

Wacław SAKWA, Grzegorz TUMUŁKA

Instytut Odlewnictwa
Politechnika Śląska

WPŁYW DODATKÓW STOPOWYCH NA ODPORNOŚĆ NA WSTRZĄSY CIEPLNE TRUDNO ŚCIERALNEGO ŻELIWA CHROMOWEGO

Streszczenie: Opracowanie przedstawia wyniki badań wpływu składu chemicznego na jednoczesną odporność żeliwa wysokochromowego na ścieranie i wstrząsy cieplne. Pozytywne rozwiązanie tak przedstawionego zagadnienia ma duże znaczenie praktyczne dla takich gałęzi przemysłu, jak: hutnictwo, przemysł koksowniczy itp. Podano podstawowe własności mechaniczne badanych stopów, technologię wytopu, a także wyznaczono dla nich wskaźnik odporności na ścieranie i zmęczenie cieplne. Przedstawiono oryginalną metodę pomiaru odporności na wstrząsy termiczne. Badania wykazały, że w większości przypadków odporność na ścieranie jest przeciwstawna odporności na zmęczenie cieplne. Jedynie dla żeliwa chromowego z dodatkiem wanadu stwierdzono jednoczesny wzrost obu tych własności.

1. Wstęp

Zagadnienie zużycia elementów maszyn i urządzeń stanowi bardzo ważną i aktualną problematykę naukowo-badawczą i gospodarczą. Zainteresowanie tym zagadnieniem wzrasta równoległe z wprowadzaniem do praktyki przemysłowej nowoczesnych konstrukcji, od których wymaga się zachowania dużej trwałości, przy jednoczesnej możliwości stosowania podwyższonych parametrów ruchowych. W obecnym stanie wiedzy nie można stworzyć ścisłej, naukowej definicji zjawiska zużycia, co wynika przede wszystkim z różnorodności form jego występowania. Spośród wielu różnych klasyfikacji, trafnym wydaje się być podział zużycia na:

- mechaniczne,
- chemiczne /korozyjne/,
- cieplne,
- elektryczne.

W praktyce najczęściej występują jednak procesy, w których jednemu rodzajowi zużycia towarzyszą inne, np.: zużyciu mechanicznemu towarzyszy często zużycie cieplne lub korozyjne.

W niniejszym opracowaniu usiłowano rozwiązać zagadnienie doboru składu chemicznego żeliwa wysokochromowego na elementy pracujące w warunkach jednoczesnego zużycia

ściernego i ciepłego. Pozytywne rozwiązanie tak postawionego problemu ma duże znaczenie praktyczne dla takich gałęzi przemysłu, jak: walcownictwo, kuźnictwo, przemysł koksowniczy itp.

Żeliwo chromowe wybrano ze względu na to, że jest to jeden z podstawowych stopów o dużej odporności na ścieranie, a szerokie badania nad własnościami i zastosowaniem tego tworzywa przeprowadzone w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej doprowadziły do popularyzacji tego tworzywa w praktyce przemysłowej i uzyskania szeregu bardzo dobrych wyników eksploatacyjnych.

2. Skład chemiczny badanych stopów oraz technologia wytopu próbek do badań

Skład chemiczny stopów przeznaczonych do badań laboratoryjnych oparto na bazie tworzyw typu Fe-Cr-C. W pierwszej grupie stopów, oznaczonych numerami 1-13, utworzono kombinację składu chemicznego pozwalającą na określenie wpływu węgla i chromu na interesujące nas własności materiału badanego, natomiast w drugiej grupie stopów, oznaczonych numerami 14-37, zbadano wpływ takich pierwiastków stopowych, jak: wolfram, wanad, molibden, krzem, nikiel, miedź i antymon. W składzie chemicznym badanych stopów występują dodatkowo:

- mangan w ilości 0,1 - 0,6 %,
- siarka w ilości 0,015 - 0,025 %,
- fosfor w ilości 0,02 - 0,03 %.

Do wytopów użyto następujących gatunków surowców: żelazo "Armco", surówka przerobcza M2, złom stalowy, żelazochrom wysoko- i niskowęglowy, żelazowolfram, żelazowanad, żelazomolibden oraz nikiel, miedź i antymon w postaci metali technicznie czystych.

Wytopy wykonano w indukcyjnym piecu elektrycznym średniej częstotliwości o pojemności tygla - 10 kg. Metal przegrzewano do temperatury 1550°C i odtleniano dodatkiem 0,03 % Al na 1-1,5 min przed zalaniem formy. Dokładny skład chemiczny określony przy pomocy analizy spektralnej oraz analizy ilościowej /w przypadku określania zawartości węgla/ podaje tabela 1.

3. Badania własności mechanicznych

Badania własności mechanicznych przeprowadzono na próbkach w stanie surowym, bez obróbki cieplnej. Z podstawowych własności wyznaczono twardość i udarność oraz wskaźnik odporności na zużycie ścierne.

Twardość zmierzono metodą Vickiersa przy pomocy aparatu HPC-250, w sposób zgodny z normą PN-57/H-04360, stosując obciążenie wgłębnika równe 50 daN, a czas działania obciążenia 15 sec.

Tabela 1

Skład chemiczny badanych stopów

Nr stopu	Zawartość pierwiastka w %						
	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo
1	1,50	0,64	0,27	20,9			
2	1,68	0,26	0,41	16,7			
3	2,17	0,43	0,11	19,4			
4	2,41	0,45	0,11	21,8			
5	3,03	0,84	0,34	19,4			
6	3,30	0,45	0,11	19,7			
7	3,70	0,44	0,10	19,1			
8	2,94	0,43	0,10	22,7			
9	1,53	0,69	0,24	26,0			
10	2,65	0,62	0,11	25,2			
11	1,69	0,71	0,44	29,1			
12	2,60	0,71	0,14	29,8			
13	3,05	0,97	0,40	31,1			
14	2,98	0,69	0,55	23,8	2,0		
15	2,70	0,71	0,15	29,4	1,77		
16	2,89	0,72	0,15	29,6	3,70		
17	2,86	0,68	0,15	31,2	4,70		
18	2,93	0,71	0,14	30,9		0,37	
19	2,91	0,73	0,15	29,9		0,56	
20	2,80	1,26	0,62	31,5		2,98	
21	2,95	1,05	0,50	31,6		6,01	
22	2,69	0,87	0,38	31,2			2,02
23	2,93	0,69	0,15	31,0			0,48
24	2,75	0,75	0,16	30,2			1,00
25	2,90	0,93	0,40	32,2			2,01
26	2,90	0,75	0,16	31,0			3,50
27	2,30	0,79	0,56	24,9	2,0		1,00
28	1,05	3,32	0,34	19,7			
29	2,06	3,56	0,38	20,1			

cd. tabeli 1

Nr stopu	Zawartość pierwiastka w %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Sb
30	3,09	0,90	0,45	30,8	1,82		
31	2,88	0,80	0,46	30,8	3,86		
32	2,94	0,97	0,45	33,1	5,62		
33	2,88	0,52	0,45	31,6	0,76	1,03	
34	2,97	0,50	0,48	31,7		0,50	
35	2,89	0,49	0,46	31,1		0,96	
36	2,82	0,89	0,47	30,6			0,10
37	2,86	0,82	0,48	30,3			0,25

Badania udarności przeprowadzono przy pomocy młota wahadłowego typu Charpy, o zasobie energii 147,15 J. Do pomiarów użyto próbek bez karbu o wymiarach 10x10x55 mm.

Wskaźnik odporności na zużycie ściernie wyznaczono przy pomocy maszyny Skoda-Savina, zgodnie z normą PN-67/M-04306. Stosowano następujące parametry badań:

- obciążenie krążka trącego $P = 50$ N
- prędkość obrotowa krążka $n = 100$ obr/min
- długość drogi tarcia $s = 282,6$ m,
- czas trwania pomiaru $t = 3$ min,
- chłodzenie 0,5 % roztworem K_2CrO_4 w wodzie destylowanej.

Wskaźnik odporności na zużycie ściernie obliczono ze wzoru:

$$R_t = \frac{1000}{V_L} \left[\frac{1}{\text{mm}^3} \right]$$

gdzie: R_t - wskaźnik odporności na zużycie ściernie,

V_L - objętość wytarcia w badanym materiale $/10^{-3} \text{ mm}^3/$.

Uzyskane w trakcie badań wyniki zamieszczano w tabeli 2.

Tabela 2

Własności mechaniczne badanych stopów

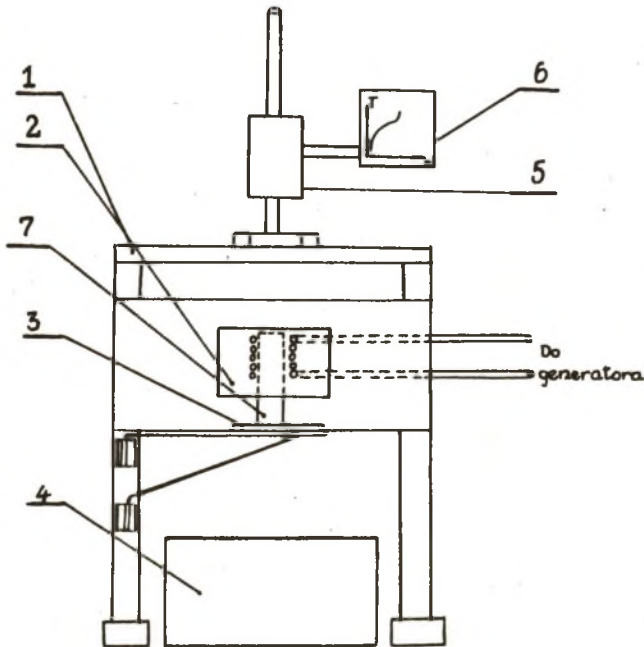
Nr stopu	Twardość HV	Udamność K/J/cm ² /	Objętość wytarcia V _T /10 ⁻³ /mm ³ /	Wskaźnik odporności na zużycie ścierne R _t / 1/mm ³ /
1	529	2,12	16,15	61,9
2	428	6,22	69,70	14,2
3	530	6,87	41,54	24,0
4	596	8,16	32,35	30,8
5	512	2,80	16,80	59,5
6	670	5,94	35,48	28,2
7	606	5,58	32,00	31,2
8	661	7,29	27,50	36,3
9	428	4,28	13,87	72,1
10	584	7,48	29,38	34,0
11	341	2,78	9,37	106,7
12	612	7,20	28,73	39,8
13	640	3,32	11,67	85,7
14	715	9,02	38,90	26,0
15	681	6,26	31,92	31,4
16	607	6,32	36,12	27,6
17	590	5,61	31,68	31,5
18	420	6,46	36,93	27,2
19	398	6,01	28,32	35,3
20	418	4,37	13,86	72,2
21	380	4,74	16,47	60,7
22	450	4,15	12,95	77,2
23	526	8,83	27,36	36,5
24	608	8,42	30,93	32,3
25	399	5,13	29,18	34,3
26	434	7,06	28,32	35,3
27	543	6,28	30,08	33,0
28	342	5,13	11,18	89,4
29	447	3,58	10,80	92,6
30	563	5,52	18,21	54,9
31	547	10,17	12,81	78,1
32	475	10,17	22,81	43,8
33	548	13,18	18,49	54,1
34	556	10,21	13,25	75,5
35	617	15,52	22,49	44,5
36	384	15,60	12,38	80,8
37	567	8,96	28,31	35,3

4. Określenie odporności żeliwa wysokochromowego na zmęczenie cieplne

Przeprowadzane w technice badania odporności na zmęczenie cieplne mają charakter badań modelowych, w których warunki przeprowadzania pomiarów dostosowuje się do warunków pracy konkretnego detalu. Podstawowymi parametrami takich prób są:

- szybkość nagrzewania i chłodzenia
- wielkość skoku temperatury w jednym cyklu
- częstotliwość i ilość cykli pomiarowych

Kształt próbek, jak i sposób ich nagrzewania, jest bardzo różnorodny. Używa się próbek w kształcie płytek, klinów, walców, względnie gotowych odlewów. Nagrzewanie próbek można wykonać w piecach komorowych, palnikiem gazowym, w kąpielach solnych lub na drodze elektrycznej. W zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej urządzeniu, nagrzewanie próbek odbywa się indukcyjnie, chłodzenie natomiast przeprowadza się w wodzie. W badaniach używano próbek walcowych o wymiarach $\varnothing 30 \times 70$ mm. Schemat urządzenia ilustruje rys.1.



Rys.1 Schemat urządzenia do badań odporności na zmęczenie cieplne - 1 - rama nośna, 2 - cewka indukcyjna z obudową, 3 - ruchoma podstawa, 4 - zbiornik z wodą, 5 - pirometr całkowitego promieniowania, 6 - rejestrator, 7 - próbka

W przeprowadzonych badaniach ustalono następujące parametry pomiaru:

- ilość cykli $i = 30$,
- temperatura nagrzewania, $t_1 = 1273 \text{ K} / 1000^\circ\text{C}$,
- temperatura wody chłodzącej $t_2 = 293 \text{ K} / 20^\circ\text{C}$,

Średnio jeden cykl nagrzewania i chłodzenia trwał około 50 sekund, czas nagrzewania - około 10 sek., czas chłodzenia - około 40 sek.

Wyniki próby oceniono w sposób następujący: na powierzchni bocznej próbki poddanej 30 cyklom nagrzewania i chłodzenia naznaczono 5 rys, co 5 mm, poczynając od czoła próbki. W dalszej kolejności określono ilość pęknięć, widocznych na poboczniczy próbki, które przecinają naniesione rysy. Ostatecznym wynikiem pomiaru była średnia ilość pęknięć przecinająca naniesione na próbkę rysy, na długości 100 mm. Przy ocenie odporności materiału na zmęczenie cieplne posługiwano się wskaźnikiem "Z" obliczonym według zależności:

$$Z = \frac{100}{\text{średnia ilość pęknięć na drodze 100 mm}}$$

Wyniki badań zamieszczono w tabeli 3. W przypadku próbek, które uległy zniszczeniu przed ukończeniem badań, podano ilość cykli, po których badania próbka rozpadła się.

5. Analiza wyników

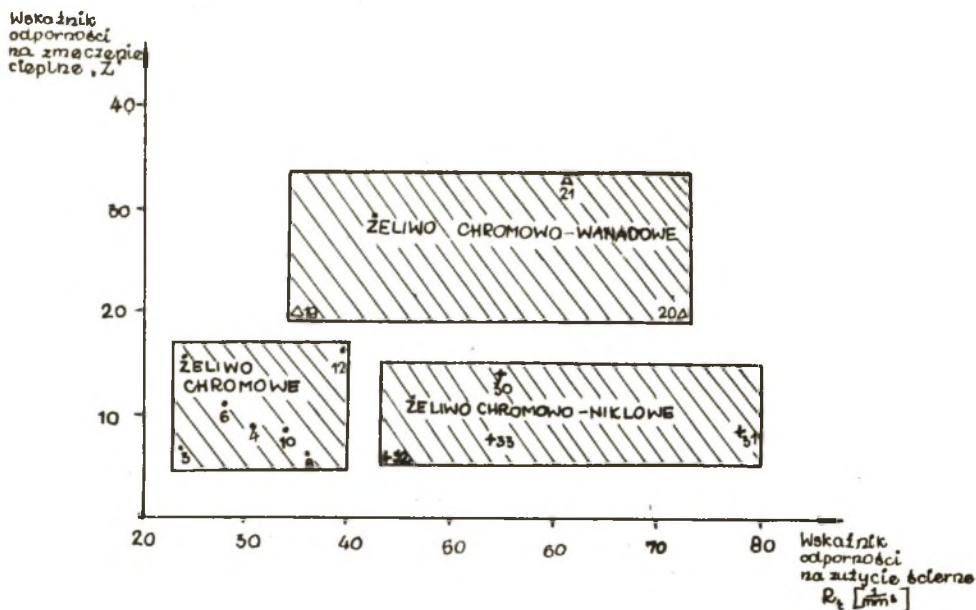
Celem badań było określenie wpływu dodatków stopowych w żeliwie wysokochromowym na jego odporność na zużycie ścierne i cieplne. Analiza wyników będzie więc dotyczyła wykrycia zależności pomiędzy składem chemicznym stopu, a wymienionymi własnościami. W celu zorientowania się, które pierwiastki stopowe działają najsilniej sporządzono wykres w układzie: odporność na ścieranie - odporność na zmęczenie cieplne, który przedstawiono na rys.2.

Na rysunku tym nie umieszczono przebadanych gatunków żeliwa z dodatkiem wolframu, jako że mieszczą się one całkowicie w polu oznaczonym jako "żeliwo chromowe". Można więc wysnuć wniosek, że dodatek tego pierwiastka w zakresie 2,0 - 5,0 % praktycznie nie zmienia odporności na zużycie cieplne i ścierne badanych stopów. Brak na rys. 2 żeliwa chromowo-molibdenowego wynika stąd, że rozrzut uzyskanych wyników jest dość duży i naniesienie tych gatunków na omawiany wykres zdecydowanie zmniejszyłoby jego czytelność. Ponieważ wpływ molibdenu jest jednak bardzo istotny i nie można go pominąć, przedstawiono działanie tego dodatku stopowego na rys.3.

Tabela 3

Odporność badanych materiałów na zmęczenie cieplne

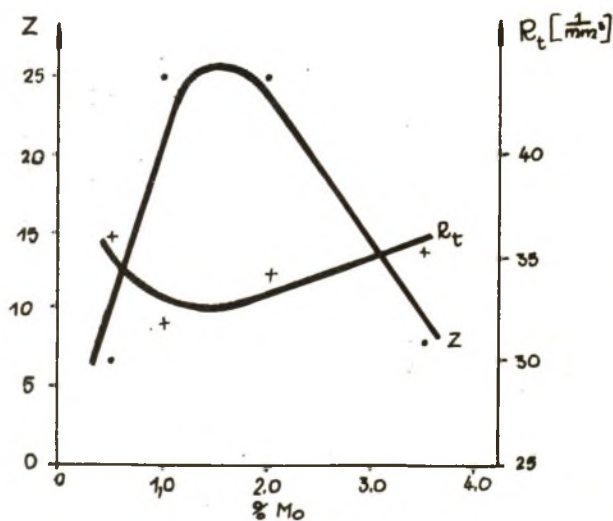
Numer stopu	Średnia ilość pęknięć na drodze 100 mm	Wskaźnik odporności na zmęczenie cieplne	Uwagi
1	-	-	zniszczenie próbki po 6 cyklach
2	18	4,6	
3	15	6,7	
4	12	8,3	
5	-	-	zniszczenie próbki po 19 cyklach
6	9	11,1	
7	-	-	zniszczenie próbki po 13 cyklach
8	17	5,9	
9	5	20,0	
10	12	8,3	
11	2	50,0	
12	6	16,6	
13	-	-	zniszczenie próbki po 24 cyklach
14	9	11,1	
15	-	-	zniszczenie próbki po 6 cyklach
16	11	9,1	
17	10	10,0	
18	10	10,0	
19	4	20,0	
20	4	20,0	
21	3	33,3	
22	-	-	zniszczenie próbki po 22 cyklach
23	15	6,7	
24	4	25,0	
25	4	25,0	
26	13	7,7	
27	18	5,6	
28	-	-	zniszczenie próbki po 24 cyklach
29	-	-	zniszczenie próbki po 4 cyklach
30	7	14,3	
31	11	9,1	
32	16	6,3	
33	13	7,7	
34	14	7,1	
35	20	5,0	
36	3	33,3	
37	18	5,6	



Rys. 2 Odporność na zużycie ciepłe i ścierne różnych gatunków żeliwa wysokochromowego

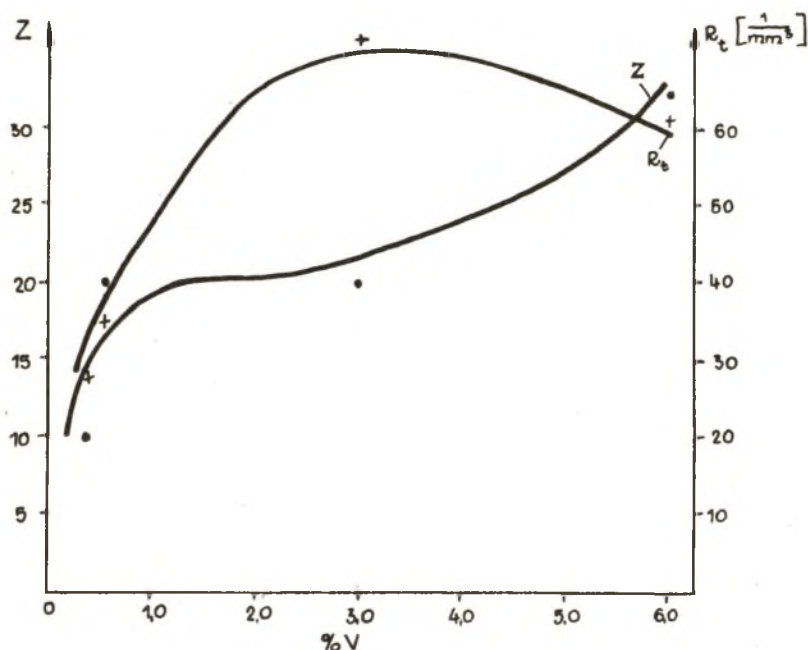
Jak wynika z analizy przedstawionych wykresów jedynym dodatkiem stopowym, który jednocześnie zwiększa odporność na ścieranie i na zmęczenie cieplne, jest wanad. Dodatek molibdenu działa korzystnie na odporność cieplno-zmęczeniową żeliwa do zawartości około 2%, przy niewielkim obniżeniu odporności na ścieranie, natomiast wyższe zawartości tego pierwiastka są niekorzystne.

Aby przeprowadzić dokładniejszą analizę wyników uzyskanych dla żeliwa chromowo-wanadowego, przedstawiono je



Rys. 3 Wpływ molibdenu na zużycie ciepłe i ścierne żeliwa chromowego o zawartości 2,7-2,9% C i 30% Cr

w formie wykresu na rys.4. Na jego podstawie można stwierdzić, że jedynie do zawartości około 3 % V następuje jednoczesny wzrost odporności na zużycie ścierne i cieplne, a przy wyższych zawartościach kierunek krzywych ilustrujących omawiane własności jest przeciwny.

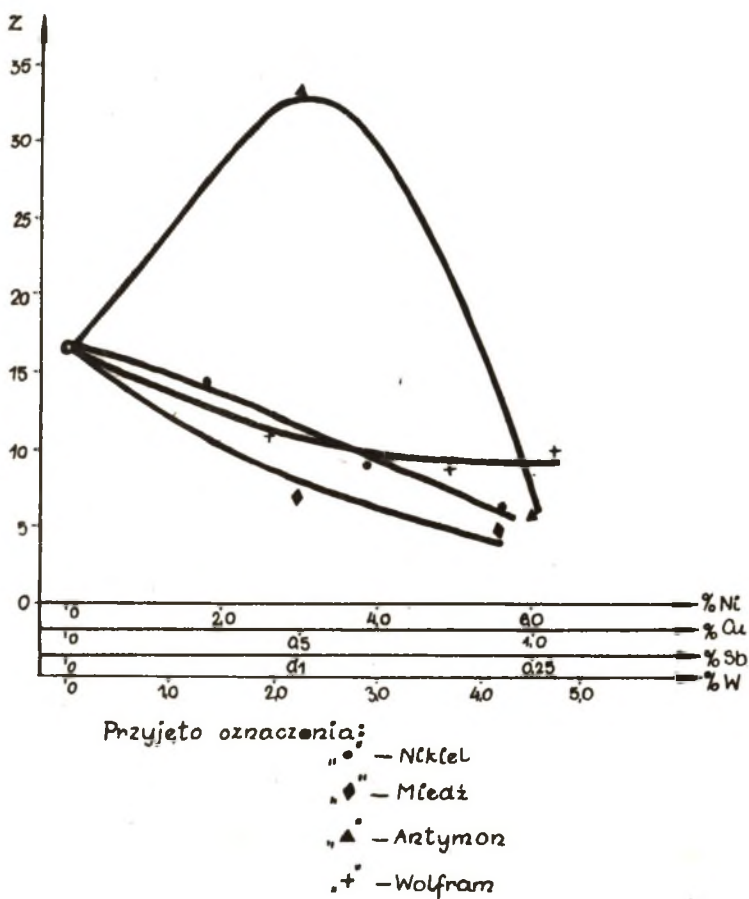


Rys.4 Wpływ wanadu na zużycie cieplne i ścierne żeliwa chromowego o zawartości 2,8-3,0 % C i ~ 30 % Cr

W przypadku żeliwa chromowo-molibdenowego również można zauważyć, że wzrost odporności na ścieranie nie idzie w parze z odpornością na zużycie cieplne. Generalnie można więc stwierdzić, że odporność ścierna i cieplna są cechami przeciwnymi i przy doborze materiału do pracy w takich warunkach zużycia należy zwracać na to szczególną uwagę.

W omawianych badaniach przeprowadzono także analizę wpływu takich pierwiastków jak: Cu, Sb i Si. Stwierdzono szczególnie niekorzystne działanie krzemu. Próbkę do określenia odporności na zmęczenie cieplne, wykonane z żeliwa z podwyższoną zawartością krzemu /stop nr 28 i 29/, rozpadły się przed ukończeniem badań. Tak więc nie można było dla tych żeliw określić wskaźnika odporności na zmęczenie cieplne, a jedynie podano ilość cykli, po których próbka uległa zniszczeniu. Dodatek antymonu w ilości 0,1 % okazał się korzystny, jednak ze względu na małą ilość prób wykonanych

z tym dodatkiem nie można tego stwierdzić w sposób jednoznaczny. Miedź wprowadzona do żeliwa wysokochromowego nieznacznie obniża jego odporność na zużycie cieplne. Dla ilustracji podanych wyżej zależności na rys. 5 przedstawiono wpływ omawianych dodatków stopowych na zużycie cieplne.



Rys. 5 Wpływ dodatków stopowych na odporność na zmęczenie cieplne żeliwa wysokochromowego

Podsumowując przeprowadzoną analizę należy stwierdzić, że przy dobieraniu tworzywa pracującego jednocześnie w warunkach ścierania i zmiennych obciążeń cieplnych, należy się kierować uzyskaniem zadawalającej odporności na ścieranie, przy możliwie skąnym rozbudowaniu składu chemicznego tworzywa.

6. Wnioski

- 6.1. Spośród zbadanych dodatków stopowych jedynie wanad oraz molibden w ilości do 2,0 % zwiększają odporność na wstrząsy cieplne.
- 6.2. W celu uzyskania największej odporności na zmęczenie cieplne nie należy nadmiernie rozbudowywać składu chemicznego żeliwa.
- 6.3. Odporność na zużycie ścierne i zużycie cieplne w większości przypadków są własnościami przeciwstawnymi.
- 6.4. Nikiel, wolfram i miedź nieznacznie obniżają odporność stopu na zmęczenie cieplne.
- 6.5. Szczególnie niekorzystna w warunkach zmiennych obciążeń cieplnych jest podwyższona zawartość krzemu.
- 6.6. W warunkach jednoczesnego zużycia ściernego i cieplnego najlepszymi własnościami charakteryzuje się żeliwo wysokochromowanadowe.

LITERATURA

1. KILARSKI J.: Wpływ pierwiastków stopowych na zużycie ścierne żeliw wysokochromowych, Praca doktorska, Gliwice 1975.
2. NEUGEBAUER - FELDMAN - SIERGIEJEW: Termostojkost litych chromistych spławów Litiejnoje Proizwodstwo, nr 3, 1971.
3. NEUGEBAUER - FELDMAN - KUSZNAREWA: Mechanizm obrazowania termicznych trzieszczin wysokochromistowo czuguna. Izv. Wys. Ucz. Zaw. Czernaja Mietallurgia, nr 2, 1973.
4. RADEHER J.W.: Rissbildung in niedrieglegierten Stahlen durch Schroffen Temperaturwechsel. Stahl und Eisen, nr 15, 1954.
5. NAMAI T.: Study of the formation of craze cracks in cast iron. 42MKO, Lizbona, ref. nr 13, 1975.
6. SAKWA W., JURA St., SAKWA J.: Żeliwa odporne na ścieranie - skrypt STOP, Kraków, /w druku/.