

Krystyna PATEREK¹

WYBRANE ASPEKTY INTENSYWNOŚCI ZUŻYCIA ODLEWÓW Z ŻELIWA BIAŁEGO

W artykule przedstawiono wyniki badań istotności oddziaływania procesu azotowania oraz zawartości: węgla, krzemu, manganu, siarki oraz temperatury przegrzania i zalewania ciekłego stopu, a także efektów współdziałania parametrów zmiennych na intensywność zużycia żeliwa białego. W metodyce badań wykorzystano macierze planowania doświadczeń ekstremalnych, pozwalające na określenie wpływu wymienionych zmiennych, przez porównanie uzyskanych współczynników regresji.

THE CHOSEN ASPECTS OF INTENSITY WEAR OF WHITE CAST IRON

The article presents research effects the significance of gas nitriding influence process of contents of carbon, silicon, manganese, sulphur, the pouring temperature and overheating temperature of a liquid alloy and effects of variable parameters interaction on the intensity of white cast iron wear. Within the methodology of research, the author used experimental trials planning matrix, which allows to establish the quantitative influence of the specified variable parameters and effects of their interaction by comparing the obtained regression coefficients.

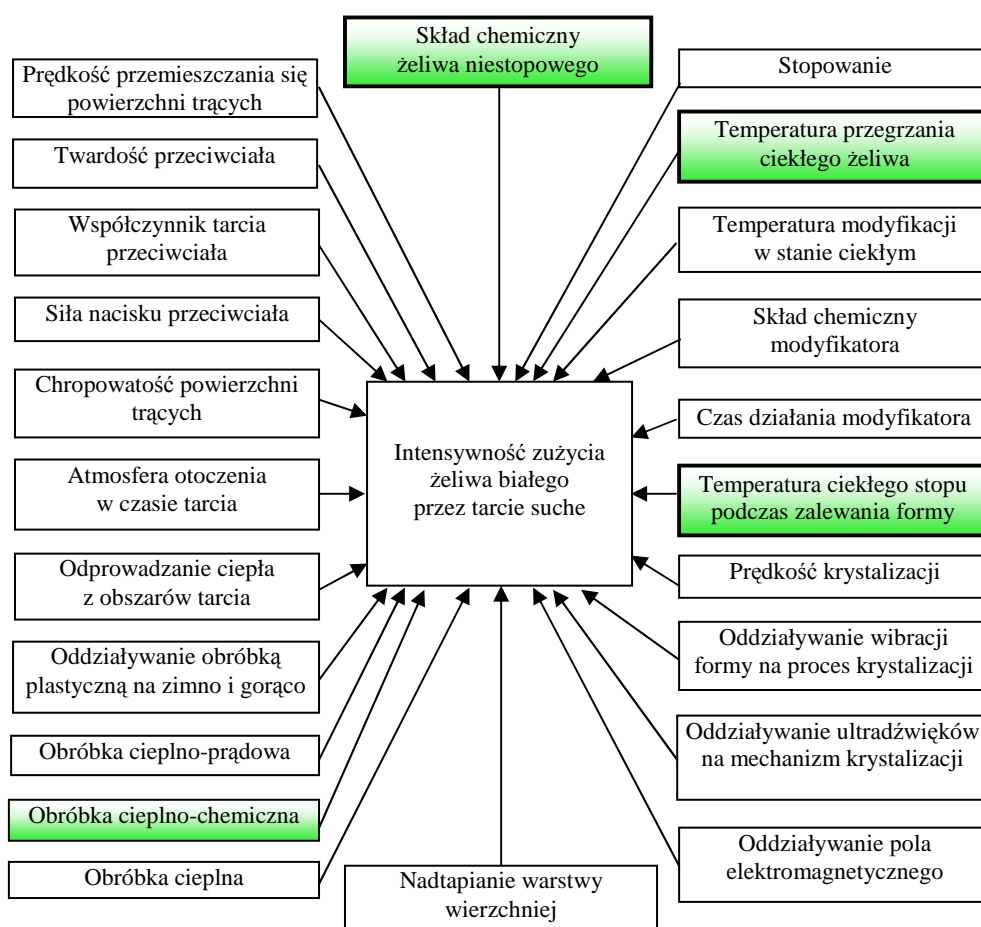
1. WSTĘP

Badania odporności na ścieranie żeliwa białego były dotychczas skierowane głównie na efekty oddziaływania dodatków stopowych. Pomijano często oddziaływanie w tym zakresie temperatury przegrzania i zalewania formy oraz zabiegów modyfikacji żeliwa w stanie ciekłym. Mało badań dotyczyło również analizy wpływu procesów azotowania żeliwa białego na zwiększenie odporności na ścieranie, prawdopodobnie w wyniku uzyskiwania niejednoznacznych efektów. Złożoność tych zagadnień potęgują efekty współdziałania manganu i siarki, temperatura inwersji czy problematyka zarodków krystalizacji zależna od stanu termodynamicznego ciekłego żeliwa. Jednoczesny wpływ tak wielu czynników utrudnia interpretację istotności i ich siły oddziaływania na późniejsze procesy trybologiczne [7]. Wydaje się zasadne w tej sytuacji wykorzystanie do badań macierzy planowania doświadczeń ekstremalnych, które pozwalają na matematyczne ujęcie zagadnienia przy minimalizacji niezbędnej ilości eksperymentów [4]. Doświadczenia z

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26–600 Radom, tel.: 48 361 76 85

zastosowaniem takich macierzy planowania prowadzono w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej w wielu pracach badawczych.

Intensywność zużycia żeliwa białego zależy od wielu czynników o czym świadczy zestawienie przedstawione na rysunku 1. Szczegółowe poznanie tych zagadnień nie jest bez znaczenia w praktycznym ich zastosowaniu do wytwarzania odlewów z żeliwa białego odpornego na ścieranie.



Rys. 1. Możliwości oddziaływania istotniejszych czynników na intensywność zużycia żeliwa białego

Żeliwo białe ma szerokie zastosowanie tam, gdzie wymagana jest duża odporność na ścieranie bez obciążeń dynamicznych. Znajduje zastosowanie głównie na odlewy łopatek i elementów obudowy do oczyszczarek śrutowych.

W miejscach intensywnego zużycia wykorzystuje się żeliwo białe uzyskane przez zastosowanie ochładzalników (żeliwo zabielenie). Stosuje się je na odlewy walców hutniczych, walców do kalandrowania czy na wałki rozrządu i dźwigienki zaworów do silników wysokoprężnych [2, 3, 5, 6].

2. METODYKA I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W badaniach intensywności zużycia żeliwa białego wykorzystano odlane próbki z 16 wytopów o zróżnicowanym składzie chemicznym i zmiennych warunkach metalurgicznych.

Za zmienne parametry żeliwa białego przyjęto:

- węgiel (2.3% i 3.3%),
- krzem (0.4% i 1.1%) ,
- mangan (0.2% i 0.6%),
- siarka (0.05% i 0.25%),
- temperatura zalewanego stopu (1400°C i 1450°C),
- temperatura ciekłego żeliwa (1480°C i 1550°C),
- gazowe azotowanie warstwy wierzchniej żeliwa białego (20 godz. w temperaturze 550°C)

Celem określenia istotności oddziaływania przyjętych zmiennych na intensywność zużycia żeliwa przez tarcie suche wykorzystano macierze planowania doświadczeń ekstremalnych 2^{6-2} (Tab.1). Obliczone w macierzach współczynniki regresji, dotyczące zużycia próbek z żeliwa białego bez azotowania i po azotowaniu, dały informacje o istotności oddziaływania 6 założonych parametrów zmiennych i 9 efektów ich współdziałania. Intensywność zużycia próbek zrealizowano metodą trójwałeczkową zgodnie z PN-83/H-04302. Przyjęto dla wszystkich prób tarcie przez 60 sek. na drodze 53.75 m przy obciążeniu 100 N.

Jak wykazuje analiza współczynników regresji (Tab. 1) intensywność zużycia żeliwa białego przez tarcie suche zależy głównie od synergicznego oddziaływanie węgla ($b_{1 \text{ IZB}} = -0.503$), krzemu ($b_{2 \text{ IZB}} = -0.307$) oraz efektu współdziałania węgla i temperatury zalewania ($b_{1,5 \text{ IZB}} = -0.440$).

Wzrost zawartości węgla (x_1) powoduje zwiększenie ilości cementytu eutektycznego a tym samym wzrost twardości i odporności na ścieranie. Dodatnie oddziaływanie krzemu (x_2) na zmniejszenie zużycia można tłumaczyć zjawiskami uzyskanej mikrosegregacji w czasie krzepnięcia żeliwa białego oraz dodatnim wpływem na rozdrobnienie struktury, dającej lepszą odporność na ścieranie. Przeciwnie oddziałuje siarka ($b_{4 \text{ IZB}} = 0.209$) i temperatura zalewania ($b_{5 \text{ IZB}} = 0.497$).

Oddziaływanie antagonistyczne siarki (x_4), tłumaczy się zwiększeniem kruchości żeliwa i większą skłonnością do wykruszeń w miejscach tarcia, zwłaszcza przy większej liczbie siarczków. Wzrost temperatury zalewania (x_5) ciekłego stopu powoduje wolniejsze krzepnięcie stopu i zmniejszenie rozdrobnienia struktury, co w efekcie może powodować wzrost intensywności zużycia żeliwa białego.

Tab. 1. Macierz planowania doświadczeń ekstremalnych 2^{6-2} i wyniki pomiarów intensywności zużycia żeliwa białego przez tarcie suche

Poziom	Parametry zmienne						Wyniki pomiarów										
	C: [%]	Si: [%]	Mn: [%]	S: [%]	T _{zait} : [K]	T _{pr} : [K]											
Podstawowy	2,82	0,742	0,389	0,15	1698	1788	$\frac{\text{Średnia intensywność zużycia}}{I_{ZB}}; \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$										
Wyższy	3,34	1,09	0,556	0,248	1723	1823											
Niższy	2,30	0,394	0,222	0,052	1673	1753											
Przedział zmian	0,52	0,348	0,167	0,098	25	35											
Numer wytopu	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅		X ₆									
01.00	+	-	-	-	-	-		-									
02.00	+	+	+	+	+	+		+									
03.00	+	+	-	+	-	-		-									
04.00	+	-	+	+	+	-		+									
05.00	+	-	-	+	-	-		+									
06.00	+	+	-	-	+	+		+									
07.00	+	-	+	-	-	-		-									
08.00	+	+	-	-	+	-		+									
09.00	+	-	-	-	+	+		+									
10.00	+	-	+	-	-	-		-									
11.00	+	+	-	+	+	+		+									
12.00	+	-	+	-	-	-	-										
13.00	+	+	-	+	-	+	+										
14.00	+	-	-	-	+	+	+										
15.00	+	+	+	+	-	-	-										
16.00	+	-	-	-	+	+	+										
Współcz. regresji b _{1ZB}	X ₀	X ₁ X ₃ =X ₂ X ₅	X ₁ X ₄ =X ₂ X ₆	X ₁ X ₅ =X ₂ X ₃	X ₁ X ₆ =X ₂ X ₄	X ₃ X ₄ =X ₅ X ₆	X ₃ X ₆ =X ₄ X ₅	X ₁ X ₂ =X ₃ X ₅ =X ₄ X ₆	X ₁ X ₃ X ₆	X ₂ X ₃ X ₆	S(I _{ZB})=0.06 t ₁₆ ; α=0.05						
	2.438	-0.503	-0.307	0.037	0.209	0.497	0.175	0.078	-0.198	0.228	-0.004*	0.001*	0.149	-0.440	0.074	-0.275	* - współczynniki statystycznie nieistotne

Intensywność zużycia żeliwa białego I_{ZB} można przedstawić w funkcji 6 zmiennych parametrów (C, Si, Mn, S, T_{zal} , T_p) i ich [9] efektów współdziałania wykorzystując wyniki obliczeń współczynników regresji z macierzy planowania doświadczeń. Przedstawienie wyników w formie graficznej, wymaga założenia 4 zmiennych parametrów na stałym poziomie.

Na rysunku 2a przedstawiono intensywność zużycia żeliwa w zależności od zawartości węgla i krzemu. Założono 4 pozostałe zmienne (x_3 , x_4 , x_5 , x_6) na poziomie niższym, celem uzyskania wyższej odporności na ścieranie. Z tego wykresu wynika, że przy większych zawartościach węgla związanego w postaci cementytu eutektycznego uzyskuje się najmniejsze zużycie a oddziaływanie krzemu jest w tym przypadku mało istotne. Synergiczne oddziaływanie krzemu uwidacznia się dopiero przy zastosowaniu niskiej zawartości węgla. Podobny charakter oddziaływania węgla i krzemu uzyskano na rysunku 2b, przy założeniu 4 pozostałych zmiennych na poziomie wyższym, lecz intensywność zużycia zwiększyła się dwukrotnie.

Reasumując, by uzyskać mniejszą intensywność zużycia żeliwa białego należy zastosować wyższą zawartość węgla (x_1) i krzemu (x_2), niską zawartość manganu (x_3) i siarki (x_4) oraz niską temperaturę zalewania (x_5) i przegrzania (x_6). Mangan i siarka wzajemnie się neutralizują tworząc siarczki. Z badań wynika zatem, że zwiększenie liczby siarczków powoduje pogorszenie odporności żeliwa białego na ścieranie.

Korzystne oddziaływanie niskiej temperatury zalewania można tłumaczyć wpływem na rozdrobnienie struktury podczas krystalizacji [1], polepszając tym odporność na ścieranie. Podobne oddziaływanie uzyskuje się obniżając temperaturę przegrzania co prowadzi do zwiększenia liczby kolonii eutektycznych a tym samym rozdrobnienia struktury, zwiększającej odporność na ścieranie.

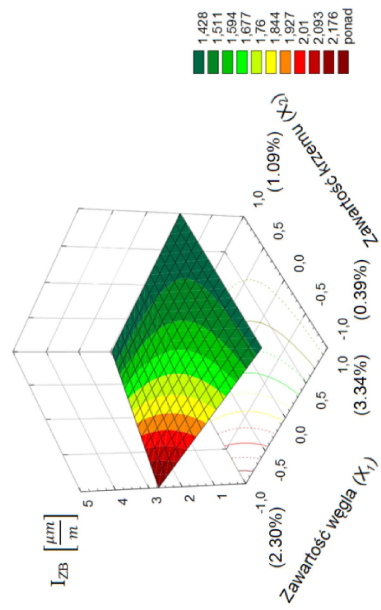
Interesującym okazały się również badania wpływu regulowanego azotowania gazowego warstwy wierzchniej żeliwa białego na jego intensywność zużycia. Zastosowana macierz planowania doświadczeń 2^{6-2} pozwoliła również na określenie istotności oddziaływania założonych 6 zmiennych parametrów i ich 9 efektów współdziałania na procesy zużycia żeliwa azotowanego.

Uzyskane współczynniki regresji dla żeliwa azotowanego uwidaczniają synergiczne oddziaływanie węgla i krzemu na intensywność zużycia podobnie jak w przypadku żeliwa białego bez azotowania. W żeliwie azotowanym istotnym parametrem zwiększającym odporność na ścieranie jest temperatura przegrzania, której oddziaływanie jest odwrotne niż w żeliwie bez azotowania. Prawdopodobnie jest to związane z intensyfikacją procesu azotowania żeliwa w wyniku zmian struktury i stopnia zagazowania towarzyszących wyższym temperaturom przegrzania stopu.

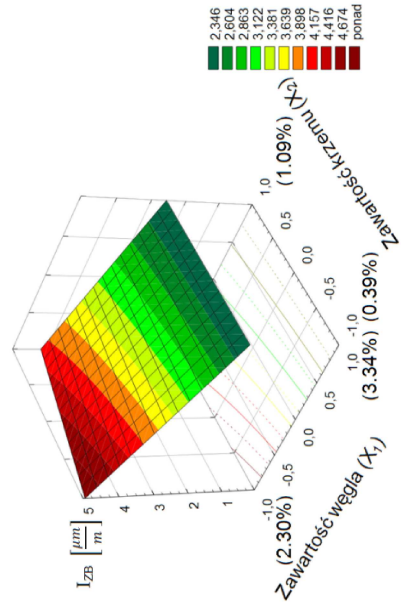
Zwiększenie temperatury ciekłego żeliwa wlewanego do formy, powoduje antagonistyczny wpływ na odporność na zużycie próbek, podobnie jak w żeliwie białym bez azotowania.

Siarka i mangan w badanym zakresie wykazują w procesach zużycia nieistotne oddziaływanie, o czym świadczą uzyskane współczynniki regresji (Rys. 3).

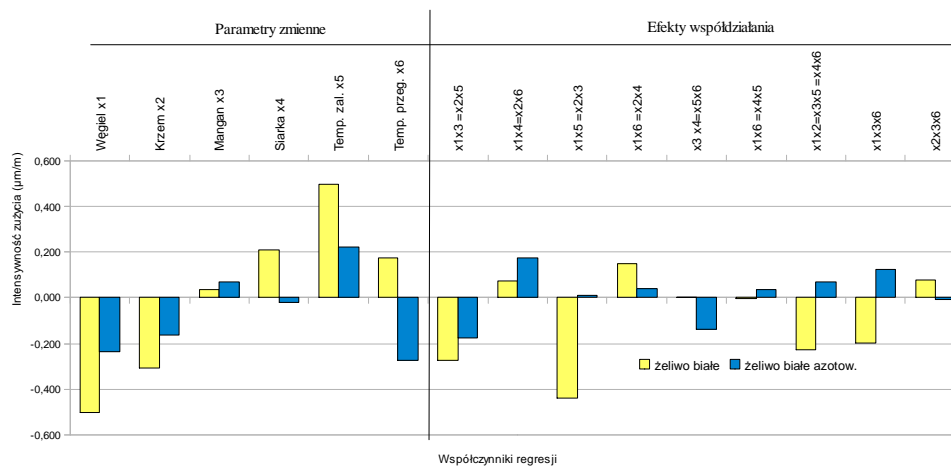
- a) $x_3 = -1$ (0.222% Mn)
 $x_4 = -1$ (0.052% S)
 $x_5 = -1$ ($T_{z\text{al}} = 1400^\circ\text{C}$)
 $x_6 = -1$ ($T_p = 1480^\circ\text{C}$)



- b) $x_3 = 1$ (0.556% Mn)
 $x_4 = 1$ (0.248% S)
 $x_5 = 1$ ($T_{z\text{al}} = 1450^\circ\text{C}$)
 $x_6 = 1$ ($T_p = 1550^\circ\text{C}$)



Rys. 2. Intensywność zużycia żeliwa białego (I_{ZB}) w zależności od zawartości węgla i krzemu



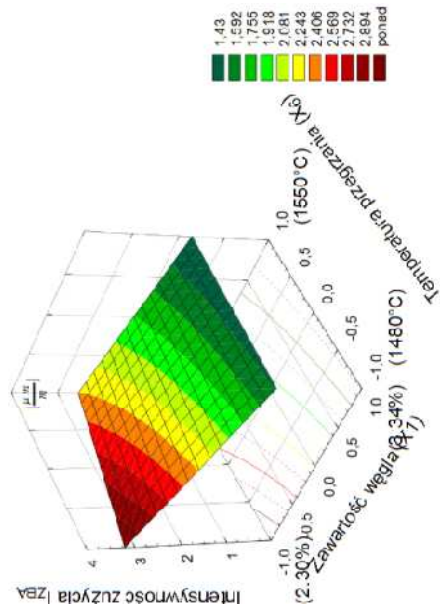
Rys.3. Porównanie współczynników regresji z macierzy planowania uzyskanych w badaniach intensywności zużycia żeliwa białego bez azotowania i po azotowaniu gazowym

Największy synergiczny wpływ na intensywność zużycia żeliwa azotowanego posiada węgiel ($b_1_{IZBA} = -0,235$) i temperatura przegrzania ($b_6_{IZBA} = -0,275$) oraz efekty współdziałania zawartości krzemu i temperatury zalewania ($b_{2,5}_{IZBA} = -0,174$).

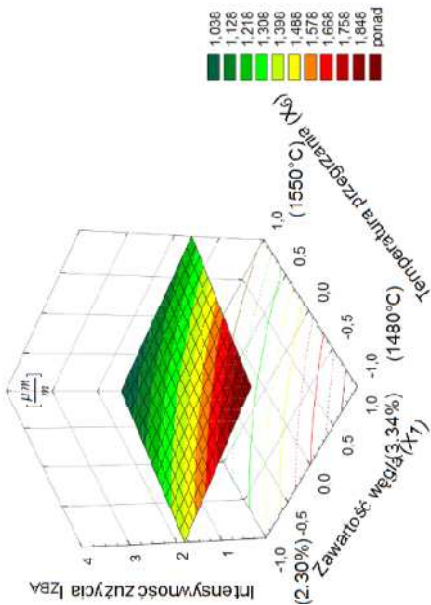
Zastosowana macierz planowania pozwala opisać matematycznie intensywność zużycia azotowanego żeliwa białego I_{ZBA} , w zależności od składu chemicznego (C, Si, Mn, S), temperatury przegrzania (T_p) i zalewania (T_{zal}) oraz 9 efektów współdziałania tych zmiennych. Przy założeniu 4 parametrów zmiennych na stałym poziomie, można uzyskane wyniki przedstawić w formie wykresu (Rys.4).

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ 2 najistotniejszych parametrów tj. węgla i temperatury przegrzania na intensywność zużycia żeliwa azotowanego, przy założeniu pozostałych 4 zmiennych na stałym poziomie. Zastosowanie krzemu na poziomie wyższym i temperatury zalewania na poziomie niższym pozwala na zminimalizowanie intensywności zużycia żeliwa, zwłaszcza przy zastosowaniu wysokich temperatur przegrzania (wykres 3a). Zmieniając zawartość krzemu na poziom niższy i temperaturę zalewania na poziom wyższy uzyskujemy zasadnicze zmiany w intensywności zużycia żeliwa azotowanego (wykres 3b). W tym przypadku temperatura przegrzania ma jedynie istotne znaczenie przy niskiej zawartości węgla. W miarę zwiększania jego zawartości (zwiększenie ilości twardego cementytu eutektycznego) intensywność zużycia maleje i oddziaływanie temperatury przegrzania traci na znaczeniu. Dowodzi to faktowi azotowania jedynie fazy perlitycznej, która charakteryzuje się mniejszą twardością i odpornością na ścieranie.

- b) $x_2 = -1$ (0.394%Si)
 $x_3 = 1$ (0.556%Mn)
 $x_4 = -1$ (0.052%S)
 $x_5 = 1$ ($T_{zad} = 1450^{\circ}\text{C}$)



- a) $x_2 = 1$ (1.09%Si)
 $x_3 = -1$ (0.222%Mn)
 $x_4 = 1$ (0.248%S)
 $x_5 = -1$ (dla $T_{zad} = 1400^{\circ}\text{C}$)



Rys. 4. Intensywność zużycia azotowanego żeliwa białego w zależności od zawartości węgla (x_1) i temperatury przegrzania (x_6)

Celem określenia uzyskanej różnicy w intensywności zużycia żeliwa białego przed i po azotowaniu przeprowadzono obliczenia wykorzystując macierze planowania doświadczeń ekstremalnych. Dzięki temu było możliwe określenie wpływu istotności oddziaływania założonych zmiennych (C, Si, Mn, S, $T_{zal.}$, T_p) na uzyskane efekty azotowania. Mierzono je względny efektem intensywności zużycia:

$$E_{IZBA} = I_{ZB} - \frac{I_{ZBA}}{I_{ZB}} \times 100\%, [\%] \quad (1)$$

gdzie: I_{ZB} - intensywność zużycia żeliwa białego

I_{ZBA} - intensywność zużycia żeliwa białego azotowanego

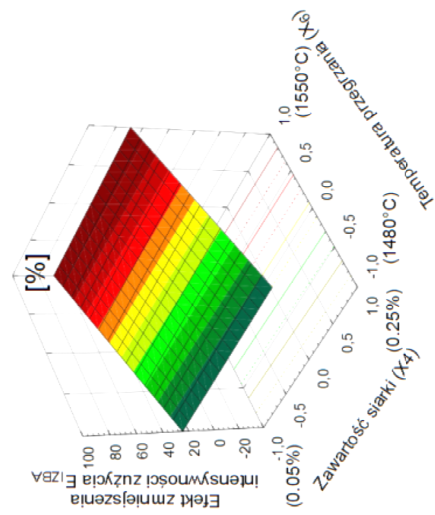
Uzyskane względne efekty azotowania zależą głównie od temperatury przegrzania i zawartości siarki w żeliwie białym. Oddziaływanie to ma charakter synergiczny w kształtowaniu odporności na ścieranie żeliwa białego. Badania te wymagają jednak jeszcze wielu potwierdzających doświadczeń z użyciem mikroanalizatora rentgenowskiego. Oddziaływanie antagonistyczne w tym zakresie wykazują nieznacznie węgiel (x_1) i krzem (x_2) oraz efekt współdziałania węgla i temperatury zalewania x_1x_5 . Małe znaczenie w omawianych procesach odgrywa badana zawartość manganu.

Proces azotowania żeliwa białego może prowadzić również do pogorszenia odporności na ścieranie co udowodniły wytopy nr 2 i 14. Badania metalograficzne próbek z tych wytopów potwierdziły dużą skłonność azotowanych warstw do pęknięć i wykruszania się cząstek podczas tarcia (Rys. 6).

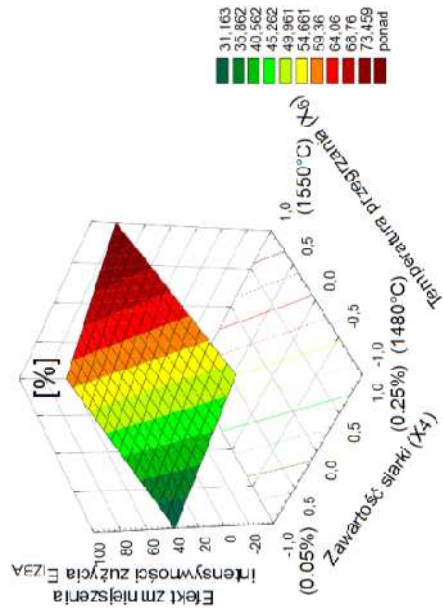
Wykorzystując współczynniki regresji z macierzy planowania, można uzyskać wzór matematyczny na obliczanie względnego efektu azotowania żeliwa białego w procesie zużycia przez tarcie suche. Zakładając na stałym poziomie 4 parametry o mniejszej istotności oddziaływania tj. C, Si, Mn i $T_{zal.}$, wykonano wykres wpływu temperatury przegrzania oraz zawartości siarki na względny efekt azotowania żeliwa w procesie zużycia przez tarcie suche (Rys. 5).

Na rysunku 5 przedstawiono znaczenie temperatury przegrzania i zawartości siarki w kształtowaniu odporności na ścieranie azotowanego żeliwa białego. Zastosowanie parametrów x_1 , x_2 , x_3 , x_5 na określonych poziomach pozwala zwiększenie istotności oddziaływania siarki w procesach zużycia. Na rysunku 5a siarka nie wykazuje istotnego znaczenia, natomiast na rysunku 5b przy zmianie poziomów 4 parametrów - ze wzrostem zawartości siarki zwiększa się względny efekt azotowania E_{IZBA} . Świadczy to o oddziaływaniu również efektów współdziałania parametrów zmiennych. W obu przypadkach podwyższenie temperatury przegrzania zdecydowanie polepsza efekt azotowania mierzony zmniejszeniem intensywności zużycia azotowanego żeliwa białego.

- a) $x_1 = -1$ (2.30% C)
 $x_2 = -1$ (0.394% Si)
 $x_3 = 1$ (0.556% Mn)
 $x_5 = 1$ ($T_{znl} = 1450^{\circ}\text{C}$)

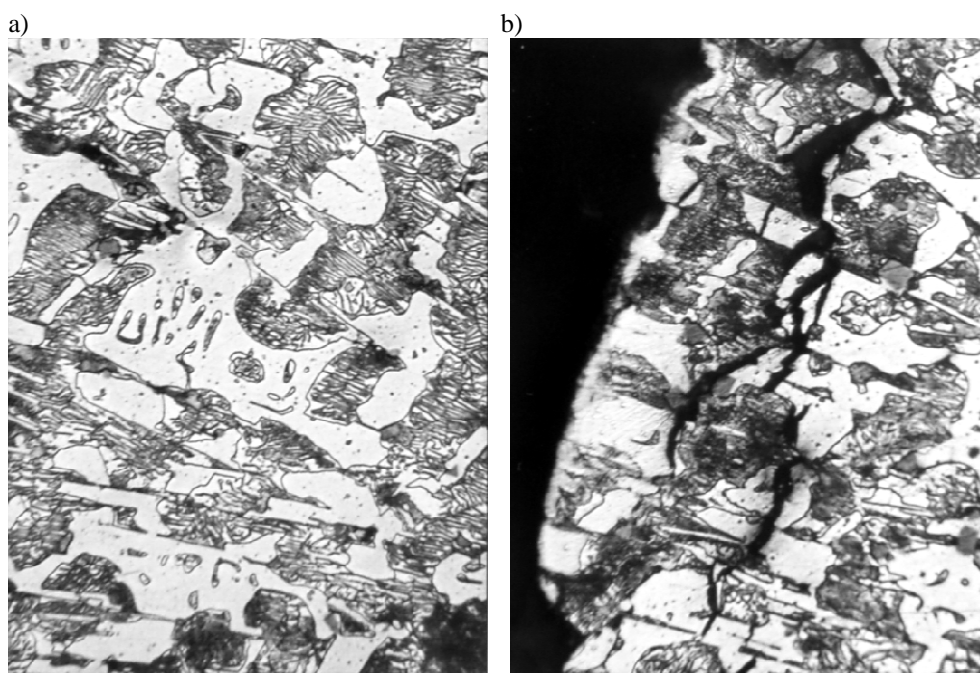


- b) $x_1 = 1$ (3.34% C)
 $x_2 = 1$ (1.09% Si)
 $x_3 = -1$ (0.222% Mn)
 $x_5 = -1$ ($T_{znl} = 1400^{\circ}\text{C}$)



Rys. 5. Względny efekt zmniejszenia intensywności zużycia żeliwa przez azotowanie dla zmiennej zawartości siarki (x_4) i temperatury przegrzania (x_6)

Na rysunku 6 przedstawiono strukturę żeliwa z wytopu nr 14, na której widoczne są pęknięcia po azotowaniu. Zastosowane powiększenie pozwala ponadto na ocenę zmian mikrostruktury wydzieli perlitu w warstwie wierzchniej po tym procesie.



Rys. 6. Struktura żeliwa po azotowaniu z wytopu nr 14: a - struktura w odległości 0.4 mm od powierzchni; b - struktura warstwy wierzchniej po azotowaniu; pow. $\times 500$

3. WNIOSKI

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na sprecyzowanie następujących wniosków:

1. W badaniach wykazano duże zróżnicowanie wyników intensywności zużycia żeliwa białego przez tarcie suche. Najistotniejsze synergiczne oddziaływanie na procesy zużycia wykazuje węgiel i krzem oraz efekt współdziałania zawartości węgla i temperatury zalewania.
2. Proces azotowania warstw wierzchnich żeliwa białego daje zróżnicowane efekty w kształtowaniu intensywności zużycia w większości wytopów. W żeliwie z wytopu nr 2 i 14 uzyskano negatywne efekty azotowania.
3. Zwiększenie odporności na ścieranie przez azotowanie jest bardziej skuteczne w przypadku stosowania wyższej temperatury przegrzania ciekłego żeliwa. Może mieć to ścisły związek z przyspieszeniem dyfuzji azotu granicami ziarn, stopniem zagazowania żeliwa oraz procesami fizykochemicznymi.

4. Średnia intensywność zużycia żeliwa białego w wyniku azotowania zmniejszyła się 1.5 - krotnie. Największy względny efekt azotowania (80 %) uzyskano w żeliwie z wytopu nr 4 (2.30 % C, 0.40 % Si, 0.56 % Mn, 2.50 % S, $T_{\text{zal}} = 1450^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{p}} = 1550^{\circ}\text{C}$).

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Fraś E.: *Krystalizacja metali*, Warszawa, WNT 2003.
- [2] Gierek A., Bajka L.: *Żeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*, Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 2005.
- [3] Maj Z., Podrzucki Cz., Wojtysiak A.: *Żeliwo stopowe odporne na ścieranie oraz sposób jego otrzymywania*, patent PRL nr 142085 z dnia 17.05.1988 r.
- [4] Nalimow W. N., Czernowa N. A.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*, Warszawa, WNT 1971.
- [5] Podrzucki Cz.: *Żeliwo*, Kraków, ZG Stop 1991.
- [6] Podrzucki Cz., Wojtysiak A.: *Żeliwo plastyczne niestopowe. Skrypty uczelniane 1138 cz. II, 1095 cz. I*, Kraków, AGH 1988.
- [7] Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia, tribotechnika*, Radom, ITEE 2000.