

Piotr NOWAK*

**METODA OCENY SYNERGIZMU WYBRANYCH
ARAMETRÓW OBRÓBKI CIEPLNEJ
NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ WŁASNOŚCI STALI
PRZEZNACZONYCH DO AZOTOWANIA**

**AN ASSESSMENT METHOD OF HEAT TREATMENT
PARAMETERS AND SELECTED SYNERGIES
FOR THE DEVELOPMENT OF STEEL FOR NITRIDING**

Słowa kluczowe:

stal, synergizm, azotowanie

Key words:

steel, synergism, nitriding

Streszczenie

Jednym ze sposobów poprawiających właściwości konstrukcyjne różnych gatunków stali jest azotowanie. Azotowanie jest zabiegiem cieplnym polegającym na dyfuzyjnym nasyceniu azotem warstwy powierzchniowej stalowego elementu. Proces ten polega na wprowadzeniu do warstwy wierzchniej przedmiotu stalowego azotu, który wiąże się z żelazem oraz dodatkami stopowymi, zwłaszcza aluminium, tworząc powierzchniową warstwę azotków. W przeciwieństwie

* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn,
ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

do nawęglania przy azotowaniu strefa powierzchniowa utwardza się bez dodatkowej obróbki cieplnej. Azotowaniu poddaje się stale uprzednio ulepszone cieplnie.

W tribologii w celu poprawy odporności na ścieranie badanych stali można wykorzystać proces azotowania, który zwiększa odporność na zużycie i podnosi własności mechaniczne.

W pracy wykorzystano statystyczne metody planowania eksperymentów, na podstawie których opracowano układ eksperymentów – plan czynnikowy kompletny $2^{(3-0)}$ umożliwiający identyfikację wpływu trzech parametrów obróbki cieplnej na kształtowanie się własności mechanicznych badanych stali. Na podstawie wyników zaplanowanych i przeprowadzonych eksperymentów polegających na azotowaniu badanych stali zgodnie z zaplanowanym zestawem wartości parametrów obróbki cieplnej opracowano modele regresyjne odwzorowujące wpływ wartości parametrów obróbki cieplnej na własności mechanicznych wybranych gatunków stali.

Opracowane modele regresyjne wykorzystano do doboru takich parametrów obróbki cieplnej, których synergizm jest największy. Za pomocą zaplanowanych doświadczeń można pokazać, jak wpływa temperatura hartowania, odpuszczania oraz azotowania na kształtowanie się własności mechanicznych wybranych gatunków stali.

WPROWADZENIE

Azotowanie jest obróbką cieplno-chemiczną, podczas której warstwę wierzchnią przedmiotów wykonanych na ogół z żelaza i jego stopów wzbogaca się dyfuzyjnie azotem. Najważniejszą z właściwości warstw azotowanych jest ich wysoka twardość. Warstwę azotowaną cechuje także odpowiednio wysoka odporność na zmęczenie, ścieranie, korozję, erozję kawitacyjną. Warstwy azotowane zachowują twardość do temperatur w zakresie 500–600°C, a krótkotrwałą nawet w wyższych temperaturach. W procesie azotowania zazwyczaj zostaje zachowana struktura i własności rdzenia przedmiotu uzyskane uprzednią obróbką cieplną (ulepszanie cieplnym wyżarzaniem normalizującym). Powierzchnie przedmiotów przeznaczone do azotowania powinny być obrobione mechanicznie na gotowo, ponieważ po azotowaniu w zależności od struktury warstwy wierzchniej dopuszcza się zdjęcie warstwy o grubości do 0,05 mm [L. 2, 3, 6].

Jeżeli jest to tylko możliwe, elementy powinny być azotowane w całości. Operacja taka jest najprostsza i najtańsza. Jeżeli jednak trzeba pozostawić jakieś obszary nienaruszone, powinny one być odpowiednio zabezpieczone. W tym celu powierzchnie, które chcemy pozostawić nienaruszone, pokrywa się 18–20-mikronową warstwą miedzi (lub brązu). Pomimo swojej kosztowności najlepszym sposobem dającym 100% efektywność jest platynowanie obszarów, które chcemy osłonić. Powłokę taką usuwa się następnie mechanicznie.

MATERIAŁ DO BADAŃ

Do azotowania używa się stali węglowej, niskostopowej i stopowej. W pracy do badań wykorzystano klasyczne stale do azotowania: 41CrAlMo7, 39CrMoV13 oraz 31CrMo12. Stale te różnią się od siebie zawartością procentową poszczególnych pierwiastków stopowych, co wpływa na własności tribologiczne tych stali. Jako medium w procesie azotowania stosuje się środowisko gazowe z wykorzystaniem amoniaku. Sama operacja bazuje na zapewnieniu w trakcie procesu odpowiedniej termodynamicznej aktywności atmosfery azotującej, określanej umownie poprzez wartość potencjału azotowego. W czasie tego typu obróbki zachodzą trzy podstawowe procesy:

- Dysocjacja amoniaku – polegająca na rozkładzie cząsteczek podgrzanego do temperatury 500°C gazu i wydzielenia aktywnych atomów pierwiastka dyfundującego – azotu, wg równania: $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$,
- absorpcja – polegająca na wchłanianiu (rozpuszczaniu) w metalu powstałego azotu, który następnie reaguje z żelazem, tworząc azotek,
- dyfuzja – polegająca na przemieszczaniu się obcych atomów w sieci przestrzennej obrabianego metalu.

Po azotowaniu, azotki żelaza, a w szczególności aluminium i chromu, tworzą cienką, nieprzekraczającą 0,6 mm oraz bardzo twardą i odporną na ścieranie, warstwę na powierzchni stali. Azotowanie jest procesem długotrwałym; trwa od 10 do 100 godzin. Utworzona warstwa zapewnia polepszenie następujących właściwości:

- odporność na ścieranie,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- twardość,
- właściwości przeciwkorozyjne (nierdzewność).

Stale do azotowania: 41CrAlMo7, 39CrMoV13 31CrMo12 wyjściowo w stanie ulepszonym, przeznaczone do finalnej obróbki cieplno-chemicznej. Skuteczność azotowania stali: 41CrAlMo7 39CrMoV13 31CrMo12 jest bardzo wysoka zarówno pod względem utwardzenia powierzchniowego, jak i głębokości azotowania, od kilku setnych do kilku dziesiątych milimetra, w zależności od czasu azotowania. Wyroby wykonane ze stali po azotowaniu uzyskują bardzo dobrą odporność na ścieranie przy niskim współczynniku tarcia współpracujących powierzchni. Mogą one pracować w podwyższonej temperaturze, nieprzekraczającej temp. azotowania poniżej 500°C. Stale tego typu stosuje się do azotowania na części maszyn wymagające dużej twardości, odporności na ścieranie i zużycie powierzchni, po azotowaniu twardość wynosi powyżej 1000 HV. Stale do azotowania ponadto stosuje się na części maszyn o wysokiej wytrzymałości rdzenia i wysokiej twardości powierzchni.

Tabela 1. Skład chemiczny (% masowy) badanych stali

Table 1. Chemical composition (% by mass) of steel

Numer normy	Znak stali	Zawartość składników, %								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Inne
PN-89/H-84030/03	41CrAlMo7	0,35÷ ±0,42	0,30÷ ±0,60	0,17÷ ±0,37	0,025	0,025	1,35÷ ±1,65	0,25	0,15÷ ±0,25	Al= 0,80
PN-89/H-84030/03	39CrMoV13	0,29÷ ±0,36	0,50÷ ±0,80	0,17÷ ±0,37	0,035	0,035	2,40÷ ±2,80	0,30	0,35÷ ±0,45	V= 0,25
PN-89/H-84030/03	31CrMo12	0,20÷ ±0,30	0,40÷ ±0,65	0,17÷ ±0,37	0,035	0,035	2,90÷ ±3,50	0,40	0,40÷ ±0,55	–

* Dodatkowe wymagania w zakresie składu chemicznego wg ark. 01 normy, p. 2.1.2; skład chemiczny dla analizy kontrolnej półwyrobów i wyrobów wg ark. 01, p. 2.1.3.

- 1) Dopuszcza się zawartości maksimum 0,05% Ti i maksimum 0,20% W, a w stalach 41CrAlMo7,31CrMo12 także zawartość maksimum 0,05% V (maksimum 0,08% V w stalach produkowanych procesem elektrycznym ze wsadu z udziałem złomu stopowego). Dla specjalnych zastosowań stali mogą być uzgodnione przy zamówieniu niższe zawartości tych pierwiastków.
- 2) Zawartość miedzi nie może przekraczać 0,30% i gwarantuje ją dostawca. Na żądanie zamawiającego, uzgodnione przy zamówieniu, ogranicza się zawartość miedzi do maksimum 0,15% w stalach przeznaczonych do kucia.

OPIS METODY BADAŃ I PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW

Wykorzystując statystyczne metody planowania doświadczeń, dokładnie plan czynnikowy kompletny $2^{(3-0)}$, opracowano zestaw eksperymentów umożliwiający identyfikację wpływu parametrów obróbki cieplnej na kształtowanie się własności mechanicznych badanych stali. Wartości zmiennych niezależnych (x_1 – temperatura azotowania, x_2 – temp. odpuszczania i x_3 – temp. hartowania t_3 [°C]) oraz wartości średnie zmiennych zależnych (y_4 – grubość warstwy naazotowanej, y_5 – twardość HB oraz y_6 – wytrzymałość na rozciąganie Rm) uzyskane w rezultacie uśrednienia wyników czterech realizacji zaplanowanych procesów azotowania pokazano w **Tabeli 2**.

Niezbędne obliczenia statystyczne konieczne do wyznaczenia wartości współczynników regresji odwzorowujących wpływ zmiennych niezależnych na zmienne wyjściowe wykonano w programie STATISTICATMPL. W celu oceny istotności opracowanych modeli regresyjnych wykorzystano analizę wariancji ANOVA, której rezultaty przedstawiono w **Tabelach 3–5**. Uzyskane równania regresji pozwoliły zaobserwować wpływ synergizmu procesów obróbki cieplnej na własności badanych stali.

Tabela 2. Planowanie i wyniki badań za pomocą doświadczeń ekstremalnych dla stali 41CrAlMo7

Table 2. Planning and test results using the extreme experience for steel 41CrAlMo7

		Temperatura azotowania t ₁ [°C]	Temperatura odpuszczania t ₂ [°C]	Temperatura hartowania w oleju t ₃ [°C]				Grubość warstwy naazotowanej z [mm]	Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]
Poziom podstawowy	Przedział zmian	510	610	920						
	Poziom wyższy	10	40	20						
	Poziom niższy	520	650	940						
		500	570	900						
Symbole kodowe	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	y ₃	y ₄	y ₅
Nr próby										
1	+	-	-	-	+	+	+	0,35	210	978
2	+	+	-	-	-	-	+	0,41	228	901
3	+	-	+	-	-	+	-	0,37	196	980
4	+	+	+	-	+	-	-	0,50	229	896
5	+	-	-	+	+	-	-	0,47	201	929
6	+	+	-	+	-	+	-	0,39	189	967
7	+	-	+	+	-	-	+	0,44	216	899
8	+	+	+	+	+	+	+	0,49	226	897
Wsp. regresji	0,427	0,02	0,0225	0,02	0,025	-0,0275	-0,005			
b(y ₃)	211,8	6,125	4,875	-3,875	4,625	-6,625	8,125			
b(y ₄)	924,6	-15,625	-12,875	-7,875	-5,875	24,625	-12,125			
b(y ₅)										

Na podstawie analizy statystycznej wartości charakteryzujących grubość, twardość i wytrzymałość azotowanych warstw uzyskanych w badanych procesach otrzymano następujące funkcje regresji opisujące wpływ zmiennych zależnych na:

Grubość warstwy azotowanej:

$$y_3 = 0,427 + 0,02x_1 + 0,0225x_2 + 0,02x_3 + 0,0225x_1x_2 - 0,0275x_1x_3 - 0,005x_2x_3$$

Twardość:

$$y_4 = 211,8 + 6,125x_1 + 4,875x_2 - 3,875x_3 + 4,625x_1x_2 - 6,625x_1x_3 + 8,125x_2x_3$$

Wytrzymałość na rozciąganie:

$$y_5 = 924,6 - 15,625x_1 - 12,875x_2 - 7,875x_3 - 5,875x_1x_2 + 24,625x_1x_3 - 12,125x_2x_3$$

- gdzie: x_1 – temperatura azotowania t_1 [°C];
 x_2 – temperatura odpuszczania t_2 [°C];
 x_3 – temperatura hartowania t_3 [°C];
 x_1x_2 – współdziałanie temperatury azotowania z temperaturą odpuszczania;
 x_1x_3 – współdziałanie temperatury azotowania z temperaturą hartowania;
 x_2x_3 – współdziałanie temperatury odpuszczania z temperaturą hartowania.

Zawarte w tabeli 3 wartości statystyk t-Studenta i odpowiadające im wartości prawdopodobieństw testowych p – mniejsze od przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ potwierdzają istotność statystyczną współczynników funkcji regresji grubości warstwy azotowanej w zależności od badanych zmiennych zależnych. Podobnie wartości przedstawione w **Tabeli 4 i 5** potwierdzają istotność statystyczną współczynników funkcji regresji twardości i wytrzymałości na rozciąganie.

Tabela 3. Wyniki analizy istotności statystycznej współczynników modelu regresyjnego grubości warstwy azotowanej

Table 3. Results of analysis of the statistical significance of a regression model layer thickness a nitriding

Wejśc.	Wpółcz. regresji; R ² = ,82; Popr., 798 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,00067 ZZ Gr. warstwy [mm]					
	Regresji Wsp.	Błąd std	t(34)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	0,428	0,0041	104,29	0,0000	0,419	0,436
(1)A	0,020	0,0041	4,88	0,0000	0,012	0,028
(2)B	0,022	0,0041	5,49	0,0000	0,014	0,031
(3)C	0,020	0,0041	4,88	0,0000	0,012	0,028
1 wz.2	0,025	0,0041	6,10	0,0000	0,017	0,033
1 wz.3	-0,028	0,0041	-6,71	0,0000	-0,036	-0,019

Tabela 4. Wyniki analizy istotności statystycznej współczynników modelu regresyjnego dla twardości

Table 4. Results of analysis of the statistical significance of a regression model for hardness

Wejśc.	Wpółcz. regresji; R ² = ,99; Popr., 94 2**(3-0) plan; Resztowy MS=13,49 ZZ Tward HD					
	Regresji Wsp.	Błąd std	t(33)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	211,90	0,58	364,87	0,00	210,72	213,08
(1)A	6,10	0,58	10,50	0,00	4,92	7,28
(2)B	4,85	0,58	8,35	0,00	3,67	6,03
(3)C	-3,85	0,58	-6,63	0,00	-5,03	-2,67
1 wz.2	4,65	0,58	8,01	0,00	3,47	5,83
1 wz.3	-6,65	0,58	-11,45	0,00	-7,83	-5,47
2 wz.3	8,10	0,58	13,95	0,00	6,92	9,28

Tabela 5. Wyniki analizy istotności statystycznej współczynników modelu regresyjnego dla wytrzymałości na rozciąganie

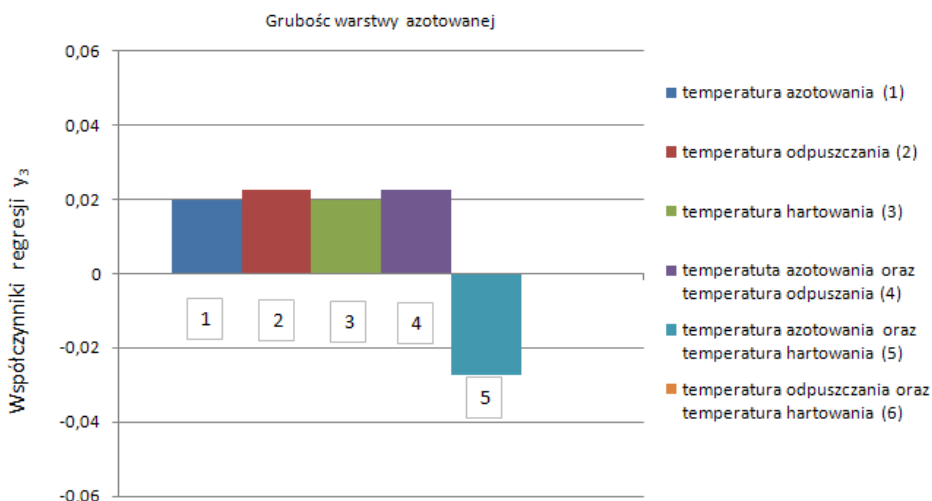
Table 5. Results of analysis of the statistical significance of a regression model for tensile strength

Wejśc.	Wpółcz. regresji; $R^2 = ,86$; Popr.: ,84 2**(3-0) plan; Resztowy MS=218,78 ZZ Wytr.					
	Regresji Wsp.	Błąd std	t(34)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	930,60	2,34	397,91	0,00	925,85	935,35
(1)A	-15,90	2,34	-6,80	0,00	-20,65	-11,15
(2)B	-13,10	2,34	-5,60	0,00	-17,85	-8,35
(3)C	-8,15	2,34	-3,48	0,00	-12,90	-3,40
1 wz.2	-6,10	2,34	-2,61	0,01	-10,85	-1,35
1 wz.3	24,35	2,34	10,41	0,00	19,60	29,10

Miarą oceny modelu regresyjnego jest współczynnik korelacji R^2 oceniający stopień dopasowania modelu do wyników pomiarów na podstawie, który został opracowany.

Śród opracowanych modeli najlepiej dopasowanym okazał się model odwzorowujący twardość dla stali 41CrAlMo7 ($R^2 = 0,99$), następnie model odwzorowujący wytrzymałość ($R^2 = 0,86$) i model grubości ($R^2 = 0,84$).

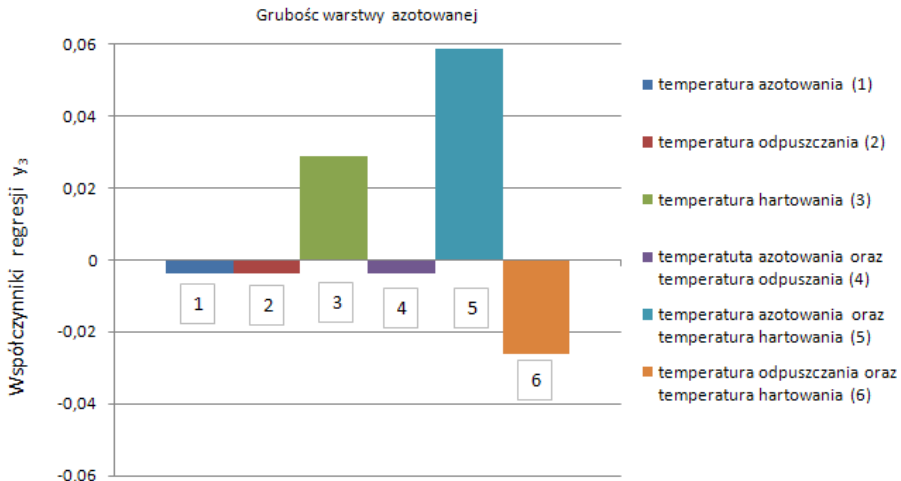
Współczynniki regresji opisujące grubość warstwy azotowanej w [mm] dla stali 41CrAlMo7 mają postać:



Rys. 1. Grubość warstwy azotowanej dla stali 41CrAlMo7

Fig. 1. Nitriding layer thickness for steel 41CrAlMo7

Współczynniki regresji opisujące grubość warstwy azotowanej w [mm] dla stali 39CrMoV13 mają postać:



Rys. 2. Grubość warstwy azotowanej dla stali 39CrMoV1

Fig. 2. Nitriding layer thickness for steel 39CrMoV1

PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Decydujący dodatni wpływ na grubość warstwy azotowanej stali 41CrAlMo7 ma temperatura odpuszczania. Natomiast temperatura azotowania wraz z odpowiednio dobraną temperaturą odpuszczania powoduje wzrost grubości warstwy azotowanej i poprawę własności mechanicznych. Synergizm związany z temperaturą azotowania oraz temperaturą hartowania powoduje zmniejszenie grubości warstwy azotowanej, co może skutkować spadkiem odporności na zużycie. Na twardość badanej stali największy dodatni wpływ na kształtowanie się własności konstrukcyjnych badanej stali wywiera synergizm temperatury odpuszczania i temperatury hartowania, tzn. im wyższa temperatura odpuszczania i hartowania, tym większa odporność na zużycie w związku ze wzrostem twardości. Ujemny wpływ na twardość badanej stali wywiera temperatura azotowania z odpowiednio dobraną temperaturą hartowania.

Analizując grubość warstwy azotowanej stali 39CrAlV13 zaobserwowano, że największy wzrost występuje przy współdziałaniu ze sobą wysokiej temperatury azotowania oraz hartowania. Dla opracowanych wyników badań twardości dla stali przeznaczonej do azotowania zaobserwowano, że najlepsze własności konstrukcyjne można uzyskać przy odpowiednim współdziałaniu temperatury azotowania oraz hartowania. Biorąc pod uwagę wytrzymałość na rozciąganie badanej stali, zauważono, że największy synergizm związany z poprawą własności mechanicznych występuje dla odpowiedniego doboru temperatury azotowania i odpuszczania.

Największy wpływ na grubość warstwy azotowanej ma synergizm związany z temperaturą azotowania i odpuszczania stali 31CrMo12, powodując przy odpowiednim doborze temperatur poprawę własności konstrukcyjnych. Jeżeli natomiast w odpowiedni sposób dobierzemy temperaturę azotowania i hartowania, możemy spowodować zmniejszenie grubości warstwy azotowanej. Na twardość badanej stali największy wpływ na poprawę własności trybologicznych wykazuje synergizmem związany z temperaturą odpuszczania i hartowania, powodując przy odpowiednim doborze temperatur znaczny wzrost twardości badanej stali. Pogorszenie własności mechanicznych uzyskano przy odpowiednim doborze temperatury azotowania i hartowania badanej stali. Natomiast przy badaniu wytrzymałości na rozciąganie badanej stali zaobserwowano, że największy synergizm wykazuje temperatura azotowania i hartowania, powodując znaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Zupełnie inaczej wykazuje synergizm temperatury odpuszczania i hartowania, czego konsekwencją przy odpowiednim doborze temperatur może być spadek własności mechanicznych przez zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie.

PODSUMOWANIE

Badając wybrane gatunki stali, pokazano, jak zmieniają się własności mechaniczne badanej stali poprzez zmianę parametrów obróbki cieplnej – temperatury odpuszczania, hartowania i azotowania. Do opracowania wyników wykorzystano metodę analizy istotności statystycznej. Metoda ta pozwala w prosty sposób określić wpływ różnych parametrów obróbki cieplnej na własności badanych materiałów, dlatego dość często jest stosowana w technice.

Przedstawione w pracy współzależności i synergizm parametrów obróbki cieplnej i własności mechanicznych mogą być przydatne m.in. w technologii obróbki cieplnej stali przeznaczonej do azotowania, jak również w aspekcie wybranych charakterystyk trybologicznych.

LITERATURA

1. Belzunce F.J., Ziadi A., Rodriguez C.: Structural integrity of hot strip mill rolling rolls, *Engineering Failure Analysis* 11 (2004) 7897797.
2. Krawczyk J., Kot M., Zimowski S., Madej M.: Analiza mechanizmu zużycia podczas kontaktu trybologicznego wybranych stali zestalą 80CrMoV4-3, XXXVII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica 29. IX +2. X 2009, s. 242+248.
3. Ray A.K., Mishra K.K., Das G., Chaudhary P.N.: Life of roUs in a cold roll ing mill in a steel plant-operation versus manufacture, *Engineering Failure Analysis* 7 (2000) 55767.
4. Żaba K., Nowak S., Kawecki A., Krawczyk J., Stanisławski W., Październiak P.: Dobór materiałów na cierne elementy tłumików drgań w zawieszeniach wagonów, *Rudy i Metale Nieżelazne* 53, 1 (2008) 8-7-14.

5. Krawczyk J.: Własności tribologiczne stali stopowych nadeutektoidalnych, *Tribologia* 224, 2 (2009) 39751.
6. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E.: Wpływ normalizowania niezupełnego na kinetykę mechanizmu zużycia tribologicznego staliwa ledeburtycznego, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 76, 6 (2009) 3997404.
7. Pacyna J., Krawczyk J.: Warunki powstawania i własności białej warstwy, *Hutnik - Wiadomości Hutnicze* 72, 11 (2005) 545-7-553.
8. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E., Madej M.: Kształtowanie własności trybologicznych staliwa G200CrNiMo4-3-3 przez obróbkę cieplną, *Przegląd Odlewnictwa* 4 (2009) 1907194.
9. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E.: The high-temperature tribology of iron matrix hypoeutectic alloy after under-annealing normalizing, *Metallurgy and Foundry Engineering* 34, 2 (2008) 1257131.
10. Krawczyk J.: Zjawiska tribologiczne zachodzące na powierzchni czopów żeliwnych walców hutniczych, *Tribologia* 219,3 (2008) 17726.
11. Krawczyk J.: Effect of the microstructure on tribological phenomena occurring on the surfach of a mill roll made of SAS T cast iron (GJSL-HV600 - GJSL-330NiMoCr12-8-3), *Archives of Foundry Engineering* 8, 2 (2008) 1707174.
12. Pacyna J., Krawczyk J.: Wpływ składników strukturalnych na własności eksploatacyjne walców roboczych w walcowniach gorących, *Konferencja Naukowo-Techniczna Huty Buczek Sp. z o.o.*, 2007, s. 10712.

Summary

Nitriding is one of the ways to improve the construction characteristics of different types of steel. Nitriding is a heat input for the diffuse nitrogen saturation of the surface layer of the steel element. This process consists of the introduction to a film passing through the steel object, which is associated with iron overload and especially aluminium, creating a surface layer of borides. In contrast to surface area nitriding cured without additional heat treatment, nitriding is constantly tempered.

This work uses statistical methods to design experiments. The plan is to complete a fractional factorial design 2 (3-0) to identify the impact of three parameters of the heat treatment on the evolution of the mechanical properties of steel. On the basis of the results of planned and carried out experiments involving the nitriding of steel in accordance with the scheduled set of parameter values of the heat treatment, Regression models were developed that capture the impact of the parameter values of the heat treatment on the mechanical properties of selected steel grades.