regeneracji polega na poddawaniu zużytej masy działaniu niskiej temperatury, w następstwie wprowadzania do masy pewnej ilości ciekłego azotu, co prowadzi do zmiany właściwości fizyko-mechanicznych otoczki materiału wiążącego. Zużyte spoiwo staje się twarde i kruche, a następujący po zamrożeniu, proces mechanicznego oddziaływania na ziarna jest bardziej skuteczny i powoduje lepsze oczyszczenie osnowy masy zużytej [2].

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono próby mające na celu poprawę efektywności regeneracji osnowy sposobem mechaniczno-kriogenicznym, w zastosowaniu do dwóch typowych rodzajów masy zużytej, a mianowicie:

- z bentonitem,
- ze szkłem wodnym z technologii floster.

---

<sup>1</sup> Dr inż. Rafał DAŃKO,

- Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych, Wydział Odlewnictwa AGH

Wybór do badań tych dwu rodzajów masy był podyktowany ich stosunkowo szerokim stosowaniem w odlewniach krajowych oraz trudnościami napotykanymi podczas odzysku osnowy sposobami klasycznej regeneracji mechanicznej.

Mniejsze zainteresowanie regeneracją zużytych masy z bentonitem wynika po części z przekonania o jej małej szkodliwości, a także na dużych możliwościach jej zagospodarowania poza odlewnictwem - w tym także jako odpowiedniego materiału służącego za przesypkę na wysypiskach odpadów komunalnych. Badania J. L. Lewandowskiego i innych [3, 4], przeprowadzone w ostatnich latach wskazują jednak na bardzo wysoką zawartość węglowodorów aromatycznych (WWA) w tych masach, które głównie powstają podczas oddziaływania ciekłego metalu na nośnik węgla błyszczącego, stanowiącego jeden ze składników tych mas.

Drugi rodzaj masy zużytej, czyli masa ze szkłem wodnym pochodząca z technologii floster, wymaga przeprowadzenia określonych badań, chociażby z tego powodu, gdyż jest powszechnie uważana za masę bardzo trudno regenerującą się w znanych odmianach regeneracji mechanicznej, co ogranicza jej stosowanie, pomimo niskiej ceny i relatywnie małej uciążliwości dla otoczenia.

Najbardziej skuteczną metodą regeneracji wymienionych mas mogła by być regeneracja mokra, obecnie całkowicie zaniechana nie tylko w Polsce, ze względu na uciążliwość jej prowadzenia oraz bardzo wysokie koszty. Aktualnie, do regeneracji większości mas zużytych stosuje się regenerację mechaniczną w urządzeniach realizujących połączone procesy ścierania, ocierania i kruszenia. Niezadowalająca skuteczność procesowa klasycznej regeneracji mechanicznej masy zużytej, szczególnie w odniesieniu do masy ze szkłem wodnym skłania do poszukiwania nowych, bardziej intensywnych procesów mających na celu poprawę efektów prowadzonej obróbki regeneracyjnej.

W prezentowanych dalej badaniach jako czynnik intensyfikujący proces regeneracji mechanicznej wybranych rodzajów masy zużytej zastosowano chłodzenie do bardzo niskiej temperatury, uzyskane przez dodanie do masy określonej ilości ciekłego azotu.

Przyjęto założenie, że znaczne obniżenie temperatury, w której odbywa się proces regeneracji mechanicznej, powinno spowodować większą kruchość otoczki szkła wodnego znajdującego się na powierzchni ziaren osnowy, a w przypadku masy z bentonitem doprowadzić do zmiany relacji sił kohezyjno-adhezyjnych w układzie: osnowa ziarnowa - otoczka lepiszcza w masie z bentonitem. W konsekwencji powinno zatem nastąpić zwiększenie zdolności do uwalniania osnowy ziarnowej z otoczek zużytego materiału wiążącego w obydwu testowanych rodzajach masy zużytej, przejawiające się lepszymi wartościami odnośnych wskaźników reprezentujących stopień oczyszczenia regeneratu, takich jak zostało wymienione w tabeli 1.

Tabela 1. Wskaźniki stosowane do oceny efektu regeneracji w zależności od rodzaju masy zużytej.

<b>Badana cecha regeneratu</b>	<b>Zużyta masa ze szkłem wodnym</b>	<b>Zużyta masa z bentonitem</b>
Zawartość Na <sub>2</sub> O w regenerowanej osnowie	tak	nie
Zawartość lepiszcza w zregenerowanej osnowie piaskowej	nie	tak
Odczyn pH oraz wskaźnik Z <sub>k</sub> otrzymanego regeneratu	tak	tak
Wytrzymałość mas sporządzonych na bazie regeneratu	nie	tak
Przepuszczalność mas sporządzonych na bazie regeneratu	nie	tak
Morfologia powierzchni regeneratu	tak	tak

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

### 2.1. Stanowisko doświadczalne

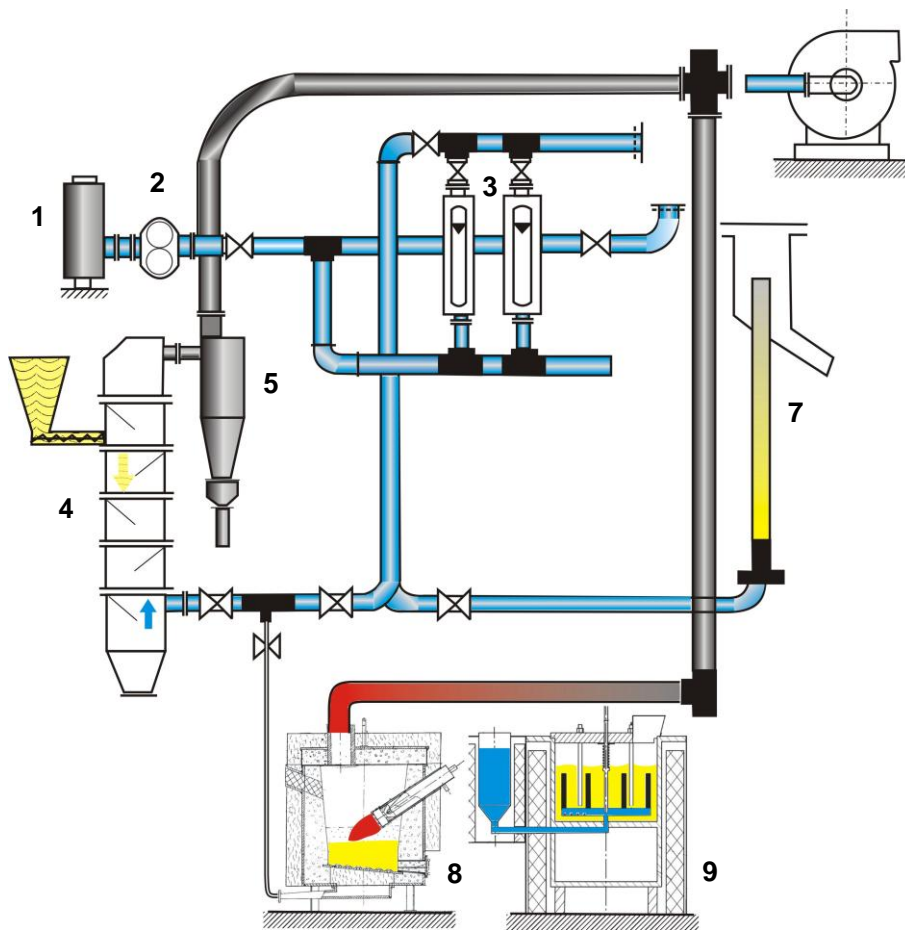
Stanowisko, przedstawione schematycznie na rysunku 1, przeznaczone do regeneracji mechanicznej i mechaniczno-kriogenicznej zostało wkomponowane w zespół już istniejących stanowisk doświadczalnych do regeneracji i klasyfikacji osnowy [1, 5].

Głównym elementem wyposażenia stanowiska jest doświadczalny regenerator mechaniczno-kriogeniczny wyposażony w wirujące elementy ściernie w postaci łopatek, który umożliwia realizację mechanicznej obróbki regeneracyjnej z użyciem ciekłego azotu jako czynnika chłodzącego, lub regenerację masy zużytej o temperaturze otoczenia. Regenerator został wyposażony w układ dozowania ciekłego azotu dla prowadzenia regeneracji w kontrolowanych warunkach obniżonej temperatury, zwanej dalej, temperaturą kriogeniczną.

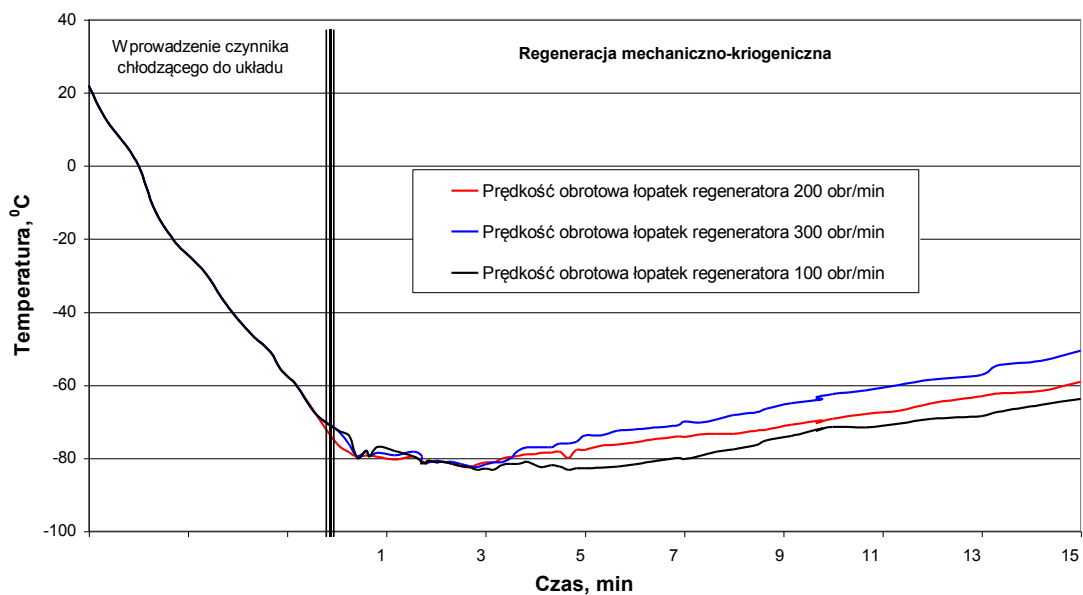
Zbiornik masy, a zarazem komora robocza regeneratora został oddzielony od otoczenia otuliną termoizolacyjną oraz poduszką powietrzną (pod dnem zbiornika). Czujnik temperatury, umieszczony w dnie regeneratora umożliwia bieżącą rejestrację temperatury regenerowanej masy zużytej.

Metoda obróbki regeneracyjnej polega na początkowym schłodzeniu masy znajdującej się w zbiorniku urządzenia za pomocą dawki ciekłego azotu, niezbędnej do schłodzenia ładunku masy zużytej do zakresu 70-80<sup>0</sup>C poniżej zera, a następnie jej poddaniu mechanicznej regeneracji. Typowe przebiegi temperatury regenerowanej masy w funkcji czasu obróbki regeneracyjnej przedstawiono na rysunku 2, przy określonej prędkości obrotowej zespołu wirnikowego.

Warto zauważyć, że możliwość prowadzenia klasycznej obróbki regeneracyjnej sposobem mechanicznym (tzw. atrycyjnej), lub kombinacji tej obróbki z regeneracją niskotemperaturową (kriogeniczną), realizowanych w tym samym urządzeniu i w takich samych warunkach realizacji procesu, ułatwia i czyni wiarygodną analizę porównawczą efektów regeneracji uzyskanych w obu badanych przypadkach.



**Rys. 1.** Schemat stanowiska doświadczalnego do odpylania masy zużytej i klasyfikacji pneumatycznej regeneratu: 1- filtr powietrza, 2-dmuchała Rootsa, 3-rotametry pomiarowe typu RIN, 4-klasyfikator kaskadowy, 5-cyklon odpylający, 6- wentylator odciągowy, 7-kolumna fluidyzacyjna, 8-regenerator termiczny, 9-regenerator mechaniczno-kriogeniczny[5].



**Rys. 2.** Typowe przebiegi temperatury masy zużytej w funkcji czasu w urządzeniu do regeneracji mechaniczno-kriogenicznej w zakresie temperatury obróbki od  $-80^{\circ}\text{C}$  do  $-60^{\circ}\text{C}$  [5].

## 2.2. Przebieg badań

Określoną masę zużytą, dostarczoną z odlewni po oddzieleniu z niej zanieczyszczeń metalowych i wstępnym pokruszeniu oraz przesianiu przez sito o oczku 3mm odpylano wstępnie w klasyfikatorze pneumatycznym, w celu usunięcia z masy wolnych frakcji pyłowych, niekorzystnie wpływających na proces regeneracji. Proces właściwej obróbki regeneracyjnej osnowy prowadzono przy następujących parametrach pracy urządzenia: prędkość obrotowa łopatek regeneratora - 300 obr/min, czas regeneracji wynoszący kolejno: 1, 3, 5, 10 i 15 min. Regeneracji poddawano najpierw w temperaturze otoczenia próbę masy zużytej (4,0 kg), a następnie, drugą o tej samej masie, którą regenerowano z równoczesnym wprowadzeniem do masy ciekłego azotu, w ilości pozwalającej na obniżenie temperatury ładunku masy do około  $-70^{\circ}\text{C}$ .

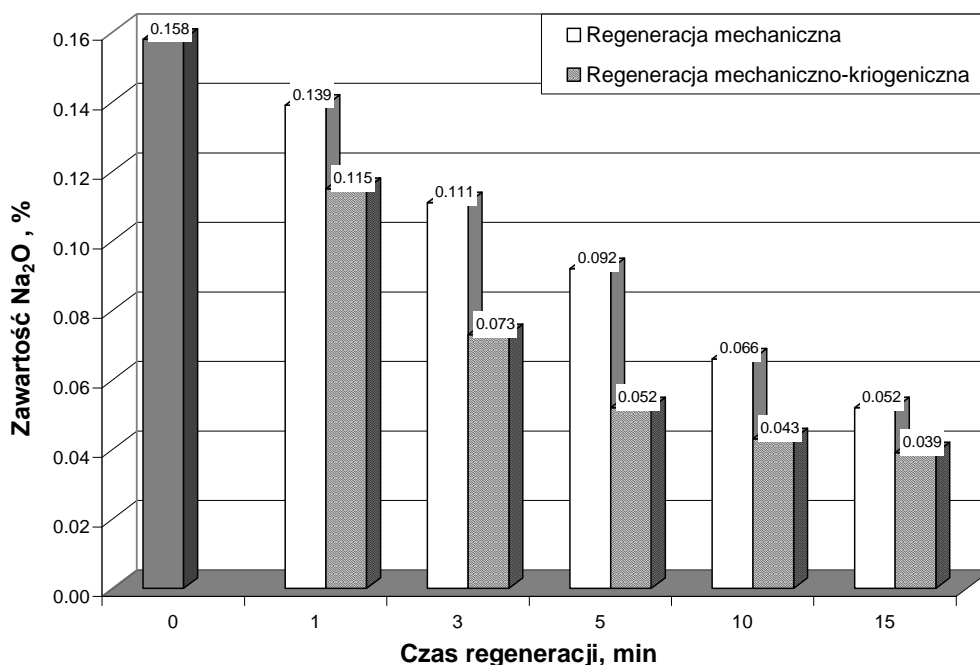
Efekt uwolnienia ziaren osnowy z otoczki zużytego materiału wiążącego oceniano za pomocą prób wymienionych w tabeli 1, które w wyniku wcześniejszych badań [1, 5] uznano, za miarodajne wskaźniki oceny stopnia zregenerowania badanych mas zużytych.

## 2.3. Wyniki przeprowadzonych prób

Wyniki przeprowadzonych prób przedstawiono na rysunkach 3-9.

### 2.3. Analiza wyników badań

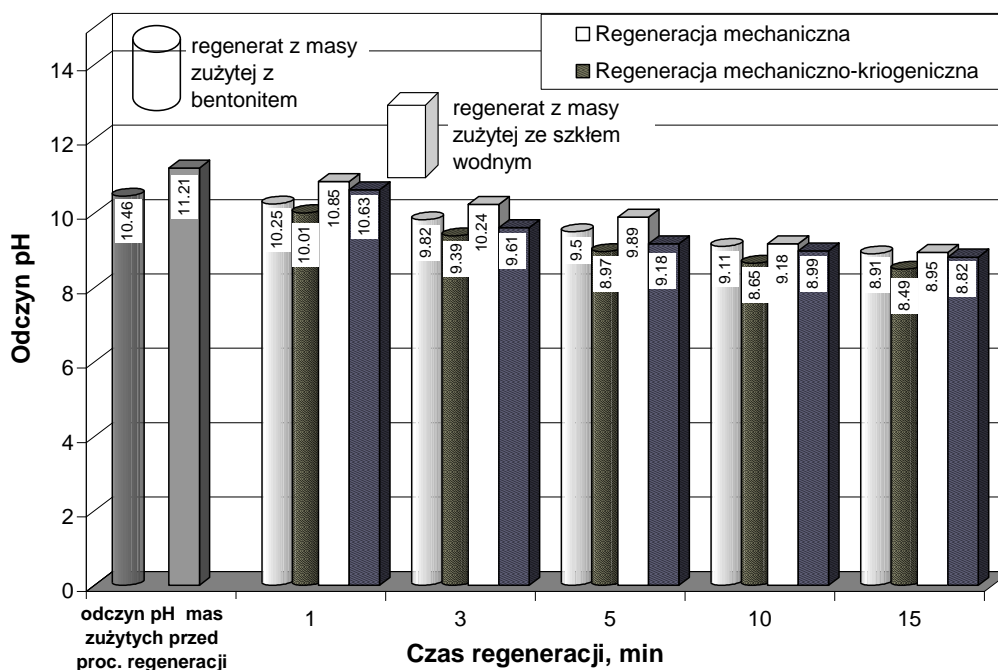
Dane przedstawione na rysunku 3 wskazują, że regeneracja mechaniczna prowadzona w temperaturze kriogenicznej, powoduje większy spadek wartości  $\text{Na}_2\text{O}$ , co jest szczególnie widoczne w początkowym okresie trwania procesu regeneracji. Niezależnie od czasu, którego wartość jest taka sama dla obu analizowanych odmian procesu, uzyskuje się korzystniejsze oczyszczenie ziaren osnowy z zużytego materiału wiążącego, w przypadku regeneracji mechaniczno-kriogenicznej.



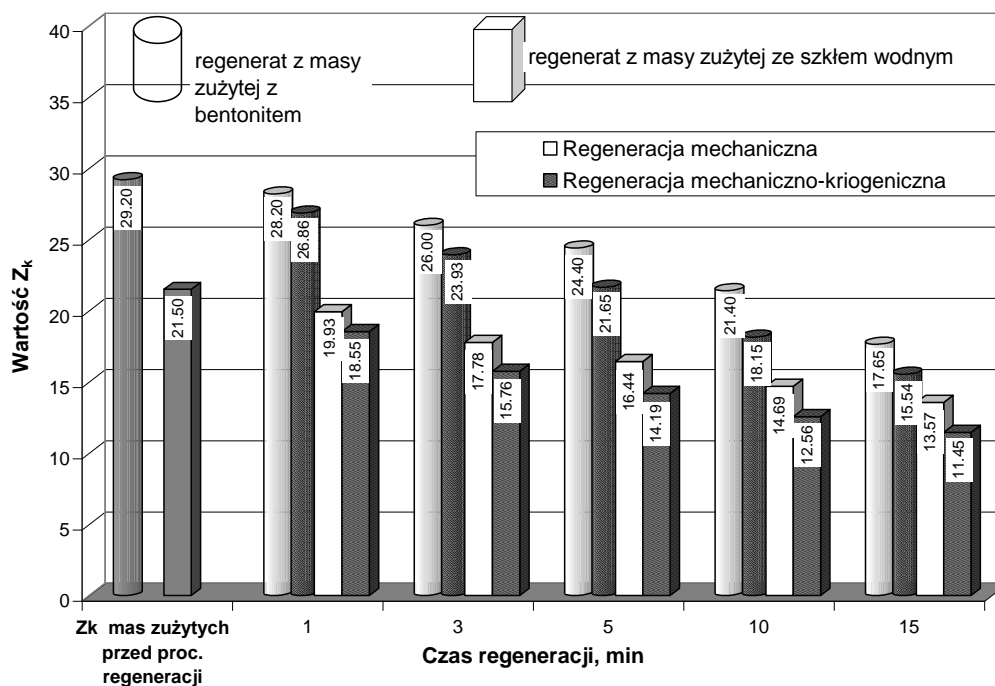
Rys.3. Zawartość  $\text{Na}_2\text{O}$  (masa zużyta ze szkłem wodnym) w regeneracie w funkcji czasu regeneracji.

Jak wiadomo, masa zużyta ze szkłem wodnym charakteryzuje się silnym odczynem zasadowym, co w dużym stopniu przenosi się na otrzymywany z niej regenerat. Dane

przedstawione na rysunkach 4 i 5, wskazują, że wartość badanego wskaźnika pH oraz ADV jest korzystniejsza dla regeneracji mechaniczno-kriogenicznej. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem stopnia oczyszczenia osnowy i usunięcia otoczki materiału wiążącego z powierzchni ziaren wartości te maleją, jednak stopień zmniejszenia badanego odczynu zmienia się znacznie wolniej niż przedstawiony na rys 3 spadek zawartości  $\text{Na}_2\text{O}$ . Wskazuje to na celowość uzupełnienia badań odczynu zasadowego badaniami zapotrzebowanie na kwas regeneratu ( $Z_K$ ) w funkcji czasu regeneracji, który dają wyniki o zbliżonym charakterze zależności jak przedstawione na rys. 3.

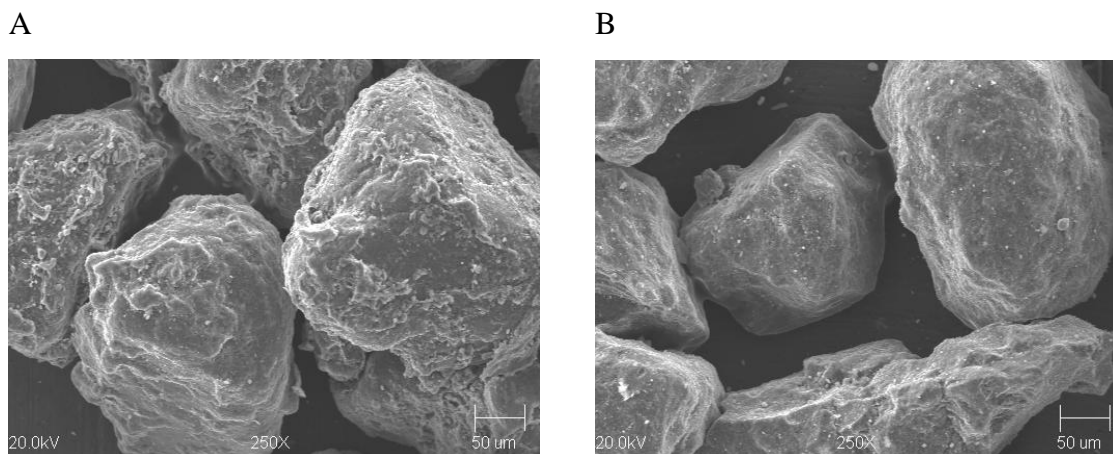


Rys. 4. Zmiana odczynu pH regeneratu w funkcji czasu regeneracji.



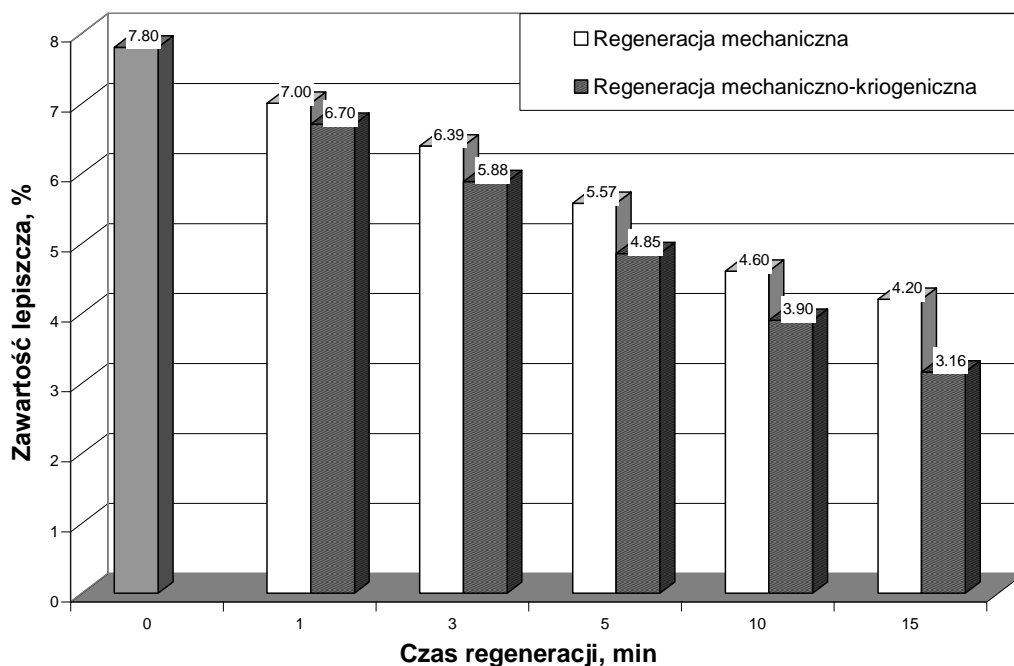
Rys. 5. Zapotrzebowanie na kwas regeneratu ( $Z_K$ ) w funkcji czasu regeneracji.

Na rysunku 6 przedstawiono zdjęcia morfologii powierzchni regeneratu po obróbce regeneracyjnej trwającej 5 minut, przy czym po lewej stronie uwidoczniono wygląd powierzchni osnowy po regeneracji mechanicznej (Rys. 6A), natomiast po prawej-analogicznej osnowy po regeneracji mechaniczno-kriogenicznej (Rys. 6B). Porównanie obu przypadków wskazuje, że nawet po relatywnie krótkim czasie obróbki regeneracyjnej sposobem mechaniczno-kriogenicznym, można zauważyć występowanie ziaren o lepiej oczyszczonej powierzchni ale o bardziej ostrych krawędziach, co wskazuje na zjawisko częściowego ich rozkruszenia podczas obróbki.



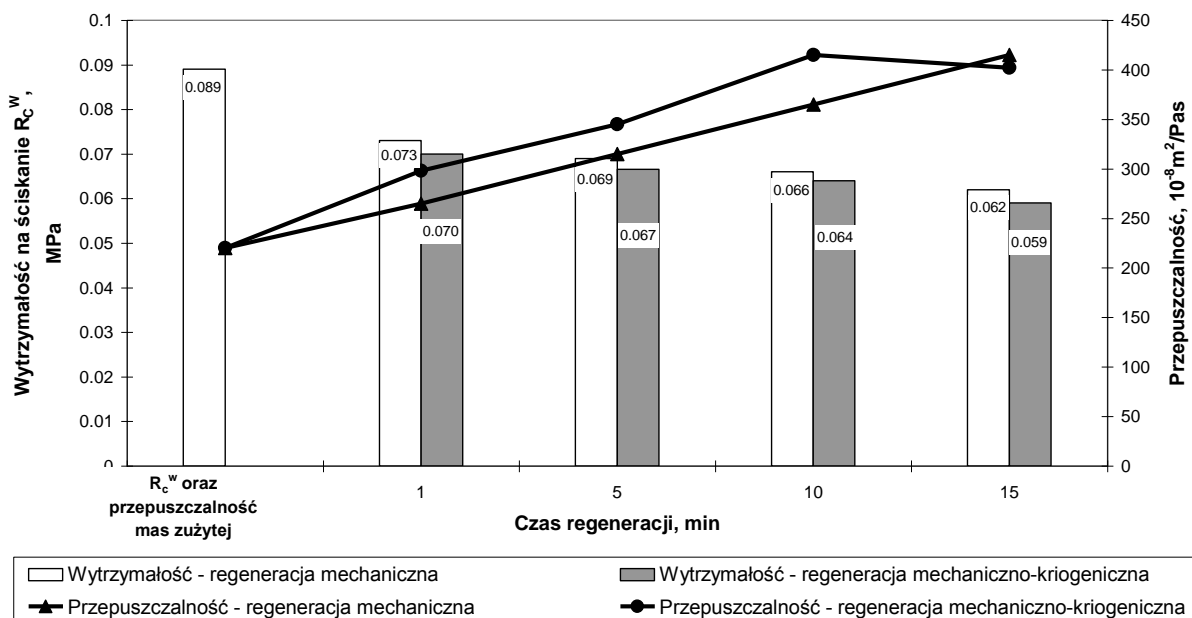
**Rys. 6.** Zdjęcia morfologii powierzchni regeneratu z masy bentonitowej po obróbce mechanicznej (A) oraz mechaniczno-kriogenicznej (B) trwającej 5 minut. Powiększenie 250x.

W ocenie efektywności regeneracji masy zużytej z bentonitem jako główny wskaźnik stopnia jej oczyszczenia jest przyjmowana zazwyczaj zawartość lepiszcza z zregenerowanej osnowy. Przeprowadzone w tym zakresie badania zostały przedstawione na rysunku 7. Jak wynika z analizy danych, przyjęta jako poziom odniesienia masa zużyta bez żadnych zabiegów regeneracyjnych poddana jedynie oddzieleniu zanieczyszczeń metalowych, wstępnemu kruszeniu i przesianiu przez sito o prześwicie oczka 3 mm wykazuje zawartość lepiszcza wynoszącą około 8 % (w badaniach 7,8%). W warunkach konkretnej odlewni masa ta była odświeżana przez dodatek ok. 0,8-1,0 % bentonitu i 0,1% pyłu węglowego, a następnie po wymieszaniu stosowana na wykonanie form dla odlewów. W wyniku przeprowadzonych badań [6] stwierdzono, że w typowych warunkach produkcyjnych, gdy obciążenie cieplne masy formierskiej, określone umownie średnim stosunkiem masy formy do masy odlewu wynoszącym 4 : 1, do regeneracji w każdym cyklu sporządzania masy powinno być kierowane ok. 15% masy obiegowej. Po zabiegach regeneracyjnych prowadzonych przez czas 15 minut zawartość lepiszcza w masie spadała do wartości 4,20% - dla regeneracji mechanicznej i do 3,5%, odpowiednio dla regeneracji mechaniczno-kriogenicznej.



Rys. 7. Zawartość lepiszcza (masa zużyta z bentonitem) w regeneracji w funkcji czasu regeneracji.

Na rysunku 8 przedstawiono badania wytrzymałości oraz przepuszczalności mas sporządzonych z przygotowanych regeneratów. W badaniach tych uzyskany regenerat traktowano jako zamiennik piasku świeżego. Stosowano skład masy z 7% udziałem bentonitu Zębiec i zawartością wody wynoszącą 3,5%. W przypadku masy z bentonitem zwiększenie intensywności regeneracji powoduje spadek wartości wytrzymałości na ściskanie  $R_c^w$ , co jest spowodowane usunięciem z powierzchni ziaren części nadal aktywnego jeszcze materiału wiążącego.



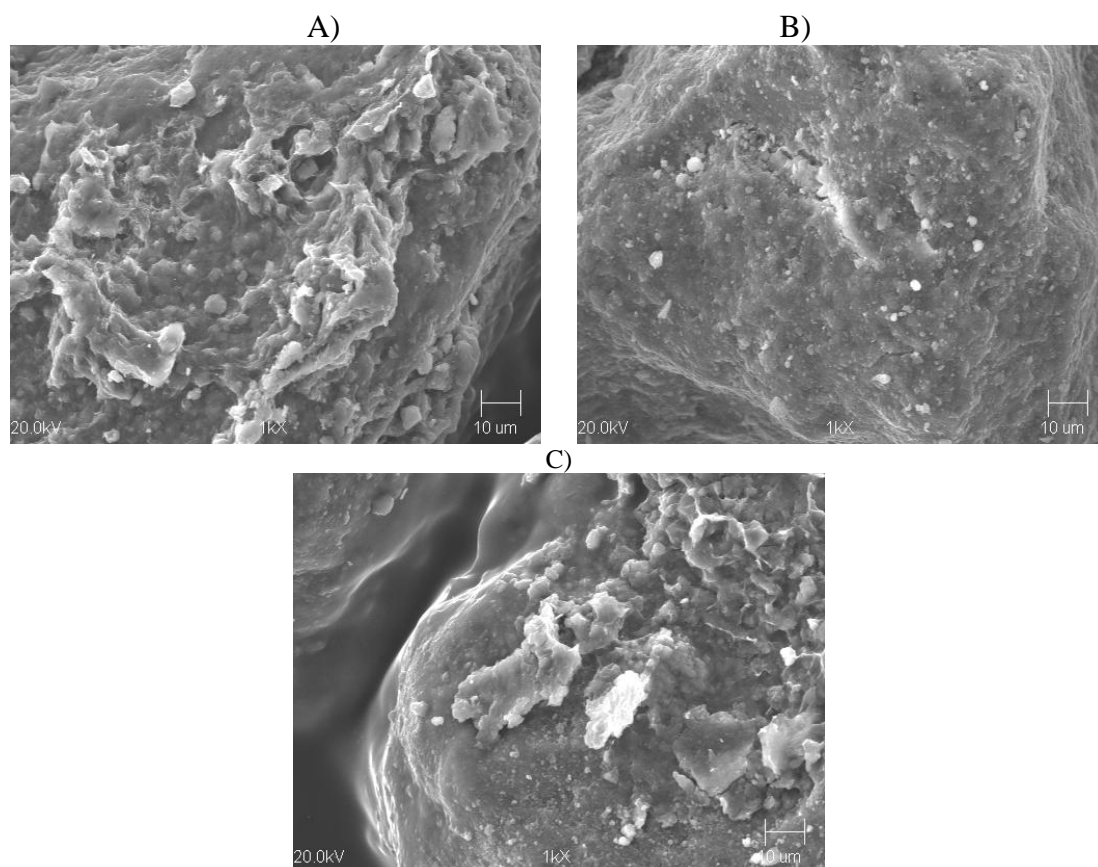
Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie  $R_c^w$  oraz przepuszczalność próbek wykonanych ze zregenerowanej osnowy po różnych czasach regeneracji (masa z dodatkiem 7 części wagowych bentonitu)



Przepuszczalność badanej masy zwiększa się ze wzrostem czasu regeneracji dla obu mas, przy czym w przypadku regeneracji mechaniczno-kriogenicznej można zauważyć spadek przepuszczalności mas sporządzonych z regeneratu obrabianego w regeneratorze przez czas dłuższy niż 10 minut. Jest to spowodowane zjawiskiem kruszenia ziaren, które ujawnia się po dłuższym czasie obróbki regeneracyjnej, co potwierdziły przeprowadzone analizy sitowe. Kruszenie ziaren wpływa na zmniejszenie się ich średnicy, zwiększenie powierzchni właściwej oraz powoduje zmianę ich kształtu na ostrokrawędzisty, co stwierdzono badając morfologię powierzchni ziaren.

Na rysunku 9 przedstawiono zdjęcia skaningowe powierzchni masy zużytej z bentonitem przed procesem regeneracji właściwej (A) oraz osnowy ziarnowej – odpowiednio po 5 minutach regeneracji mechanicznej (B) i mechaniczno-kriogenicznej (C), przy powiększeniu 1000 krotnym.

Na podstawie przedstawionych zdjęć można stwierdzić, że w warunkach regeneracji mechaniczno-kriogenicznej następuje naruszenie zwartości warstw lepiszcza, przejawiające się odkrytymi fragmentami powierzchni ziaren osnowy kwarcowej. Zużyty materiał wiążący jest w tym przypadku postrzępiony i na granicach ziaren widoczne są efekty zniszczenia mechanicznego, podczas gdy na ziarnach regeneratu po regeneracji mechanicznej nadal pozostaje względnie zwarta otoczka. Można zatem przypuszczać, że zwiększony efekt regeneracji mechaniczno-kriogenicznej jest wywołany zwiększeniem kruchości otoczki zużytego materiału wiążącego pod wpływem obróbki w zakresie temperatur kriogenicznych.



**Rys. 9.** Morfologia powierzchni ziaren: A – masa zużyta z bentonitem przed regeneracją, B – regenerat po 5 minutach regeneracji mechanicznej, C – regenerat po 5 minutach regeneracji mechaniczno-kriogenicznej. Powiększenie 1000x.

### 3. PODSUMOWANIE

Przedstawione badania wskazują, że obróbka regeneracyjna mas trudno regenerujących się, przedstawiona na przykładzie masy zużytej ze szkłem wodnym typu floster pozwala na uzyskanie zdecydowanie lepszych efektów procesu uwalniania ziaren osnowy z otoczek zużytego materiału wiążącego w zakresie temperatur kriogenicznych. W charakterze uzasadnienia celowości takiej obróbki można podać, że obecnie stosowane procesy regeneracji z zastosowaniem zakresu bardzo niskich temperatur, jako jedyne ze znanych wykorzystują właściwości higroskopijne mas jako czynnik wspomagające oczyszczanie ziaren z materiału wiążącego. Obecność czynnika „mrożącego” wywołuje zmianę objętości zarówno materiału wiążącego, zawartej w nim wody oraz samych ziaren obrabianej osnowy piaskowej, co prowadzi do zwiększenia naprężeń powierzchniowych, wewnątrz ziarnowych i jest przyczyną zwiększonej kruchości materiału wiążącego.

Większość obecnie stosowanych regeneratorów mechanicznych, eksploatowanych w temperaturze otoczenia, po przystosowaniu do regeneracji w niskich temperaturach stwarza realne warunki zwiększenia intensywności obróbki regeneracyjnej, co pozwala w krótszym czasie uzyskać osnowę lepiej oczyszczoną. Jest to czynnik korzystny zarówno ze względów ekonomicznych, ale także środowiskowych, gdyż umożliwia stosowanie zwiększonych udziałów regeneratu w nowo sporządzanych masach formierskich i rdzeniowych, co w oczywisty sposób wpływa na zmniejszenie odpadów poprodukcyjnych.

Należy zwrócić uwagę, możliwy negatywny efekt regeneracji mechaniczno-kriogenicznej masy ze szkłem wodnym oraz bentonitem, która w przypadku niedostatecznej kontroli może prowadzić do szybszego zużycia osnowy oraz do generowania zbyt dużej ilości pyłów, z uwagi na zwiększoną kruchość nie tylko otoczki materiału wiążącego, ale także samej osnowy. Należy to brać pod uwagę przy doborze określonego dla danej masy sposobu regeneracji.

### LITERATURA

- [1]. Dańko J., Dańko R, Łuczczak M.: Procesy i urządzenia do regeneracji osnowy zużytych mas odlewniczych. Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, Kraków 2007.
- [2]. Tordoff W. L. , Miller J., Trembly J.: *New development in sand reclamation*. CIATF Technical Forum, 1999, p. 377-386.
- [3]. Lewandowski J.L., Solarski W., Zawada J.: *Toxicity of moulding sands with bentonite and coal dust*. Solidifications of Metals and Alloys, No. 35, 1998, p. 67-76.
- [4]. *Used Foundry Sand – classification and disposal*. EPA (Environmental Protection Act) Guidelines. Re-issued September 2003
- [5]. Dańko R.: Podstawy teoretyczne i technologiczne doboru optymalnych sposobów regeneracji suchej zużytych mas formierskich. Rozprawa doktorska, Wydział Odlewnictwa, Kraków 2006.
- [6]. Lewandowski J.L., Dańko J., Dańko R.: Selekcja mas zużytych w Odlewniach Polskich SA w Starachowicach. Przegląd Odlewnictwa. — 2004 t. 54 nr 2 s. 120–126.

*Badania zrealizowano w ramach pracy własnej AGH, nr10. 10. 170.298*