

3.1. Wprowadzenie

Raport Wykonawcy (Wydział Odlewnictwa AGH) zadania 3 realizowanego w ramach umowy warunkowej obejmuje dwie części:

A/ Wykonanie partii odlewów funkcjonalnych z użyciem żeliwa wytwarzanego w ulepszonym procesie.

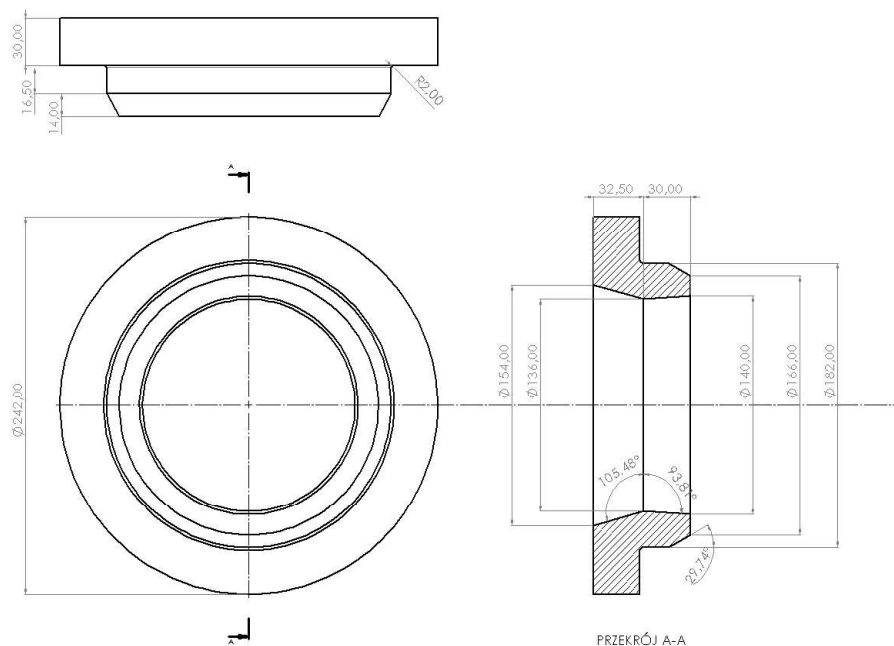
B/ Optymalizacja parametrów procesu technologicznego produkcji żeliwa do pracy w niskiej temperaturze, obejmująca:

- Optymalizację w zakresie skład chemiczny żeliwa bazowego przeznaczonego do obróbki pozapiecowej – w technologii przewodu elastycznego
- Optymalizację w zakresie rodzaju zaprawy sferoidyzującej do prowadzenia pozapiecowej obróbki (określenie optymalnej zawartości magnezu w zaprawie, rodzaju zaprawy, grubości przewodu, itp.).

3.2. Wykonanie serii odlewów z żeliwa o podwyższonej uduarności

3.2.1. Wybór odlewu do testów w odlewni doświadczalnej

Wyboru odlewy do wykonania serii próbnej z żeliwa sferoidalnego po podwójnej rafinacji dokonała Odlewnia „Drawski” s. z o.o. Model został wykonany z żywicy modelarskiej grupy LAB. Model odlewu pokazano na rysunku 3.1.



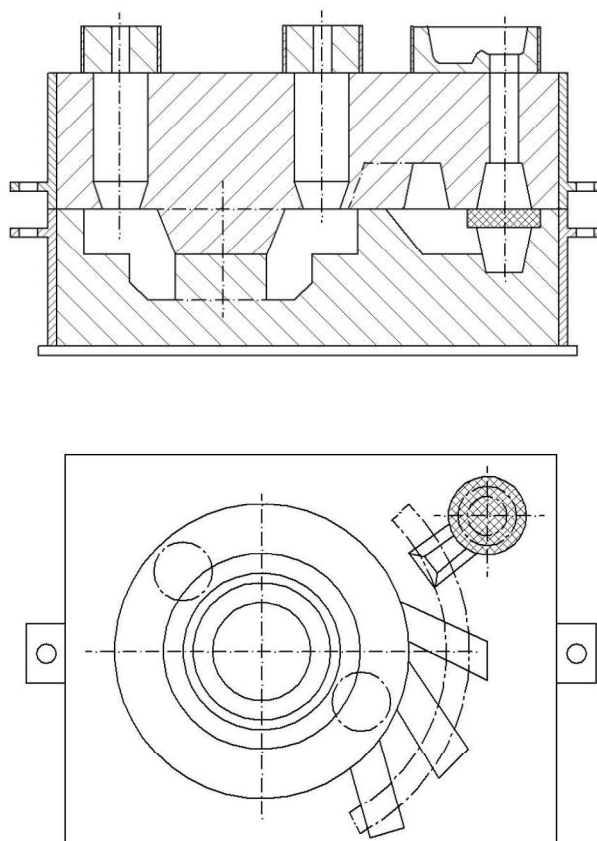
Rys. 3.1. Rysunek konstrukcyjny odlewu testowego

Odlew, z konstrukcyjnego punktu widzenia ma kształt pierścienia o średnicy ~250mm i przekroju w kształcie litery „L”. Moduł cieplny (moduł krzepnięcia) odlewu wynosił około 1,1 cm ($M = 1,1 \text{ cm}$). Opracowując technologię wykonania odlewu uwzględniono:

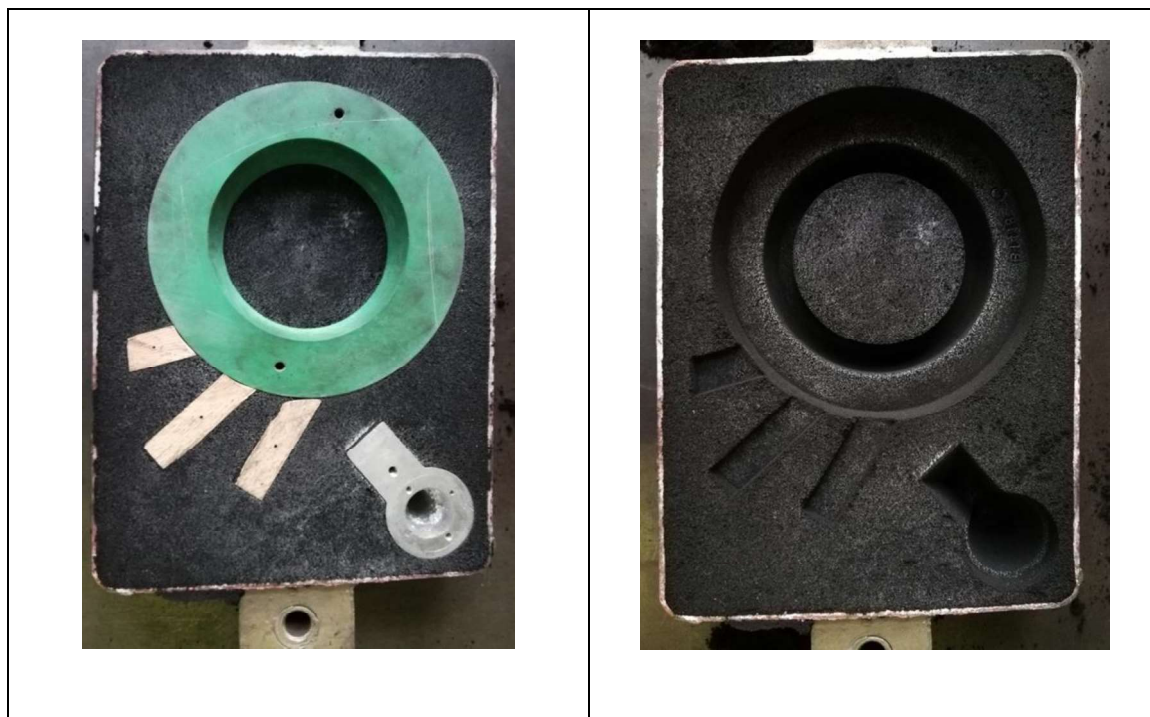
- konieczność jego zasilania z nadlewów,
- konieczność umieszczenia filtra piankowego w układzie zalewania,
- potrzebę wykonania wtórnej modyfikacji żeliwa techniką: „na strugę” lub w zbiorniku wlewowym.

Wymienione powyżej zabiegi technologiczne mają na celu stworzenie warunków uzyskiwania odlewu o zwartej budowie struktury (bez porowatości skurczowej czy gazowej – stosowanie nadlewów), struktury bez wtórnych wtrąceń niemetalowych, których źródłem jest zjawisko reoksydacji (tworzenia tlenków), proces wtórnej modyfikacji w zbiorniku (na strugę) (po to są filtry piankowe) oraz zwiększenie zdolności metalu do tworzenia struktury drobnoziarnistej (z dużą ilością drobnych, kulkowych wydzieleni grafitu).

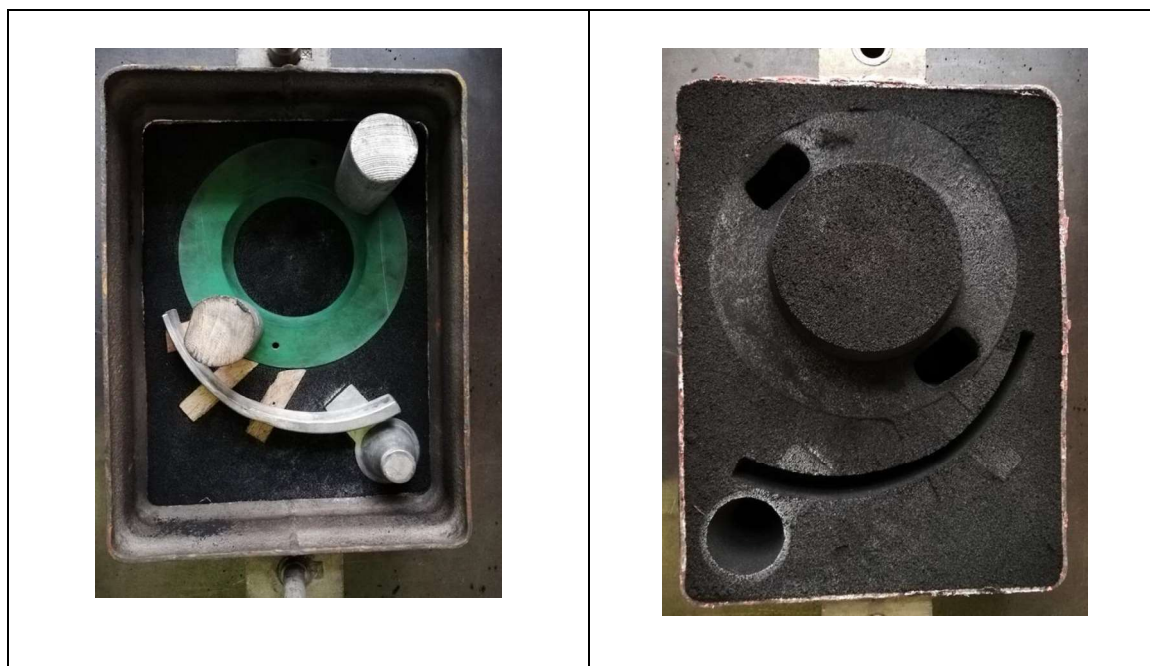
Odlew z uwagi na kształt jest stosunkowo łatwy z punktu widzenia technologii wykonywania formy. Nie wymaga stosowania rdzeni, forma wykonywana jest w wersji formowania z „fałszywką”. Wygląd formy - koncepcja wykonania odlewu pokazana został na rysunkach 3.2 = 3.4. Zastosowano skrzynki o wysokości $H = 150$ mm każda.



Rys. 3.2. Szkic formy stosowanej przy wykonywaniu serii odlewów testowych



Rys.3.3. Widok dolnej połowy formy: po zaformowaniu i po przygotowaniu do złożenia



Rys.3.4. Widok górnej połowy formy: po zaformowaniu i w trakcie przygotowaniu do złożenia

3.2.2. Wyznaczanie spadków temperatury żeliwa wywołanych rafinacją

W procesie wytwarzania żeliwa wysokojakościowego sferoidalnego ważnym elementem są spadki temperatury metalu, które w przypadku technologii z dwustopniową rafinacją będą występować na kolejno:

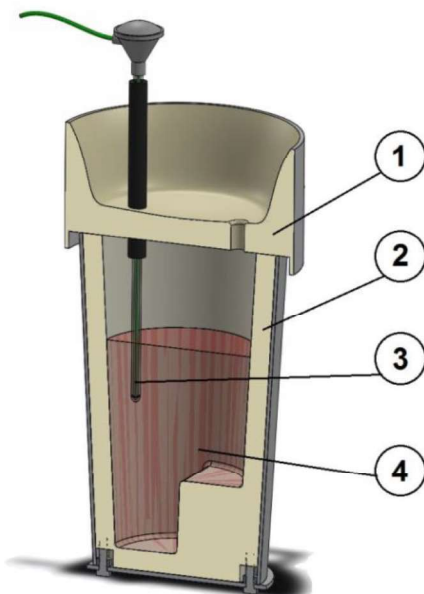
- podczas spustu metalu z pieca do kadzi,
- podczas sferoidyzacji w kadzi, rozpuszczania zaprawy magnezowej,
- podczas rafinacji żeliwa w kadzi,
- podczas zalewania.

Wszystkie spadki, ich wielkość zależy od wielu czynników, w tym wielkości i konstrukcji kadzi, im mniejsza kadź tym większe spadki w tym samym czasie. Sumaryczny spadek temperatury musi być wyznaczony dla każdego układu technologicznego (stosowanej kadzi, sposobu sferoidyzacji, transportu, powtórnego przelewania, itp.,) po to, aby można było wyznaczyć wartość temperatury żeliwa na początku procesu – w piecu przed przelewaniem do kadzi. Rafinacja żeliwa jest zabiegiem technologicznym niezbyt często stosowanym, stąd wiedza o jego wpływie na zmiany temperatury żeliwa jest niewielka.

W ramach badań realizowanych w ramach Projektu podjęto próbę określenia wpływu procesu rafinacji żeliwa przy pomocy azotu na przebieg zmian temperatury żeliwa.

Aby wykonać pomiary temperatury żeliwa w kadzi, w pokrywie wykonano drugi oprócz spustowego otwór, przez który wprowadzano termoparę PtPtRh10 osłoniętą kwarcową rurką do ciekłego żeliwa, rys.3.5 i 3.6. Pomiar prowadzono w sposób ciągły, a więc podczas napełniania kadzi, na dnie której umieszczano zaprawę FeSiMg9, ciekłym żeliwem. Pomiar kontynuowano również w drugiej fazie procesu, a więc podczas rafinacji żeliwa azotem. Pomiar wykonano dla dwóch przypadków:

- wytapiania żeliwa bez zabiegu rafinacji
- wytapiania żeliwa z procesem rafinacji.



Rys. 3.5. Szkic kadzi ze szczelną pokrywą z umieszczoną termoparą w pokrywie – idea: 1 – pokrywa, 2 – kadź, 3 – termopara, 4 – ciekły metal

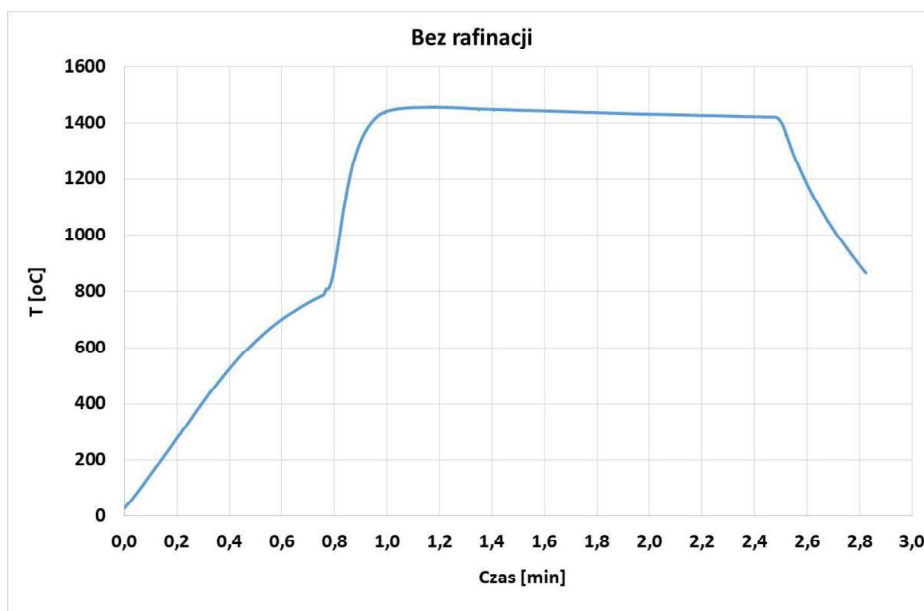


Rys. 3.6. Kadzi ze szczelną pokrywą z termoparą w pokrywie w tulei grafitowej – pomiar spadków temperatury podczas rafinacji.

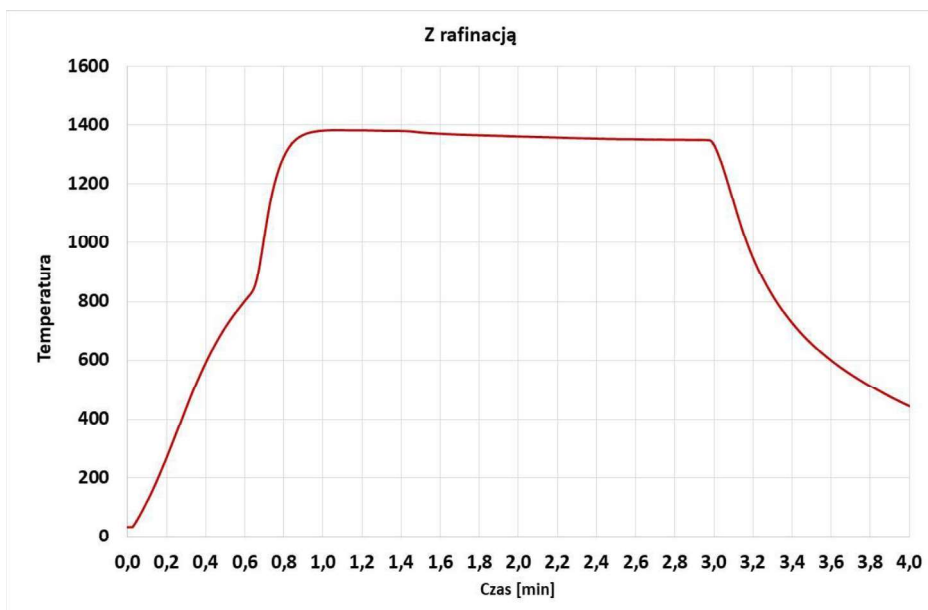
Na rysunkach 3.7 i 3.8 pokazano zarejestrowane przebiegi zmian temperatury żeliwa w doświadczalnej kadzi. Oceniany odcinek na wykresach temperatury to ten, który położony jest w strefie maksymalnych temperatur, co odpowiada zanurzeniu termopary w ciekłym metalu. Pomiar realizowano podczas napełniania kadzi i podczas

rafinacji. Równoległe z napełnianiem kadzi żeliwem przebiegał proces sferoidyzacji, na dnie kadzi każdorazowo umieszczano zaprawę magnezową FeSiMg9 w ilości około 1,25 ÷ 1,45%. Z wykresu trudno jest odczytać, czy rozpuszczanie zaprawy magnezowej prowadzi do przyrostu temperatury żeliwa, ponieważ napełnianie kadzi przebiega równoległe z rozpuszczaniem zaprawy. Opisywane badania zogniskowane są na ocenie wpływu rafinacji na przebiegi zmiany temperatury żeliwa.

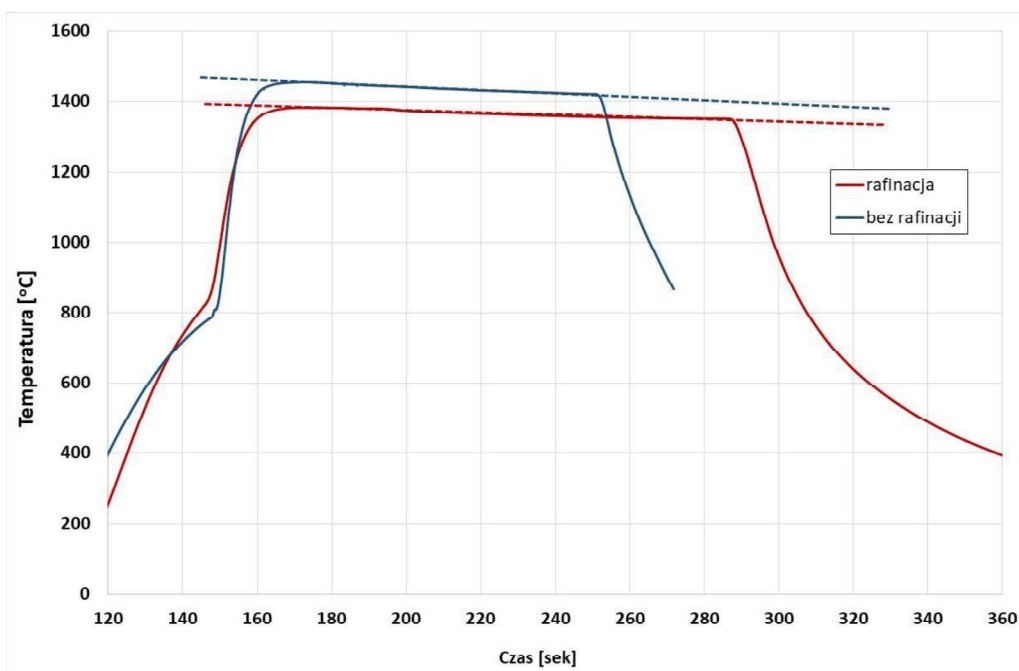
Zestawienie przebiegów (rys.3.9) zmian temperatury żeliwa w kadzi w przypadkach z zastosowaniem rafinacji i bez rafinacji pokazuje, iż przepływ gazu (azotu) w badanym okresie rafinacji (około 1,0 min) nie generuje dodatkowych spadków temperatury na poziomie zauważalnym. Temperatura żeliwa spada z podobną szybkością zarówno wtedy, gdy prowadzi się rafinację jak i wtedy, gdy tej rafinacji się nie prowadzi. Na rysunku 3.9 i 3.10 naniesiono dodatkowe linie, które są stycznymi do linii przebiegów rzeczywistych. Styczne mają podobny kąt pochylenia, co oznacza, iż **szybkości spadków temperatury metalu w kadzi są podobne zarówno wtedy, gdy proces prowadzony jest z rafinacją i bez rafinacji.**



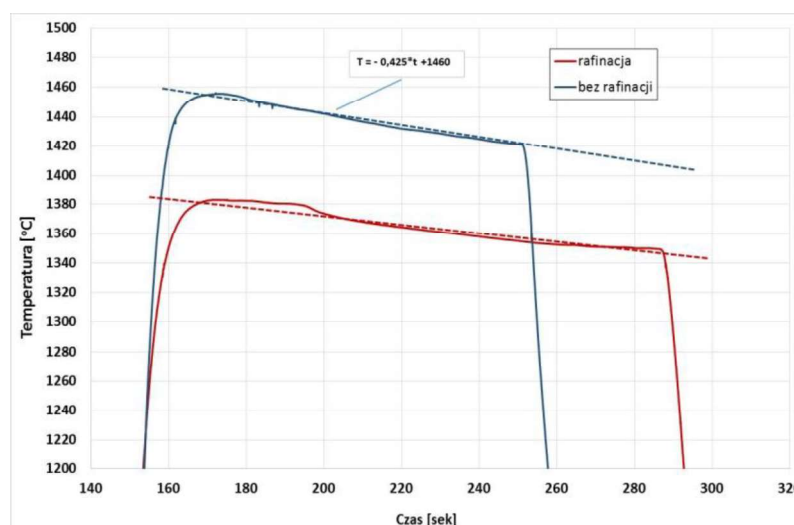
Rys.3.7. Przebieg zmian temp. podczas sferoidyzacji żeliwa w doświadczalnej kadzi w technologii Tundish. Proces bez rafinacji żeliwa.



Rys.3.8. Przebieg zmian temp. podczas sferoidyzacji żeliwa w doświadczalnej kadzi w technologii Tundish. Proces bez rafinacji żeliwa.



Rys.3.9. Przebiegi zmian temp. podczas sferoidyzacji żeliwa w doświadczalnej kadzi w technologii Tundish. Porównanie przebiegów w przypadku z aplikacją rafinacji i bez rafinacji.



Rys. 3.10. Przebiegi zmian temp. podczas sferoidyzacji żeliwa w doświadczalnej kadzi w technologii Tundish. Szybkość spadków temperatury

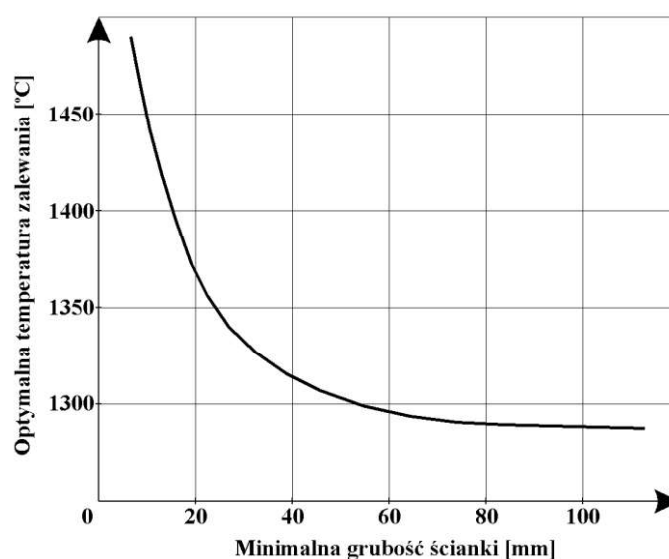
Na rysunku 3.10 jeszcze raz analizowane są spadki temperatury podczas pierwszego okresu obróbki pozapiecowej żeliwa, tj. podczas napełniania kadzi metalem, kiedy równoległe do napełniania przebiega również sferoidyzacja i modyfikacja żeliwa. W wersji technologii z rafinacją w kadzi przebiega również rafinacja (około 60s). W kadzi laboratoryjnej o pojemności ~ 35 kg żeliwa spadki temperatury postępują z szybkością około 25,5°C/min (0,425°C/s). W okresie przelewania (sferoidyzacji) spadki wynoszą około 35°C. Proces rafinacji nie zmienia szybkości spadków temperatury, stosunkowo niewielkie ilości gazu przepływającego przez żeliwo nie wywołują istotnych dodatkowych spadków. Naturalnie ogólny czas obróbki pozapiecowej metalu wydłuża się o okres rafinacji (~60s) i ten dodatkowy czas jest czynnikiem powodujący dodatkowy spadek temperatury.

W przemysłowych kadziach, których pojemność najczęściej jest większa od 500kg spadki temperatury żeliwa w opisywanej obróbce będą mniejsze, i należy je określić na drodze pomiarów.

Podsumowując przeprowadzone badania, których wynikiem jest stwierdzenie, iż sam proces rafinacji żeliwa nie jest źródłem dodatkowych spadków temperatury o istotnych wartościach, tzn. takich, które generowałyby skutki technologiczne np. konieczność podwyższenia temperatury topienia. Jest to ważny wniosek dla dalszych prac badawczych i wdrożeniowych opracowywaną technologią

z dwustopniową rafinacją wysokojakościowego żeliwa. Przewidywany czas rafinacji trwający w przypadku kadzi przemysłowych około 2 minut nie będzie dodatkowym źródłem spadków temperatury. W tym okresie około 2 min spadki temperatury metalu w kadzi naturalnie będą mieć miejsce, ale będą one podobnej wartości jak spadki przy przetrzymywaniu żeliwa bez procesu rafinacji.

Wyznaczanie spadków temperatury jest istotne z punktu widzenia temperatury zalewania, a więc temperatury, podczas zalewania formy żeliwem sferoidalnym. Na rysunku 2.10 pokazano empiryczną temperaturę zalewania, jako funkcję minimalnej grubości ścianki odlewu. Wyznaczanie temperatura zostało oparte o kryterium zdolności żeliwa sferoidalnego do wypełniania formy o określonej szerokości wnek (grubości ścianek odlewu). W projekcie dąży się do uzyskania struktury ferrytycznej, bez udziału perlitu. Łatwiej taką strukturę uzyskać wtedy, gdy odlew krzepnie powoli. Dlatego w przypadku wytwarzania drobnych i średnich odlewów żeliwnych, w których ośnowę powinien stanowić ferryt, wskazane jest podwyższanie temperatury zalewania dla wydłużenia czasu krystalizacji i stygnięcia. Korzystając z zależności pokazanej na rysunku 3.11 należy przyjmować wyższe (o 20 - 25°C) wartości temperatury zalewania niż wynikałoby dla danej grubości z samego rysunku. Tak więc formy doświadczalne odlewu o grubości ścianek $g = 25 \div 30 \text{ mm}$ powinny być zalewane żeliwem o temperaturze bliskiej wartości $T_{\text{zal}} = 1350^\circ\text{C}$.



Rys. 3.11. Zależność pomiędzy grubością ścianki i temperaturą zalewania żeliwa sferoidalnego

3.2.3. Optymalizację w zakresie skład chemiczny żeliwa bazowego przeznaczonego do obróbki pozapiecowej – w technologii przewodu elastycznego

Skład chemiczny żeliwa przeznaczanego na odlewy do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń w niskiej temperaturze powinien być tak dobrany, aby w odlewach uzyskiwano strukturę ferrytyczną (najkorzystniej czysto ferrytyczną), bez eutektyki fosforowej i wtrąceń niemetalowych, z grafitem kulkowym dobrze rozdrobnionym. Aby możliwe było uzyskanie struktury ferrytycznej w składzie podstawowym należy ograniczyć zawartość Mn najkorzystniej do wartości $Mn < 0,2\%$. Skład końcowy żeliwa, który pozwala na uzyskiwanie założonych właściwości mechanicznych uzyskuje się jak wynik składu bazowego (wyjściowego w piecu przed obróbką pozapiecową) oraz jego uzupełnienia w procesie sferoidyzacji i modyfikacji. W obróbce pozapiecowej – sferoidyzacji – zwiększa się w żeliwie zawartość krzemu (Si) i magnezu (Mg). Zmienia się zawartość węgla (zmniejsza się), ponadto do żeliwa mogą być wprowadzane w niewielkich ilościach inne pierwiastki, wchodzące w skład zapraw FeSiMg. Są to najczęściej: Al., Ca, Cer, inne

Modyfikacji, która w wypadku tego ferrytycznego gatunku żeliwa powinna być szczególnie skuteczna, staje się przyczyną zwiększenia zawartości Si w żeliwie, co jest powszechnie znanym zjawiskiem w produkcji żeliwa sferoidalnego czy modyfikowanego. Modyfikatory wprowadzają do żeliwa niewielkie dodatki takich pierwiastków jak: Ca, Al., B, Sr, inne i ten fakt jest również powszechnie znany.

Zakres zmian zawartości poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład chemiczny żeliwa zależy od wielu czynników technologicznych, a te są charakterystyczne dla technologii stosowane przez odlewnie. Propozycja składu bazowego żeliwa powinna uwzględniać ten fakt. Punktem wyjścia do ustalenia składu chemicznego żeliwa bazowego powinno być zdefiniowanie składu końcowego.

Przeprowadzone ponad 20 wytopów doświadczalnych w Odlewni AGH, jakkolwiek w skali laboratoryjnej pozwala zdefiniować zalecany skład chemiczny, przy zachowaniu, którego można wytwarzać gatunki żeliwa do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń przy zachowaniu niskiej temperatury (-20°C , i -40°C). Skład

chemiczny jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym dla uzyskania oczekiwanych właściwości żeliwa sferoidalnego i o tym należy pamiętać. W obróbce pozapiecowej żeliwa, która obejmuje sferoidyzację i modyfikację ważną rolę odgrywają ponadto: temperatura żeliwa zarówno podczas sferoidyzacji i modyfikacji, ale także podczas zalewania. Drugim ważnym czynnikiem wywierającym wpływ na końcową strukturę żeliwa i wszystkie jego właściwości jest czas mierzony od momentu sferoidyzacji i modyfikacji. Wskazując zalecany (dobrany) skład chemiczny dla wybranego gatunku żeliwa należy uwzględniać rolę pozostałych czynników.

Aby osiągnąć zespół właściwości opisanych normą dla gatunku żeliwa **EN-GJS-400-18 LT**, które obejmują wytrzymałość $R_m = 400 \div 450 \text{ MPa}$, wydłużenie $A_5 > 18\%$ oraz udarność próbki z karbem V na poziomie $U_v > 12 \text{ J}$ przy temperaturze $T = (-20^{+2})$, żeliwo przeznaczone na odlewy drobne i średnie o module krzepnięcia $M < 1,5 \div 1,7 \text{ cm}$ powinno mieć następujący skład chemiczny, podany w tabeli 3.1:

Tab. 3.1. Zalecane składy chemiczne żeliwa sfero. do pracy w niskiej temperaturze

L.p.	Pierwiastek	Zaw. [%]	Uwagi
1	C	3,50 ÷ 3,65	
2	Si	2,40 ÷ 2,65	
3	Mn	< 0,15	
4	P	< 0,035	
5	S	< 0,010	
6	Mg	0,045 ÷ 0,055	
7	Sc	1,03 ÷ 1,05	Równoważnik węglowy Sc
Pozostałe pierwiastki i ich rola			
6	Ca	0,006 ÷ 0,010	Zwiększa liczbę kulek grafitu w żeliwie i sprzyja ferrytyzacji osnowy, co podnosi wydłużenie i udarność
7	Al	0,010 ÷ 0,025	j.w.
8	Cu	< 0,010	Sprzyja perlityzacji, zwiększa R_m i HB, obniża A_5 , obniża udarność
9	Cr	< 0,01	j.w.,
10	Ni	< 0,02	j.w.
11	V	< 0,01	j.w.
12	Sn	< 0,005	j.w.

Wyznaczenie optymalnych składów chemicznych podanych w tabeli 3.1. zostało oparte na analizie stanu literatury, ale przede wszystkim na bazie doświadczalnych wytopów, zrealizowanych w odlewni Doświadczalnej AGH w ramach realizacji badań nad żeliwem uzyskiwanym w technologii z podwójną rafinacją gazową. W ramach badań w AGH wykonano ponad 20 doświadczalnych wytopów w piecu indukcyjnym o pojemności ~ 35 kg. Część z nich dotyczyła wykonania serii odlewów pierścienie z żeliwa EN – GJS - 400-18LT i żeliwa EN-GJS 350-22-LT.

3.2.4. Wykonanie serii doświadczalnych odlewów i ich badania

Wytapianie żeliwa w piecach indukcyjnych, w których nie prowadzi się takich zabiegów technologicznych jak odsiarczanie czy obniżanie zawartości fosforu wymaga zastosowania takiej struktury składników wsadu, aby po wytopieniu żeliwa i wykonaniu wielostopniowej obróbki pozapiecowej możliwe było uzyskanie założonego składu chemicznego. Dla uzyskania żeliwa o osnowie ferrytycznej ten zalecany skład podano w tabeli 3.1.

W produkcji żeliwa sferoidalnego o wysokich właściwościach plastycznych i wysokiej uduźności w niskiej temperaturze składnikami wsadu są:

- Surówki specjalne o wysokiej zawartości C i małych zawartościach pozostałych składników (Si, Mn, S, P),
- Żłom żeliwa sferoidalnego ferrytycznego,
- Żłom stalowy niskowęglowy i nisko manganowy (blachy tłoczne),
- Grafit granulowany, jako nawęglacz,
- Modyfikatory,
- Zaprawy sferoidyzujące (FeSiMg)

Budowanie kompozycji z w/w składników wymaga szybkich przeliczeń składów, co można realizować z użyciem programów komputerowych do optymalizacji składów wsadów metalowych. Dla celów realizacji Projektu opracowano arkusz obliczeniowy w środowisku Excel, co zostało zaprezentowane się tabeli 3.2. Dla zachowania wysokiej zdolności do grafityzacji udział surówki nie powinien być mniejszy niż około 35%.

Tab. 3.2. Algorytm do wyznaczania składu wsadu metalowego dla osiągnięcia założonego składu żeliwa

	Q = 27,5kg		Składy chemiczne elementów wsadu																		
	kg	%	C	C%	Si	Si%	Mn	Mn%	S	S%	P	P%	Al.	AL%	Mg	Ca	Ca%	Ce	Zr	Sr	Ba
Surówka Pig -Not (firmy JAK)	11,00	40,0	4,556	1,822	0,815	0,326	0,026	0,010	0,009	0,004	0,029	0,012	0,02	0,008							
Złom żeliwny	9,63	35,0	4,030	1,411	2,730	0,956	0,043	0,015	0,002	0,001	0,048	0,017	0,005	0,002							
Stal	5,50	20,0	0,100	0,020	0,015	0,003	0,250	0,050	0,009	0,002	0,008	0,002	0,040	0,008							
Fe Si 75	0,08	0,3	0,100	0,000	75,000	0,225	0,300	0,001	0,020	0,000	0,050	0,000	0,30	0,001	0,00	0,20	0,001	0,00			
Modyfikator 1 Innocul 63	0,21	0,8	0,000	0,000	65,000	0,488	3,700	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	1,00	0,008	0,00	1,60	0,012	0,00	4,70	0,00	
Modyfikator 2 (Zirconic)	0,00	0,0	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,20	0,000	0,00	2,25	0,000	0,00	1,50	0,00	0,000
Zaprawa sfero FeSiMg9	0,45	1,7	0,000	0,000	44,000	0,726	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,20	0,003	10,00	2,00	0,033	0,70	0,00	0,00	0,000
Modyfikator strontowe MS 1	0,08	0,3	0,000	0,000	73,00	0,219	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,42	0,001	0,00	0,03	0,000			0,74	
Modyfikator borowy MB10	0,00	0,0	0,00	0,000	65,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	1,37	0,000	0,00	1,28	0,000	0,00	0,00	0,00	10,200
Modyfikator BARONIC	0,00	0,0	0,00	0,000	67,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	1,20	0,000	0,00	1,00	0,000	0,00	0,00	0,00	2,500
Grafit (dowłgłacz)	0,22	0,8	95,0	0,760	0,000	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000		0,000			0,000				
	27,17	98,8		4,013		2,942		0,104		0,006		0,030		0,031			0,046				
				3,61188		2,6478		0,093562		0,005545		0,027039		0,02752245			0,041121				

Tabela 3.3. Składy wsadów metalowych użyte w kolejnych wytopach

8	25kg surówki	400g (280+120)	75g gruby do pokrywy kadzi	400g	100g	Rafinacja w piecu (45s)
			100g drobny na lustro po			
			50g na formę			
			25g na klin			
9	25kg surówki	400g (230+170)	75g gruby do pokrywy kadzi	400g	100g	Rafinacja w piecu
			100g drobny na lustro po	na dno w piecu 60%		Rafinacja w kadzi (wydłużona d
			50g na formę	reszta w trakcie		problem przy małym ciśnieniu
			25g na klin			
10	14,5kg surówki	400g (280+120)	75g gruby do pokrywy kadzi	0	100g	Rafinacja w piecu (45s)
	12,2kg złom	(stary+nowy) 9%	100g drobny na lustro po			Rafinacja w kadzi
			50g na formę			azotem
			25g na klin			
11	14,5kg surówki	1,1m PE	75g gruby do pokrywy kadzi	0	50	Rafinacja w piecu (45s)
	12,2kg złom	16% Mg ~40g	100g drobny na lustro po			Rafinacja w kadzi
			50g na formę			azotem
			25g na klin			
12	14,5kg surówki	400g (280+120)	75g gruby do pokrywy kadzi	0	0	Rafinacja w piecu (60s)
	12,2kg złom	(stary+nowy) 9%	100g drobny na lustro po			Rafinacja w kadzi
			50g na formę			azotem
			25g na klin			
13	14kg surówki	1,2m PE	75g gruby do pokrywy kadzi	0	0	Rafinacja w piecu (60s)
	12,4kg złom	16% Mg	100g drobny na lustro po			Rafinacja w kadzi
			50g na formę			azotem
			25g na klin			



Fundusze
Europejskie
Inteligentny Rozwój



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Tabela 3.4. Składy chemiczne uzyskane w wytopach podczas wytwarzania odlewów testowych

Nr wytopu	Skład chemiczny											
	Zawartość pierwiastka [%]											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al.	Mg	Fe
R8	1	4,12	2,73	0,03300	0,0480	0,0059	0,0250	<0,0025	0,01200	0,02300	0,03400	92,90
R8	2	3,79	2,74	0,03300	0,0540	0,0068	0,0250	0,0028	0,01300	0,02200	0,03100	93,20
R9.1	z pieca	4,31	1,68	0,01160	0,0289	<0,00050	0,0045	<0,0014	<0,00400	0,02050	0,00142	93,82
R9.2	po wszystkich	4,23	2,98	0,02190	0,0163	<0,00050	0,0071	<0,0014	<0,00408	0,03410	0,03360	92,56
R10.1	z pieca	5,24	1,69	0,01330	0,0173	0,00289	0,0011	<0,0014	<0,00400	0,00398	0,00078	92,92
R10.2	po wszystkich	4,11	2,89	0,02450	0,0194	<0,00050	0,0040	<0,0014	<0,00400	0,01120	0,00846	92,81
R10.3	po wszystkich	4,07	2,83	0,02650	0,0263	<0,00050	0,0054	<0,0014	<0,00400	0,01080	0,01060	92,90
R11.1	z pieca	4,45	1,81	0,01760	0,0283	0,00494	0,0027	<0,0014	<0,00400	0,00394	0,00096	93,56
R11.2	po wszystkich	>6,75	3,16	0,01980	<0,00120	<0,00584	0,0135	<0,0157	0,11600	0,02020	0,05380	<89,72
R11.3	po wszystkich	>6,36	3,45	0,01900	<0,00457	<0,00369	0,0129	<0,0048	<0,0570	0,01380	0,03270	<89,93
R12.1	z pieca	4,04	1,61	0,01130	0,0328	0,00801	0,0026	<0,0014	<0,00400	0,00303	0,00104	94,17
R12.2	po wszystkich	3,92	2,90	0,01990	0,0190	<0,00050	0,0054	<0,0014	<0,00400	0,01230	0,02120	92,98
R13.1	z pieca	4,03	1,67	0,04120	0,0503	0,00452	0,0164	0,0083	<0,0233	0,00306	0,00163	94,05
R13.2	po wszystkich	3,98	2,87	0,04510	0,0411	<0,00236	0,0188	0,0091	<0,00615	0,02080	0,03900	92,90
R14.1	z pieca	3,70	1,61	0,04070	0,0368	0,00624	0,0114	0,0119	<0,00400	0,00363	0,00180	94,45
R14.2	po wszystkich	4,18	2,79	0,07430	0,0138	<0,00191	0,0107	0,0071	<0,00651	0,01310	0,02850	92,80
R15.1	z pieca	3,90	1,64	0,03140	0,0246	0,00629	0,0041	0,0080	0,01120	0,00324	0,00110	94,25
R15.2	po wszystkich	3,68	2,76	0,06440	0,0219	<0,00076	0,0056	0,0083	<0,00400	0,01470	0,03590	93,29
R16.1	z pieca	4,10	1,61	0,04220	0,0321	0,00584	0,0062	0,0065	<0,00400	0,00300	0,00159	94,07
R16.2	po wszystkich	3,80	2,86	0,02850	0,0005	0,00802	0,0080	0,0074	0,00702	0,01890	0,02470	93,02

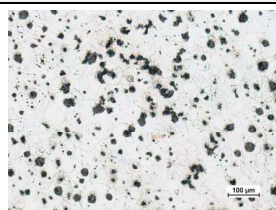
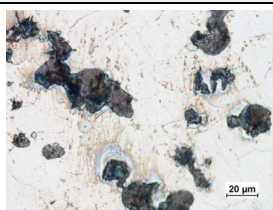
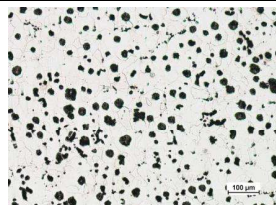
Odlewy testowe wykonywano w trakcie ośmiu kontrolowanych wytopów. Operowanie w trakcie wytopów stosunkowo niewielką objętością metalu czyni warunki wykonywania niestabilnymi. Dość szybko następuje strata temperatury metalu, zmienia się stopień przyswojenia magnezu z zaprawy oraz skuteczność modyfikacji. W każdym wytopie, obok wykonania testowego odlewu wykonywano również odlew wlewka próbnego typu Y2, oraz wykonywano próby technologiczne do oceny skłonności do zabielen oraz wykonywano próbę analizy termicznej derywacyjnej ATD.

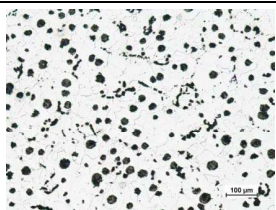
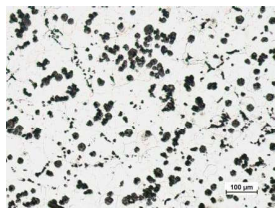
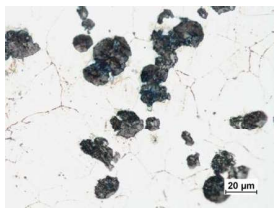
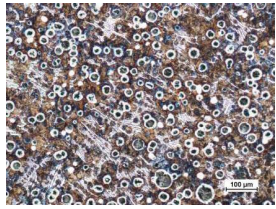
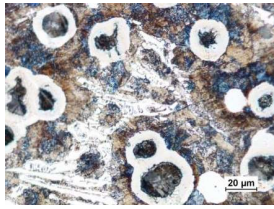
Ocenę jakości odlewów dokonywano dwoma metodami, tj. na drodze oceny udarności próbek pobranych w odlewów oraz ocenę mikrostruktury metalograficznej na próbkach po wykonaniu próby udarności. Miejsca wycinania próbek do badań zaznaczono na odlewie, rys. 3.11. Celem prac badawczych było uzyskanie właściwości mechanicznych (udarności) w odlewie odpowiadających właściwością żeliwa żeliwo EN GJS 400-18 – LT. Chodzi tu przede wszystkim o udarność w temperaturze $T = -20^{\circ}\text{C}$. Wykonano również badania struktury metalograficznej żeliwa, tabele 3.5.

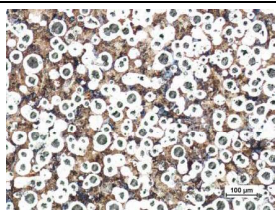
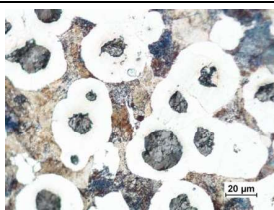
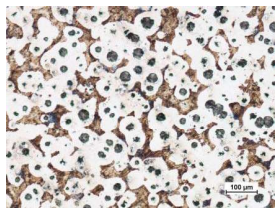
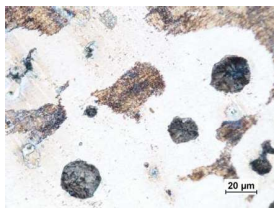
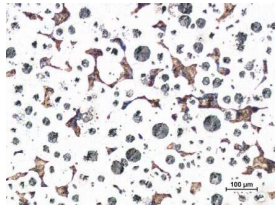
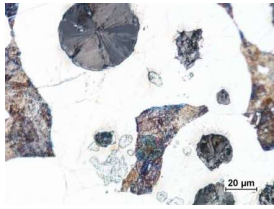


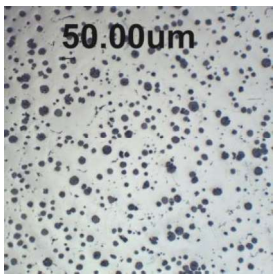
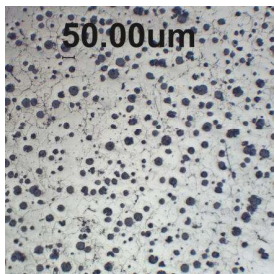
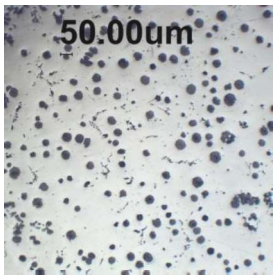
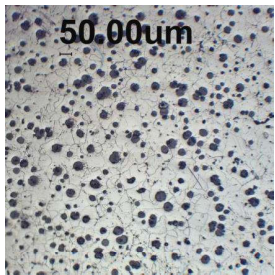
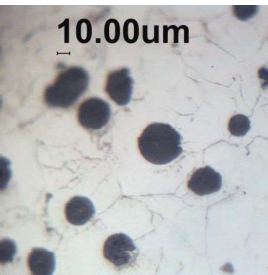
Rys. 3.12. Odlew próbny wykonany w technologii z podwójną rafinacją z zaznaczeniem miejsca pobierania próbek do badań udarności, żeliwo EN GJS 400-18 - LT.

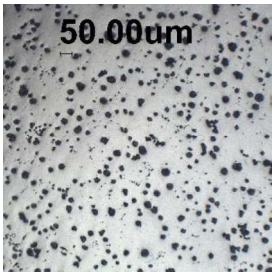
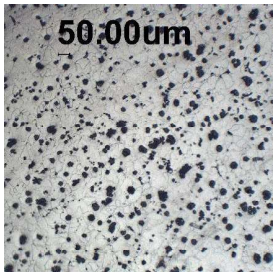
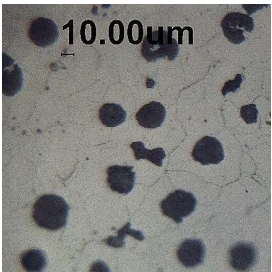
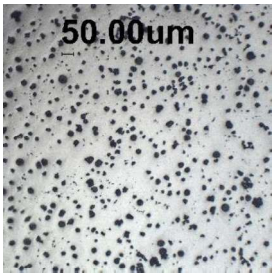
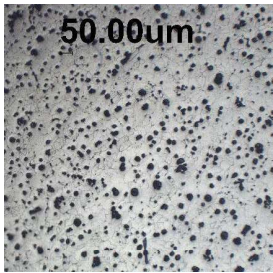
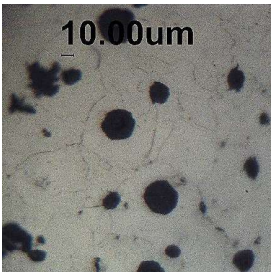
Tabela 3.5. Wybrane struktury metalograficzne w próbkach pobieranych z: odlewów próbnych, wlewków Y2 oraz próby schodkowej

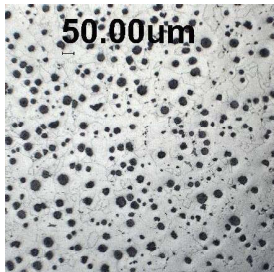
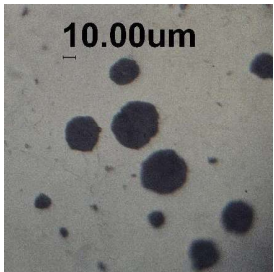
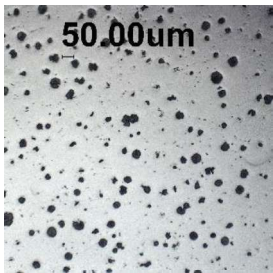
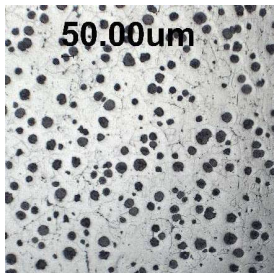
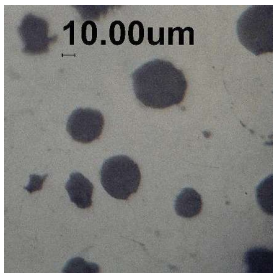
Numer wytopu	Miejsce pobrania próbki	Zdjęcie struktury badanego zeliwa			Opis struktury zeliwa
		Przed trawieniem	Po trawieniu 3% nitałem		
		pow. 100x	pow. 100x	pow. 500x	
R10	walek	-			Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i wermikularnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm, około 100 kulek /mm ²
R11	próbka Y	-			Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm, około 100 kulek/mm ²

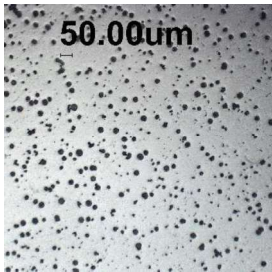
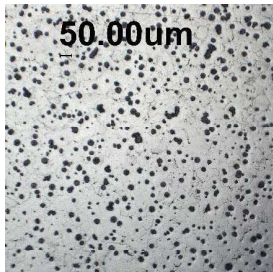
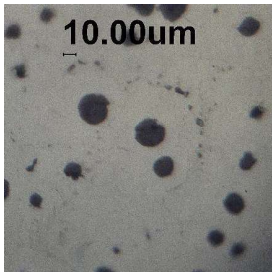
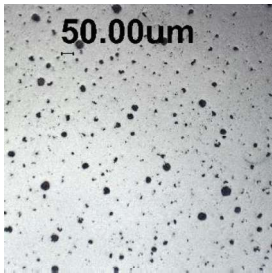
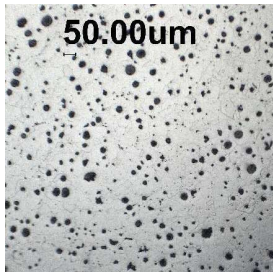
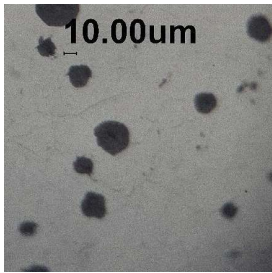
R11	odlew (dolna część)	-			Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i wermikularnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 75 kulek/mm ²
R11	odlew (górna część)	-			Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i wermikularnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 50 kulek/mm ²
R12	schodek 4 mm	-			Osnowa perlityczno-ferrytyczna, eutektyka fosforowa z dużymi wydzieleniami cementytu, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 125 kulek/mm ²

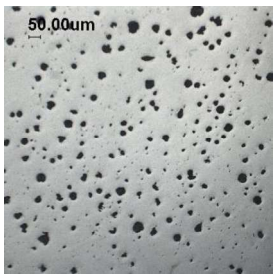
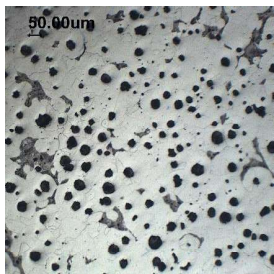
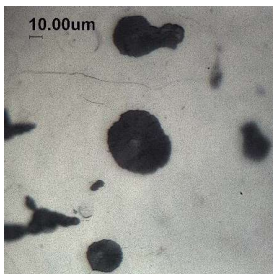
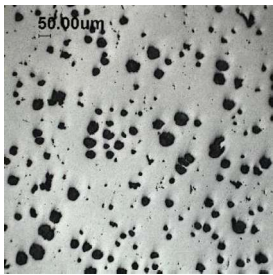
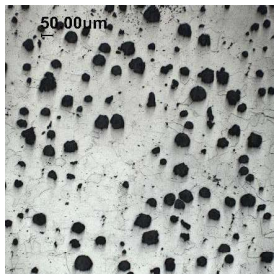
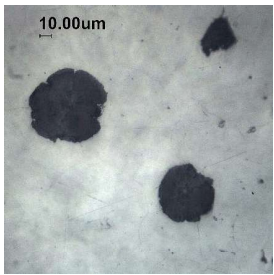
R12	schodek 8 mm	-			Osnowa perlityczno-ferrytyczna, grafit sferydalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 100 kulek/mm ²
R12	schodek 16 mm	-			Osnowa ferrytyczno-perlityczna, grafit sferydalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 75 kulek/mm ²
R12	schodek 27 mm	-			Osnowa ferrytyczno-perlityczna, grafit sferydalny o wielkości odpowiadającej klasie 40-60 µm, około 50 kulek/mm ²

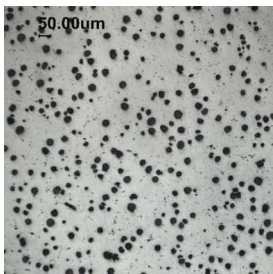
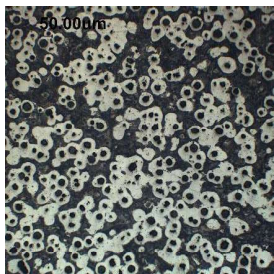
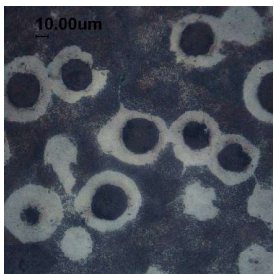
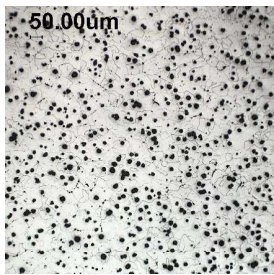
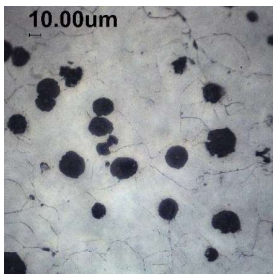
R12	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 125 kulek/mm ²
R12	odlew				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, nieregularnego grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 µm, około 100 kulek/mm ²

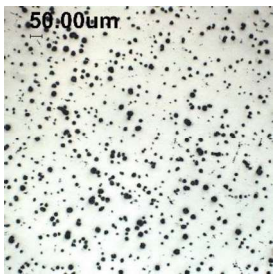
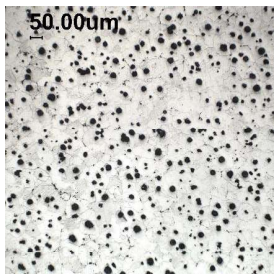
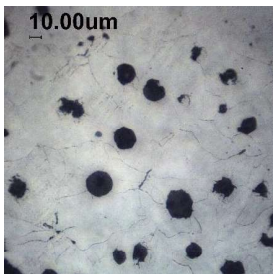
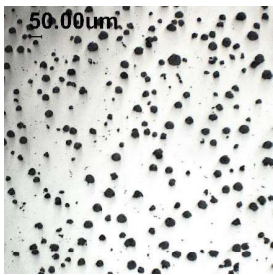
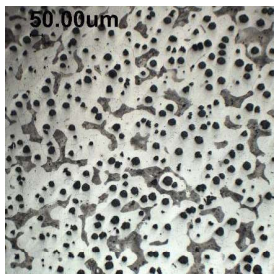
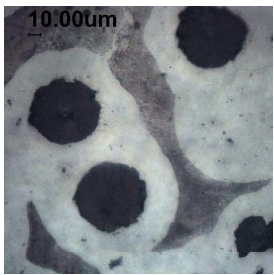
R13	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, nieregularnego grafitu sferoidalnego sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm , około 150 kulek/ mm^2
R13	odlew				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, nieregularnego grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm , około 175 kulek/ mm^2

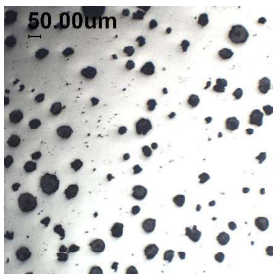
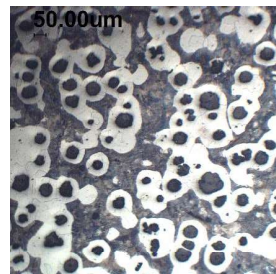
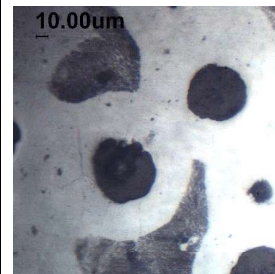
R14	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i nieregularnego grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm, około 100 kulek/mm^2
R15	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i nieregularnego grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 40-60 μm, około 75 kulek/mm^2

R15	odlew				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie do 25 μm , około 200 kulek/ mm^2
R16	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i nieregularnego grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie do 25 μm , około 100 kulek/ mm^2

R17	próbka Y				Osnowa ferrytyczno-perlityczna, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm , około 75 kulek/ mm^2
R17 OC	próbka Y				Osnowa ferrytyczna, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 60-100 μm , około 50 kulek/ mm^2

R18	walek				Osnowa perlityczno-ferrytyczna, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie do 25 μm , około 175 kulek/ mm^2
R19	Schodek 30 mm (brzeg)				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie do 25 μm , około 250 kulek/ mm^2

R19	schodek 30 mm (środek)				Osnowa ferrytyczna, występowanie grafitu sferoidalnego i wermikularnego, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie do 25 μm , około 250 kulek/ mm^2
R20	schodek 30 mm (dół)				Osnowa ferrytyczno-perlityczna, grafit sferoidalny o wielkości odpowiadającej klasie 25-40 μm , około 125 kulek/ mm^2

R20	Schodek 30 mm (góra)				Osnowa perlityczno-ferrytyczna. Grafit sferydalny o wielkości odpowiadającej klasie 60- 100 μm, około 50 kulek/mm^2
-----	----------------------	--	--	---	--

W ramach analizy wydzielen grafitu, z użyciem programu Image J prowadzona jest równolegle pełniejsza forma oceny tych wydzielen. Prace są na etapie oceny przydatności tego programu do oceny wydzielen grafitu. W tabeli 3.6 (poniżej) zestawiono wyniki próbnych testów dla próbek z kilku wytopów. Materiał pobierano zarówno z odlewu jak i wlewków Y2 jak i próby schodkowej do oceny wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia. Typowy przedział liczby kulek w próbkach z przeprowadzonych wytopów zawiera się od około $150 \div 300$ 1/mm². W projekcie dąży się, do uzyskanie stopnia rozdrobnienia wydzielen na poziomie nie najmniej 225 kulek. Już na etapie pierwszych prób nad optymalizacją technologii uzyskiwano większa liczbę wydzielen niemal w co drugiej próbie, chociaż testowano wiele elementów i wariantów technologii. Dużą liczbę wydzielen grafitu należy przypisać wielostopniowej (trójstopniowej) modyfikacji żeliwa.

Tabela.3.6. Wybrane parametry wydzielen grafitu grafitu

Numer wytopu	Miejsce pobrania próbki	Średnia liczba wydzielen na [mm ²]	Całkowita powierzchnia zajmowana przez wydzielenia grafitu [%]	Średnia średnica Fereta [mm]	Średni obwód wydzielen [mm]
R12	próbka Y	290	13,00	0,02687112	0,09130020
R12	odlew	175	11,50	0,03359972	0,12281110
R13	próbka Y	275	12,52	0,02858501	0,10216571
R13	odlew	305	11,87	0,02623435	0,09190692
R14	próbka Y	160	7,86	0,02881445	0,11363757
R15	próbka Y	129	7,14	0,50591085	0,11364064
R15	odlew	276	8,58	0,02349603	0,08553112
R16	próbka Y	145	4,40	0,02484044	0,11086142
R17	próbka Y	151	7,11	0,02817018	0,08852685
R17 OC	próbka Y	127	12,57	0,03981371	0,13901359
R18	walek	225	11,19	0,02853565	0,09017630
R19	schodek 30 mm (brzeg)	343	8,74	0,02112098	0,06351452
R19	schodek 30 mm (środek)	333	8,55	0,02089537	0,06323657
R20	schodek 30 mm (dół)	159	10,92	0,03360294	0,10905683
R20	schodek 30 mm (górze)	70	10,86	0,04761393	0,16640484

Materiał dokumentujący uzyskiwane mikrostruktury tab. 3.5) obejmuje:

- Wlewki próbne typu Y
- Odlewy pierścienia
- Odlewy próby schodkowej

Z punktu widzenia normy ocenie należy poddawać próbki pobrane z wlewków próbnych typu Y2. Pozostałe badania są jedynie uzupełniające. Dla oceny możliwości wytwarzania odlewów z badanego gatunku żeliwa uwagę należy skupić również na mikrostrukturze w odlewach.

Celem nadrzędnym prowadzonych prób było uzyskanie w znormalizowanych wlewkach Y2 mikrostruktury czysto ferrytycznej. Ponadto, dążono do uzyskania kulkowej postaci grafitu i wysokiego rozdrobnienia jego wydzielen. **Proces rafinacji dwustopniowej ciekłego metalu pozwalał na uzyskiwania żeliwa bez wtrąceń niemetalicznych.** Analizując obraz zgładów metalograficznych w próbkach pobranych z wlewków Y2 i z odlewów testowych można zauważyć, iż:

- Na zgładach po trawieniu Nitaliem **nie występują wtrącenia niemetaliczne** ani też eutektyka fosforowa, która zawsze nadaje dużą kruchość żeliwu i ogranicza jego udarność i plastyczność.
- W wytopach z przedziału nr 8 – nr 16, w trakcie, których wykonywano odlewy uzyskiwano **osnowę czysto ferrytyczną** tak we wlewku próbnym jak i w odlewie. Osnowa perlityczna pojawia się w cienkich ściankach próby schodkowej. W tych częściach odlewów obserwuje się zwiększenie szybkości stygnięcia, co sprzyja powstawaniu struktury perlitycznej.
- Dążenie do uzyskania ferrytycznej osnowy, której konieczność wynika z dążenia do nadaniu żeliwu wysokiej plastyczności i wysokiej udarności skłania do stosowania nadeutektycznych składów żeliwa. Takie gatunki żeliwa zachowują dużą zdolność do grafityzacji. Niestety, nadeutektyczne żeliwo, szczególnie przy $Sc > 1,10$ ma skłonność do tworzenia "dużych" wydzielen grafitu i małej ich ilości, co zmniejsza udarność żeliwa. Dla uzyskania wysokiej zdolności do grafityzacji (osnowa ferrytyczna) i uzyskiwania drobnych wydzielen grafitu **koniecznym staje się zastosowanie wielostopniowej modyfikacji.**



- W ramach uszlachetniania żeliwa w drodze obróbki pozapiecowej stosowano trzystopniową modyfikację, którą realizowano w następujący sposób:
 - I - modyfikacja zespolona ze sferoidyzacją. Modyfikator wprowadzany na dno kadzi lub na powierzchnię pokrywy w kadzi Tundish
 - II - modyfikacja po sferoidyzacji, którą w końcowych wytopach (Nr 20 i powyżej) prowadzono metodą dzwonową. We wcześniejszych wytopach metodą „na powierzchnię” metalu w kadzi zabiegowej.
 - III – modyfikacja końcowa polegała na wprowadzaniu modyfikatora na strugę przy zalewaniu form lub do zbiornika wlewowego podczas zalewania,
- Wysoką czystość metalu żeliwa uzyskiwano ponadto w wyniku stosowania filtrów piankowych o wielkości oczek odpowiadającym wskaźnikowi 10ppi. Filtry są niezbędne w technologii wytwarzania odlewów z żeliwa sferoidalnego gatunku EN GJS – 400 – 18 –LT.



Rys.3.13. Formy wlewków próbnych typu Y2 ze zbiornikami wlewowymi z filtrem

- Również, dla zbliżenia warunków odlewania wlewków próbnych typu Y2 do warunków zalewania form z filtrami umieszczonymi w układach wlewowych,

odlewanie wlewków powinno prowadzić się przez zbiorniki wlewowe z filtrem piankowym. Taka procedura wykonywania wlewów próbnych Y2 była stosowana we wszystkich próbach (wytopach), w których odlewano wlewki Y2, rys. 3.13.

3.2.5. Ocena udarności próbek pobranych z odlewów i z wlewków Y2

Zgodnie z normą, ocena klasy żeliwa odbywa się w oparciu o pomiar wskaźników wytrzymałości w tym udarności. W warunkach technicznego odbioru mogą być również uzgodnione badania na próbkach wyciętych z wlewków przyłanych do odlewu, których wymiary związane są z grubością odlewu.

W Projekcie równoległe z odlewaniem testowych odlewów wykonywano z tego samego żeliwa wlewki typu Y2. Próbki do badań udarności wycinano zarówno z wlewków próbnych jak i odlewów, jak pokazano to na rysunku 3.12. W tabeli 3.7 zestawiono wyniki badań udarności wyznaczone w próbkach z wlewków Y2 oraz z odlewów próbnych. Testowano wiele parametrów procesu wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze. Dlatego wyniki badań w wielu próbach nie spełniają wymagań żeliwa EN GJS 400-18-LT. W próbach chodziło również o to, aby poznać rolę (często negatywną) poszczególnych parametrów procesu w kształtowaniu końcowych właściwości żeliwa. Do grupy testowanych parametrów należy zaliczyć: skład chemiczny żeliwa, udział nim poszczególnych pierwiastków, zawartość resztkowa Mg, rola udziału pierwiastków perlitotwórczych, temperatura metalu na poszczególnych etapach, rola rafinacji, wpływ modyfikacji żeliwa, i jeszcze kilka innych czynników. Analizując wyniki badań udarności należy każdorazowo wiązać z uzyskaną mikrostrukturą, w tym wskaźnikami opisującymi grafit oraz wskaźnikami osnowy metalowej żeliwa, rodzajem osnowy.

Analizując wyniki badań udarności, szczególnie te uzyskane w drugiej serii prób, kiedy proces rafinacji dwustopniowej został dopracowany można zauważyć, iż zarówno w przypadku wlewków Y2 jak i odlewów próbnych, udarność określana na kilku próbkach (najczęściej 3) charakteryzuje się małym rozrzutem wyników. Tak jest w wytopach oznaczonych nr R14, R15, R16. Rafinacja pozwala ustabilizować wyniki

poprzez eliminację wtrąceń niemetalowych i wtrąceń gazowych, które są losowo rozmieszczane w objętościach próbki. Analizując wygląd zgładów w stanie po trawieniu daje się zauważyć, iż nie są obecne wtrącenia. Jest to cecha żeliwa po rafinacji dwustopniowej.

Tabela 3.7. Wyniki badań udarności w temp. od + 20°C do - 40°C

Nr wytopu	Nr próbki	Udarność	Udarność	UWAGI
		kG.m/cm ²	[J]	
R 3	3	1,70	16,677	
	3,4	0,85	8,339	-40
	3,5	1,20	11,772	-20
	3,6	1,40	13,734	-20
	3,7	0,85	8,339	-40
	3,8	0,70	6,867	-40
R 3 oc	31	1,95	19,130	
	32	1,95	19,130	
R 4	4	1,15	11,282	
R 5	5	1,30	12,753	
	5,6	0,55	5,396	-40
	5,7	0,75	7,358	-40
	5,8	0,55	5,396	-40
R 5 oc	51	2,10	20,601	
	52	2,35	23,054	
	5,4	1,05	10,301	-20
	5,5	1,25	12,263	-20
R6		0,25	2,453	-20
		0,25	2,453	-20
		0,20	1,962	-40
		0,20	1,962	-40
		0,20	1,962	-40
R -7 (odlew)	7.1	1,25	12,263	żeliwo nie w pełni sfero, osnowa ferryt,
	7.2	0,65	6,377	próbki z odlewu
	7.3	1,52	14,911	Nowa lanca
R -7 Klin)	7.1	1,96	19,228	żeliwo nie w pełni sfero, osnowa ferryt,
	7.2	1,75	17,168	próbki z klina Y (bez modyf. W zbiorn.)
	7.3	1,74	17,069	Nowa lanca
	7,4	0,99	9,712	-20

R7	7,2	0,45	4,415	-20
	7,1	0,45	4,415	-20
	7	0,45	4,415	-40
R -8(odlew)	8,1	2,49	24,427	żeliwo w pełni sfero, osnowa ferryt,
	8,2	2,85	27,959	próbki z odlewu , rafinacja
	8,3	2,54	24,917	Nowa lanca
	8,4	2,58	25,310	
R -8 (Klin)	8,1	1,16	11,380	żeliwo w pełni sfero, osnowa ferryt,
	8,2	1,27	12,459	próbki z klina Y (bez modyf. W zbiorn.)
	8,3	1,06	10,379	Nowa lanca
	8	0,95	9,320	-20
R8	8,6	0,40	3,924	-40
	8,7	0,65	6,377	-20
	8,8	0,80	7,848	-20
R-9 (D)	9.1	1,40	13,734	20°C
	9.2	1,35	13,244	20°C
	9.3	0,40	3,924	-40
R-9 (G)	9.1	0,80	7,848	20°C
	9.2	0,85	8,339	20°C
	9.3	0,50	4,905	-40
R-9 (Klin)	9.1	1,75	17,168	20°C
	9.2	1,60	15,696	20°C
	9.3	1,15	11,282	-20
	9.4	0,45	4,415	-40
R11 D	11,1	1,20	11,772	
	11,2	0,80	7,848	
	11,3	0,90	8,829	-20
R11 G	11,1	0,45	4,415	
	11,2	0,45	4,415	
	11,3	0,55	5,396	-20
R11 klin	11,1	1,15	11,282	20
	11,2	1,18	11,576	20
	11,3	1,05	10,301	-20
	11,4	1,05	10,301	-20
R12 odlew	12,1	1,25	12,263	20
	12,2	1,40	13,734	20
	12,3	0,75	7,358	-20
	12,4	0,65	6,377	-20
	12,5	0,35	3,434	-40

	12,6	0,35	3,434	-40
R12 klin	12,1k	1,65	16,1865	20
	12,2k	1,65	16,1865	20
	12,3k	1,23	12,0663	-20
	12,4k	0,60	5,886	-40
R13 odlew	13,1	1,15	11,282	20
	13,2	1,00	9,810	20
	13,3	1,05	10,301	20
	13,4	0,98	9,614	-20
	13,5	0,65	6,377	-20
	13,6	0,65	6,377	-40
R13 klin	13,1k	1,00	9,81	20
	13,2k	1,15	11,2815	20
	13,3k	0,99	9,7119	-20
	13,4k	0,80	7,848	-40
R14	14,1	1,65	16,1865	20
	14,2	1,65	16,1865	20
	14,3	0,95	9,3195	-20
	14,4	0,55	5,3955	-40
R15 odlew	15,1	1,50	14,715	20
	15,2	1,50	14,715	20
	15,3	1,55	15,206	20
	15,4	1,17	11,478	-20
	15,5	1,21	11,870	-20
	15,6	1,05	10,301	-40
R15 klin	15,1k	1,75	17,1675	20
	15,2k	1,75	17,1675	20
	15,3k	1,45	14,2245	-20
	15,4k	1,25	12,2625	-40
R16	16,1	1,68	16,481	20
	16,2	1,75	17,168	20
	16,3	1,66	16,285	20
	16,4	1,13	11,085	-20
	16,5	1,00	9,810	-20
	16,6	0,98	9,614	-20
	16,7	0,70	6,867	-40
	16,8	0,75	7,358	-40
R17	17,1	1,65	16,187	20
	17,2	1,66	16,285	20
	17,3	1,69	16,579	20
	17,4	0,75	7,358	-20

	17,5	0,75	7,358	-20
	17,6	0,45	4,415	-40
	17,7	0,45	4,415	-40
	17,8	0,48	4,709	-40
R19	19.1	1,40	13,734	20
	19.2	1,25	12,263	20
	19.3		0,000	-20
	19.4	0,80	7,848	-40
	19.5	1,15	11,282	20
	19.6	0,95	9,320	20
	19.7	1,00	9,810	-20
	19.8	0,80	7,848	-40
	19.III.1	1,10	10,791	20
	19.III.2	1,10	10,791	20
	19.III.3	0,95	9,320	-20
	19.III.4	0,70	6,867	-40

Podsumowanie wyników badań udarności:

Udarność jest podstawowym kryterium oceny klasy żeliwa w grupie do pracy w niskiej temperaturze. Zestawione wyniki badań udarności w tabeli 3.5 pokazują, iż dużo łatwiej jest wytwarzać żeliwo klasy EN GJS 400 – 18 –LT, które powinno charakteryzować się udarnością $U_{V(-20)} > 12J$ niż żeliwo klasy EN GJS 350 – 22-LT, którego udarność w temperaturze - 40°C wynosi odpowiednio $U_{V(-40)} > 12 J$. W obu przypadkach, jak wykazały przeprowadzone badania struktura osnowy powinna być „czysto” ferrytyczna a grafit musi mieć postać kulistą oraz musi być rozdrobniony. Liczba kulek na jednostkę powierzchni powinna w obu gatunkach powinna być nie mniejsza niż $N_{kulek} > 200 1/mm^2$.

Z tabeli 3.6 można wnioskować, iż **kryterium udarności odpowiadające gatunkowi żeliwa EN GJS 400 – 18 – LT** uzyskano w wytopach 3; 5; 14; 16; i 19. Udarność w temperaturze -20°C , w każdym pojedynczym pomiarze była powyżej 9J, lub średnia z trzech powyżej 12J.

Z tabeli 3.6 można wnioskować, iż **kryterium udarności odpowiadające gatunkowi żeliwa EN GJS 350 – 22 – LT** uzyskano w wytopie Nr 15. Udarność w

temperaturze -20°C , w każdym pojedynczym pomiarze była powyżej 9J, lub średnia z trzech powyżej 12J.

W serii wykonanych **7 sztuk odlewów** o masie 16kg każdy, żeliwo użyte do ich wytworzenia w **6 przypadkach** spełniało kryterium żeliwa **EN GJS 400 – 18 – LT** lub żeliwa **EN GJS 350 – 22 – LT**. Powtarzalność w uzyskiwaniu żeliwa do pracy w niskiej temperaturze w wytopach, w których odlewano testowe próby oraz próby klinowe Y2 stanowiące podstawę klasyfikacji żeliwa **wynosiła 85%**. Zebrane doświadczenie należy przenosić na warunki przemysłowe, które głównie na skalę obiektów (pieców, kadzi, seri odlewów) są naturalnie inne.

Badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych mają swoją specyfikę, która utrudnia osiągnięcie optymalnych warunków wytwarzania żeliwa wysokojakościowego (sferoidalnego) o strukturze czysto ferrytycznej. Operowanie małą ilością metalu prowadzi do szybkich spadków temperatury metalu, co utrudnia właściwą jego modyfikację prowadzoną na trzech etapach. Ponadto niska temperatura metalu nie sprzyja jego krystalizacji z osnową ferrytyczną. Z tych powodów zmniejszenia temperatury w wielu próbach podwyższano stopień nasycenia eutektycznego Sc, aby nadać większą zdolność do grafityzacji. Jednakże nadmierny udział grafitu, nadmierna jego ilość prowadzi do obniżenia udarności. Stąd w części prób (wytopów) nie osiągnięto zakładanych właściwości. Jednakże, dzięki dużej liczbie wytopów zostały określone warunki brzegowe i wartości poszczególnych parametrów procesu, przy zachowaniu, których możliwe jest wytwarzanie żeliwa sferoidalnego do pracy w niskiej temperaturze w technologii z podwójną rafinacją gazową, na etapie topienia żeliwa i na etapie obróbki pozapiecowej (sferoidyzacji).

4. Optymalizacja parametrów procesu sferoidyzacji

Badania, których wyniki obejmujące mikrostrukturę i udarność w niskiej temperaturze opisano powyżej prowadzono stosując technologię sferoidyzacji w dwóch wariantach: przy zastosowaniu kadzi smukłych ze szczelną pokrywą (technologii Tundish) oraz w technologii przewodu elastycznego PE. W przypadku technologii opartej na nisko magnezowych zaprawach FeSiMg stosowano zaprawę o zawartości $9,0 \div 11\%$. Zaprawy magnezowe do prób, które były używane w próbach to:

- VL 53 (M) z Cerem - 1-10 mm lub 8-30 mm
- VL 53 (O) - 1-10 mm lub 5-35 mm,

Badania prowadzono na zaprawach o wielkości ziarna $< 10\text{mm}$, co naturalnie wynika z małej objętości metalu.

W zakresie technologii sferoidyzacji z użyciem prętów PE w ofercie rynkowej powszechnie dostępne są przewody PE:

- Pręt EP 05 zawartość Mg = 16 % średnica pręta 13mm
- Pręt EP 26 zawartość Mg = 23% średnica pręta 13mm
- Pręt No17 zawartość Mg = 17% średnica pręta 13,6mm
- Pręt No 9 zawartość Mg = 42% średnica pręta 9mm

Laboratoryjne prototypowe urządzenie wykorzystywane w Projekcie do sferoidyzacji metodą PE dostosowane jest do wykorzystywania prętów o średnicy 13mm. Badania prowadzono stosując pręt EP 26 o zawartości magnezu 26%. W warunkach laboratoryjnych, z uwagi na szybkie spadki temperatury należy dążyć do zmniejszania czasów wykonywania poszczególnych zabiegów technologicznych. Dlatego wykorzystano PE z wyższą zawartością Mg.

Opracował

Dr hab. inż. Jerzy Zych, prof. nadzw.

Kraków 06.01.2020



**Rzeczpospolita
Polska**

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

