

Dr inż. Beata PACHUTKO

Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

Dr hab. inż. Leszek MAŁDZIŃSKI, prof. nadzw. PP

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej, Poznań

Nieniszczące badania stref azotków żelaza i warstw azotowanych na stalach 38HMJ i WCL za pomocą przyrządów Wirotest

Non-destructive examination of iron nitride zones and nitrided layers on 38HMJ and WCL steels by means of Wirotest devices

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań grubości strefy azotków żelaza $\epsilon+\gamma$ i warstwy azotowanej $\epsilon+\gamma+\alpha$ na stali WCL i 38HMJ. Grubość warstwy azotowanej scharakteryzowano jako odległość od powierzchni do umownej twardości 550 HK 0,1 dla stali 38HMJ i 750 HK 0,1 dla stali WCL. Zastosowano przyrząd Wirotest 301 z czujnikiem o częstotliwości 0,5 MHz i przyrząd Wirotest 03 z czujnikiem o częstotliwości 3,4 kHz. Stale azotowano gazowo w temperaturze 550 °C w czasie 2÷43 h przy potencjale azotowym $N_p=4 \text{ atm}^{-0.5}$ oraz w temperaturze 500 °C w czasie 2÷48 h przy potencjale azotowym $N_p=14 \text{ atm}^{-0.5}$. Wykazano, że ocena grubości strefy faz $\epsilon+\gamma$ i warstwy azotowanej jest wystarczająco dokładna. Stwierdzono też wpływ twardości rdzenia stali 38HMJ na wskazania przyrządów wiropędowych. Zależność wskazań przyrządów wiropędowych opisuje funkcja wielomianowa drugiego stopnia. Opisaną metodyką badań może być zastosowana do oceny jakości części maszyn i innych odpowiedzialnych wyrobów po azotowaniu.

Abstract

The paper presents the results of thickness examination of $\epsilon + \gamma$ iron nitride zones and the nitrided $\epsilon + \gamma + \alpha$ layer on WCL and 38HMJ steel. The thickness of the nitrided layer has been defined as the distance from the surface to the conventional hardness of 550HK 0.1 for the 38HMJ steel and 750 HK 0.1 for the WCL steel. Wirotest 301 device with a 0.5 MHz frequency sensor and Wirotest 03 device with a 3.4 kHz frequency sensor have been used. The steels were gas nitrided at 550 °C for 2÷43 hours with the nitrogen potential of $N_p = 4 \text{ atm}^{-0.5}$ and at 500 °C for 2÷48 hours with the nitrogen potential of $N_p = 14 \text{ atm}^{-0.5}$. It has been proved that the assessment of the thickness of the $\epsilon + \gamma$ phase zone and the nitrided layer is sufficiently accurate. It has also been found that the hardness of the 38HMJ steel core influences the indications of eddy current devices. The relationship of the eddy current device indications is described by a second order polynomial function. The examination methodology described here can be applied to the assessment of the quality of nitrided machine parts and other responsible products.

Słowa kluczowe: strefa azotków, warstwa azotowana, azotowanie gazowe, metoda prądów wirowych

Key words: nitride zone, nitrided layer, gas nitriding, eddy current method

1. WSTĘP

Przedstawiono wyniki badań, które były kontynuacją wcześniejszych badań przeprowadzonych celem wykorzystania metody prądów wirowych do wyznaczania krzywych kalibracyjnych i określania za pomocą tych krzywych

grubości warstwy azotowanej oraz grubości strefy azotków żelaza $\epsilon+\gamma$ na stali narzędziowej do pracy na gorąco WCL [1, 2]. Warunki azotowania gazowego dobrano tak, aby otrzymać warstwy azotowane o grubości od ok. 0,12 do ok. 0,4 mm i strefy fazy $\epsilon+\gamma$ o grubości od

ok. 5 do ok. 25 μm . Wyniki badań stref faz $\epsilon+\gamma$ przy częstotliwościach 0,5 i 1 MHz charakteryzowały się jednak pewną rozbieżnością. Dlatego zdecydowano o uzupełnieniu badań w odniesieniu do stali WCL i wykonaniu podobnych badań na stali konstrukcyjnej stopowej do azotowania 38HMJ.

Celem spełnienia oczekiwań klientów zainteresowanych nieniszczącą kontrolą jakości procesu azotowania lub azotowanych części maszyn o dużych wymaganiach odporności na ścieranie i obciążenia udarowe zaproponowano ocenę jakości warstwy azotowanej na podstawie rozkładów twardości Knoopa. Grubość warstwy scharakteryzowano jako odległość od powierzchni do umownej twardości 550 HK 0,1 (ok. 520 HV 0,1) dla stali 38HMJ oraz 750 HK 0,1 (ok. 720 HV 0,1) dla stali WCL. Wybór umownej twardości zależał od twardości stali po ulepszeniu cieplnym. Warunki obróbki cieplnej stali WCL (odpowiednik stali X37CrMoV5-1) były zgodne z podanymi w normie PN-EN ISO 4957:2004 – Stale narzędziowe. Obróbkę cieplną stali 38HMJ (odpowiednik stali 41CrAlMo7-10) wykonano zgodnie z wytycznymi podanymi w normie PN-EN 10085:2003 – Stale do azotowania – Warunki techniczne dostawy. Warunki azotowania gazowego były zbliżone do tych, jakie stosowano we wcześniejszych badaniach i które zapewniały otrzymanie dwustrefowych warstw azotków $\epsilon+\gamma$. Wprowadzono dwugodzinny proces azotowania, aby otrzymać zarówno płytką strefę azotków żelaza, jak i strefę azotowania wewnętrznego próbek badawczych.

2. BADANY MATERIAŁ, OBRÓBKĄ CIEPLNĄ I CIEPLNO-CHEMICZNĄ ORAZ METODYKA BADAŃ

Badane były stale WCL (X37CrMoV5-1) i 38HMJ (41CrAlMo7-10), których skład chemiczny był zgodny z normami PN-EN ISO 4957:2004 i PN-EN 10085:2003.

Wykonano następujące próbki:

- walcowe o wymiarach $\phi 29 \times 16$ mm ze stali WCL oraz $\phi 28 \times 15$ mm ze stali 38HMJ przeznaczone do badań za pomocą prądów wirowych,

- prostopadłościennie o wymiarach $10 \times 14 \times 16$ mm ze stali WCL oraz $9 \times 13 \times 15$ mm ze stali 38HMJ przeznaczone do badań mikroskopowych strefy faz $\epsilon+\gamma$.

Obróbka cieplna

Stal WCL:

- austenitzowanie w temperaturze 1020 °C w soli, chłodzenie w oleju,
- odpuszczanie w temperaturze 560 °C/2 godz. w soli.

Twardość próbek po odpuszczaniu wyniosła 53 HRC.

Stal 38HMJ:

- austenitzowanie w temperaturze 920 °C w soli, chłodzenie w oleju,
- wariant I: odpuszczanie w temperaturze 560 °C/2 godz. w soli, twardość próbek wyniosła 42 HRC, lub
- wariant II: odpuszczanie w temperaturze 620 °C/2 godz. w soli, twardość próbek wyniosła 36 HRC.

Obróbka cieplno-chemiczna

Warunki procesów azotowania gazowego:

- atmosfera: mieszanina amoniaku i dysocjowanego amoniaku,
- wariant I: temperatura azotowania 550 °C, potencjał azotowy $N_p = 4,0 \text{ atm}^{-0,5}$, czas azotowania: 2, 4, 16, 43 godz.,
- wariant II: temperatura azotowania 500 °C, potencjał azotowy $N_p = 14,0 \text{ atm}^{-0,5}$, czas azotowania: 2, 4, 16, 48 godz.

Temperatury i potencjały azotowe dobrano w taki sposób, aby warstwy azotowane składały się ze strefy azotków żelaza $\epsilon+\gamma$ przy powierzchni stali i strefy wydzieleniowej pod strefą azotków.

W pracy wykorzystano następujące techniki i metody badawcze:

- mikroskopię świetlną do wyznaczenia grubości strefy faz $\epsilon+\gamma$. Pomiary grubości wykonano na trawionych nitalem próbkach ze stali WCL i 38HMJ, których strukturę badano za pomocą mikroskopu ECLIPSE L150 (Nikon),

- wyznaczenie umownej grubości warstwy azotowanej na podstawie badania rozkładów twardości metodą Knoopa wg normy PN-EN ISO 4545-1:2006 – Metale - Pomiar twardości sposobem Knoopa – Część 1: Metoda badania, przy sile obciążającej 0,98 N (symbol twardości HK 0,1) za pomocą twardościomierza MICROMET 2104 (Witz-Bueher), na przekrojach poprzecznych próbek. Zastosowano następujące kryteria: $g_{550 \text{ HK}}$ - oznaczało odległość od powierzchni próbki do miejsca, w którym twardość stali 38HMJ wynosiła 550 HK 0,1, oraz $g_{750 \text{ HK}}$ – jako odległość od powierzchni próbki do miejsca, w którym twardość stali WCL wynosiła 750 HK 0,1,
- wyznaczenie rozkładu stężenia azotu w warstwie wierzchniej stali 38HMJ za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego EDS (EDAX),
- badania metodą prądów wirowych za pomocą układów pomiarowych składających się z:
 - przyrządu Wirotest 03 i czujnika stykowego nieekranowanego o polu detekcji o ϕ 8,2 mm, przy częstotliwości prądu magnesowania 3,4 kHz,
 - przyrządu Wirotest 301 i czujnika stykowego nieekranowanego o częstotliwości nominalnej 0,5 MHz i polu detekcji o ϕ 6,5 mm.

3. WYNIKI BADAŃ

W tablicach 1÷3 pokazano wyniki pomiarów grubości stref faz $\epsilon+\gamma'$ w zależności od warunków azotowania badanych stali, grubości warstw azotowanych: $g_{550 \text{ HK}}$ o twardości powyżej 550 HK 0,1 dla stali 38HMJ oraz $g_{750 \text{ HK}}$ o twardości powyżej 750 HK 0,1 dla stali WCL.

Tablica 1. Wpływ warunków azotowania gazowego stali WCL na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma'$ i warstwy $g_{750 \text{ HK}}$

Table 1. The influence of WCL steel gas nitriding conditions on the thickness of $\epsilon+\gamma'$ phase zone and the $g_{750 \text{ HK}}$ layer

Warunki azotowania			Grubość	
Temp. °C	Czas godz.	Potencjał azotowy atm ^{-0,5}	$\epsilon+\gamma'$ μm	$g_{750 \text{ HK}}$ mm
550	2	4,0	6,9	0,1
550	4	4,0	7,8	0,113
550	16	4,0	17,9	0,214
550	43	4,0	20,3	0,284
500	2	14,0	0,8	0,041
500	4	14,0	5,6	0,071
500	16	14,0	6,9	0,116
500	48	14,0	12,6	0,19

Tablica 2. Wpływ czasu azotowania gazowego stali 38HMJ, austenitzowanej w temperaturze 920 °C i odpuszczonej w temperaturze 560 °C/ 2 godz., na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma'$ i warstwy $g_{550 \text{ HK}}$

Table 2. The influence of the gas nitriding time of 38HMJ steel austenitized at 920 °C and tempered at 560 °C/2 hrs on the thickness of the $\epsilon+\gamma'$ phase zone and of the $g_{550 \text{ HK}}$ layer

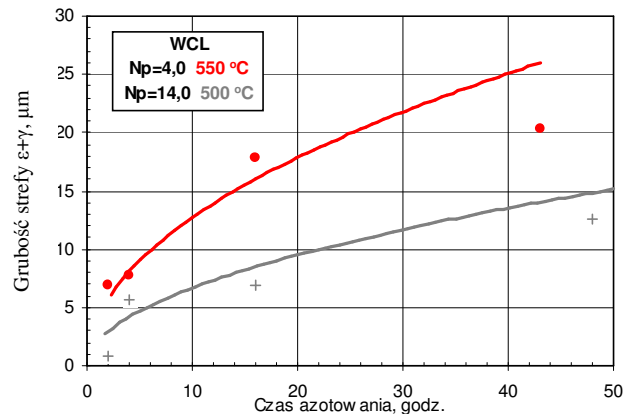
Warunki azotowania			Grubość	
Temp. °C	Czas godz.	Potencjał azotowy atm ^{-0,5}	$\epsilon+\gamma'$ μm	$g_{550 \text{ HK}}$ mm
550	2	4,0	10,5	0,147
550	16	4,0	24,2	0,333
550	43	4,0	32,1	0,527
500	2	14,0	1,2	0,079
500	4	14,0	6,4	0,122
500	16	14,0	9,4	0,196
500	48	14,0	18,6	0,327

Tablica 3. Wpływ czasu azotowania gazowego stali 38HMJ, austenitzowanej w temperaturze 920 °C i odpuszczonej w temperaturze 620 °C/2 godz., na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma$ i warstwy $g_{550\text{ HK}}$

Table 3. The influence of the gas nitriding time of 38HMJ steel austenitized at 920 °C and tempered at 620 °C/2 hrs on the thickness of the $\epsilon+\gamma$ phase zone and of the $g_{550\text{ HK}}$ layer

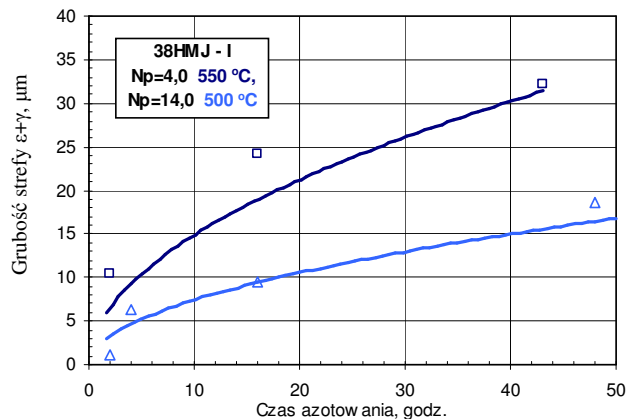
Warunki azotowania			Grubość	
Temp. °C	Czas godz.	Potencjał azotowy $\text{atm}^{-0.5}$	$\epsilon+\gamma$ μm	$g_{550\text{ HK}}$ mm
550	2	4,0	8,7	0,124
550	4	4,0	9,1	0,149
550	16	4,0	24,5	0,297
550	43	14,0	25,4	0,411
500	2	14,0	1,4	0,06
500	16	14,0	9,3	0,172
500	48	14,0	16,7	0,276

Na rys. 1 pokazano wyniki kinetyki wzrostu strefy faz $\epsilon+\gamma$ w układzie czas - grubość strefy azotków żelaza na stali WCL. Podobnie, rys. 2 przedstawia wyniki kinetyki wzrostu strefy azotków żelaza w zależności od czasu azotowania stali 38HMJ. Zaznaczone krzywe, będące parabolami pochodzą z doświadczalnie opracowanego modelu kinetyki wzrostu strefy faz $\epsilon+\gamma$ na stalach gatunku 38HMJ i WCL, który opisano w pracy [3]. Wzrost strefy azotków żelaza można uznać za paraboliczny, a pewne odchylenia szczególnie widoczne dla próbek azotowanych w temperaturze 550 °C należy tłumaczyć sposobem preparatyki próbek. W badaniach zastosowano inkludowanie próbek na gorąco w prasce metalograficznej. Pomimo obniżenia ciśnienia prasowania żywicy epoksydowej nie uniknięto częściowego wykruszenia azotków w przypadku stref o grubości powyżej 20 μm . Inną przyczyną odchylenia wzrostu strefy faz $\epsilon+\gamma$ od wzrostu parabolicznego mógł być również brak równowagi między stężeniem powierzchniowym azotu w fazie ϵ a atmosferą azotującą w początkowym okresie procesu azotowania, co zaobserwowano we wcześniej prowadzonych badaniach [1, 2].



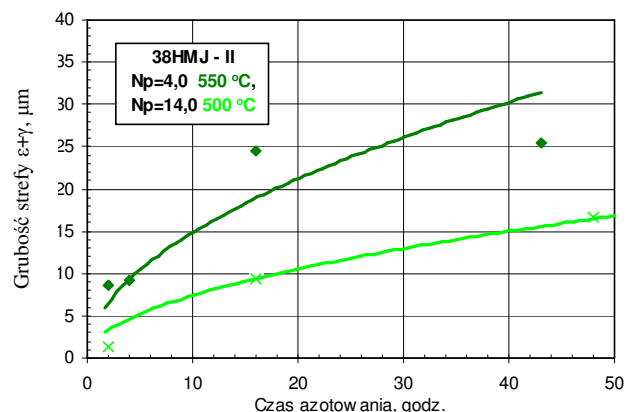
Rys. 1. Wpływ warunków azotowania stali WCL na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma$

Fig. 1. The influence of WCL steel gas nitriding conditions on the thickness of $\epsilon+\gamma$ phase zone



Rys. 2. Wpływ warunków azotowania stali 38HMJ na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma$. Austenitzowanie w temperaturze 920 °C i odpuszczenie w temperaturze 560 °C/2 godz.

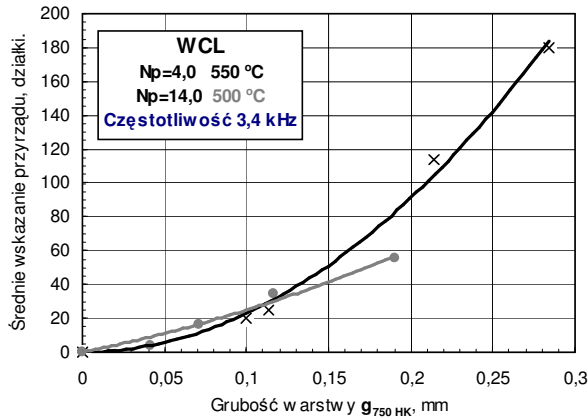
Fig. 2. The influence of 38HMJ steel gas nitriding conditions on the thickness of $\epsilon+\gamma$ phase zone. Austenitizing at 920 °C and tempering at 560 °C/2 hrs



Rys. 3. Wpływ warunków azotowania stali 38HMJ na grubość strefy faz $\epsilon+\gamma$. Austenitzowanie w temperaturze 920 °C i odpuszczenie w temperaturze 620 °C/2 godz.

Fig. 3. The influence of 38HMJ steel gas nitriding conditions on the thickness of $\epsilon+\gamma$ phase zone. Austenitizing at 920 °C and tempering at 620 °C/2hrs

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 03 w zależności od grubości warstwy azotowanej $g_{750\text{ HK}}$ na stali WCL pokazano graficznie na rys. 4.



Rys. 4. Wpływ grubości warstwy azotowanej $g_{750\text{ HK}}$ na wskazania przyrządu Wirotest 03 w zależności od warunków azotowania stali WCL

Fig. 4. The influence of the $g_{750\text{ HK}}$ nitrided layer thickness on the indications of the Wirotest 03 device depending on the WCL steel nitriding conditions

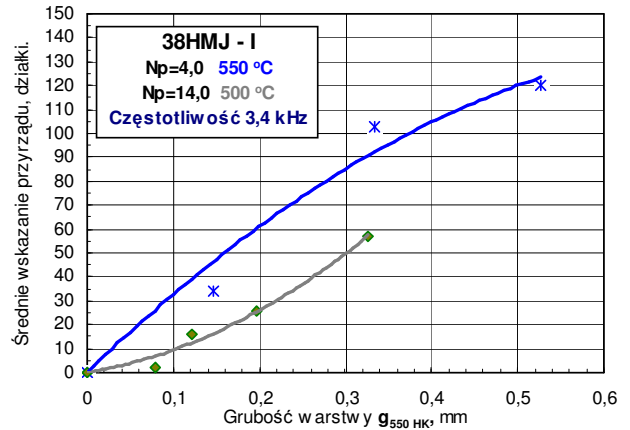
Związek średnich wskazań przyrządu Wirotest 03 i grubości warstwy azotowanej $g_{750\text{ HK}}$ stali WCL opisują równania podane w tabelicy 4.

Tabela 4. Opis zależności wskazań przyrządu Wirotest 03 od grubości warstwy azotowanej $g_{750\text{ HK}}$ stali WCL

Table 4. Description of the relationship of the Wirotest 03 device indications and the thickness of the $g_{750\text{ HK}}$ nitrided layer on WCL steel

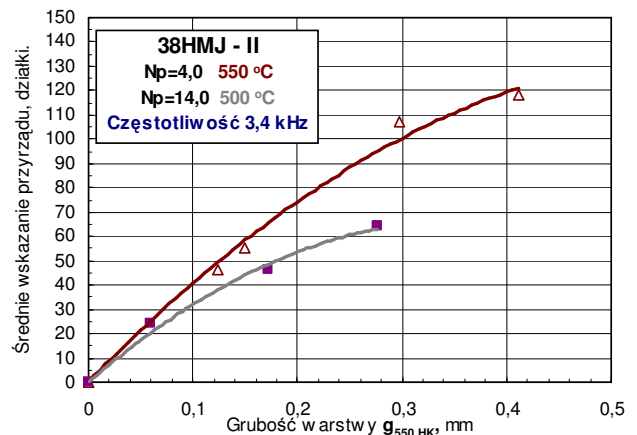
Warunki azotowania		Równanie	Współczynnik R^2
Temp. °C	N_p atm ^{-0,5}		
550	4,0	$y = 22792 g_{750\text{ HK}}^2 + 0,86 g_{750\text{ HK}}$	0,99
500	14,0	$y = 545,4 g_{750\text{ HK}}^2 + 194,8 g_{750\text{ HK}}$	0,98

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 03 w zależności od grubości warstwy azotowanej $g_{550\text{ HK}}$ stali 38HMJ podano graficznie na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Wpływ grubości warstwy azotowanej $g_{550\text{ HK}}$ na wskazania przyrządu Wirotest 03 w zależności od warunków azotowania stali 38HMJ. Temperatura austenitzowania 920 °C, temperatura odpuszczania 560 °C

Fig. 5. The influence of the $g_{550\text{ HK}}$ nitrided layer thickness on the indications of the Wirotest 03 device depending on the conditions of 38HMJ steel nitriding. Austenitizing temperature 920 °C, tempering temperature 560 °C



Rys. 6. Wpływ grubości warstwy azotowanej $g_{550\text{ HK}}$ na wskazania przyrządu Wirotest 03 w zależności od warunków azotowania stali 38HMJ. Temperatura austenitzowania 920 °C, temperatura odpuszczania 620 °C

Fig. 6. The influence of the $g_{550\text{ HK}}$ nitrided layer thickness on the indications of the Wirotest 03 device depending on the conditions of 38HMJ steel nitriding. Austenitizing temperature 920 °C, tempering temperature 620 °C

Związki średnich wskazań przyrządu Wirotest 03 i grubości warstw azotowanych $g_{550\text{ HK}}$ stali 38HMJ z uwzględnieniem temperatury odpuszczania i warunków azotowania przedstawiono w tabelicy 5.

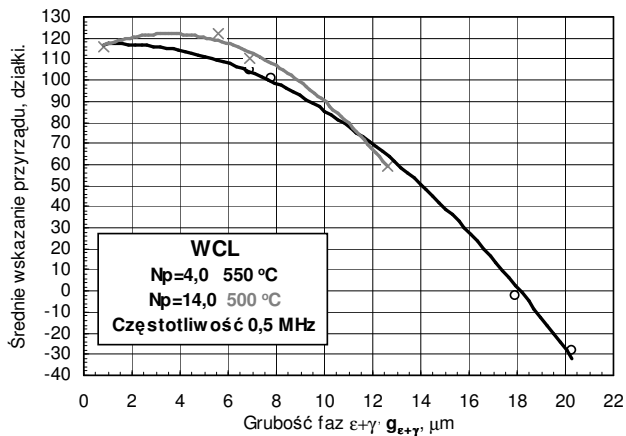
Tablica 5. Opis zależności wskazań przyrządu Wirotest 03 od grubości warstwy azotowanej $g_{550\text{ HK}}$ stali 38HMJ. Temperatura austenitizowania $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura odpuszczania: $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ – I, $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ – II

Table 5. Description of the relationship of the Wirotest 03 device indications and the thickness of the $g_{550\text{ HK}}$ nitrided layer on 38HMJ steel.

Austenitizing temperature $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering temperature $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ – I, $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ – II

Warunki azotowania		Równanie	Współczynnik R^2
Temp. $^{\circ}\text{C}$	N_p $\text{atm}^{-0.5}$		
550	4,0	I $y = -218,6 g_{750\text{ HK}}^2 + 349,3 g_{750\text{ HK}}$	0,97
550	4,0	II $y = -363,9 g_{750\text{ HK}}^2 + 444,1 g_{750\text{ HK}}$	0,99
500	14,0	I $y = 355,9 g_{750\text{ HK}}^2 + 58,87 g_{750\text{ HK}}$	0,98
500	14,0	II $y = -516,1 g_{750\text{ HK}}^2 + 371,3 g_{750\text{ HK}}$	0,99

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 301 w zależności od grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ przy uwzględnieniu warunków azotowania stali WCL pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Wpływ grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ stali WCL na wskazania przyrządu Wirotest 301

Fig. 7. The influence of the $\varepsilon+\gamma'$ phase zone thickness on the indications of the Wirotest 301 device

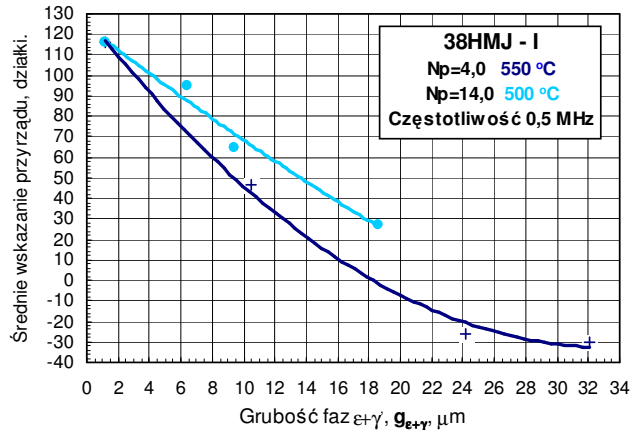
Związek średnich wskazań przyrządu Wirotest 301 od grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ $g_{\varepsilon+\gamma'}$ z uwzględnieniem warunków azotowania stali WCL opisują równania podane w tablicy 6.

Tablica 6. Opis zależności wskazań przyrządu Wirotest 301 od grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ $g_{\varepsilon+\gamma'}$ na stali WCL. Częstotliwość pomiarowa $0,5\text{ MHz}$

Table 6. Description of the relationship of the Wirotest 301 indications and the thickness of the $\varepsilon+\gamma'$ phase zone, $g_{\varepsilon+\gamma'}$, on WCL steel. Measurement frequency $0,5\text{ MHz}$

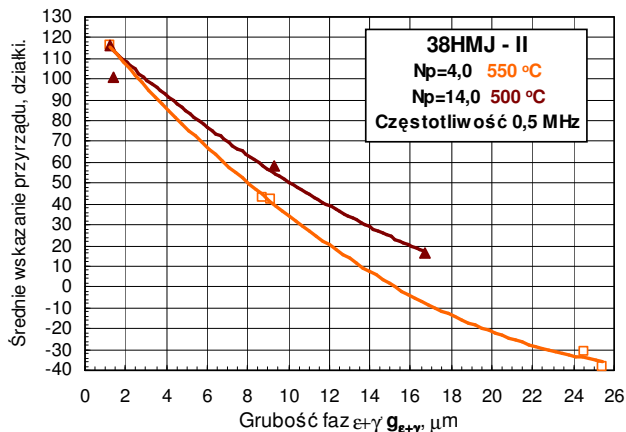
Warunki azotowania		Równanie	Współczynnik R^2
Temp. $^{\circ}\text{C}$	N_p $\text{atm}^{-0.5}$		
550	4,0	$y = -0,412 g_{\varepsilon+\gamma'}^2 + 1,05 g_{\varepsilon+\gamma'} + 116,4$	0,998
500	14,0	$y = -0,759 g_{\varepsilon+\gamma'}^2 + 5,32 g_{\varepsilon+\gamma'} + 112,7$	0,991

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 301 w zależności od grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ $g_{\varepsilon+\gamma'}$ otrzymanych na stali 38HMJ w różnych warunkach azotowania przy uwzględnieniu temperatury odpuszczania próbek przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Wpływ grubości strefy faz $\varepsilon+\gamma'$ stali 38HMJ na wskazania przyrządu Wirotest 301. Temperatura austenitizowania $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura odpuszczania $560\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. The influence of the 38HMJ steel $\varepsilon+\gamma'$ phase zone thickness on the indications of the Wirotest 301. Austenitizing temperature $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering temperature $560\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rys. 9. Wpływ grubości strefy faz $\epsilon+\gamma$ stali 38HMJ na wskazania przyrządu Wirotest 301. Temperatura austenizowania 920 °C, temperatura odpuszczania 620 °C

Fig. 9. The influence of the 38HMJ steel $\epsilon+\gamma$ phase zone thickness on the indications of the Wirotest 301.

Austenitizing temperature 920 °C, tempering temperature 620 °C

Związki średnich wskazań przyrządu Wirotest 301 od grubości strefy faz $\epsilon+\gamma$ stali 38HMJ z uwzględnieniem temperatury odpuszczania i warunków azotowania przedstawiono w tablicy 7.

Tablica 7. Opis zależności wskazań przyrządu

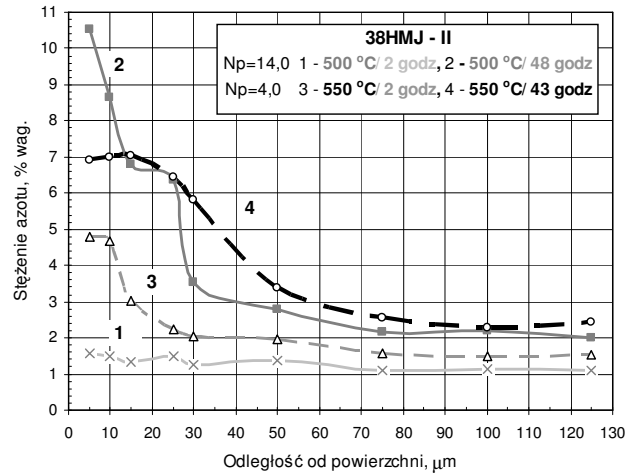
Wirotest 301 od grubości strefy faz $\epsilon+\gamma$ $g_{\epsilon+\gamma}$ na stali 38HMJ. Temperatura austenizowania 920 °C, temperatura odpuszczania: 550 °C – I, 620 °C – II

Table 7. Description of the relationship of the Wirotest 301 indications and the thickness of the $\epsilon+\gamma$ phase zone, $g_{\epsilon+\gamma}$, on the 38HMJ steel. Austenitizing temperature 920 °C, tempering temperature 550 °C – I, 620 °C – II

Warunki azotowania		Równanie	Współczynnik R^2
Temp. °C	N_p atm ^{-0,5}		
550	4,0	I $y = 0,145 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 9,66 g_{\epsilon+\gamma} + 128$	0,996
550	4,0	II $y = 0,194 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 11,42 g_{\epsilon+\gamma} + 129$	0,999
500	14,0	I $y = 0,035 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 5,91 g_{\epsilon+\gamma} + 124$	0,978
500	14,0	II $y = 0,152 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 9,06 g_{\epsilon+\gamma} + 126$	0,971

Wyniki badań rozkładu stężenia azotu w strefach przypowierzchniowych warstw azotowanych na stali 38HMJ metodą mikroanalizy rentgenowskiej EDS pokazano na rys. 10.

Badania te wykonano na stali hartowanej z temperatury 920 °C i odpuszczonej w temperaturze 620 °C.



Rys. 10. Profile stężenia azotu w strefach podpowierzchniowych stali 38HMJ azotowanej gazowo. Temperatura austenizowania 920 °C, temperatura odpuszczania 620 °C

Fig. 10. Nitrogen concentration profiles in the subsurface zones of gas nitrided 38HMJ steel. Austenitizing temperature 920 °C, tempering temperature 620 °C

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

W wyniku azotowania gazowego stali WCL i 38HMJ w temperaturze 550 °C przy potencjale azotowym $N_p = 4 \text{ atm}^{-0,5}$ otrzymano grubsze strefy faz $\epsilon+\gamma$ i $\epsilon+\gamma+\alpha$ $g_{750 \text{ HK}}$ o twardości powyżej 750 HK 0,1 dla stali WCL oraz $g_{550 \text{ HK}}$ 550 HK 0,1 dla stali 38HMJ, w porównaniu z tymi strefami otrzymanymi w procesach azotowania w temperaturze 500 °C i przy potencjale azotowym $N_p = 14 \text{ atm}^{-0,5}$.

Zwiększenie temperatury odpuszczania stali 38HMJ, a przez to zmniejszenie twardości rdzenia z 42 HRC do 36 HRC, spowodowało uzyskanie nieznacznie cieńszych stref azotków żelaza i warstw $g_{550 \text{ HK}}$ o mniejszej grubości.

Z badań stref faz $\epsilon+\gamma$ i α za pomocą przyrządów Wirotest wynika silny związek między grubością stref azotków żelaza i stref azotowania wewnętrznego, a wskazaniami przyrządów wiroprowadowych. Wzrost grubości stref faz $\epsilon+\gamma$ powoduje spadek wskazań przyrządu Wirotest 301 (rys. 7÷9), a wzrost grubości strefy α - zwiększenie wskazań przyrządu Wirotest 03 (rys. 4÷6). Ponadto stwierdzono wpływ tempe-

ratury azotowania na wskazania obu przyrządów wiropędowych. Wyraźny jest też wpływ twardości rdzenia próbek ze stali 38HMJ azotowanej w temperaturze 550 °C na wskazania przyrządu Wirotest 03 (rys. 5 i 6) oraz przyrządu Wirotest 301 (rys. 8 i 9). Może to mieć związek z dalszym odpuszczaniem rdzenia stali podczas procesu azotowania w wyższej temperaturze, procesami dyfuzji azotu oraz wydzielania węglików i azotków stopowych w strefie azotowania wewnętrznego.

Zmiany wskazań przyrządów wiropędowych, które opisano powyżej, są wynikiem różnic we własnościach magnetycznych warstw azotowanych otrzymanych w obu procesach azotowania gazowego stali. Spośród wielkości charakteryzujących własności magnetyczne, względna przenikalność magnetyczna jest najbardziej czuła na zmiany strukturalne [4, 5]. Gradient stężenia azotu w strefie α wywołuje makronapężenia, a za rozwój mikronapężeń odpowiedzialne są azotki pierwiastków stopowych [5]. Własności magnetyczne warstwy azotowanej są zatem w pewnym stopniu uzależnione od stanu makro- i mikronapężeń w warstwie. Wpływ napężeń na wskazania przyrządu wiropędowego można zmniejszyć stosując częstotliwości prądu magnesującego od ok. 1 do ok. 3 kHz. Istotne jest, aby głębokość wnikania prądów wirowych była przynajmniej dwukrotnie większa od maksymalnej grubości warstwy azotowanej. Wyniki badań warstw azotowanych za pomocą przyrządu Wirotest 03 wskazują, że warunek ten w badaniach spełniono.

W badaniach wpływu grubości strefy faz $\epsilon+\gamma'$ na własności magnetyczne warstw azotowanych zastosowano częstotliwość prądu magnesowania 0,5 MHz, tak aby prądy wirowe indukowały się jedynie w strefie przypowierzchniowej warstwy azotowanej. Z analizy zmian wskazań przyrządu Wirotest 301 od grubości strefy faz $\epsilon+\gamma'$ $g_{\epsilon+\gamma'}$ wynika, że względna przenikalność magnetyczna maleje ze wzrostem grubości $g_{\epsilon+\gamma'}$. Wpływ grubości tej strefy jest silniejszy, gdy próbki azotowano w temperaturze 550 °C przy $N_p = 4 \text{ atm}^{-0.5}$ (rys. 7÷9). Zależność wskazań przyrządu wiropędowego, a pośrednio względnej przenikalności magnetycznej, od grubości strefy faz $\epsilon+\gamma'$ opisują funkcje wielomianowe drugiego stopnia

podane w tablicy 6 - dla stali WCL oraz tablicy 7 - dla stali 38HMJ.

Z porównania profili stężenia azotu w strefie przypowierzchniowej stali 38HMJ (rys. 10) wynika, że większe stężenie azotu występuje w strefie α w obszarach odległych od ok. 25 do ok. 100 μm w przypadku azotowania w temperaturze 550 °C przy $N_p = 4 \text{ atm}^{-0.5}$. Związane jest to z tzw. przesyceniem strefy α .

5. WNIOSKI

- 1) Ocena grubości strefy azotków żelaza $\epsilon+\gamma'$ oraz strefy azotowania wewnętrznego α (scharakteryzowanej przez parametry $g_{550 \text{ HK}}$ dla stali 38HMJ i $g_{750 \text{ HK}}$ dla stali WCL) za pomocą układów pomiarowych Wirotest, jest wystarczająco dokładna.
- 2) Temperatura azotowania wpływa na własności magnetyczne warstwy azotowanej i tym samym na zależność wskazań przyrządów Wirotest od grubości stref faz $\epsilon+\gamma'$ i α .
- 3) Stwierdzono również wpływ twardości rdzenia stali 38HMJ na zależności wskazań przyrządów Wirotest.
- 4) Należy prowadzić dalsze badania i sprawdzić, czy można ustalić warunki braku wpływu strefy fazy ϵ w warstwie azotowanej na wskazania przyrządu wiropędowego.

*Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: **BM 901 30 002 - Określenie budowy fazowej warstwy azotowanej na własności magnetyczne stali.***

LITERATURA

- [1] Pachutko B., Małdziński L.: Zastosowanie przyrządu Wirotest 301 do badania grubości strefy azotków żelaza na stali WCL. *Obróbka Plastyczna Metali* 2005 nr 1 s. 21-30.
- [2] Pachutko B., Małdziński L.: Badania nieniszczące warstw azotowanych na stalach narzędziowych za pomocą przyrządów Wirotest. *Inżynieria Powierzchni* 2006 nr 2 s. 40-46.
- [3] Małdziński L.: Termodynamiczne, kinetyczne i technologiczne aspekty wytwarzania warstwy azotowanej na żelazie i stalach w procesach azoto-

- wania gazowego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Seria Rozprawy Nr 373, Poznań 2002.
- [4] Heptner H., Stroppe H.: Magnetyczne i indukcyjne badania metali. Wydawnictwo „Śląsk”, Warszawa 1972.
- [5] J. Ratajski: Wybrane aspekty współczesnego azotowania gazowego pod kątem sterowania procesem. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia Wydziału Mechanicznego Nr 95, Koszalin 2003.