

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie żeliwa o bardzo wysokich właściwościach plastycznych i odporności na obciążenia dynamiczne w warunkach niskiej temperatury (-20°C) lub (-40°C) przy utrzymaniu wysokiego wskaźnika powtarzalności jest możliwe pod warunkiem równoczesnego spełnienia kilku warunków technologicznych. Badania przeprowadzone w ramach zadania 1, a wykonane w ramach Umowy Warunkowej w Akademii Górniczo-Hutniczej potwierdziły istnienie takiej możliwości. Jednym z kluczowych elementów nowej technologii jest dwustopniowa rafinacja żeliwa wykonywana na etapie roztopiania żeliwa (w piecu indukcyjnym, w którym roztopia się wsad metalowy) oraz druga rafinacja na etapie obróbki pozapiecowej żeliwa – po wykonaniu zabiegów sferoidyzacji i modyfikacji żeliwa w tzw. kadzi zabiegowej.

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 $U_v(-20) > 12\text{J}$ niż żeliwo klasy EN GJS 350 – 22-LT, którego udarność w temperaturze -40°C wynosi odpowiednio $U_{v(-40)} > 12\text{J}$. 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 $N_{\text{kulek}} > 200\text{ 1/mm}^2$.

Z tabeli 3.6 (zadania 3 w harmonogramie AGH) 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 tej samej 3.6 można wnioskować, iż **kryterium udarności odpowiadające gatunkowi żeliwa EN GJS 350 – 22 – LT** uzyskano w wytopie Nr 15. Udarność w temperaturze -40°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, serii odlewów) są naturalnie inne.

Daje to podstawę do uznania, iż **kamienie miłowe KM1** (*Opracowanie w skali laboratoryjnej technologii wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze i przy dynamicznych obciążeniach o parametrach wyznaczanych na znormalizowanych próbkach: żeliwo EN-GJS-350-22-LT: A5 >22% ; UV > 12J (przy T = minus 40oC) oraz żeliwa EN- GJS-400-18-LT : A5 >18% ,UV > 12J (przy temp. = minus 20oC)* **i kamień miłowy KM2** (*Opracowanie technologii z wykorzystaniem dwustopniowej rafinacji i instrukcji wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze i przy dynamicznych obciążeniach w warunkach Odlewni Drawski*) zostały osiągnięte, co stanowi podstawę do kontynuacji prac w ramach zadania 2.

Daje to również podstawę do opracowania **wytocznych (na podstawie doświadczeń w skali laboratoryjnej i walidacji) do Instrukcji wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze** i dynamicznych obciążeniach dla warunków technologicznych Odlewni Drawski (przeskalowanie do warunków rzeczywistego funkcjonowania, co przedstawiono poniżej.

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 udurowienia. 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).

W oparciu o zebrane i przeanalizowane wyniki badań uzyskane z ponad 20 kontrolowanych wytopów w piecu indukcyjnym zostały opracowane wytyczne do instrukcji wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze w warunkach

technologicznych Odlewni Drawski. Z uwagi na skalę doświadczeń realizowanych w Odlewni Doświadczalnej AGH, opracowanie pełnej technologii wytwarzania żeliwa będzie wymagać wykonania serii prób w skali makro – rzeczywistych warunkach istniejących w Odlewni Drawski S.A.

Wytyczne opracowane w ramach badań w odlewni AGH (Wydział Odlewnictwa) obejmują następujące elementy technologii wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze:

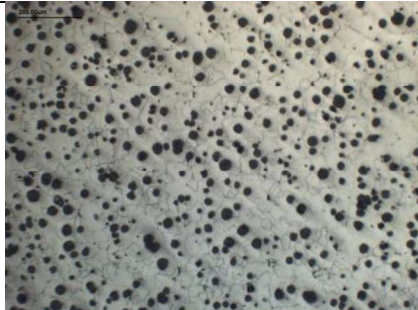
1. Opis struktury metalograficznej, którą należy uzyskać we wlewkach próbnych typu Y2, które stanowią podstawowy materiał do kwalifikowania stopu (żeliwa sferoidalnego) z punktu widzenia spełnienia wymagań w zakresie właściwości mechanicznych opisanych w normie,
2. Opis pośrednich wskaźników, jakości, których spełnienie jest konieczne dla osiągnięcia opisanych w normie właściwości żeliwa do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń w niskiej temperatury,
3. Określenia końcowego składu chemicznego żeliwa, który należy osiągnąć w procesie topienia i obróbki pozapiecowej żeliwa,
4. Określenie wytycznych o do struktury wsadu metalowego przygotowywanego do wytopów żeliwa, oraz wytycznych, co do zalecanej temperatury żeliwa na poszczególnych etapach procesu jego wytwarzania.
5. Opisanie technologii rafinacji z wskazaniem rodzaju gazu do rafinacji jak i wytycznych, co do czasu rafinacji, ciśnienia roboczego, ilości gazu,
6. Opracowanie wytycznych co do sposobu modyfikacji żeliwa, ilości dodawanych modyfikatorów, ich granulacji, momentu prowadzenia zabiegu modyfikowania,
7. Opracowanie wytycznych w zakresie kontroli procesu wytapiania, w tym wykonywania prób technologicznych, stosowania analizy termicznej, możliwości kontroli techniką ultradźwiękową,
8. Opracowanie zaleceń co do zasad projektowania technologii form, z uwzględnieniem wyznaczonych właściwości technologicznych.
9. Uwagi końcowe

Wytyczne do instrukcji wytwarzania odlewów

AD.1. Opis struktury metalograficznej, którą należy uzyskać we wlewkach próbnych typu Y2.

Jak wykazano to w wyniku prac badawczych osiągnięcie założonych wskaźników właściwości mechanicznych żeliwa gatunku EN GJS 400 – 18 LT lub żeliwa EN GJS 350 – 22 LT jest możliwe pod warunkiem osiągnięcia struktury czysto ferrytycznej, kulkowej postaci grafitu z ilością wydzieleni nie mniejszą niż 200 kulek/mm². Przykłady zalecanych struktur zestawiono w tabeli 1.

Tab.1. Zalecane mikrostruktury żeliwa do pracy w niskiej temperaturze

Wytóp	Wygląd mikrostruktury, traw. Nitaliem pow. x 100		Uwagi
R18			
R13			
R14			

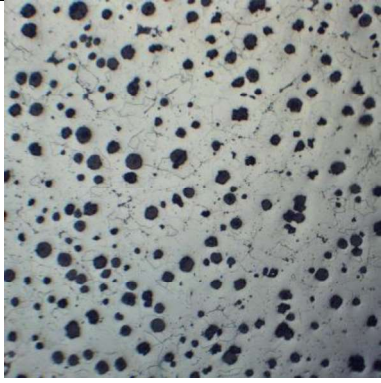
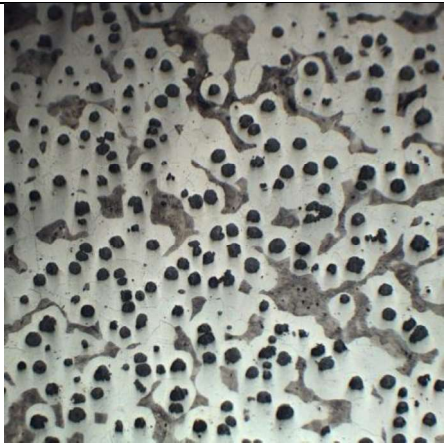
R15		
-----	---	--

Tabela 2. Niewłaściwe struktury żeliwa do pracy w niskiej temperaturze (przykłady)

Wytop	Wygląd mikrostruktury, traw. Nitałem pow. x 100	Uwagi
W 18		1. Zbyt duża zawartość Cu = 0,37%
W 20		1. Zbyt duża zawartość Cu = 0,17%

AD.2. Opis pośrednich wskaźników jakości, których spełnienie jest konieczne dla osiągnięcia opisanych w normie właściwości żeliwa do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń w niskiej temperaturze

Ocena końcowe wytworzonego żeliwa opiera się o badania wskaźników wytrzymałościowych (R_m) i wydłużenia (A_5) oraz badania udarności w wybranej temperaturze, to jednak dla wstępnej oceny można zalecić ocenę pośrednią. Powinna ona być również oceną pośpieszną, dającą wstępną ocenę w stosunkowo krótkim czasie.

W ramach projektu **opracowano nową, pośrednią metodę wstępnej oceny jakości wytworzonego żeliwa**, która oparta jest o pomiar jednego z parametrów ultradźwiękowy (pomiar szybkości propagacji fali w żeliwie - C_L) i pomiar twardości HB. Badania te należy wykonać na wlewkach próbnym Y2, który służy do wykonania właściwych próbek do badań zgodnych z normą. Żeliwo do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń charakteryzuje się kulkową postacią grafitu, a ten parametr stosunkowo dobrze określa się techniką ultradźwiękową, im bardziej kulista postać tym większa prędkość fali. Ponadto, żeliwo powinno mieć ośnowę ferrytyczną – a ten parametr najlepiej jest określać poprzez pomiar twardości HB, im więcej ferrytu – tym jest ona mniejsza. Na bazie tych dwóch wielkości można zbudować wskaźnik jakości żeliwa do pracy w niskiej temperaturze i mógłby on mieć postać równania 5.1:

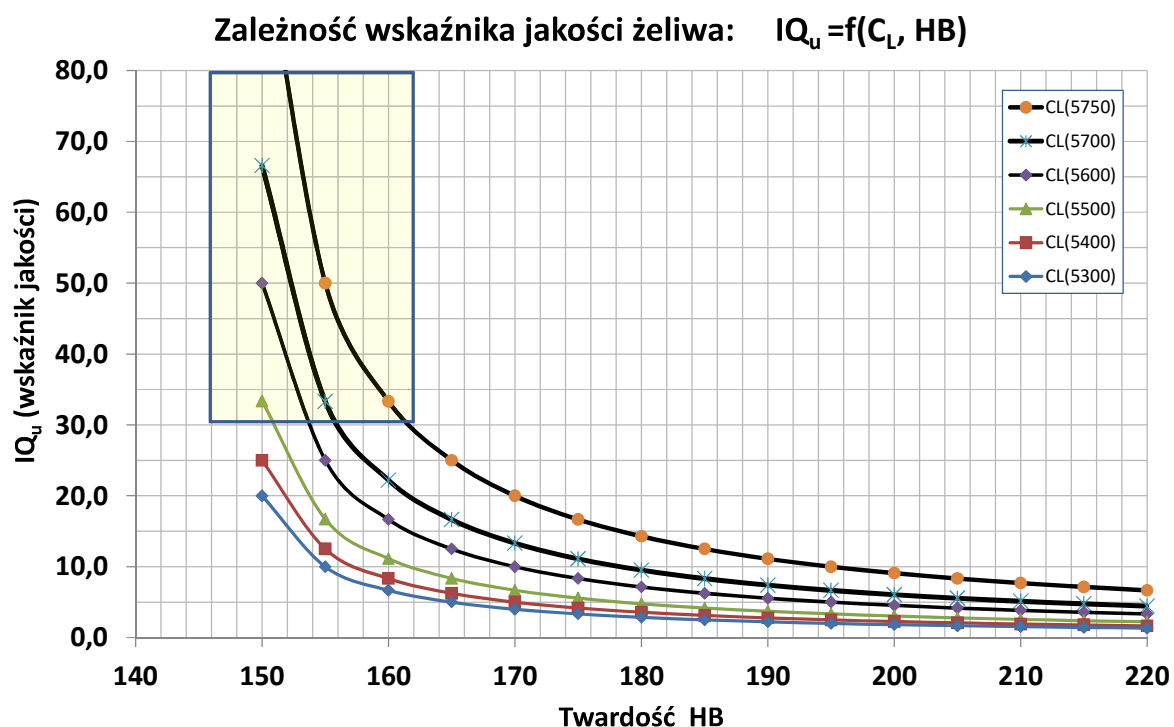
$$IQ_u = \frac{C_L}{HB} \quad (5.1)$$

Analiza uzyskanych w projekcie wyników wskazuje, iż dla zwiększenie „wrażliwości” wskaźnika IQ_u na zmiany twardości i prędkości fali, lepiej jest posłużyć bezwymiarowymi wielkościami: prędkości fali (S_{CL}) i twardości (S_{HB}). Wtedy wskaźnik IQ przyjmie postać równania 5.2:

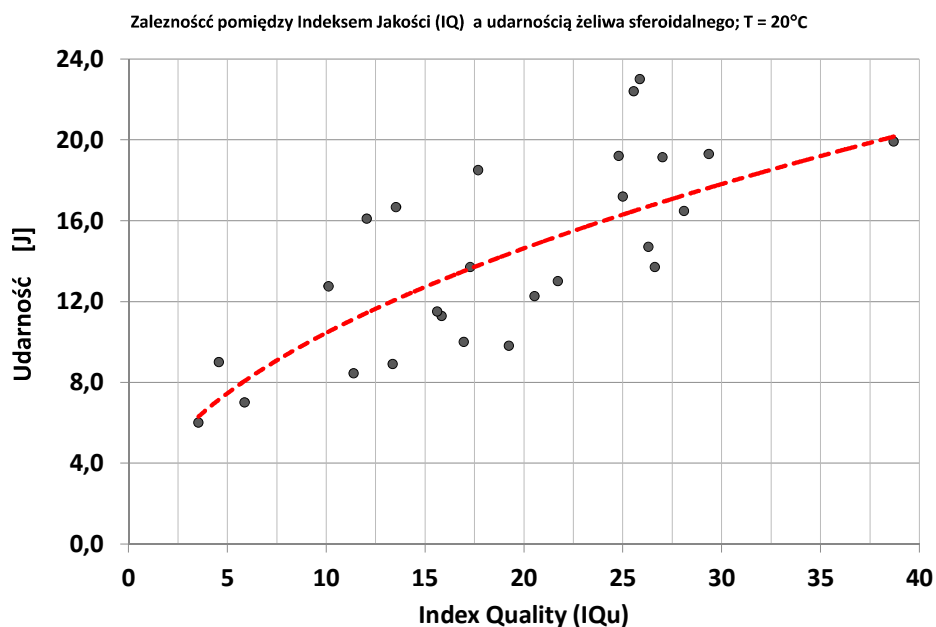
$$IQ_u = \frac{S_{CL}}{S_{HB}} \quad (5.2)$$

Na rysunku 5.2 przedstawiono zależność opracowaną dla żeliwa sferoidalnego i ośnową metalową, w której dominuje ferryt. Zależność opracowano dla przedziałów zmienności parametrów: $HB = 145 \div 220$, a prędkość fali mieści się w zakresie $C_L = 5300 \div 5750$ m/s. Dla osiągnięcia właściwości mechanicznych żeliwa klasy: EN GIS 400 -18-LT lub żeliwa EN GJS 350 – 22 – LT warunkiem koniecznych (ale nie wystarczającym) jest **osiągnięcie wartości wskaźnika jakości żeliwa do pracy w niskiej temperaturze powyżej 30 jednostek**. Wg wyznaczonych zależności, aby to osiągnąć prędkość fali

powinna być praktycznie $C_L > 5600$ m/s, a twardość mniejsza od: $HB < 160$ HB. Naturalnie, im wyższa wartość indeksu jakości, tym większa szansa uzyskania żeliwa spełniającego wymagania opisane w normie.



Rys. 5.1. Wskaźnik jakości (Index Quality) (IQ_u) żeliwa sferoidalnego oparty na wartościach prędkości propagacji fali ultradźwiękowej (C_L) i twardości HB.



Rys.5.2. Zależność pomiędzy wartością Indexu Quality, a udernością żeliwa sferoidalnego ferrytycznego

Na rysunku 5.2 przedstawiono zależność opracowaną na podstawie wyników badań zrealizowanych w Projekcie. Zależność pokazuje istnienie dobrej zależności pomiędzy Indeksą Quality a udarnością żeliwa sferoidalnego ferrytycznego, przeznaczanego do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń.

Opracowana metoda wstępnej oceny jakości żeliwa powinna zostać wprowadzona do instrukcji wytwarzania żeliwa EN GIS 400 -18-LT lub żeliwa EN GJS 350 – 22 – LT w Odlewni Żeliwa Drawski

AD. 3. Określenia końcowego składu chemicznego żeliwa, który należy osiągnąć w procesie topienia i obróbki pozapiecowej żeliwa

Skład końcowy żeliwa, obok szybkości stygnięcia i stanu fizykochemicznego (modyfikacja) jest kluczowym parametrem (czynnikiem) decydującym o mikro i makrostrukturze żeliwa. Wykonane prace badawcze, doświadczenie zebrane z kilkudziesięciu wytopów wykonanych w ramach projektu pozwoliły, na ustalenie optymalnych składów chemicznych dla uzyskania żeliwa **EN GIS 400 -18-LT lub żeliwa EN GJS 350 – 22 – LT w Odlewni Żeliwa Drawski**. Ze względu na dążenie do uzyskania również dobrych właściwości technologicznych (mała skłonność do tworzenia wad pochodzenia skurczowego) żeliwa powinno mieć skład lekko nadeutektyczny. **Zaleca się, aby współczynnik nasycenia eutektycznego S_c mieścił się w granicach:**

$$S_c = 1,04 \div 1,08$$

Szczegółowy skład chemiczny, zawartość poszczególnych pierwiastków powinna spełniać warunki określone w tabeli 5.2. W zadaniu podano w tabeli 3.1 zalecane zawartości głównie dla żeliwa klasy EN GJS 400-18-LT. Aby objąć oba gatunki żeliwa do pracy w niskiej temperaturze, skorygowaniu musi ulec zakres zmienności zawartości węgla i krzemu. Żeliwo do pracy w temperaturze - 40°C (EN GJS 350-22-LT) powinno mieć ograniczoną zawartość krzemu, który umacnia ferryt podwyższając wytrzymałość i równocześnie obniża plastyczność żeliwa (wydłużenie). **Zaleca się, aby w produkcji żeliwa w temperaturze -20°C (EN GJS 400-18-LT) utrzymać zawartość węgla do poziomu $C < 3,65\%$ i nieco wyższe zawartości krzemu do $Si = 2,50 \div 2,65 \%$.**

Dla żeliwa do pracy w temperaturze do -40°C (EN GJS 350-22 -LT) zaleca się obniżenie zawartości krzemu do $Si = 2,30 \div 2,45\%$ i podwyższenie zawartości węgla do zakresu $C = 3,65 \div 3,85$.

Zawartość pozostałych składników powinna być utrzymana zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 5.2.

Zawartość magnezu powinna być dobierane wg zasady: im grubsza ścianka odlewu, tym większa zawartość Mg, ale mieszcząca się w przedziale podanym w tabeli. 5.2.

Tab.5.2. Zalecane składy chemiczne żeliwa do pracy w niskiej temperaturze (do – 20 i do -40°C)

L.p.	Pierwiastek	Zaw. [%]	Uwagi
1	C	3,50 ÷ 3,85	
2	Si	2,30 ÷ 2,65	
3	Mn	< 0,15	
4	P	< 0,035	
5	S	<0,010	
6	Mg	0,040 ÷ 0,055	
7	Sc	1,04 ÷ 1,08	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 Rm 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

4. Określenie wytycznych o do struktury wsadu metalowego do wytopów żeliwa, oraz wytycznych, co do zalecanej temperatury żeliwa na poszczególnych etapach procesu jego wytwarzania.

Struktura wsadu metalowego wynika ze składów chemicznych poszczególnych jego składników, docelowego składu wytwarzanego żeliwa, zmian zawartości (zgary) w procesie topienia i kosztów wytwarzania. W procesie obróbki pozapiecowej żeliwa sferoidalnego (jego sferoidyzacji i modyfikacji) szczególnie dużym wahaniom podlega zawartość krzemu. W tabeli 5.3. zestawiono wyniki analizy zmian składu chemicznego

żeliwa wywołane pozapiecową obróbką. W obróbce pozapiecowej żeliwa, sferoidyzacji i modyfikacji można zaobserwować następujące zmiany (Tab. 5.3);

- Zawartość węgla zmniejsza się: $\Delta C \sim -0,20\%$, zakres tych zmian będzie zależeć od technologii topienia, wielkości pieca, temperatur procesu, itp.
- Zawartość krzemu zwiększa się średnio o około: $\Delta Si \sim +1,25\%$, i wynika to z wprowadzania zapraw FeSiMg jako sferoidyzatora oraz modyfikatorów, w których podobnie jak w zaprawie magnezowej jest około 75% Si. Aby nie przekroczyć zalecanej zawartości Si, składniki wsadowe (surówka, złom stalowy, inne) powinny zawierać małe ilości krzemu. Surówki specjalne przeznaczone do produkcji żeliwa sferoidalnego charakteryzują się niską zawartością Si. Przykładowy skład chemiczny takiej surówki podano poniżej:

C	=	4,456	%
Si	=	0,815	%
Mn	=	0,026	%
S	=	0,009	%
P	=	0,029	%

- Trzeci ważny pierwiastek, którego zawartość należy kontrolować w składnikach wsadu to mangan Mn o silnym działaniu perlitotwórczym. Jego zawartość w składnikach wsadu nie powinna **dać sumarycznie zawartości powyżej 0,15% (Mn <0,15%)**. Mangan jest składnikiem stali konstrukcyjnych (Mn ~ 0,60%) i dlatego nie nadają się one do wsadu żeliwa ferrytycznego. **Niektóre modyfikatory przeznaczone** do modyfikacji żeliwa perlitycznego mogą zawierać Mn, co będzie powodować jego zwiększanie w żeliwie. Należy unikać stosowania takich modyfikatorów. W realizowanych wytopach mangan zwiększał zawartość podczas obróbki pozapiecowej o około: $\Delta Mn = +0,02\%$

Tab. 5.4. Zmiany składu chemicznego żeliwa podczas obróbki pozapiecowej

Różnice składu wyjściowego i końcowego												
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al.	Mg	Fe
R3		0,27	1,13	0,0292	-0,016	0,0000	-0,0009	0,0007	0,0090	0,0129	0,0397	-1,48
R3	Z chemii	-0,22	1,03	0,0310	0,019	0,0002	-0,0020	0,0010	0,0020	0,0120	0,0228	-1
R4		-0,12	0,93	0,0283	-0,003	0,0000	0,0003	-0,0034	0,0011	0,0096	0,0287	-0,87
R5		0,29	1,06	0,0319	-0,027	0,0000	-0,0011	-0,0028	0,0085	0,0154	0,0256	-1,40
R7		-0,42	1,04	0,0050	0,008	-0,0005	0,0020	0,0000	0,0026	0,0220	0,0170	-0,70
R9		-0,08	1,30	0,0103	-0,013	0,0000	0,0026	0,0000	0,0001	0,0136	0,0322	-1,26
R11	Z chemii	0,17	1,49	0,0090	0,017	-0,005	-0,0060	0,0000	0,0029	0,0099	0,0280	-1,8
R12		-0,12	1,29	0,0086	-0,014	-0,0075	0,0028	0,0000	0,0000	0,0093	0,0202	-1,19
R13		-0,05	1,20	0,0039	-0,009	-0,0022	0,0024	0,0008	-0,0172	0,0177	0,0374	-1,15
R14		0,48	1,18	0,0336	-0,023	-0,0043	-0,0007	-0,0048	0,0025	0,0095	0,0267	-1,65
R15		-0,22	1,12	0,0330	-0,003	-0,0055	0,0015	0,0003	-0,0072	0,0115	0,0348	-0,96
R16		-0,30	1,25	-0,0137	-0,032	0,0022	0,0019	0,0009	0,0030	0,0159	0,0231	-1,05
R17		0,22	1,44	0,0371	-0,015	-0,0009	0,0045	-0,0030	0,0012	0,0158	0,0201	-1,72
R17	Z chemii	-0,08	1,29	0,0400	0,002	-0,0022	0,0060	0,0000	0,0020	0,0166	0,0250	-1,3
R18		0,42	1,64	0,0354	-0,017	-0,0070	0,0005	-0,0012	-0,1180	0,0160	0,0916	-2,06
R19		0,19	1,47	0,0348	-0,014	-0,0053	0,0018	0,0003	0,0208	0,0158	0,0539	-1,78
R20		-0,33	1,46	0,0355	-0,001	-0,0018	0,0010	0,0087	0,0155	0,0166	0,0351	-1,78
R21		-0,01	1,31	0,0250	-0,005	-0,0039	0,0035	0,0004	-0,0080	0,0113	0,0372	-1,78
Sumy wartości		0,09	22,63	0,42	-0,14	-0,04	0,02	0,00	-0,08	0,25	0,60	-24,93
Średnie odchylenie		0,005	1,257	0,02322	-0,00799	-0,00243	0,00111	-0,00011	-0,00439	0,01397	0,03328	-1,38500

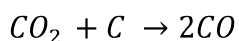
Struktura wsadu metalowego jest uwarunkowana docelowym składem. Przykład takiego składu podano tabeli 5.5. **Dla zachowania wysokiej zdolności do grafityzacji zaleca się stosować do wsadu udział surówki nie mniejszy niż 30%.** Pozostałe należy tak dobrać, aby osiągnąć zamierzony skład opisany wcześniej. **Opracowano nakładkę na arkusz Exela, która pokazana jest jako tabela 5.6, a pozwala na takie skonfigurowanie składu chemicznego, jaki chcemy osiągnąć.**

	Q = 27,5kg		Składy chemiczne elementów wsadu																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
--	------------	--	----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

AD.5.Opisanie technologii rafinacji z wskazaniem rodzaju gazu do rafinacji jak i wytycznych co do czasu rafinacji, ciśnienia roboczego, ilości gazu.

W drodze wielokierunkowych badań, w tym czystości powierzchni przełomów próbek żeliwa sferoidalnego wykazano, iż rafinacja dwustopniowa prowadzi do usuwania wtrąceń niemetalowych z kąpeli żeliwa. Badania udarności wykazały, iż w serii próbek wykonanych z tego samego wlewka Y, czy też odlewu rozrzuty wyników są bardzo małe. Wynika to z usunięcia z metalu wtrąceń niemetalowych, które losowo rozłożone w objętości wlewka/odlewu prowadziły do generowania dużych rozrzutów wyników, pogarszania jakości żeliwa. Należy podkreślić jednak, iż rafinacja żeliwa jedno czy dwustopniowa jest zabiegiem technologicznym wspomagającym uzyskiwanie wysokiej jakości żeliwa sferoidalnego. Jednak kluczowym elementem budowy żeliwa jest osiągnięcie czystej – ferrytycznej osnowy i maksymalnego stopnia sferoidyzacji (kulkowa, rozdrobniona postać wydzieleni grafitu). Krótkotrwała rafinacja (kilka minut) azotem a tym bardziej argonem nie wywiera wpływu na skład chemiczny. Przy wyraźnie dłuższej rafinacji (powyżej 10 min) , azot może przechodził do roztworu, sprzyjając perlityzacji osnowy.

Technologia rafinacji dwustopniowej żeliwa wymaga określenia parametrów wprowadzania gazu (czas rafinacji i ciśnienie) oraz dokonania wyboru w zakresie rodzaju gazu rafinującego oraz typu porowatych kształtek. W projekcie testowano dwa rodzaje gazu rafinującego: dwutlenek węgla i azot. **Przy krótkotrwałych (1÷ 2 minut) czasach rafinacji nie stwierdzono oddziaływania gazu rafinującego na skład chemiczny żeliwa.** Doświadczenia opisane w literaturze, jak i teoretyczne rozważania wskazywały na możliwość „odwęglania” żeliwa przy stosowaniu dwutlenku węgla w wyniku procesu rozpadu CO_2 na CO z pobieraniem węgla z kąpeli metalowej:



Niewielkie ilości gazu wprowadzane do metalu powodują, iż skutki tego procesu są niezauważalna, nie obserwuje się dodatkowego obniżania zawartości C w żeliwie. Podobnie jest z azotem, z tego samego tytułu (krótki czas rafinacji) nie zauważa się jego rozpuszczania się w żeliwie, w takim stopniu, aby zwiększała się tendencja do perlityzacji osnowy metalowej.

Z analizy stany techniki wynika, iż występuje istotny jest wpływ mieszania gazem na przebieg modyfikacji. Wprowadzany FeSi, wykazuje uzysk 82.5%, podczas gdy w przypadku rafinacji sięga 93%. Poprawia się jednorodność żeliwa. Zmniejsza się

ponadto skłonność do zabieleń. O ile w nieobrobionym żeliwie grubość warstwy zabilonej sięga 3 mm, o tyle po obróbce azotem nie przekracza 1.5 mm. Modyfikujące działanie przedmuchiwania na stop pojawia się jako skutek zmiany wielkości wydzieleni grafitu. W żeliwie z małym tlenem (2.5 ppm) działanie przedmuchiwania jest mało istotne, pojawia się dużo wyraźniej przy wyższym tlenie (5 ppm).

Podobne skutki były obserwowane w badaniach wykonanych w ramach projektu, jako skutek dwustopniowej rafinacji obserwowano: zmniejszenia wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia potwierdzona w próbach schodkowych, uzyskiwanie dużego rozdrobnienia wydzieleni grafitu, duża czystość na przełomach po próbie udarności, mały rozrzut wyników udarności wśród próbek wykonanych z jednego wlewka. To potwierdza brak (małe ilości) wtrąceń niemetalowych, które losowo rozkładane w objętości powodują duże rozrzuty wyników udarności w sytuacji kiedy nie stosuje się rafinacji.

Opisane pozytywne skutki potwierdzają osiągnięcie kamienia milowego Nr1, który dotyczył opanowania technologii rafinacji dwustopniowej w skali mikro. Na tej podstawie zaleca się umieszczenie w instrukcji wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze przygotowywanej przez Odlewnię Drawski wdrożenie dwustopniowej rafinacji.

Jakkolwiek w badaniach nie wykazały przewagi jednego z testowanych gazów rafinujących (azot czy CO₂) **to zdecydowanie częściej stosuje się azot w pojedynczej rafinacji i zaleca się jego stosowanie w podwójnej rafinacji, tak jak to prowadzono w skali mikro, w badaniach wykonywanych w AGH.**

W zakresie doboru porowatych kształtek ceramicznych testowano kształtki, które zalecane są przez producentów (zakłady ceramiczne) do rafinacji żeliwa. Przekrój kształtki pokazano na rysunku 5.3. **Testy wykazały, iż żywotność kształtki przekracza 25 prób (tyle wykonano wytopów), po tej serii nie obserwuje się zużycia kształtki ani też zmian zdolności do przepuszczania gazu.** Zaleca się wykorzystanie w próbach przemysłowych tego rodzaju (lub podobnej) budowy kształtki.



Rys. 5.3. Przekrój kształtki gazo przepuszczalnej stosowanej w dwustopniowej rafinacji

W ofercie handlowej rynku jest wiele zaleceń co do konstrukcji wkładek gazoprzepuszczalnych, jest to oferta głównie dla staliwa (rys.5.4). Żeliwo mniej obciąża termicznie wkładki, a zatem mogą być one wykorzystane również dla żeliwa. Ważnym elementem rafinacji jest miejsce zamontowania wkładki. **Uwzględniając doświadczenie zebrane w badaniach w skali mikro (AGH) zaleca się umieszczanie wkładek w dnie kadzi i w dnie pieca, a w przypadku kadzi Tundish na dnie tzw. kieszeni. Zaleca się również, przed umieszczeniem wkładki w wymurówce pieca/kadzi, umieszczanie wkładki w metalowej (blaszanej) obudowie z zewnątrz, dla ukierunkowania przepływu gazu do metalu, a nie do wymurówki.** Takie sposób mocowania wkładki pozwala na rafinację całej objętości metalu w piecu lub w kadzi, bez strat gazu rafinującego.

Wybrane formaty

Format	Szkic	Objętość	Wymiary			
		V	a	b	l	h
		[dm ³]	[mm]			
HB1		3,42				
HB1S		3,40				
HL1A		3,03				
OLA		12,62				

tolerancje wymiarowe: $\leq 230\text{mm} \pm 2\text{mm}$; $> 230\text{ mm} \pm 1\%$.

2019-09-04 Zakłady Magnezytowe "ROPCZYC"

Rys. 5.4. Przemysłowe kształtki gazoprzepuszczalne do kadzi

Kolejnym elementem technologii rafinacji jest określenie ciśnienia roboczego gazu rafinującego. **Ciśnienie robocze należy każdorazowo dopasować do wysokości słupa metalu (ciśnienia metalostatycznego).** Im wyższy słup metalu nad wkładką tym wyższe ciśnienie. Ciśnienie i wydatek gazu powinny być tak dobrane, aby przepływający gaz powodował widoczne drgania (lekkie falowanie) górnej powierzchni metalu. Zbyt duże ciśnienie/wydatek będą powodować efekt fontanny

metal, co jest zjawiskiem szkodliwym (utlenianie metalu) i nie powinno się do niego dopuszczać.

Zużycie gazu w procesie dwuetapowej rafinacji żeliwa, wg badań w skali mikro jest na poziomie ~ 0,5 litra/kg żeliwa. W literaturze zaleca się (przy jednostopniowej rafinacji) zużycie około **0,13 m³/Mg (0,13 l/kg)**.

PODSUMOWANIE RAFINACJI:

Analiza danych literaturowych dotyczących rafinacji stopów żelaza, w tym głównie żeliwa można podsumować następująco oraz badania wykonane w ramach projektu pozwalają na sformułowanie wniosków końcowych :

- **Spośród gazów technicznych możliwych do wykorzystania w celu rafinacji żeliwa, najmniej korzystnym jest dwutlenek węgla (CO₂), gdyż jego użycie może prowadzić do odwęglania żeliwa.**
- **Rafinacja, której celem jest usunięcie wtrąceń powinna trwać około 2,0 min. Zaleca się rafinację azotem.**
- **Rafinacja prowadzi dodatkowo do ujednorodnienia temperatury w kadzi oraz zwiększenia skuteczności modyfikacji**
- **Rafinacja prowadzi do odgazowania stopu, w tym do usunięcia wodoru i częściowo tlenu.**
- **Zalecana sumaryczna ilość gazu rafinującego wynosi nie więcej niż około 0,5l /kg żeliwa .**

AD. 6. Opracowanie wytycznych co do sposobu modyfikacji żeliwa, ilości dodawanych modyfikatorów, ich granulacji, momentu prowadzenia zabiegu modyfikowania

Ważnym elementem technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego w ogóle, a żeliwa sferoidalnego ferrytycznego jest modyfikowanie żeliwa. Jest to zabieg konieczny po wprowadzeniu magnezu dla przywrócenie zdolności żeliwa do grafityzacji. **Prace badawcze wykonane w ramach Projektu potwierdziły założenia wstępne o konieczności realizacji wielostopniowej modyfikacji.** Konieczne jest stosowanie modyfikacji na trzech etapach procesu wytwarzania. Sumarycznie wprowadza się około 1,0 – 1,2% modyfikatorów w stosunku do

masy metalu. I tak zaleca się wprowadzenie do instrukcji Odlewni Drawski wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze:

- **Modyfikacja wstępna (premodyfikacja)**, którą prowadzi się w kadzi równolegle ze sferoidyzacją. Modyfikator powinno się wprowadzić na dno kadzi lub na strumień podczas przelewania żeliwa z pieca do kadzi zabiegowej. Na tym etapie wprowadzana jest połowa docelowej ilości modyfikatora (0,50-0,60%). Granulacja modyfikatora powinna być nieco większa niż przy pozostałych etapach. Zaleca się granulację w granicach 0,8 – 1,0 cm, przy dużych objętościach metalu może ona być nieco większa.
- **Modyfikacja po sferoidyzacji**, powinna być prowadzona przy przelewaniu z kadzi zabiegowej do kadzi rozlewczej (do zalewania). Na tym etapie modyfikator powinien mieć mniejszą granulację, najlepiej wielkość ziarna 2,0 do 6,0mm. Wprowadza się około 0,30% w stosunku do ilości żeliwa.
- **Modyfikacja przy zalewaniu**, najczęściej realizowana metoda „na strugę” metalu. Ilość modyfikatora powinna się mieścić w zakresie 0,10 – 0,20%. Granulacja modyfikatora powinna być drobna (~2,0mm). Istnieje niebezpieczeństwo zbyt niskiej temperatury metalu na trzecim etapie. Modyfikacja przestaje być skuteczna (nie rozpuszczają się w pełni modyfikatory) jeśli temperatura obniża się poniżej 1320°C.

Ważne jest, aby na wszystkich etapach zabiegu stosować modyfikatory pozbawione pyłów, dobrze wysuszone (bez wilgoci) i odpowiednio świeże. Na rynku istnieje bardzo bogata oferta modyfikatorów, przeznaczonych głównie do wytwarzania perlitycznych gatunków żeliwa szarego lub sferoidalnego. Zawierają one dodatki sprzyjające perliyzacji (np. Mn, Cr, Zr). Ta grupa modyfikatorów nie powinna być stosowana, bowiem celem technologii jest wytwarzanie żeliwa ferrytycznego.

Inną grupę stanowią modyfikatory o silnym działaniu grafityzującym, które w swoim składzie zawierają: C, Ca, Al.. **Zaleca się, aby do modyfikacji stosować modyfikatory z tej grupy. Takie były testowane w trakcie realizacji projektu (między innymi Inoculoy). Ten wybór dotyczy przede**

wszystkim premodyfikacji (modyfikacja wstępna), bo na tym etapie wprowadzana jest największa część modyfikatorów.

Kontrolę skuteczności modyfikacji należy prowadzić techniką analizy termicznej, wykorzystując profesjonalne urządzenia typu ATAS lub ITAKA. Ocena skuteczności modyfikacji jest konieczna. W projekcie realizowano ją na trzech etapach, po roztopieniu żeliw, po sferoidyzacji (premodyfikacji) i modyfikacji wtórnej oraz po wykonaniu modyfikacji przy zalewaniu. Zaleca się pełne wdrożenie analizy termicznej do kontroli wytwarzania żeliwa sferoidalnego ferrytycznego.

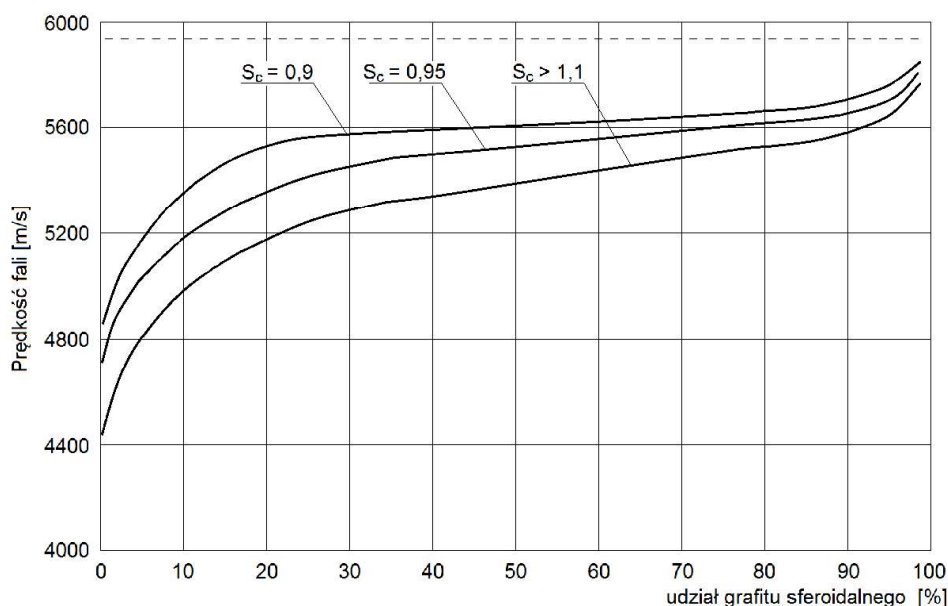
AD.7. Opracowanie wytycznych w zakresie kontroli procesu wytapiania, w tym wykonywania prób technologicznych, stosowania analizy termicznej, możliwości kontroli techniką ultradźwiękową.

Monitorowanie przebiegu procesu wytwarzania żeliwa w procesie z podwójną rafinacją powinno być realizowane kilkoma metodami. Jest to szczególnie ważne na etapie wdrażania tej nowej technologii.

Obok standardowej analizy spektrometrycznej składu chemicznego **należy kontrolować wskaźniki składu chemicznego: stopień nasycenia eutektycznego Sc oraz równoważnik węglowy CE metodą analizy termicznej derywacyjnej ATD.** Analiza termiczna jest, w zakresie wyznaczania tych dwóch kluczowych wskaźników składu chemicznego żeliwa, mniej zawodna, niż analiza spektralna. Dlatego zaleca się jej wdrożenie. Wszystkie wytopy próbne w skali mikro (próby w AGH) były prowadzone z wykorzystaniem analizy termicznej.

Wdrażana metoda ATD powinna być aplikowana w wersji z odlewaniem dwóch równolegle kubków próbnych, co jest konieczne dla szybkiej oceny zawartości Si w żeliwie. Zawartość Si jest podstawową wielkością decydującą o strukturze ferrytycznej żeliwa, musi być utrzymywana w wąskim pasmie zakresu zmienności. **Stąd to zalecania o konieczność zastosowania analizy termicznej jako metody monitoringu procesu wytwarzania żeliwa sferoidalnego do pracy w niskiej temperaturze.**

Technika ultradźwiękowa, co wykazano już wcześniej jest podstawowym narzędziem w ocenie postaci wydzieleni grafitu w żeliwie. W ciągu procesu technologicznego powinna być ona stosowana na kilku etapach. Ocena żeliwa w próbkach i odlewach opiera się na wyznaczeniu wartości szybkości rozchodzenia się fali w żeliwie, a na tej podstawie dokonuje się oceny postaci wydzieleni grafitu, rys.5.5.



Rys. 5.5. Wpływ postaci grafitu na w żeliwie na prędkość fali ultradźwiękowej

Dla oceny skuteczności zabiegu sferoidyzacji żeliwa bezpośrednio po jego przeprowadzeniu (a przed rozlaniem metalu do form) opracowana została metoda ultradźwiękowa (przez J. Zych). Idea metody polega na odlaniu specjalnej próbki stosunkowo szybko stygnącej, schłodzeniu jej w końcowej fazie w wodzie do temperatury otoczenia i wykonaniu pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. **Wymiary próbki zostały tak dobrane, aby czas stygnięcia i czas wykonania pełnej oceny żeliwa nie trwały sumarycznie dłużej niż 2 minuty.** Na rysunku 5.6 widoczny jest zestaw pomiarowy stosowany w ocenie stopnia sferoidyzacji żeliwa. Prostopadłościenna próbka mająca kwadratowy przekrój ułatwia wykonywanie szybkich pomiarów, co jest konieczne do prowadzenia procesu technologicznego. Prędkość fali w próbce jest podstawowym kryterium oceny skuteczności procesu sferoidyzacji i stanowi

podstawę o skierowaniu metalu do zalewania form. We wdrożeniach przemysłowych metody przyjęto prędkość fali w próbce wynoszącą $\vartheta = 5640$ m/s jako prędkość minimalną. Test ten pozwala na szybką ocenę żeliwa, z punktu widzenia kulistości wydzielen grafitu. **Metoda stosowana w kilku odlewniach, (opracowana przez autora Raportu), na okres dopracowywania technologii wytwarzania żeliwa z dwustopniową rafinacją w Odlewni Drawski powinna być wdrożona.**



Rys. 5.6. Stanowiska do kontroli stopnia sferoidyzacji żeliwa, z widoczną próbką, głowicą i ultradźwiękowym próbnikiem materiałów.

To samo urządzenie ultradźwiękowe, jak wykazano w opisie wyników badan Projektu, powinno być wykorzystane do kontroli wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia. Źle przygotowane żeliwo ma tendencje do tworzenia silnie zróżnicowanej struktury, wtedy, kiedy grubości ścianek odlewu nie są jednakowe. Mówi się że żeliwo jest wrażliwe na szybkość stygnięcia. Dobrze przeprowadzona obróbka pozapiecowa żeliwa, modyfikacja i rafinacja obniżają tą wrażliwość. Kontrolę tej cechy żeliwa można prowadzić przez pomiar prędkości fali ultradźwiękowej w próbce o zróżnicowanej grubości ścianek. Pokazano to na rysunku 5.7. Małe różnice w prędkościach fali świadczą o istnieniu „jednakowych” struktur metalograficznych w poszczególnych segmentach próbki. **Zaleca się wdrożenie tej metody do procedury kontroli procesu**

wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze. Badania tej cechy żeliwa są szczególnie ważne w okresie dochodzenia do optymalnych parametrów technologii wytwarzania danego gatunku żeliwa.



Rys. 5.7. Kontrola wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia metodą ultradźwiękową.

AD.8. Opracowanie zaleceń co do zasad projektowania technologii form, z uwzględnieniem wyznaczonych właściwości technologicznych

Wytwarzanie odlewów z danego stopu obejmuje technologię przygotowania ciekłego metalu o odpowiednich parametrach i odpowiednim stanie fizykochemicznym oraz technologię wykonania odlewu. W tym drugim obszarze dla opracowania omodelowania odlewniczego (płyt modelowych, rdzennic) konieczna jest znajomość wielkości skurczu odlewniczego i skurczu objętościowego, który ma miejsce podczas stygnięcia metalu w stanie ciekłym oraz podczas krzepnięcia. Wyznaczone w trakcie badań wielkości skurczów wynoszą odpowiednio:

- Skurcz odlewniczy (liniowy) - $\beta = 0,50\%$
- Skurcz objętościowy (zasilania) $\varepsilon = 3,5\%$ dla form wilgotnych

Stosunkowo małe wartości skurczów wynikają z zjawiska zwiększania się objętości żeliwa podczas wydzielania się grafitu z fazy ciekłej i podczas wzrostu wydzielen kulkowych grafitu w stanie stałym.

W technologii formy dla tego gatunku żeliwa sferoidalnego (ferrytycznego), z uwagi na dużą rozszerzalność przedskurczową, występuje duża skłonność do rozpychania słabych form wykonywanych z mas wilgotnych (technologia linii formowania Disa). Konsekwencją tego zjawiska jest zwiększona skłonność do tworzenia porowatości skurczowej. **Fakt ten powinien być uwzględniony w instrukcjach wytwarzania odlewów z żeliwa sferoidalnego ferrytycznego.**

AD. 9. Uwagi końcowe

Zebrane, na bazie kilkudziesięciu wytopów w skali mikro, wytyczne dla instrukcji (technologii) wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze w skali makro dotyczą wszystkich elementów technologii. W skali makro wiele procesów ma nieco inną kinetykę, ale kluczowe parametry, wielkości i etapy będą bardzo podobny charakter. W skali mikro głównym problemem, który w dużo mniejszym zakresie występuje w skali makro, to są szybkie spadki temperatury metalu w kadzi zabiegowej. Obowiązuje tu prawidłowość, iż im mniejsza kadź, tym szybciej obniża się temperatura. **Pomimo tej niedogodnej specyfiki technologii w skali mikro osiągnięto parametry tworzywa zapisane w postaci kamieni milowych KM1 i KM2 co stanowi podstawę do kontynuacji prac w ramach Projektu. Osiągnięto, również wymagania zapisane kamieniem milowym KM3, czyli powtarzalność procesu na poziomie ponad 80%.** Partia odlewów nie była zbyt duża (8szt), ale każdy odlew to oddzielny wytop metalu. Powtarzalność dotyczy wytopów.

Opracował

Dr hab. inż. Jerzy Zych, prof. nadzw.

Kraków. 7.01.2020