

Niskostopowe staliwo konstrukcyjne

D. Bartocha*, J. Kilarski, J. Suchoń, C. Baron, J. Szajnar, K. Janerka

Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska,
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: dariusz.bartocha@polsl.pl

Otrzymano 29.07.2011; zaakceptowano do druku 31.08.2011

Streszczenie

Wykonanie odlewu konstrukcyjnego konkurencyjnego dla konstrukcji spawanych z wysokowytrzymałych stali wymaga przede wszystkim uzyskania staliwa o wysokiej jakości metalurgicznej. W pracy przedstawiono założenia, metodykę i wyniki badań, których celem było określenie najkorzystniejszych: konfiguracji i parametrów zabiegów metalurgicznych oraz sposobów modyfikacji, w aspekcie uzyskania staliwa niskostopowego o możliwie najwyższej jakości. Wykonano cykl wytopów staliwa niskostopowego wzorowanego na staliwie L20HGSNM, opracowano sposób argonowania w laboratoryjnym piecu indukcyjnym o pojemności 50kg, oraz przeprowadzono modyfikację dodatkami FeNb, FeV i sferoidyzatora MgCe. W trakcie wytopów zostały pobrane próbki staliwa bezpośrednio z pieca oraz wykonano szereg odlewów próbnych. Określono skład chemiczny wytopionego staliwa, zawartości O, N i H oraz oceniono wpływ dodatków na strukturę i charakter przełomów próbek udarnościowych.

Słowa kluczowe: Staliwo konstrukcyjne, Obróbka metalurgiczna, Modyfikacja, Argonowanie

1. Wprowadzenie, plan badań

Dzisiejsze wysokowytrzymałe materiały to przede wszystkim stale o wysokiej wytrzymałości gatunki S690Q – S960Q charakteryzujące się wartością $R_{e\ min} = 690-960$ MPa, które ponadto są dobrze spawalne, a także odporne na ścieranie. Niestety, kluczowym zagadnieniem spawalności stali o wysokiej wytrzymałości jest jej skłonność do pęknięć wywołanych procesami spawania i reakcją stali na cykl ciepno-odkształceniowy podczas spawania. Dlatego też w wielu przypadkach zamiast stali można stosować staliwo, które jako gotowa konstrukcja lana lub jej fragment wykonany metodą odlewniczą nie wymaga spawania lub spawanie jest w dużej mierze ograniczone. Stąd pojawia się temat odlewania ramion i wysięgników wielu maszyn, lecz aby spełnić wymagania lekkości konstrukcji, powinny być wykonane ze staliwa wysokowytrzymałego. Lekkość konstrukcji określa się jako stosunek gęstości wyrażonej w $[Mg \times m^{-3}]$ do R_e wyrażonej w [MPa], co stanowi podstawowy wskaźnik w doborze materiału na określone wyroby. Wartość tego stosunku dla staliwa

wysokowytrzymałego powinna wynosić poniżej 8×10^{-3} , podczas gdy dla dotychczas produkowanych staliw stopowych konstrukcyjnych jego wartość wynosi powyżej 15×10^{-3} , a dla stali węglowych nawet 30×10^{-3} . Polskie Normy nie przewidują staliwa wysokowytrzymałego, ale można do tego celu adaptować stale stopowe konstrukcyjne (przyjmując z pewną modyfikacją ich składy chemiczne), lub wykorzystać staliwa martenzytyczne z grupy staliw odpornych na ścieranie. Z pośród krajowych staliw konstrukcyjnych stopowych (PN-90/H-83161) i odpornych na ścieranie (PN-88/H-83160) najwyższe właściwości mechaniczne tj. R_m i R_e posiada staliwo L20HGSNM. Wysokie, według normy, $R_m > 1300$ MPa i $R_e > 1100$ MPa tego staliwa predysponuje je wręcz do zastosowania na wspomniane ramiona czy wysięgniki. Niestety w praktyce odlewnie nie gwarantują tak wysokich właściwości próbek przylanych zrzucając całą winę z reguły na nie najlepsze materiały wsadowe. Pewnie jest to tylko część prawdy, a poprawy tego stanu rzeczy w dużej mierze należy szukać w: doskonaleniu składu chemicznego wspomnianego staliwa, stosowaniu dodatków modyfikujących np. Ti, V, Nb, przestrzeganiu odpowiednich parametrów obróbki cieplnej, a przede wszystkim przez zwrócenie uwagi na technologię topienia

i obróbki pozapiecowej staliwa dążąc do ograniczenia w metalu różnego rodzaju defektów materiałowych jak pory gazowe, zażużlenia, wtrącenia niemetaliczne (tlenki, siarczki, krzemki itp.), mikropęknięcia itp. Stanowią one nieciągłości materiału, zmniejszające czynny przekrój elementów konstrukcyjnych, a więc osłabiają ogólną wytrzymałość i w wielu wypadkach są bardzo groźnymi koncentratorami naprężeń mogących doprowadzić do przedwczesnego zniszczenia części maszyn. Szczególne miejsce zajmują tu gazy takie jak tlen, azot i wodór, które dostają się do metalu głównie podczas procesów metalurgicznych. Pierwsze dwa zwykle tworzą związki chemiczne (tlenki, azotki), natomiast wodór występuje przeważnie w postaci gazowej gromadząc się na wszelkiego rodzaju defektach strukturalnych, wywołując porowatość, powstanie i rozwój pęcherzy oraz mikropęknięć. Co, w efekcie, prowadzi do gwałtownego spadku właściwości mechanicznych. W związku z powyższym celem prezentowanych badań było określenie, w cyklu eksperymentalnych wytopów staliwa wzorowanego na L20HGSNM, możliwości podwyższenia jego jakości w warunkach małej odlewni, poprzez odpowiednie prowadzenia wytopu i zastosowanie dodatków modyfikujących. Głównymi parametrami podlegającymi ocenie były: zawartość O, H i N, oraz struktura przelomów próbek pobranych z odlewów próbnych.

Plan eksperymentalnych wytopów obejmował wykonanie czterech dwu etapowych wytopów staliwa o składzie chemicznym wzorowanym na staliwie L20HGSNM. Planowane czynności w ramach każdego wytopu od momentu przegrzania po dodaniu żelazostopów przedstawiony został w tabeli 1.

Tabela 2.

Skład chemiczny staliwa L20HGSNM [%]

Table 2.

Chemical composition of L20HGSNM cast steel [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,18-0,25	0,7-1,0	0,8-1,1	<0,035	<0,03	0,6-0,9	0,1-0,2	0,9-1,2

Tabela 3.

Skład chemiczny materiałów wsadowych [%]

Table 3.

Chemical composition of charge materials [%]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Nb	CeM M	Mg	N [ppm]	O [ppm]	H [ppm]
Staliwo I	0,18	0,6	0,18	0,02	0,0085	1,6	0,77	1,69	0,03	0,23					126	106	<0,6
Staliwo II	0,14	0,48	0,4	0,025	0,03	0,75	0,5	0,8	0,06	0,088					245	133	<0,6
FeMn-HC	7,00	1,50	75,00	0,250	0,030												
FeMn-LC	1,31	1	79,93	0,1	0,001												
FeNb		1,04		0,12	0,1							65,2					
FeV	0,06	0,5	0,08	0,02	0,04				1		80,3						
MgCe		42,6							0,7				1,78	30			

Tabela 1.

Plan wytopów

Table 1.

Melting plan

Operacja	1	2	3	4
1 Pobranie próbki 0	1	1	1	1
2 Odtlenie	1	1	1	1
3 Argonowanie	0	1	1	1
4 Modyfikacja FeNb	0	1	0	1
5 Modyfikacja FeV	0	0	1	1
6 Pobranie próbki 1	1	1	1	1
7 Zalanie odlewu próbnego I	1	1	1	1
8 Odtlenie	1	1	1	1
9 Argonowanie	1	0	0	0
10 Modyfikacja FeNb	0	0	1	0
11 Modyfikacja FeV	0	1	0	0
12 Dodanie zaprawy MgCe	0	0	0	1
13 Pobranie próbki 2	1	1	1	1
14 Zalanie odlewu próbnego II	1	1	1	1

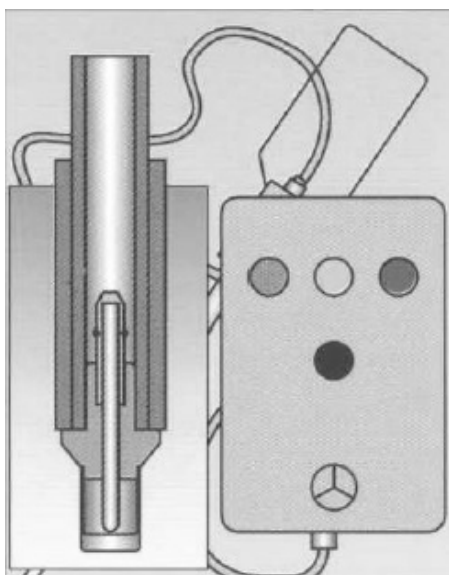
2. Materiał

Jak już wspomniano powyżej staliwem badanym było staliwo wzorowane na staliwie L20HGSNM o określonym w polskiej normie składzie chemicznym, który został przedstawiony w tabeli 2. Podstawowymi materiałami wsadowymi były dwa, wcześniej do tego celu wytopione staliwa, w tabeli 3 prezentującej składy chemiczne używanych w badaniach materiałów wsadowych i pomocniczych określone jako Staliwo I i Staliwo II. Miało to na celu ustalenie wpływu głównego materiału wsadowego stanowiącego prawie 98% masy całego wsadu na skład i zawartość zanieczyszczeń badanego staliwa.

3. Badania

Wytopy przeprowadzono w piecu tyglowym indukcyjnym o wyłożeniu kwaśnym o pojemności 50 kg, masa wytopionego staliwa wynosiła 40 kg. Poszczególne wytopy prowadzono zgodnie z założonym planem (tabela 1) szczegółowy przebieg wytopów wyglądał następująco.

1. Stopienie głównych materiałów wsadowych Staliwo I i Staliwo II wraz z materiałami żużlotwórczymi,
2. Dodanie FeMn-NC oraz Ni uruchomienie ochronnego nadmuchu argonu na lustro ciekłego metalu,
3. Przegrzanie kąpieli metalowej powyżej 1600°C,
4. Pobranie próbki przecikowej przy użyciu próbnika zanurzeniowego „T.O.S.” firmy Heraeus Electro-Nite (rys. 1),

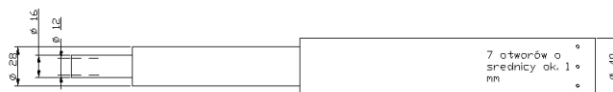


Rys. 1. System do pobierania próbki staliwa do oznaczania zawartości tlenu całkowitego firmy Heraeus Electro-Nite
Fig. 1. A system for sampling of cast steel for the determination of the total oxygen content, Heraeus Electro-Nite company

5. Odtlenienie kąpieli poprzez wprowadzenie do pieca 0,05kg Al i 0,06kg FeMn-LC,
6. Przeprowadzenie argonowania kąpieli przy pomocy lancy (rys. 2) wprowadzanej od góry pod kątem prostym do lustra ciekłego metalu, (z wyjątkiem wytopy nr 1 gdzie na tym etapie nie przeprowadzono argonowania).

Na podstawie analizy parametrów argonowania stosowanych w stalowniach ([1]) oraz kilku próbach zdecydowano we wszystkich przypadkach prowadzić argonowanie przez 1 min z przepływem 1,5 l/min. W wytopy nr 1 argonowania nie przeprowadzono w celu określenia wpływu operacji dotleniającej połączonej z argonowaniem i bez argonowania, na spadek zawartości O, N i H w staliwie. Operacja argonowania prowadzona w małych kadziach jako samodzielny proces rafinacji ma nieznaczny wpływ na obniżenie zawartości tlenu, zmniejsza jego zawartość tylko gdy początkowa jego ilość w metalu jest odpowiednio wysoka, w

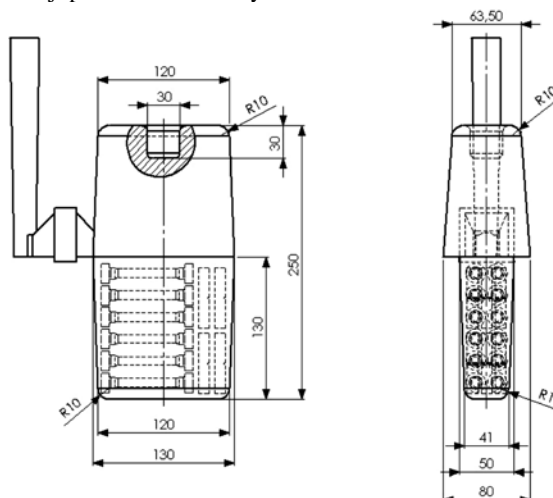
innych przypadkach zawartość tlenu wzrasta podobnie jak zawartość azotu [2].



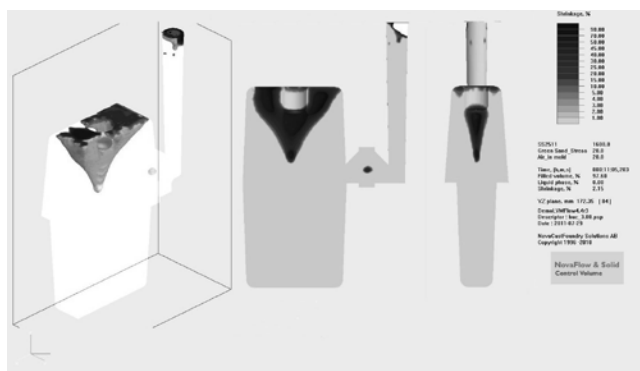
Rys. 2. Geometria lancy stosowanej do argonowania
Fig. 2. Lance for argoning geometry

7. Po przegrzaniu kąpieli metalowej powyżej 1600°C i upływie 2min pobranie kolejnej próbki przecikowej,
 8. Wprowadzenie dodatków modyfikujących,
 - a) Wytopy 1 bez modyfikacji,
 - b) Wytopy 2 dodatek 0,04kg FeNb,
 - c) Wytopy 3 dodatek 0,04kg FeV,
 - d) Wytopy 4 dodatek 0,04kg FeNb i 0,04kg FeV.
- Jako dodatki modyfikujące użyto żelazo-niobu i żelazo-wanadu, ze względu na stosunkowo wysoką tzw. „aktywność modyfikującą” niobu i wanadu [3], ponadto nawet niewielki dodatek tych pierwiastków w połączeniu z odpowiednią obróbką cieplną wpływa korzystnie na własności mechaniczne niskostopowego staliwa [4]. Naprzemienne, pkt. 8bc i 14bc oraz jednocześnie pkt. 8d wprowadzenie dodatków, pozwoli na określenie ewentualnego interaktywnego ich działania.
9. Przegrzanie kąpieli metalowej powyżej 1600°C i spust połowy metalu z odtlenieniem w kadzi przy pomocy 0,04kg Al,
 10. Zalanie odlewu próbnego,

W ramach każdego wytopy na określonym w planie etapie wykonywano odlew próbny (rys. 3). Masa odlewu wynosiła 15kg, a jego geometrię odlewu i nadlewu wzorowano na stosowanych w przemyśle odlewach próbnych do określania własności mechanicznych. Została ona tak dobrana, aby uzyskać odlew maksymalnie niepodatny na powstanie w nim wad odlewniczych pochodzenia skurczowego, co potwierdzają wyniki komputerowej symulacji przedstawione na rysunkach 4 i 5.

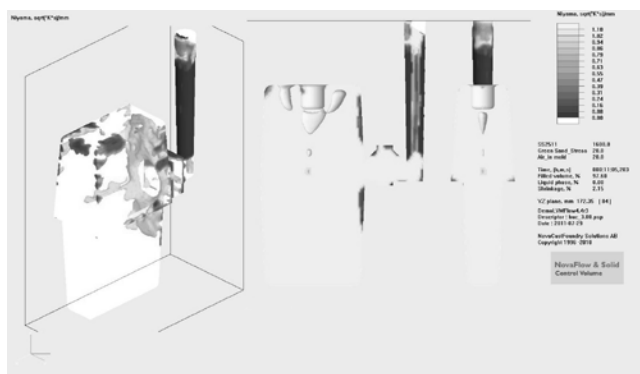


Rys. 3. Geometria odlewu próbnego
Fig. 3. Experimental casting geometry



Rys. 4. Symulowany rozkład wad skurczowych w odlewie próbnym

Fig. 4. Distribution of shrinkage defects in experimental casting, simulated



Rys. 5. Symulowany rozkład kryterialnej liczby Niyama w odlewie próbnym

Fig. 5. Distribution of Niyama criterion number in experimental casting, simulated

11. Przegrzanie pozostałego metalu powyżej 1600°C,
12. Odtlenienie kąpieli poprzez wprowadzenie do pieca 0,03kg Al i 0,03kg FeMn-LC, tylko wytop nr 1,
13. Przeprowadzenie argonowania kąpieli, tylko wytop nr 1,
14. Wprowadzenie dodatków modyfikujących,

Tabela 4.

Skład chemiczny staliwa z poszczególnych wytopów

Table 4.

Chemical compositions of melted cast steel

Nr wyt.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
1_1	0,27	0,35	0,80	0,029	0,029	1,02	0,67	1,31	0,06	0,16
1_2	0,25	0,46	0,74	0,029	0,026	1,02	0,66	1,30	0,10	0,16
2_1	0,22	0,47	0,86	0,027	0,022	1,08	0,64	1,33	0,19	0,17
2_2	0,22	0,49	0,80	0,028	0,026	1,08	0,65	1,33	0,15	0,16
3_1	0,22	0,44	0,96	0,028	0,022	1,05	0,63	1,30	0,20	0,16
3_2	0,24	0,46	0,93	0,029	0,025	1,11	0,64	1,30	0,04	0,16
4_1	0,23	0,47	0,92	0,030	0,023	1,11	0,65	1,35	0,02	0,17
4_2	0,25	0,67	0,88	0,029	0,022	1,16	0,66	1,36	0,05	0,17
Śr.	0,24	0,48	0,86	0,03	0,02	1,08	0,65	1,32	0,10	0,16
Odch. st.	0,018	0,088	0,075	0,001	0,003	0,048	0,013	0,024	0,069	0,004

- a) Wytop 1 bez modyfikacji,
- b) Wytop 2 dodatek 0,04kg FeV,
- c) Wytop 3 dodatek 0,04kg FeNb,
- d) Wytop 4 dodatek zaprawy MgCe ok. 0,03kg Mg.

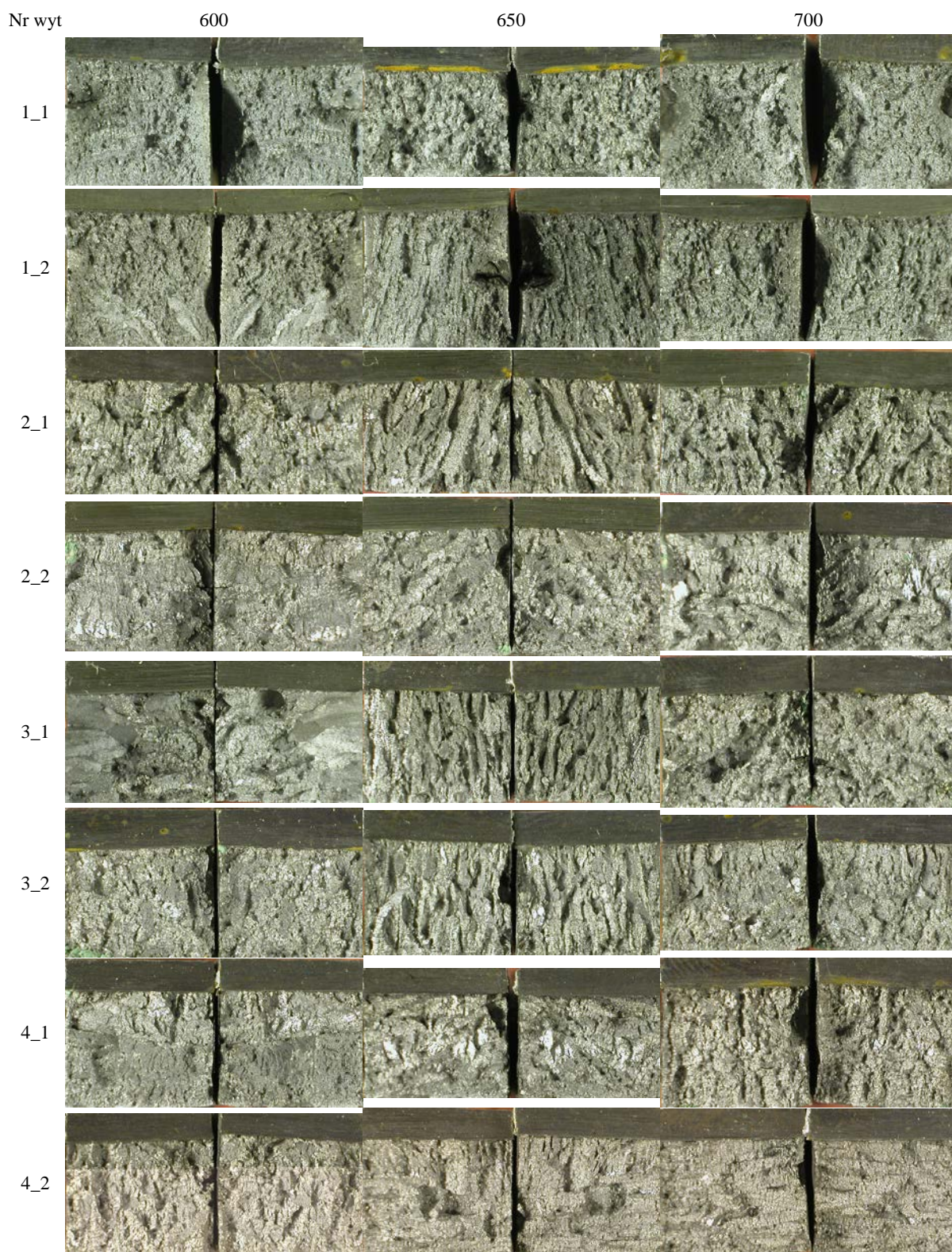
W czwartym wytopie zdecydowano się na zastosowanie zaprawy magnezowo-cerowej stosowanej jako sferoidyzator do żeliwa, ze względu na wartość „aktywności modyfikującej” tych pierwiastków. Wartość ta zarówno dla magnezu jak i ceru jest prawie stukrotnie wyższa w porównaniu do niobu, a w porównaniu do wanadu prawie pięćdziesięciokrotnie wyższa [3].

15. Po przegrzaniu kąpeli metalowej powyżej 1600°C i upływie 2min pobranie kolejnej próbki przecikowej,
16. Spust pozostałego metalu z odtlenieniem w kadzi przy pomocy 0,04kg Al,
17. Zalanie odlewu próbnego.

4. Wyniki

Analizy składu chemicznego badanego staliwa wykonano na próbkach pobranych z odlewów próbnych. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 4. W odniesieniu do staliwa L20HGSNM zawartości chromu i niklu zostały nieznacznie podniesione, a molibdenu ze względu na jego korzystny wpływ na własności mechaniczne zdecydowano się podnieść do zawartości powyżej 0,6%. Ze względu na kwaśne wyłożenie pieca trudna okazała się kontrola zawartości manganu i krzemu stąd też stosunkowo duże wahania zawartości tych pierwiastków. Zamierzonymi ich zawartościami było jak najniższe stężenie krzemu około 0,4%, a stężenie manganu, w górnej granicy przewidzianego dla staliwa L20HGSNM, czyli około 1,1%.

Zawartość tlenu całkowitego, azotu oraz wodoru, określono metodą topienia próbki, umieszczonej w tyglu grafitowym w analizatorze zawartości azotu, tlenu i wodoru TCHEN600 firmy LECO, wykorzystując próbki przecikowe pobrane w charakterystycznych fazach każdego z wytopów. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 5. Dla trzeciego wytopu równocześnie z pobraniem próbek przecikowych 0 i 1 określono zawartość aktywnego tlenu w topionym staliwie aparatem Celox firmy Heraeus Electro-Nite, zmierzone wartości podano w nawiasach.



Rys. 6. Przełomy próbek udarowościowych badanego staliwa,
 Fig. 6. Impact strength samples of investigated cast steel fractures

Tabela 5.
Zawartość O, N i H w staliwie z poszczególnych wytopów
Table 5.
Contents of O, N and H in cast steel

Nr wyt.	Nr pr.	N	O	H
1	0	200	128	<0,6
	1	211	37	<0,6
	2	231	31	<0,6
2	0	213	132	0,6
	1	234	43	<0,6
	2	241	40	<0,6
3	0	209	124 (56)	0,6
	1	202	34 (6)	<0,6
	2	249	47	<0,6
4	0	192	95	0,6
	1	202	42	<0,6
	2	227	47	<0,6

W nawiasach podano zawartość aktywnego tlenu zmierzoną bezpośrednio w ciekłym metalu aparatem Celox firmy Heraeus Electro-Nite

Do oceny efektu modyfikacji najszybszą wydaje się jakościowa ocena przełomów. W ramach badań z wykonanych odlewów próbnych wycinano próbki do badań własności mechanicznych. Standardowe próbki do statycznej próby rozciągania i próbki udarnościowe. Próbki poddano ulepszaniu cieplnemu, zahartowane próbki podzielono na trzy grupy i odpuszczono je w trzech różnych temperaturach [5]. Zdjęcia przełomów próbek udarnościowych przedstawiono na rysunku 6. Nie bez znaczenia na charakter i wygląd przełomu ma miejsce pobrania próbki, a co za tym idzie usytuowanie przełomu w odlewie próbnym oraz zawartość zanieczyszczeń metalicznych i niemetalicznych [6].

5. Podsumowanie i wnioski

Skład chemiczny badanego staliwa w poszczególnych wytopach różni się nieznaczająco. Jedynie zróżnicowanie zawartości krzemu wynosi ponad 10%, dla pozostałych jest to wartość poniżej 10% dla większości zaś poniżej 5%. Podobnie wyniki daje porównanie końcowych zawartości tlenu i azotu w odlewach próbnych. Zróżnicowanie zawartości tlenu to niecałe 15%, a azotu niecałe 8%. Można zatem uznać że różnice występujące w strukturze i własnościach staliwa z poszczególnych wytopów są następstwem sekwencji zastosowanych zabiegów metalurgicznych, zastosowanych dodatków o charakterze modyfikującym i warunków krzepnięcia. Ostatni czynnik także można uznać za nieznaczający ponieważ wszystkie odlewy były wykonywane w jednakowych formach przygotowywanych w ten sam sposób z takiej samej masy formierskiej, zaś temperatura zalewania zawierała się w przedziale 1620-1645°C.

Analizując charakter i wygląd przełomów można zauważyć, że najdrobniejsza struktura występuje w próbkach 1_1, więc staliwa odlenionego za pomocą Al i FeMn-LC nie poddanego argonowaniu, przełomy wykazują charakter ciągliwy i te próbki wykazały najwyższą udarność [5]. W kolejnych próbkach przełomy zmieniają się znacząco od krucho-ciągłego o

drobnym ziarnie próbki 1_2 do gruboziarnistych o dużym, transkystalicznym ziarnie, kruchych przełomów próbki 3_1. Korzystna poprawa następuje w próbkach z wytopu 4 szczególnie w próbkach 4_2 gdzie występuje wyraźne rozdrobnienie struktury w porównaniu do staliwa z dodatkiem V i Nb, dla tych próbek uzyskano także wyższe wartości udarności [5]. Podsumowując otrzymane wyniki można sformułować następujące wnioski:

1. Argonowanie spowodowało jedynie nieznaczne wahania zawartości O i N w badanym staliwie co potwierdza dane literaturowe [2], każdorazowo zanotowano przyrost zawartości N natomiast zawartość O w wytopach 1 i 2 nieznacznie się obniżyła a w wytopach 3 i 4 wzrosła,
2. Zastosowanie żelazomanganu niskowęglowego w połączeniu z aluminium spowodowało nawet czterokrotny spadek zawartości tlenu,
3. Dodatek żelazoniobu i żelazowanadu nie przyniósł spodziewanych efektów w postaci rozdrobnienia struktury staliwa,
4. Korzystny wpływ na rozdrobnienie struktury wykazał dodatek, tuż przed spustem staliwa, niewielkiej ilości sferoidyzatora w postaci magnezowo-cerowej zaprawy.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy N N508 585139.

Serdeczne podziękowania autorzy składają firmie Heraeus Electro-Nite Polska Sp z o.o. z Sosnowca za pomoc i udostępnienie aparatury pomiarowej.

Literatura

- [1] Anioła-Kusiak A., Lux A., Mamro K., Rzeszowski M.: Biblioteka metalurga – Metalurgia argonowa stali. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1981.
- [2] K.J. Hubner, J. Głownia: Metody argonowania stali w małych kadziach a czystość staliwa. Krzepnięcie Metali i Stopów, Rocznik 2, nr 44, Pan Katowice 2000.
- [3] J. Szymaszal, E. Krzemień, T. Zajac: Modyfikacja metali i stopów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1984.
- [4] T. Wachelko, M.S. Soński, A. Nowak: Podwyższenie własności staliwa niskostopowego przez wprowadzenia mikrododatków wanadu i niobu. Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 2, Pan Katowice 1980.
- [5] D. Bartocha, J. Kilarski, J. Suchoń, C. Baron, J. Szajnar: Wpływ temperatury opuszczania na własności niskostopowego staliwa. Archives of Foundry Engineering SI 3/2001, Gliwice 2011.
- [6] D. Bartocha, J. Suchoń: Struktura niskostopowego staliwa – ilościowa analiza zanieczyszczeń Archives of Foundry Engineering SI 3/2001, Gliwice 2011.

Low-alloy constructional cast steel

Abstract

Production of constructional casting competitive for welded structure of high-strength steel first of all required high metallurgical quality of cast steel. Assumptions, methodology and results of investigation which the aim was determination of the most advantageous: configuration and parameters of metallurgical treatments and ways to modify, in aspects of reach the low-alloy cast steel of the highest quality as possible, are presented. A series of low-alloy cast steel melts modeled on cast steel L20HGSNM was performed, the way of argoning in laboratory induction furnace with a capacity of 50kg was worked out, modifications with additions of FeNb, FeV and master alloy MgCe were performed. During each melts samples of cast steel direct from metal bath were get and series of experimental casting was made. Chemical compositions of melted cast steel, contents of O, N and H were determined as well as influence of additions on structure and nature of impact strength samples fracture were estimated.