

**OPRACOWANIE TECHNOLOGII PRODUKCJI „BENTONITU ZMODYFIKOWANEGO” PRZEZNACZONEGO DO WYKONYWANIA ODLEWÓW STALIWNYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM JAKOŚCI ICH WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ**

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY TO MANUFACTURE „MODIFIED BENTONITE” USED IN PRODUCTION OF STEEL CASTINGS WITH SPECIAL REGARD TO CASTING SURFACE QUALITY**

*Zbigniew Stefański, Małgorzata Warmuzek, Łukasz Boroń*

*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

**Streszczenie**

*W artykule przedstawiono ważniejsze wyniki prac badawczych rozwojowych i wdrożeniowych, zrealizowanych w ramach jednego z Projektów Celowych w wyniku współpracy pomiędzy Przedsiębiorstwem Techniczno Handlowym CERTECH w Niedomicach (producentem materiałów dla potrzeb odlewnictwa), a Instytutem Odlewnictwa w Krakowie. Celem projektu było opracowanie innowacyjnej technologii i uruchomienie produkcji „bentonitu zmodyfikowanego” przeznaczanego do wykonywania odlewów staliwnych o bardzo dobrej jakości powierzchni. Przedstawiono oraz omówiono wyniki badań dotyczących możliwości zastosowania dodatków węglowych w masie formierskiej przeznaczonej do wykonywania odlewów staliwnych, ich wpływu na jakość powierzchni odlewów, szczególnie na warstwę powierzchniową (naskórek odlewniczy), w aspekcie ewentualnego nawęglenia powierzchni odlewów. Efektem przedstawionych badań było opracowanie „bentonitu zmodyfikowanego”, technologii jego wytwarzania oraz uruchomienie produkcji na skalę przemysłową.*

*Słowa kluczowe: masy formierskie bentonitowe, odlewy staliwne, pył węglowy, zamienniki pyłu węglowego, jakość powierzchni odlewów, naskórek odlewniczy*

**Abstract**

*The article presents the most important results of the research, development and implementation studies carried out under one of the Target Projects as a result of cooperation between the CERTECH Technical and Commercial Enterprise at Niedomice (manufacturer of materials for foundry industry) and Foundry Research Institute in Cracow. The aim of the project was development of innovative technology and start up of the production of “modified bentonite” used in production of steel castings characterised by very high surface quality. The results of investigations regarding possible use of carbon additives to moulding sands for the manufacture of steel castings were presented and discussed, including the effect of these additives on casting surface quality, especially on casting skin in terms of its possible carburising. Studies were described, the final outcome of which was the development of “modified bentonite”, the development of its manufacturing technology, and finally the start up of production.*

*Keywords: bentonite moulding sands, steel castings, coal dust, coal dust substitutes, casting surface quality, casting skin*

## Wstęp

Przedstawione w artykule wyniki badań uzyskano realizując prace badawczo-rozwojowe i wdrożeniowe w ramach Projektu Celowego współfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Projekt ten był realizowany przez Przedsiębiorstwo Techniczno Handlowe CERTECH w Niedomicach (producent materiałów dla potrzeb odlewnictwa) oraz Instytut Odlewnictwa w Krakowie. Prace tego typu są związane z poszukiwaniem nowych technologii produkcji, a także materiałów odlewniczych, w celu obniżenia kosztów produkcji, poprawy jakości wyrobów oraz warunków ekologicznych wytwarzania wyrobów.

Jednym z podstawowym problemów w produkcji odlewów wykonywanych z różnych tworzyw odlewniczych, a szczególnie staliwnych, jest odpowiednia jakość ich powierzchni. Przy produkcji odlewów żeliwnych w masach formierskich bentonitowych stosowane są nośniki węgla błyszczącego (są to materiały węglowe typu pył węglowy lub jego zamienniki), dzięki czemu uzyskuje się dobrą ich jakość.

Zgodnie z obowiązującym poglądem, dodatków węglowych nie stosuje się w masach formierskich bentonitowych przeznaczonych do wykonywania odlewów staliwnych ze względu na występujące w takim przypadku nawęglenie warstwy powierzchniowej odlewów (naskórek odlewniczy), dyskwalifikujące odlew [1, 2, 3]. Wyjątkiem są odlewy wykonywane ze staliwa Hadfielda (zawierające w swoim składzie chemicznym znacznie większą zawartość węgla od innych staliw), do produkcji których w masach bentonitowych stosowane są niewielkie ilości dodatku pyłu węglowego, bez ryzyka zwiększenia koncentracji węgla w naskórku odlewniczym.

Problemy związane z jakością powierzchni odlewów staliwnych, dotyczą wszystkich rodzajów stosowanych mas formierskich. Przykładowo podczas wykonywania odlewów w masach ze spoiwami żywicznymi zarówno stosowane żywice, jak i utwardzacze powodują zwiększenie stężenia gazów w odlewach, wskutek występowania reakcji metal-forma. Jest to powodem powstawania wad odlewniczych na powierzchni odlewów typu „nakłucia” i „porowatości gazowe” [4].

Inny problem, to zbyt duża wartość wytrzymałości na ściskanie mas wiążących chemicznie oraz mała ich podatność w wysokich temperaturach. Wymienione czynniki, a także bardzo duża wartość skurczu odlewniczego staliwa (znacznie wyższa od żeliwa), są przyczyną powstawania takich wad w odlewach, jak pęknięcia na gorąco, odkształcenie postaci i blizny [5]. Stosowanie mas formierskich chemoutwardzalnych ze spoiwami żywicznymi fenolowo-formaldehadowymi, dla odlewów staliwnych o małej zawartości węgla, stwarza również problemy ze względu na nawęglanie powierzchni odlewów (naskórek odlewniczy). W wyniku przeprowadzonych innych prac stwierdzono, że zastosowanie spoiwa furanowego ogranicza nawęglanie powierzchni odlewów, natomiast spoiwa fenolowe sprzyjają procesowi ich nawęglania. [6]. Kolejne dane literaturowe wskazują, że rodzaj zastosowanej masy formierskiej wpływa na proces wtórnego utleniania się powierzchni odlewów staliwnych [7]. Występuje on najsilniej w przypadku stosowania mas formierskich wilgotnych, a zmniejsza się przy użyciu mas suszonych lub ze spoiwami organicznymi. Decydujące znaczenie ma również zawartość wilgoci we wnętrzu formy. Wraz ze wzrostem jej wartości rośnie skłonność do ponownego utleniania staliwa. Najbardziej niebezpieczne są tlenki MnO i FeO reagujące z krzemionką piasku kwarcowego w formie i powodujące powstawanie ciekłych krzemianów, o niskiej temperaturze topnienia, które są głównym składnikiem żużla wtórnego [7].

Jak wynika z powyższej analizy istotnym zagadnieniem jest poszukiwanie nowych, korzystniejszych materiałów formierskich, których zastosowanie pozwoli na poprawę jakości produkowanych odlewów. Celem badań było uzyskanie odpowiedzi na pytania w jaki sposób dodatki wprowadzone do masy formierskiej wpływają na zmiany struktury warstwy powierzchniowej odlewów oraz czy konsekwencje tych zmian mogą dyskwalifikować odlew.

## Wykonanie odlewów testowych

Jednym z podstawowych czynników decydującym o jakości powierzchni odlewów staliwnych wykonywanych w masach bentonitowych jest odpowiednia jakość surowca przeznaczonego do wykonywania bentonitu odlewniczego. W tym celu producent wprowadził odpowiednie unowocześnienia w technologii jego produkcji. Dotyczyły one w pierwszej kolejności selektywnej eksploatacji złoża bentonitu na terenie kopalni, a następnie opracowano technologię produkcji bentonitów, umożliwiającą otrzymanie wysokiej zawartości w nich montmorylonitu (powyżej 85%). Taki materiał (jako wyjściowy) zastosowano do przeprowadzenia badań nad zmodyfikowanym bentonitem przeznaczonym do mas formierskich dla odlewów staliwnych.

Kolejne zagadnienie dotyczyło zmodyfikowania niektórych właściwości bentonitu, w sposób umożliwiający poprawę jakości powierzchni odlewów staliwnych. Realizowano to poprzez wprowadzenie do surowca wyjściowego niewielkich ilości specjalnych dodatków, powodujących korektę jego właściwości. Istotnym zagadnieniem było zbadanie w jaki sposób wprowadzone dodatki modyfikujące bentonit wpływają na jakość odlewów.

Podstawowe pytania na które należało uzyskać odpowiedź opracowując nowy materiał były następujące:

- czy zastosowanie w masach formierskich bentonitu zawierającego dodatki węglowe (nośniki węgla błyszczącego), w postaci pyłu węglowego, lub jego zamiennika powoduje poprawę jakości powierzchni odlewów staliwnych wykonywanych w tych masach, podobnie jak to ma miejsce w przypadku odlewów żeliwnych;
- czy dodatek materiałów węglowych zawartych w bentonicie, a więc i w masie formierskiej wpływa na nawęglenie powierzchni odlewów staliwnych, ewentualnie w jakim stopniu;
- czy otrzymana warstwa powierzchniowa odlewu staliwnego w wyniku zastosowania w masie formierskiej materiałów węglowych jest odmienna od wewnętrznej oraz czy może być powodem dyskwalifikacji odlewu;
- jakie są różnice w grubości nawęglenia lub odwęglenia warstwy powierzchniowej odlewów staliwnych wykonywanych w wilgotnych masach formierskich i suszonych;
- zagadnieniem interesującym było również bezpośrednie porównanie oddziaływania dodatków węglowych zawartych w bentonicie/w masie formierskiej, na jakość warstwy powierzchniowej odlewów staliwnych oraz żeliwnych (wykonanych w takich samych masach).

Odpowiedzi otrzymane na postawione pytania są bardzo istotne ze względów praktycznych, w aspekcie określenia możliwości zastosowania w bentonicie przeznaczonym dla odlewów staliwnych różnego rodzaju dodatków modyfikujących,

w tym także węglowych, a także ze względów poznawczych. W tym celu niezbędnym było wykonanie partii próbnych bentonitów zawierających różne dodatki modyfikujące, następnie zastosowanie ich do wykonania odlewów, dla których przeprowadzono badania struktur warstwy powierzchniowej. Dla zrealizowania powyższego w pierwszej kolejności została opracowana „odlewnicza testowa próba technologiczna”, wykonane zostało omodelowanie odlewnicze, opracowano warunki wykonywania odlewów testowych.

Próby dotyczące wykonywania odlewów przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym w Instytucie Odlewnictwa z zastosowaniem mas formierskich zawierających badane bentonity. Dla porównania wykonano również odlewy testowe z zastosowaniem mas formierskich, zawierających standardowy bentonit. Z mas tych wykonane zostały formy odlewnicze o wymiarach 320 x 250 x 100/100 mm. Metalochłonność formy wraz z układem wlewowym wynosiła ok. 7 kg. Na rysunku 1 pokazano formę odlewniczą odlewu testowego (część dolna i górna), wraz z oprzyrządowaniem modelowym. Po zalaniu form ciekłym metalem i po ostygnięciu odlewów wybijano je z form i poddawano oględzinom. Następnie wykonano odpowiednie badania odlewów, celem pełnej oceny ich jakości, a więc pośrednio jakości bentonitów. Na rysunku 2 pokazano formy odlewnicze (próba testowa) po zdjęciu górnej skrzynki, a na rysunku 3 przykładowe odlewy testowe po wybiciu z form.

Skład chemiczny (w % wag.) odlewów ze staliwa niskowęglowego był następujący: C-0,15 do 0,33; Si-0,30 do 0,40; Mn-0,6 do 0,80; S-0,015 do 0,02; P-0,02; Cr-0,15, Ni-0,12, temperatura zalewania wynosiła 1550°C, czas zalewania 8 sekund.

Skład chemiczny (w % wag.) odlewów z żeliwa był następujący: C-3,15 do 3,30%; Si-2,10 do 2,40; Mn-0,4 do 0,60; S-0,03 do 0,04; P-0,04; temperatura zalewania odlewów żeliwnych wynosiła 1340°C.



*Rys. 1. Forma odlewnicza do wykonywania odlewu testowego (część dolna i górna) po zaformowaniu wraz z oprzyrządowaniem modelowym*

*Fig. 1. Foundry mould (the lower and upper part) with pattern assembly ready for pouring of test casting*



Rys. 2. Formy odlewnicze próby testowej wraz z odlewami po zdjęciu górnej skrzynki

Fig. 2. Foundry test moulds with castings after the removal of cope

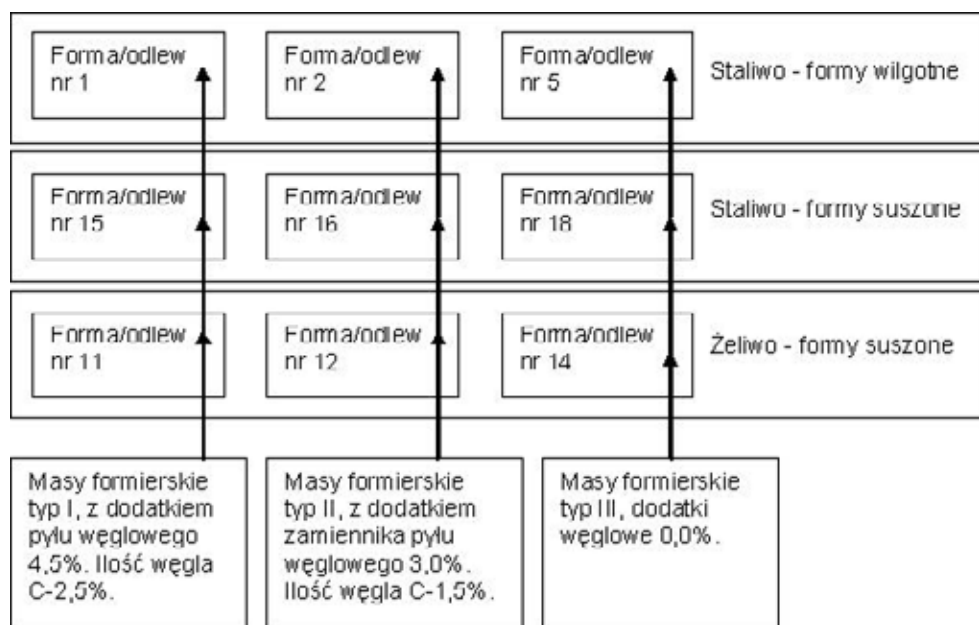


Rys. 3. Wykonane przykładowe odlewy testowe po wybiciu z formy

Fig. 3. Examples of test castings knocked out from moulds

Próby wykonywania odlewów przeprowadzono dla różnych wariantów technologicznych dotyczących składu mas formierskich, dla odlewów żeliwnych i stalowych. Po ocenie wizualnej odlewów pobierano z nich wycinki do badań metalograficznych. Na rysunku 4 przedstawiono plan przeprowadzonych badań w postaci schematu technologicznego, zaprojektowany w celu otrzymania odpowiedzi na przedstawione powyżej pytania.

Pokazana numeracja form odlewniczych odpowiada numeracji odlewów, numeracji wyciętych z nich próbek dla których badano struktury metalograficzne. W opisie po prawej stronie rysunku 4 zawarto informację dotyczącą materiału odlewów (żeliwo, stal) oraz informację o tym czy formy w których wykonano odlewy były suszone, czy wilgotne. W dolnej części rysunku zawarto kolejne informacje dotyczące zawartości dodatku węglowego w masach formierskich w których wykonywano odlewy.



Rys. 4. Schemat technologiczny przeprowadzonych badań technologicznych dotyczących warstwy powierzchniowej (naskórka odlewniczego)

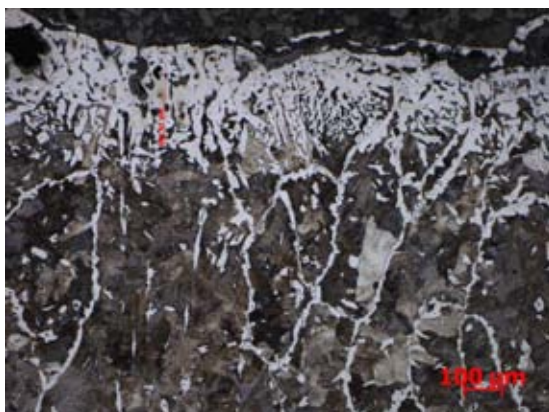
Fig. 4. Flowchart of technological tests performed on the surface layer of casting (casting skin)

### Badania warstwy powierzchniowej (naskórka odlewniczego)\* odlewów wykonanych w masach formierskich z zastosowaniem bentonitu podstawowego

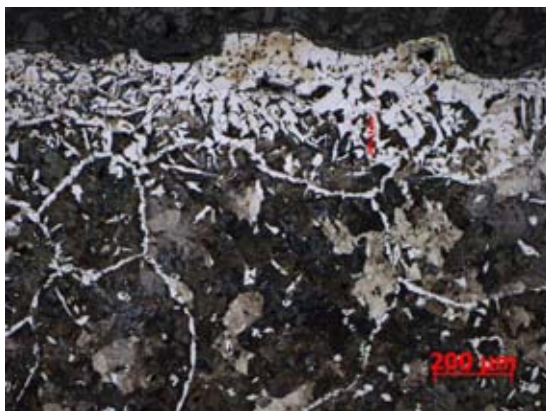
Badania mikrostruktury przeprowadzono dla wycinków odlewów, wykonanych według opracowanej odlewniczej testowej próby technologicznej. Niejednorodność mikrostrukturalną naskórka odlewniczego oceniano na zglądach metalograficznych w próbkach wyciętych prostopadłe do powierzchni odlew-forma. Zglądy przygotowano metodą standardową i wytrawiono w odczynniku  $Mi1Fe$ . Obserwacje przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego AXIO OBSERVER Z1m oraz skaningowego mikroskopu elektronowego STEREOSCAN 420. Skład chemiczny wybranych mikroobszarów naskórka odlewniczego określano za pomocą mikroanalizy rentgenowskiej EDS, z wykorzystaniem mikroanalizatora LINK ISIS 300. Obrazy mikrostruktury dla badanych odlewów przedstawiono na rysunkach 5 do 10. Wyniki obserwacji składników mikrostrukturalnych oraz ich cech morfologicznych przedstawiono opisowo w tabeli 1. Przyjęta w opisie numeracja analizowanych próbek, rodzaj materiału odlewów, rodzaj form odlewniczych w jakich były wykonywane odlewy, odpowiada numeracji w przedstawionym schemacie technologicznym przeprowadzonych badań (rys. 4).

\* W niniejszym opracowaniu wykorzystano następującą definicję naskórka odlewniczego, sformułowaną na potrzeby opisu mikrostruktury: „naskórek odlewniczy” jest to mikrostrukturalnie wyodrębniona warstwa przy powierzchni odlewu, widoczna na zglądach metalograficznych, prostopadłych do powierzchni kontaktu: odlew-forma.

## Mikrostruktura odlewów stalowych wykonanych w formach wilgotnych (wilgotność formy ok. 3,5%)

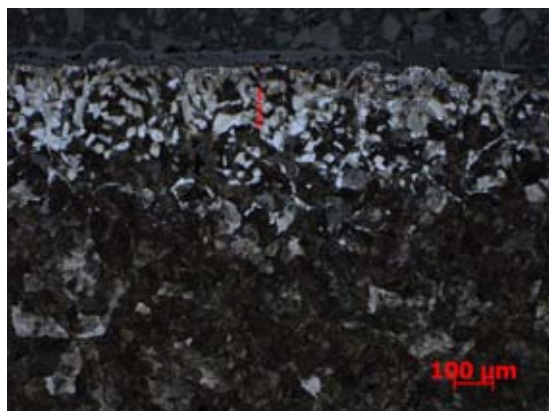


Rys. 5. Staliwo, forma wilgotna. Mikrostruktura próbki nr 1, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 5. Cast steel, green sand mould. Microstructure of specimen no. 1, 100x, etched section

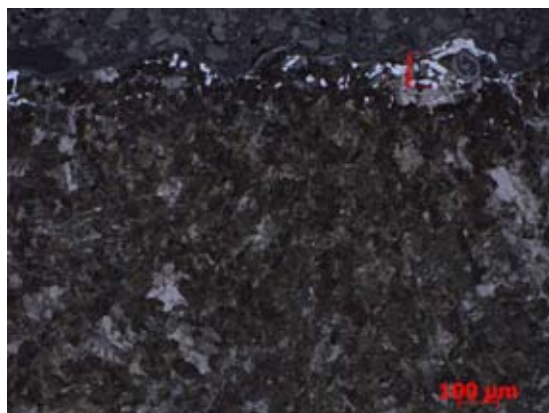


Rys. 6. Staliwo, forma wilgotna. Mikrostruktura próbki nr 5, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 6. Cast steel, green sand mould. Microstructure of specimen no. 5, 100x, etched section

**Mikrostruktura odlewów staliwnych wykonanych w formach suchonych  
(wilgotność formy ok. 0,8%)**



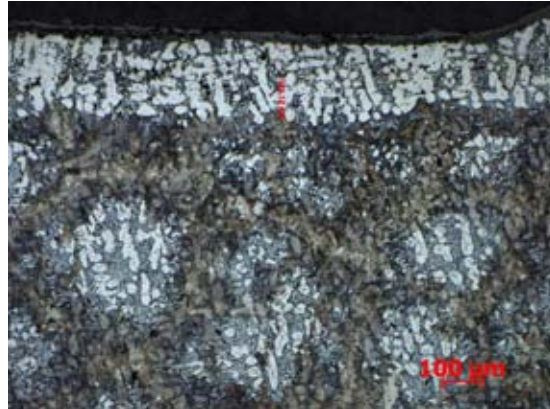
*Rys. 7. Staliwo, forma suszona. Mikrostruktura próbki nr 15, pow. 100x, zgląd trawiony*  
*Fig. 7. Cast steel, dry sand mould. Microstructure of specimen no. 15, 100x, etched section*



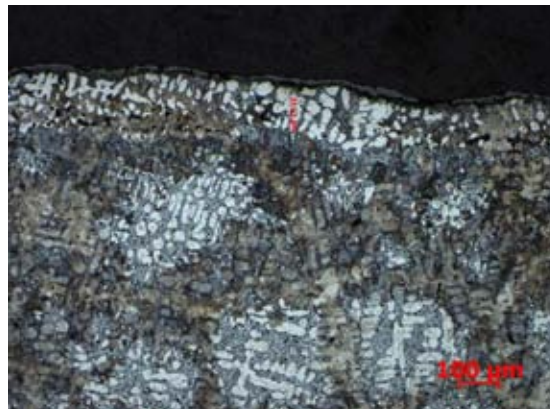
*Rys. 8. Staliwo, forma suszona. Mikrostruktura próbki nr 18, pow. 100x, zgląd trawiony*  
*Fig. 8. Cast steel, dry sand mould. Microstructure of specimen no. 18, 100x, etched section*



### Mikrostruktura odlewów żeliwnych wykonanych w formach suszonych (wilgotność formy ok. 0,8%)



Rys. 9. Żeliwo, forma suszona. Mikrostruktura próbki nr 11, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 9. Cast iron, dry sand mould. Microstructure of specimen no. 11, 100x, etched section



Rys. 10. Żeliwo, forma suszona. Mikrostruktura próbki nr 12, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 10. Cast iron, dry sand mould. Microstructure of specimen no. 12, 100x, etched section

Tabela 1. Wyniki badań mikrostruktury analizowanych próbek odlewów  
Table 1. The results of microstructural examinations of the investigated test castings

Grupa odlewów	Nr próbki (odlewu)	Cechy mikrostruktury		
		Składniki mikrostrukturalne	Formy morfologiczne mikrostruktur w odlewach	Specyficzne cechy mikrostruktury w poszczególnych odlewach
Staliwo, formy wilgotne	1,2,3, 4,5	1. Ferryt 2. Perlit	Ziarna równoosiowe: ferryt i perlit Kryształy kolumnowe: ferryt i perlit Struktura Widmanstättena: pasma ferrytu na granicach ziaren perlitu	Próbka nr 1, 2, 3, 4, 5. Naskórek widoczny na całym obwodzie badanej próbki o grubości wyraźnie mniejszej na narożach. Strefa kryształów kolumnowych zaczyna się bezpośrednio przy powierzchni odlewu, bliżej centrum odlewu występują kryształy równoosiowe.
Staliwo, formy suszone	15,16, 17,18	1. Ferryt 2. Perlit	Ziarna równoosiowe: ferryt i perlit Kryształy kolumnowe: ferryt i perlit	Próbka nr 15, 16, 17. Naskórek w postaci niejednorodnej warstwy widoczny na całym obwodzie badanej próbki, z wyjątkiem naroża. Kryształy równoosiowe na całym przekroju odlewu. Próbka nr 18. Naskórek w postaci niejednorodnej warstwy widoczny na całym obwodzie odlewu, z wyjątkiem naroża. Nierówna powierzchnia odlewu z bardzo dużą ilością wtrąceń niemetalicznych, wokół których odwęglenie jest wyraźniej zaznaczone. Ziarna równoosiowe na całym przekroju odlewu.
Żeliwo, formy suszone	11,12, 13, 14	1. Ferryt 2. Perlit 3. Grafit 4. Cementyt	Ziarna równoosiowe: ferryt i perlit Dendryty: perlit Otoczki kolonii eutektycznych: perlit, ferryt Płatki o zróżnicowanym stopniu rozdrobnienia: grafit Kryształy kolumnowe: cementyt	Próbka nr 11, 12, 14. Naskórek w postaci warstwy niejednorodnej mikrostrukturalnie: w osnowie perlitycznej o morfologii pasmowej, z lokalnymi ziarnami ferrytu i wydzieleniami cementytu występuje bardzo drobny (przechłodzony) grafit płatkowy. Przekrój odlewu. Grafit płatkowy bardzo drobny, rozmieszczony międzydendrytycznie. W centrum odlewu w osnowie perlityczno-ferrytycznej występował grafit płatkowy, o rozdrobnieniu malejącym wraz z odległością od powierzchni odlewu. Zachowane zostały ślady mikrosegregacji dendrytycznej i eutektycznej. Występowały kryształy kolumnowe cementytu, usytuowane zgodnie z kierunkiem odpływu ciepła.

W tabeli 2 zestawiono wyniki analizy, przeprowadzonej dla poszczególnych próbek, dotyczącej grubości warstwy odwęglonej i grubości naskórka.

*Tabela 2. Grubość i usytuowanie naskórka (zamieszczono wartość maksymalną występującą w badanej próbce)*

*Table 2. The thickness and location of casting skin (a maximum value observed in the examined specimen was stated)*

Nr próbki	Max. grubość naskórka, $\mu\text{m}$	Rodzaj metalu	Rodzaj form	Uwagi
1s, 1w	250–260	Staliwo	Wilgotne	Odwęglenie powierzchni, pasma struktury Widmanstättena
2s, 2w	230			Odwęglenie strefowe, pasma struktury Widmanstättena
5s, 5w	280–300			Odwęglenie częściowe, brak odwęglenia w narożu, pasma struktury Widmanstättena
15, 15s	240–250	Staliwo	Suszone	Odwęglenie strefowe
16w, 16s	180–200			Odwęglenie częściowe, brak odwęglenia w narożu
18w, 18s	200–220			Odwęglanie częściowe w sąsiedztwie wtrąceń żużla
11s, 11w	150–200	Żeliwo	Suszone	Odwęglenie powierzchni, brak odwęglania w narożu
12, - 14	150–200			Odwęglenie powierzchni

Wnioski dotyczące wpływu materiału formy na naskórek w odlewach są następujące:

1. W odlewach stalowych wykonanych w formach wilgotnych, występowała warstwa naskórka o zwiększonym udziale ferrytu w stosunku do obserwowanego w centrum odlewu (naskórek ferrytyczny, odwęglony). Występowanie warstwy ferrytycznej w tej strefie odlewu świadczy o jej powierzchniowym zubożeniu w węgiel. Grubość ferrytycznej strefy naskórka była zróżnicowana w odlewach wykonanych z zastosowaniem wszystkich rodzajów masy formierskiej. Oszacowano, że największa była w odlewach wykonanych w masach typu III, niezawierających dodatków węglowych, a najmniejsza w odlewach wykonanych w masach formierskich typu II, zawierających 1,5% węgla.
2. W odlewach stalowych, wykonanych w formach suchych, występowała warstwa naskórka o większym udziale ferrytu, w porównaniu z centrum odlewu. Jej grubość była jednak nieco mniejsza niż obserwowana w odlewach wykonanych w formach wilgotnych. Największą grubość naskórka obserwowano w odlewach wykonanych w masach formierskich typu I, a najmniejszą w odlewach wykonanych w masach formierskich typu II.

3. Zastosowany dodatek nośników węgla błyszczącego w masach formierskich do wykonywania odlewów staliwnych powodował pogorszenie jakości ich powierzchni. Ponadto warstwy masy formierskiej o grubości około 40 mm (od powierzchni odlewów) były bardzo mocne spieczone, powodując pogorszenie wybijałości odlewów. Przyczyną tego może być wyższa temperatura zalewania odlewów staliwnych w porównaniu do stosowanej dla żeliwnych, co sprzyja zwiększeniu grafityzacji dodatków węglowych zastosowanych w masie formierskiej.
4. W żadnym z badanych odlewów staliwnych nie stwierdzono aby dodatki węglowe zastosowane w masie formierskiej powodowały nawęglenie powierzchni odlewów staliwnych. W każdym przypadku obserwowano powierzchniowe odwęglenia, o różnej grubości i ciągłości, zarówno dla odlewów wykonywanych w formach wilgotnych, jak i w formach suszonych. Wniosek ten jest odmienny od informacji zawartej w danych literaturowych wskazujących, że dodatki węglowe zawarte w masie formierskiej powodują nawęglenie powierzchni odlewów staliwnych [1,2,3].
5. Z obserwacji mikrostruktury badanych próbek odlewów staliwnych wynikało, że w odlewach wykonanych w masach suszonych strefa naskórka była cieńsza w porównaniu z odlewami wykonanymi z zastosowaniem mas wilgotnych, niezależnie od rodzaju masy formierskiej.
6. Z analizy lokalnego składu chemicznego w strefach przypowierzchniowych wynika, że powierzchnia badanych odlewów staliwnych była pokryta niejednorodną warstwą tlenkową, zawierającą głównie tlenki Fe i Si. Lokalnie występujące wtrącenia, usytuowane pod powierzchnią odlewu, w postaci zwartych cząstek lub pasm, zawierały oprócz tlenków Fe i Si także Cr, Ti, Ni i Al.
7. W odlewach z żeliwa, w naskórku występował wyjątkowo drobny (przechłodzony) grafit płatkowy o rozłożeniu międzydendrytycznym w osnowie perlitycznej, grafit rozłożony równomiernie w osnowie ferrytycznej oraz pola czystego ferrytu. Ze względu na zróżnicowanie morfologiczne składników fazowych w warstwie naskórka oraz występowanie zabielań w odlewach, wykonanych w formach z masy formierskiej zawierającej 4,5% oraz 3,0% dodatków węglowych, nie można było jednoznacznie ocenić wpływu materiału formy.

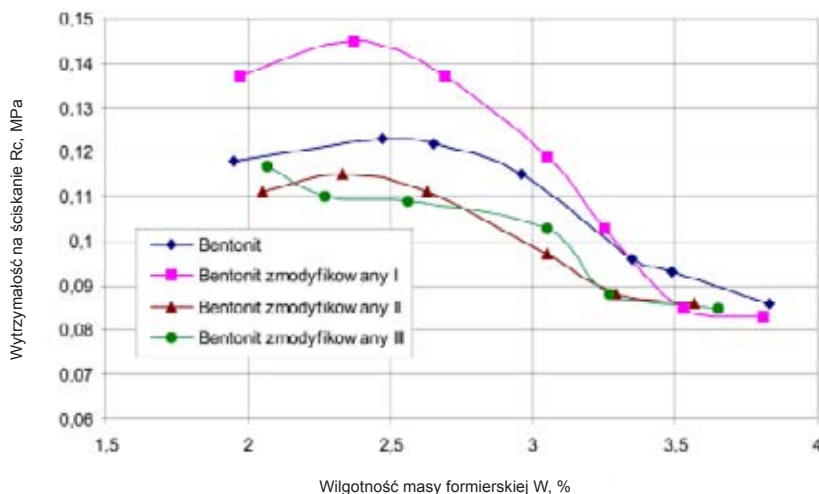
## Opracowanie bentonitu zmodyfikowanego oraz technologii jego produkcji

Prace związane z opracowaniem bentonitu zmodyfikowanego przeznaczonego do wykonywania odlewów staliwnych realizowano w kilku kierunkach. Oprócz omówionych poprzednio badań dotyczących wpływu zastosowanych w masie formierskiej (w bentonicie) dodatków węglowych na naskórek odlewów, kolejne badania związane z modyfikacją bentonitu realizowano stosując innego typu materiały. Były to różnego typu dodatki organiczne. W pierwszej kolejności stosowano w bentonitach różnego typu modyfikatory, badając ich wpływ na podstawowe właściwości technologiczne mas formierskich. Następnie wykorzystując „odlewniczą testową próbę technologiczną” badano wpływ zmodyfikowanych bentonitów na jakość powierzchni odlewów. Badania przeprowadzono dla trzech różnych rodzajów opracowanego bentonitu zmodyfikowanego oraz w celach porównawczych dla bentonitu podstawowego, czyli bez dodatków modyfikujących. Badano podstawowe właściwości mas, a głównie takie jak: wytrzymałość na ściskanie ( $R_c^w$ ), wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m^w$ ), przepuszczalność ( $P^w$ ), osypliwość ( $S^w$ ), płynność Dieterta (LD), wytrzymałości na rozciąganie w strefie przewilżonej.

Niektóre z wyników badań właściwości technologicznych mas formierskich z zastosowanymi w nich bentonitami przedstawiono na rysunkach 11–14. Wnioski wynikające z uzyskanych wyników badań są następujące:

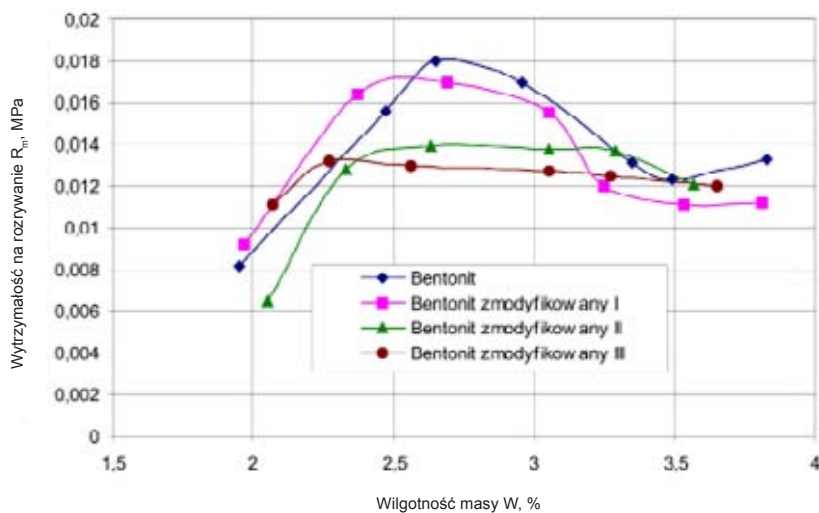
- dla mas formierskich zawierających bentonity zmodyfikowane najkorzystniejsze właściwości wytrzymałość na ściskanie uzyskiwano w przypadku stosowania bentonitu zmodyfikowanego I (rys. 11);
- w przypadku wytrzymałości na rozciąganie najlepiej należy ocenić bentonit podstawowy oraz bentonit zmodyfikowany I, pozostałe wykazywały nieco niższą wytrzymałość (rys. 12);
- w przypadku przepuszczalności najlepsze wyniki uzyskano dla mas zawierających bentonity podstawowy i zmodyfikowany I, wyniki badań pozostałych mas i bentonitów były nieco gorsze (rys. 13);
- wytrzymałość w strefie przewilżonej dla mas formierskich z bentonitem podstawowym oraz zmodyfikowanym nr I była porównywalna, a zarazem korzystniejsza w porównaniu do wartości tego parametru do pozostałych badanych mas formierskich (rys. 14). Dla mas formierskich o wyższej wytrzymałości występuje mniejsza tendencja do występowania w odlewach wad odlewniczych typu „strupa”.

Ogólnie można stwierdzić że dla bentonitów zmodyfikowanych nr I i II otrzymano najkorzystniejsze wartości właściwości badanych mas formierskich.



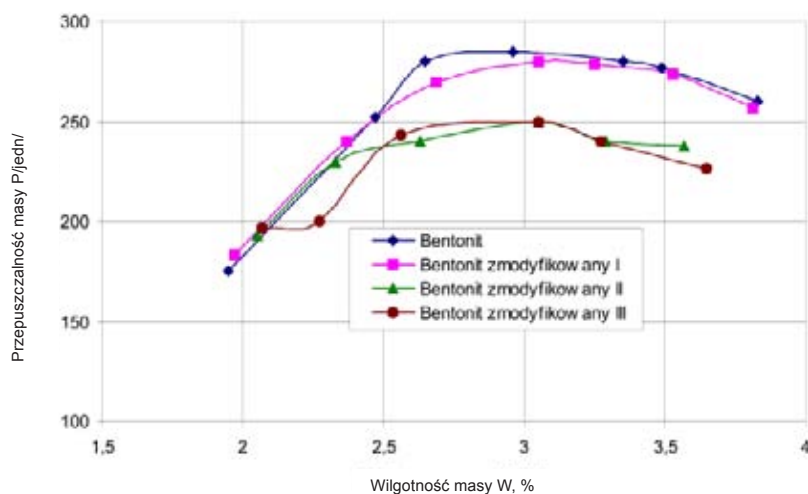
Rys. 11. Wpływ zastosowanych bentonitów na wytrzymałość na ściskanie masy formierskiej ( $Rc^W$ )

Fig. 11. Bentonite effect on moulding sand compression strength ( $Rc^W$ ).



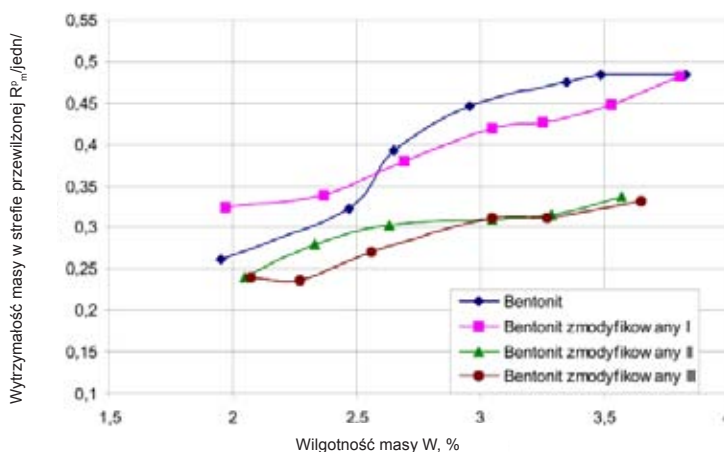
Rys. 12. Wpływ zastosowanych bentonitów na wytrzymałość na rozciąganie masy formierskiej ( $R_m^w$ )

Fig. 12. Bentonite effect on moulding sand tensile strength ( $R_m^w$ )



Rys. 13. Wpływ zastosowanych bentonitów na przepuszczalność masy formierskiej ( $P^w$ )

Fig. 13. Bentonite effect on moulding sand permeability ( $P^w$ ).



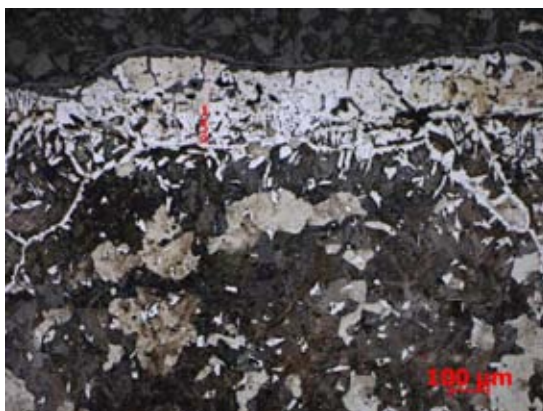
Rys. 14. Wpływ zastosowanych bentonitów na wytrzymałość w strefie przewilżonej mas formierskich

Fig. 14. Bentonite effect on moulding sand strength in moisture condensation zone

## Wykonanie odlewów testowych w masach formierskich z zastosowaniem bentonitu zmodyfikowanego, ocena jakości ich powierzchni oraz badanie warstwy powierzchniowej

Zgodnie z opisem zawartym w pkt. 2 wykonane zostały odlewy testowe z zastosowaniem mas formierskich zawierających zmodyfikowane bentonity (rys. 1–3). Jakość powierzchni odlewów porównywano i oceniano. Najkorzystniej oceniono odlewy wykonane z zastosowaniem bentonitów zmodyfikowanych oznaczonych numerami I i II, jakość ich powierzchni była lepsza w porównaniu do powierzchni odlewów wykonanych z zastosowaniem bentonitu podstawowego.

Podobnie jak poprzednio z odlewów tych pobrano wycinki dla których przeprowadzono badania mikroskopowe. Na rysunkach 15 i 16 pokazano przykładowe mikrostruktury próbek odlewów wykonanych w masach formierskich z zastosowaniem opracowanych bentonitów. Badania przeprowadzono dla form wilgotnych zalewanych staliwem oraz dla suszonych. Stwierdzono, że charakter zmian w strukturze, dotyczący naskórka odlewniczego (jego odwęglenia), był podobny jak w przypadku poprzednich badań, w których zastosowano w bentonicie nośniki węgla błyszczącego. Opracowane bentonity zmodyfikowane nie powodują nawęglenia powierzchni wykonanych odlewów.



Rys. 15. Staliwo forma wilgotna. Mikrostruktura próbki nr 2, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 15. Cast steel, green sand mould. Microstructure of specimen no 2, 100x, etched section



Rys. 16. Staliwo forma suszona. Mikrostruktura próbki nr 16, pow. 100x, zgląd trawiony  
Fig. 16. Cast steel, dry sand mould. Microstructure of specimen no 16, 100x, etched section.

Dodatkowo zaobserwowano, że zastosowanie opracowanych bentonitów zmodyfikowanych I i II w masie formierskiej powoduje stabilizację wilgotności masy. Masa formierska w formach odlewniczych jest odporna na odparowanie wody z jej warstwy powierzchniowej, a także odporniejsza na erozję ciekłego metalu podczas zalewania form, co sprzyja zmniejszeniu ilości wad odlewniczych typu „zaprószenia”. Nie stwierdzono występowanie wad powierzchniowych odlewów typu „nakłucia”, „porowatości gazowe” itp.

Parametry fizykochemiczne i technologiczne opracowanych bentonitów zmodyfikowanych I i II wytypowanych do dalszych badań zestawiono w tabelach 3 i 4.



Tabela 3. Właściwości fizykochemiczne zmodyfikowanych bentonitów I i II

Table 3. Physico-chemical properties of modified bentonites I and II

Parametr		Wynik badania
Zawartość montmorylonitu		powyżej 85%
Zawartość wody		7,5%
Zawartość węglanów		poniżej 3,45%
Wskaźnik pęcznienia		20 cm <sup>3</sup> /2 h
Wytrzymałość na ściskanie na wilgotno Rc <sup>w</sup> :		powyżej 0,082 MPa
Wydzielalność gazów		poniżej 37 ml/g
Analiza sitowa (odsiew przeliczony na sicie)		tabela poniżej
oczko sita, mm	odsiew przeliczony na sicie, %	
poniżej 0,056	83,0	
0,056	3,0	
0,063	13,5	
0,16	0,5	

Tabela 4. Właściwości technologiczne zmodyfikowanych bentonitów I i II

Table 4. Technological properties of modified bentonites I and II

Parametr	Wartość	
	Bentonit I	Bentonit II
Wilgotność masy, %	3,42	3,35
Wytrzymałość na ściskanie Rc <sup>w</sup> , MPa	0,083	0,082
Przepuszczalność masy P <sup>w</sup> x (10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /Pa · s)	245	255
Wytrzymałość na rozrywanie na wilgotno Rm <sup>w</sup> , MPa	0,011	0,012
Osypliwość S <sup>w</sup> , %	8,1	9,5
Wytrzymałość na rozrywanie w strefie przewilżonej R <sup>p</sup> <sub>m</sub> , N/cm <sup>2</sup>	0,44	0,42
Zagęszczalność masy Z, %	67	65

Opracowane bentonity do wykonywania odlewów stalowych na tym etapie badań oceniono pozytywnie. O ich przydatności ostatecznie zdecydowały wyniki prób wykonywania odlewów stalowych, przeprowadzonych w skali przemysłowej w wytypowanych odlewniach.

### **Wykonanie próbných odlewów stalowych w warunkach przemysłowych, uruchomienie produkcji zmodyfikowanego bentonitu**

W celu wykonania większych partii bentonitów zmodyfikowanych do przeprowadzenia prób przemysłowych, koniecznym było wykonanie instalacji doświadczalnej umożliwiającej wykonanie serii informacyjnej tych materiałów w ilości około 30 ton. Pierwszym etapem było opracowanie doświadczalnej technologii produkcji bentonitów, w zakresie której przygotowano podstawowe informacje techniczne niezbędne dla realizacji planowanego przedsięwzięcia. Bazując na doświadczeniu zebranych podczas realizacji dotychczasowych prac badawczych, opracowano założenia technologiczne, a następnie doświadczalną technologię, a także wybrano urządzenia technologiczne dla instalacji doświadczalnej. W ramach tych prac wykonana została doświadczalna instalacja wytwarzania zmodyfikowanego bentonitu.

W kolejnych pracach nad bentonitem zmodyfikowanym wykonane zostały próbne jego partie z zastosowaniem nowej instalacji doświadczalnej. Zbadano ich właściwości fizykochemiczne i technologiczne, a następnie bentonity przesłano do prób w warunkach przemysłowych, w odlewniach wykonujących odlewy stalowe (INCAST w Bolesławiu, ZREMB S. A. w Krakowie oraz SPECODLEW w Krakowie).

#### **Odlewnia INCAST w Bolesławiu**

W odlewni tej przeprowadzono próby wykonywania odlewów z zastosowaniem bentonitu zmodyfikowanego I oraz II. Wykonano serie następujących rodzajów odlewów:

- wirnik (rys. 17), materiał odlewu - stal LH 18S2, masa odlewu - 20 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1550°C,
- płyty przecieraka (rys. 18), materiał odlewu - stal G17CrMoV-5,1, masa odlewu - 4 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1620°C.



Rys. 17. Odlew wirnika, stal LH18S2, masa - ok. 20 kg

Fig. 17. Rotor cast from LH18S2 steel, approximate weight - 20 kg

W wyniku porównania uzyskanych powierzchni odlewów wykonanych z zastosowaniem obu rodzajów bentonitów zmodyfikowanych stwierdzono, że w obydwu przypadkach wyniki są zadowalające, przy czym nieco lepsze powierzchnie odlewów uzyskano w przypadku zastosowania bentonitu zmodyfikowanego nr I.



Rys. 18. Odlewy płyt przecieraka, staliwo G17CrMoV-5,1; masa - ok. 4 kg

Fig. 18. Rubbing machine parts cast from G17CrMoV-5,1 steel; approximate weight - 4 kg

#### Odlewnia SPECODLEW Sp. z o.o.

Próby wykonano stosując zmodyfikowany bentonit nr I. Wykonano następujące odlewy:

- segment pierścienia (rys. 19), materiał odlewu - staliwo LH27N5GW, masa odlewu 75 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1560°C,
- pierścień zimnego końca (rys. 20), materiał odlewu - staliwo LH25N7S2G2, masa odlewu 150 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1560°C.

Otrzymano bardzo dobrą jakość powierzchni odlewów, nie stwierdzono na niej wad odlewniczych.



Rys. 19. Segment pierścienia, staliwo LH27N5GW, masa odlewu - ok. 75 kg

Fig. 19. Ring segment cast from LH27N5GW steel, approximate weight - 75 kg



Rys. 20. Pierścień zimnego końca, staliwo LH25N7S2G2, masa odlewu - ok. 150 kg

Fig. 20. Ring of cold end terminal cast from LH25N7S2G2 steel, approximate weight - 150 kg

### Odlewnia ZREMB SA

Przeprowadzono próby z zastosowaniem bentonitu zmodyfikowanego nr I. Wykonano dwa typy odlewów w seriach po kilkanaście sztuk. Były to następujące odlewy:

- koło, materiał odlewu staliwo - L30GS, masa odlewu - 59 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1671°C,
- koło zębate, materiał odlewu - staliwo L600, masa odlewu - 100 kg, temperatura spustu metalu z pieca - 1671°C.

Na rysunkach 21 i 22 pokazano wykonane odlewy.



Rys. 21. Przykładowy odlew po wybiciu z formy i przed obcięciem układu wlewowego i zasilaczy

Fig. 21. Example of casting knocked out from mould before the removal of gating system and feeders



Rys. 22. Przykładowy odlew po odcięciu układu wlewowego i po oczyszczeniu

Fig. 22. Example of casting after the removal of gating system and fettling

## Wnioski

Pozytywny wynik wykonanych badań pozwolił na uruchomienie prac inwestycyjnych, których celem było uruchomienie produkcji bentonitu zmodyfikowanego. W ramach tych prac opracowano przemysłową technologię wykonywania bentonitu zmodyfikowanego, a następnie w firmie CERTECH w Niedomicach została zbudowana instalacja produkcyjna o wydajności 2000 ton/rok oraz uruchomiono jego produkcję.

Wysoka jakość surowca, a szczególnie wysoka zawartość w nim montmorylonitu umożliwia produkcję wysokiej jakości bentonitu zmodyfikowanego pozwalającego na otrzymanie bardzo dobrych właściwości technologicznych mas formierskich, przy małym wskaźniku jego zużycia. Wysoka ognioodporność bentonitu jest jednym z podstawowych warunków otrzymania bardzo dobrej jakości powierzchni odlewów, spełniających stawiane im wymagania. Stosowanie opracowanych bentonitów zmodyfikowanych nie powoduje nawęglenia powierzchni odlewów. Zastosowanie ich w masach formierskich sprzyja zmniejszeniu ilości wad odlewniczych typu pęcherze gazowe, nakłucia, strup, blizny.

Na szczególną uwagę zasługują wyniki badań dotyczących możliwości zastosowania w masach formierskich dla odlewów stalowych dodatków węglowych i ich wpływ na jakość powierzchni odlewów, szczególnie na warstwę powierzchniową (naskórek odlewniczy), w aspekcie ewentualnego nawęglenia powierzchni odlewów. W żadnym z badanych odlewów stalowych nie stwierdzono aby dodatki węglowe zastosowane w masie formierskiej powodowały nawęglenie powierzchni odlewów. W każdym przypadku stwierdzono odwęglenie zarówno dla odlewów wykonywanych w formach wilgotnych, jak i w formach suszonych. Wniosek ten jest odmienny od informacji zawartej w danych literaturowych wskazujących, że dodatki węglowe zawarte w masie formierskiej powodują nawęglenie powierzchni odlewów stalowych.

## **Podziękowanie**

Autorzy artykułu pragną podziękować kierownictwu oraz kadrze technicznej Przedsiębiorstwa Techniczno-Handlowego CERTECH w Niedomicach za współpracę oraz twórcze i profesjonalne zaangażowanie przy realizacji prac związanych z projektem, umożliwiające osiągnięcie założonych celów.

## **Literatura**

1. Janicki E., Sakwa W.: Materiały formierskie właściwości i zastosowanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1965
2. Lewandowski J. L.: Masy formierskie i rdzeniowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991
3. Hysell M. i in.: Randaufkohlung bei Edeltstahlguss - Untersuchung verschiedener Kaltharzbinde und Sandzussaetze, Giesserei-Prax, 1998, nr 3, s.100–105
4. Hofmann E., Siefert W.: Gasabgabe aus unterschiedlichen Formstoffen beim Giessen von Stahlguss, Giessereiforsch, 1994, Jg. 46, H. 4, s. 105–112
5. Druzhevskij M.A., Matveev I.A.: Opredelenie "gorjachej" deformatsionnoj sposobnosti khimicheskoi tverdejushhej smesi, Lit. Proiz., 2001, nr 6, s. 18–19
6. Hysell M. i in.: Randaufkohlung bei Edeltstahlguss - Untersuchung verschiedener Kaltharzbinde und Sandzussaetze, Giesserei-Prax, 1998, nr 3, s. 100–105
7. Rous J.: Reoxidacni pochody v dutine formy. Slevarenstvi, 1991 Rocz. 39, czis.1–2, s. 33–41