

dr inż. Beata Pachutko<sup>1)</sup>, dr hab. inż. Leszek Małdziński<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań, <sup>2)</sup> Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej, Poznań

## ZASTOSOWANIE PRZYRZĄDU WIROTEST 301 DO BADANIA GRUBOŚCI STREFY AZOTKÓW ŻELAZA NA STALI WCL

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań grubości strefy azotków  $\epsilon+\gamma'$  na stali WCL, metodą prądów wirowych przy częstotliwości prądu magnesowania 0,5 i 1 MHz. W badaniach zastosowano przyrząd Wirotest 301 i czujnik ekranowany oraz nieekranowany. Próbkę azotowano gazowo w temperaturze 540 °C w czasie od 4 do 40 godz. przy potencjale azotowym  $N_p = 3,6 \text{ atm}^{-1/2}$  oraz w temperaturze 500 °C w ciągu 22, 48 i 76 godz. przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$ . Badania przeprowadzono również na próbkach ze stali WCL, których grubości stref azotków określono metodą metalograficzną podczas wcześniej prowadzonych badań. Próbkę azotowaną w niższej temperaturze różniły się twardością po ulepszeniu cieplnym. Wykazano, że związek średnich wskazań przyrządu Wirotest 301  $W$  od grubości strefy azotków  $g_{\epsilon+\gamma}$  próbek azotowanych w temperaturze 500 °C można opisać regresją liniową, a współczynniki  $R^2$  wyniosły ok. 0,95 dla obu użytych czujników. Analogiczny związek  $W = f(g_{\epsilon+\gamma})$  dla próbek azotowanych w temperaturze 540 °C najlepiej opisuje funkcja wielomianowa drugiego stopnia, której współczynnik  $R^2$  osiągnął największą wartość, gdy próbki badano czujnikiem ekranowanym. Twardość próbek w zakresie 45-51 HRC, w stanie ulepszonym cieplnie, nie wpływa istotnie na proces azotowania i tym samym na grubość strefy azotków. Opisana metodyka badań może być stosowana do oceny grubości warstw azotków na azotowanych wyrobach. Istotny jest dobór czujnika o polu detekcji dostosowanym do wielkości badanego wyrobu oraz przeprowadzenie badań wstępnych określających zależność wskazań  $W$  od grubości badanej fazy  $\epsilon$ ,  $\epsilon+\gamma'$  lub  $\gamma'$  przy różnych częstotliwościach prądu magnesującego.

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

### 1. Wstęp

W latach 1999-2001, w Zakładzie Badania Metali Instytutu Obróbki Plastycznej, prowadzono badania azotowanych stali metodą prądów wirowych za pomocą przyrządu Wirotest 03. Szczegółowy wykaz publikacji opracowanych w tym okresie podano w pracy [1]. Skoncentrowano się na ocenie wpływu grubości warstwy azotowanej, w której istotna była grubość strefy dyfuzyjnej  $\alpha$ , na zmiany sygnału napięciowego indukowanego w czujniku stykowym i na sporządzeniu wykresów kalibracyjnych opisujących te zależności dla różnych gatunków stali narzędziowych. Wykazano, że grubość stref faz  $\epsilon+\gamma'$  nie wpływała istotnie na zmiany sygnału czujnika, gdy badania prowadzono przy zbyt niskiej częstotliwości prądu magnesowania wynoszącej ok. 3,4 kHz. Znacznie większe możliwości badaw-

cze stwarza przyrząd Wirotest 301, którego częstotliwość prądu magnesowania można zmieniać w zakresie od 0,7 kHz do 2 MHz. Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy była ocena (za pomocą ww. przyrządu), możliwości badania grubości stref azotków  $\epsilon$  i  $\gamma'$  wytworzonych na stali do pracy na gorąco WCL. Nieniszczące badania warstw azotków metodą prądów wirowych mogą być przydatne zarówno do kontroli procesu azotowania, jak i azotowanych wyrobów [2÷4]. W procesie azotowania gazowego można sterować wartością potencjału azotowego i tym samym regulować grubość strefy przypowierzchniowej, składającej się z faz  $\epsilon$ ,  $\epsilon+\gamma'$  lub  $\gamma'$  oraz strefy dyfuzyjnej  $\alpha$  [5 i 6]. Grubość strefy przypowierzchniowej warstwy azotowanej stali narzędziowej ma znaczny wpływ na własności użytkowe, np. odporność na ścieranie [7÷9]. Wymagania stawiane azotowa-

nym stalom narzędziowym, dotyczące określonej grubości strefy przypowierzchniowej lub braku jej występowania oraz grubości strefy dyfuzyjnej  $\alpha$ , zależą od warunków pracy narzędzia. W pracy [10] wykazano, że azotowanie gazowe stali WCLV, w wyniku którego uzyskano warstwę azotowaną o grubości 0,2 mm z cienką strefą faz  $\varepsilon+\gamma$  o grubości 5,0  $\mu\text{m}$ , znacznie zwiększa odporność tej stali na ścieranie, a cykliczne nagrzewanie próbek do temperatury 550 °C i ich chłodzenie do temperatury 340 °C nie spowodowało powstania pęknięć. Wyniki badań skłoniły do wniosku, że w badaniach grubości stref związków metodą prądów wirowych należy uwzględnić warstwę azotowaną charakteryzującą się strefą azotków o podobnej grubości.

## 2. Badany materiał i metodyka badań

Ze stali WCL, której skład chemiczny podano w tabeli 1 pracy [4], wykonano próbki walcowe o wymiarach  $\phi 18 \times 15$  mm oraz prostopadłościennie o wymiarach 10 $\times$ 5 $\times$ 14 mm. Próbki walcowe stosowano jako wzorce w badaniach metodą prądów wirowych. Próbki prostopadłościennie stosowano w badaniach mikroskopowych do określenia grubości strefy faz  $\varepsilon+\gamma$  i strefy dyfuzyjnej  $\alpha$ .

Obróbka cieplna próbek polegała na ich ulepszeniu cieplnym w warunkach:

- austenitzowanie w temperaturze 1030 $\pm$ 10 °C w soli, w czasie 20 min. próbek walcowych i w czasie 10 min. próbek prostopadłościennych,
- chłodzenie w oleju,
- odpuszczanie w temperaturze 550 $\pm$ 3 °C w czasie 2 godz.,
- odpuszczanie w temperaturze 550 $\pm$ 3 °C w czasie 2 godz. i wyżarzanie w temperaturze 600 $\pm$ 3 °C w czasie 1,5 godz..

Twardość próbek po ulepszeniu cieplnym wyniosła od 50 do 51 HRC, a po dodatkowym wyżarzeniu od 43 do 45 HRC.

Azotowanie gazowe próbek przeprowadzono w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych. Warunki procesów azotowania były następujące:

- atmosfera – mieszanina amoniaku i zdysocjowanego amoniaku,

- temperatura azotowania 540 $\pm$ 3 °C, potencjał azotowy  $N_p = 3,6 \text{ atm}^{-1/2}$ , czas azotowania: 4, 8, 16, 32 i 40 godz.
- temperatura azotowania 500 $\pm$ 3 °C, potencjał azotowy  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$ , czas azotowania: 22, 48 i 76 godz.

Temperatury i potencjały azotowe procesów azotowania dobrano tak, aby uzyskać warstwy azotowane o podobnej budowie strefy przypowierzchniowej.

Badania warstw azotowanych prezentowane w niniejszej pracy miały wykazać, czy:

- twardość ulepszonej cieplnie stali WCL ma wpływ na rezultat procesu azotowania w obniżonej temperaturze,
- ww. warunki azotowania gazowego mają istotny wpływ na własności magnetyczne warstw azotowanych stali WCL,
- własności magnetyczne cienkich warstw, obejmujących strefę azotków i cienką strefę podpowierzchniową o podobnej grubości, próbek otrzymanych w ww. procesach azotowania gazowego, istotnie się różnią.

W pracy wykorzystano następujące techniki badawcze:

- mikroskopię świetlną do określenia grubości strefy faz  $\varepsilon+\gamma$  i strefy dyfuzyjnej  $\alpha$  oraz grubości metalograficznej warstwy azotowanej. Pomiar grubości przeprowadzono na trawionych nitalem zglądach poprzecznych obserwowanych za pomocą mikroskopu Neophot 2, przy powiększeniach obrazu 100 i 500x.
- Badania metodą prądów wirowych za pomocą układów pomiarowych składających się z:
  - a) przyrządu Wirotest 03 i czujnika nieekranowanego o polu detekcji o  $\phi 8,2$  mm, przy częstotliwości prądu magnesowania wynoszącej 3,4 kHz,
  - b) przyrządu Wirotest 301 i czujnika ekranowanego o częstotliwości nominalnej 1 MHz i polu detekcji o  $\phi 3,5$  mm lub czujnika nieekranowanego nr SNC/01/004 o tej samej częstotliwości i polu detekcji o  $\phi 7$  mm. Badania przeprowadzono również na azotowanych gazowo próbkach ze stali WCL, poddanych wcześniej badaniu za pomocą przyrządu Wirotest 03, które opisano w pracy [1].

### 3. Wyniki badań

Wyniki pomiarów grubości stref faz  $\varepsilon+\gamma'$ ,  $\alpha$  i grubości metalograficznej warstwy azotowanej  $g$  w zależności od warunków azotowania podano w tabeli 1 oraz graficznie na rys. 1÷3.

Z analizy kwadratów grubości stref badanych faz wynika (rys. 1÷3):

- wzrost strefy dyfuzyjnej  $\alpha$  zachodzi wg zależności parabolicznej dla obu wariantów procesu azotowania ,

- wzrost strefy faz  $\varepsilon+\gamma'$  wykazuje pewne odchylenie od zależności parabolicznej, gdy próbki azotowano w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p=3,6 \text{ atm}^{-1/2}$ , co należy tłumaczyć brakiem równowagi między stężeniem powierzchniowym azotu w fazie  $\varepsilon$  a atmosferą azotującą w tym procesie.

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 03 w zależności od grubości warstwy azotowanej  $g$  próbek azotowanych w różnych warunkach podano w tabeli 2 i graficznie na rys 4.

Tabela 1

**Wpływ warunków azotowania gazowego na grubość strefy faz  $\varepsilon+\gamma'$ ,  $\alpha$  i grubość warstwy azotowanej  $g$  próbek ze stali WCL**

Warunki azotowania			Grubość faz, mm		Grubość warstwy $g$ mm
temperatura °C	czas godz.	$N_p$ atm <sup>-1/2</sup>	$\varepsilon+\gamma'$	$\alpha$	
540	4	3,6	0,0048	0,115	0,120
540	8	3,6	0,01	0,169	0,179
540	16	3,6	0,0164	0,202	0,218
540	24	3,6	0,0212	0,240	0,261
540	32	3,6	0,0173	0,284	0,301
540	40	3,6	0,0225	0,363	0,386
500	22	14,2	0,0159	0,184	0,2
500	48	14,2	0,02	0,263	0,283
500	76	14,2	0,0254	0,326	0,352
500	22	14,2	0,0152	0,197	0,212
500	48	14,2	0,021	0,279	0,3
500	76	14,2	0,0252	0,341	0,366

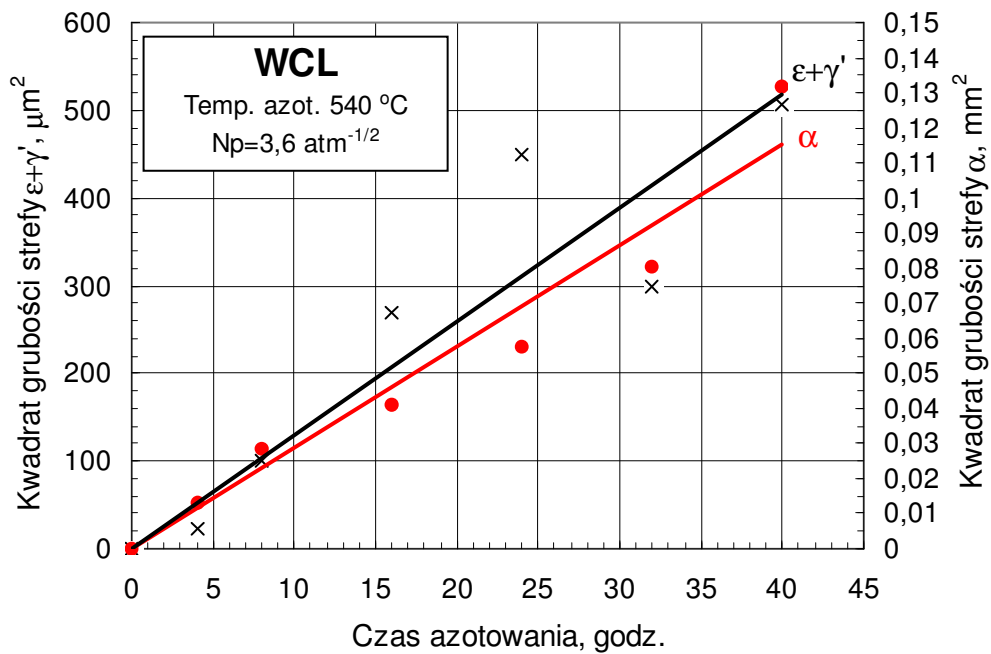
- wyróżnienie próbek ulepszonych cieplnie i wyżarzonych w temperaturze 600 °C w czasie 1,5 godz. przed azotowaniem gazowym

Tabela 2

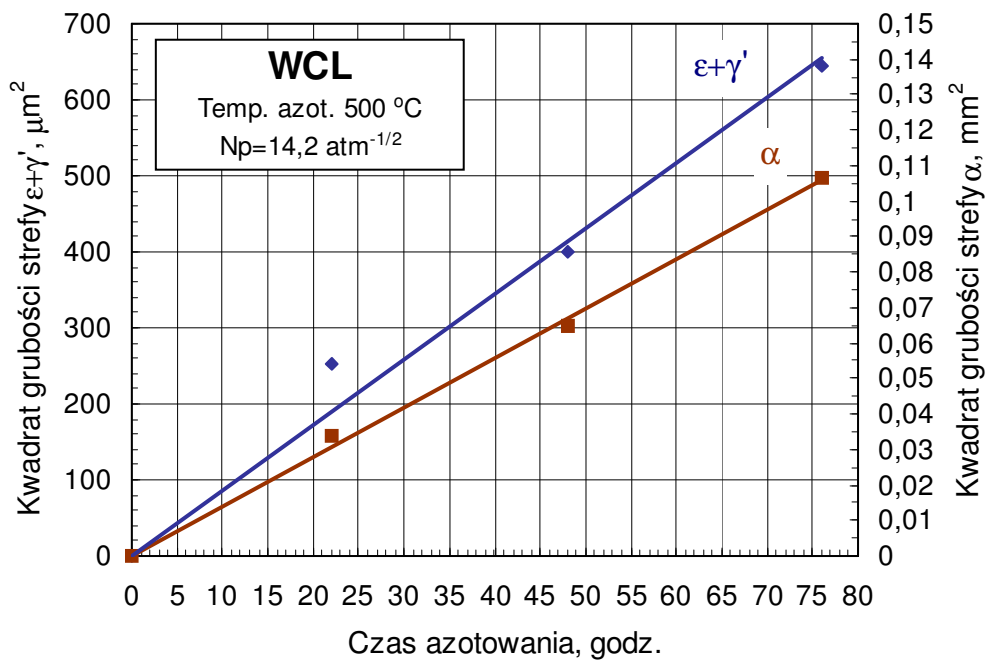
**Wpływ grubości warstwy azotowanej  $g$  na wskazania przyrządu Wirotest 03 w zależności od warunków azotowania próbek ze stali WCL**

Warunki azotowania			Grubość warstwy $g$ mm	Średnie wskazanie przyrządu, przedział ufności
temperatura °C	czas godz.	$N_p$ atm <sup>-1/2</sup>		
540	4	3,6	0,120	19,2±2
540	8	3,6	0,179	32±1
540	16	3,6	0,218	42±1
540	24	3,6	0,261	58±1
540	32	3,6	0,301	71±1
540	40	3,6	0,386	83±2
500	22	14,2	0,2	23±1
500	48	14,2	0,283	39±1
500	76	14,2	0,352	49±1
500	22	14,2	0,212	29±1,5
500	48	14,2	0,3	42±1
500	76	14,2	0,366	45±1,5

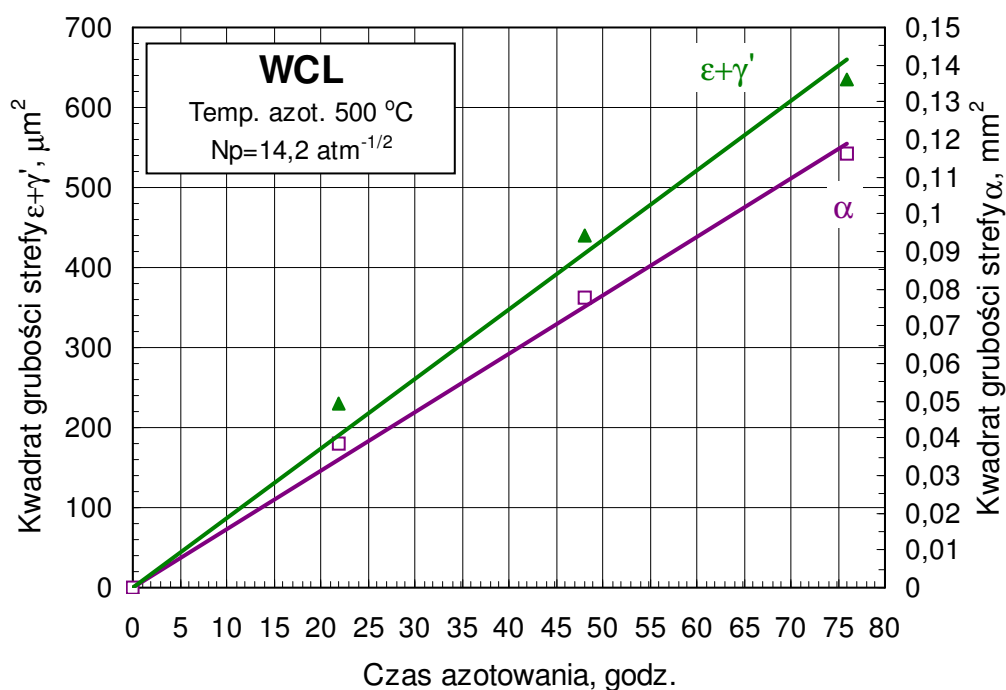
- wyróżnienie próbek ulepszonych cieplnie i wyżarzonych w temperaturze 600 °C w czasie 1,5 godz. przed azotowaniem gazowym



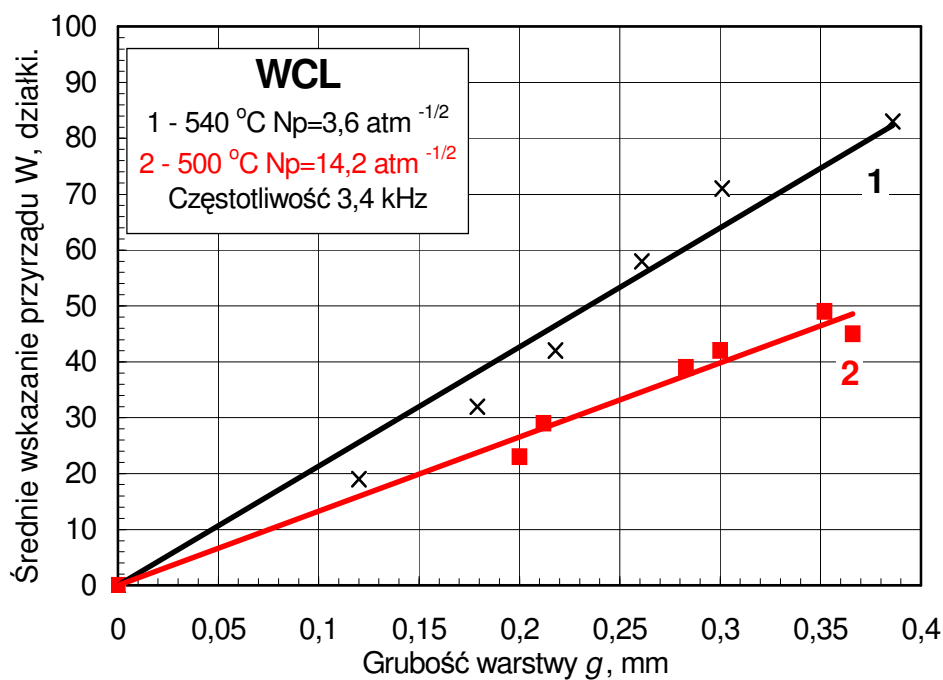
Rys. 1. Wpływ czasu azotowania gazowego w temperaturze 540 °C przy potencjale azotowym  $N_p = 3,6 \text{ atm}^{-1/2}$  na kwadrat grubości stref faz  $\epsilon+\gamma'$  i  $\alpha$  w próbkach ze stali WCL



Rys. 2. Wpływ czasu azotowania gazowego w temperaturze 500 °C przy potencjale azotowym  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$  na kwadrat grubości stref faz  $\epsilon+\gamma'$  i  $\alpha$  w próbkach ze stali WCL



Rys. 3. Wpływ czasu azotowania gazowego w temperaturze 500 °C przy potencjale azotowym  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$  na kwadrat grubości stref faz  $\epsilon+\gamma'$  i  $\alpha$  w próbkach ze stali WCL ulepszonych cieplnie i wyżarzonych w temperaturze 600 °C w czasie 1,5 godz.



Rys. 4. Wpływ grubości warstwy azotowanej g na wskazania przyrządu Wiretest 03 w zależności od warunków azotowania próbek ze stali WCL

Związek średnich wskazań przyrządu Wirotest 03 i grubości warstwy  $g$  opisują równania (rys. 4):

1.  $W = 213,4 g$ ,  
współczynnik  $R^2 = 0,97$ , gdy próbki azotowano w temperaturze  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  przy potencjale  $N_p = 3,6\text{ atm}^{-1/2}$ ,
2.  $W = 132,8 g$ ,  
współczynnik  $R^2 = 0,978$ , gdy próbki azotowano w temperaturze  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  przy potencjale  $N_p = 14,2\text{ atm}^{-1/2}$ .

Wyniki wskazań przyrządu Wirotest 301 w zależności od grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma$  próbek azotowanych w różnych warunkach, z uwzględnieniem stosowanych czujników i częstotliwości podano w tabeli 3 i graficznie na rys. 5÷7.

W tabeli 4 zestawiono parametry badania grubości stref faz  $\epsilon+\gamma$  za pomocą przyrządu Wirotest 301 oraz czujników ekranowanego i nieekranowanego.

**Tabela 3**

**Wpływ grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma$  na wskazania przyrządu Wirotest 301 w zależności od warunków azotowania próbek ze stali WCL i częstotliwości pomiarowej**

Warunki azotowania			Grubość strefy faz $\epsilon+\gamma$ $\mu\text{m}$	Średnie wskazanie przyrządu, przedział ufności		
temp. $^{\circ}\text{C}$	czas godz.	$N_p$ $\text{atm}^{-1/2}$		Czujnik/ częstotliwość pomiarowa		
				ekranowany 1 MHz	ekranowany 0,5 MHz	nieekranowany 1 MHz
540	4	3,6	4,8	97±1	104±2	119±1
540	8	3,6	10,0	76±1	86±1	37±2
540	16	3,6	16,4	62±2	75±1	17±1
540	24	3,6	21,2	45±1	61±1	-39±1
540	32	3,6	17,3	28±2	49±1	-77±1
540	40	3,6	22,5	20±2	41±2	-60±1
540*	14*	3,65*	11,2*	60±2*	74±2*	31±1*
540*	64*	3,65*	25,9*	16±2*	36±2*	-72±0,5*
500	22	14,2	15,9	75±1	85±1	73±0,5
500	48	14,2	20,0	55±1	69±1	24±1
500	76	14,2	25,4	33±1	47±1	11±1
500	22	14,2	15,2	70±1	80±1	66±2
500	48	14,2	21,0	44±1	59±0,5	25±1
500	76	14,2	25,2	29±1	48±1	14±1

\* - próbki dodatkowe, opisane w pracy [1]

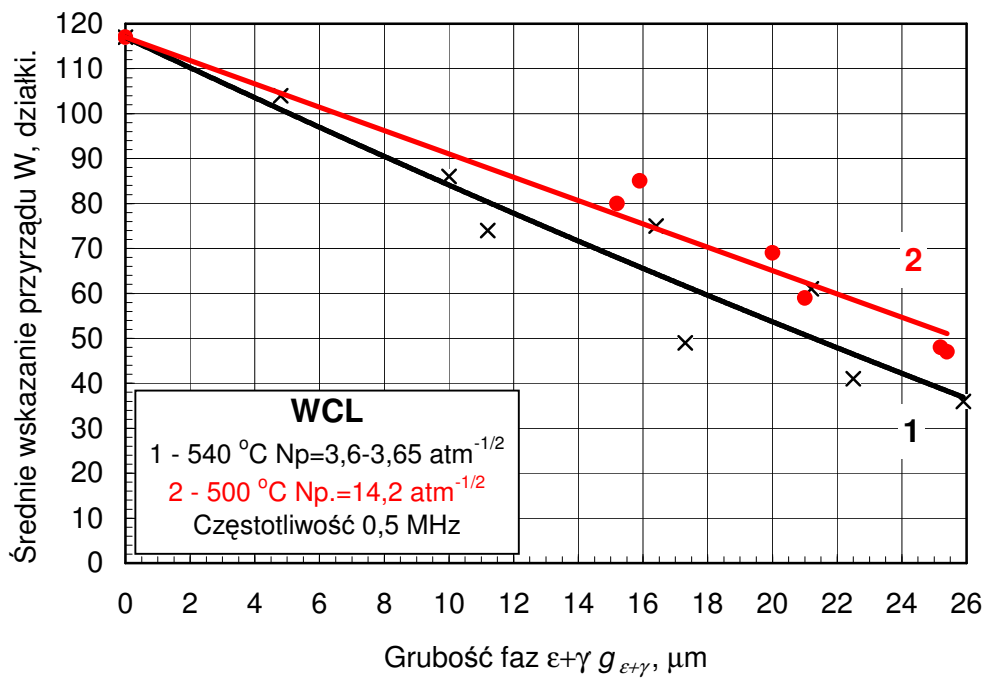
■ - wyróżnienie próbek ulepszonych cieplnie i wyżarzonych w temperaturze  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  w czasie 1,5 godz. przed azotowaniem gazowym

**Tabela 4**

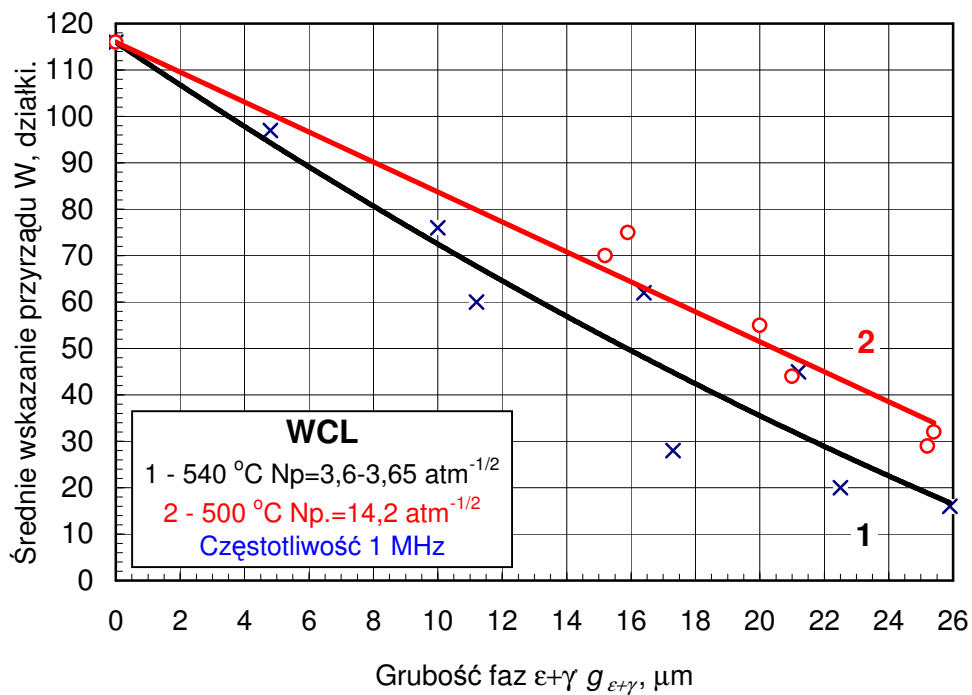
**Parametry badania grubości stref faz  $\epsilon+\gamma$  za pomocą przyrządu Wirotest 301 i stosowanych czujników**

Rodzaj czujnika	Częstotliwość pomiarowa MHz	Wzmocnienie	Zero*
ekranowany 1 MHz	0,5	7,8	0,37
ekranowany 1 MHz	1	6,55	1,0
nieekranowany 1 MHz	1	6,55	3,34

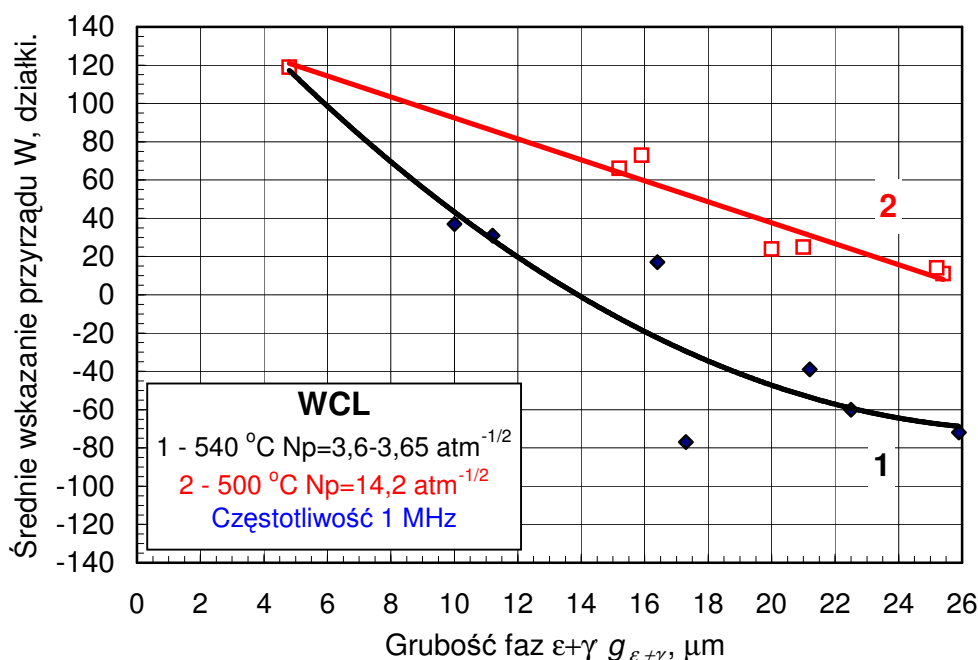
\* - zero oznacza przesunięcie z pozycji czujnik - powietrze



Rys. 5. Wpływ grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma'$  na wskazania przyrządu Wirotest 301. Czujnik ekranowany 1 MHz. Częstotliwość pomiarowa 0,5 MHz



Rys. 6. Wpływ grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma'$  na wskazania przyrządu Wirotest 301. Czujnik ekranowany 1 MHz. Częstotliwość pomiarowa 1 MHz



Rys. 7. Wpływ grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma'$  na wskazania przyrządu Wirotest 301. Czujnik nieekranowany 1 MHz. Częstotliwość pomiarowa 1 MHz

Związki średnich wskazań przyrządu Wirotest 301 i grubości faz  $\epsilon+\gamma'$  (rys. 5÷7) opisują równania:

*czujnik ekranowany, częstotliwość pomiarowa 0,5 MHz (rys. 5)*

1.  $W = 0,0124 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 3,41 g_{\epsilon+\gamma} + 117$ , współczynnik  $R^2 = 0,923$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p = 3,6 \div 3,65 \text{ atm}^{-1/2}$
2.  $W = -2,6 g_{\epsilon+\gamma} + 117$ , współczynnik  $R^2 = 0,959$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 500 °C przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$ .

*czujnik ekranowany, częstotliwość pomiarowa 1 MHz (rys. 6)*

1.  $W = 0,0325 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 4,67 g_{\epsilon+\gamma} + 116$ , współczynnik  $R^2 = 0,917$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p = 3,6 \div 3,65 \text{ atm}^{-1/2}$
2.  $W = -3,23 g_{\epsilon+\gamma} + 116$ , współczynnik  $R^2 = 0,967$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 500 °C przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$ .

*czujnik nieekranowany, częstotliwość pomiarowa 1 MHz (rys. 7)*

1.  $W = 0,341 g_{\epsilon+\gamma}^2 - 19,27 g_{\epsilon+\gamma} + 201,9$ , współczynnik  $R^2 = 0,875$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p = 3,6 \div 3,65 \text{ atm}^{-1/2}$
2.  $W = -5,48 g_{\epsilon+\gamma} + 147,2$ , współczynnik  $R^2 = 0,954$ , gdy próbki azotowano w temperaturze 500 °C przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$ .

#### 4. Podsumowanie wyników badań

W wyniku azotowania gazowego stali WCL w warunkach: 540 °C,  $N_p = 3,6 \text{ atm}^{-1/2}$  w czasie od 4 do 40 godz. otrzymano warstwy azotowane o grubości strefy faz  $\epsilon+\gamma'$  w zakresie 4,8÷22,5  $\mu\text{m}$  i grubości metalograficznej  $g$  w zakresie 0,12÷0,386 mm. Obniżenie temperatury procesu azotowania do 500 °C przy wyższym potencjale azotowania  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$  spowodowało uzyskanie warstw azotowanych o grubości strefy azotków od 15,9 do 25,4  $\mu\text{m}$  i grubości metalograficznej  $g$  wynoszącej od 0,2 do 0,352 mm, gdy proces trwał od 22 do 76 godz. Wyżarzanie ulepszonych cieplnie



próbek w temperaturze 600 °C w ciągu 1,5 godz. przed procesem azotowania w temperaturze 500 °C przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$  nie wpłynęło istotnie na proces azotowania, ponieważ otrzymano warstwy azotowane o podobnej grubości strefy faz  $\varepsilon+\gamma$  i grubości metalograficznej  $g$  (tabela 1). Warstwy azotowane otrzymane w obu procesach azotowania znacznie różnią się własnościami magnetycznymi (rys. 4, tabela 2). Uważa się, że względna przenikalność magnetyczna i natężenie pola koercji są najbardziej czułe na zmiany fazowe i strukturalne [2]. Charakter zmian własności magnetycznych w zależności od grubości warstwy azotowanej można uznać za liniowy. Współczynniki  $R^2$  zależności wskazań przyrządu Wirotest 03 przy częstotliwości 3,4 kHz od grubości metalograficznej  $g$  warstwy azotowanej wyniosły ok. 0,97 dla obu wariantów procesu azotowania.

Z analizy zależności wskazań przyrządu Wirotest 301 od grubości strefy faz  $\varepsilon+\gamma$  dla czujników ekranowanego i nieekranowanego, przedstawionych w tabeli 3 i na rys. 5÷7 wynika, że:

- czujnik ekranowany charakteryzował się większą czułością i okazał się lepiej przystosowany, pod względem pola detekcji do badań warstw azotków na próbkach o  $\phi$  18 mm, niż nieekranowany,
- związek wskazań przyrządu  $W$  i grubości strefy azotków  $g_{\varepsilon+\gamma}$  próbek azotowanych w temperaturze 500 °C przy potencjale  $N_p = 14,2 \text{ atm}^{-1/2}$  wykazuje regresję liniową, ponieważ współczynniki  $R^2$  wyniosły powyżej 0,95 dla obu użytych czujników,
- w przypadku próbek azotowanych w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p$  w zakresie  $3,6 \div 3,65 \text{ atm}^{-1/2}$  związek wskazań przyrządu  $W$  i grubości strefy azotków  $g_{\varepsilon+\gamma}$  najlepiej opisuje funkcja wielomianowa drugiego stopnia, której współczynnik  $R^2$  osiągnął największą wartość 0,923, gdy próbki badano czujnikiem ekranowanym przy częstotliwości 0,5 MHz,
- największe odchylenia od ww. regresji miały próbki azotowane w czasie 16 i 32 godzin, co również wyniknęło podczas analizy zależności kwadratów grubości strefy faz  $\varepsilon+\gamma$  od czasu azotowania

w temperaturze 540 °C przy potencjale  $N_p = 3,6 \text{ atm}^{-1/2}$  (rys. 1),

- własności magnetyczne cienkich warstw o podobnej grubości próbek azotowanych w obu wariantach procesu azotowania różnią się nieznacznie, przy czym różnica ta zmniejsza się ze zwiększeniem grubości strefy azotków.

## 5. Wnioski

- 1) Układ pomiarowy składający się z przyrządu Wirotest 301 oraz czujnika o polu detekcji dostosowanym do wielkości badanego wyrobu i częstotliwości prądu magnesowania w zakresie  $0,5 \div 1 \text{ MHz}$  można z powodzeniem stosować do badania grubości strefy azotków od 5 do 25  $\mu\text{m}$  warstwy wierzchniej stali WCL.
- 2) Badania grubości strefy azotków na innym gatunku stali wymagają opracowania wykresu kalibracyjnego określającego zależność wskazań  $W$  od grubości badanej fazy  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon+\gamma$  lub  $\gamma$  przy różnych częstotliwościach prądu magnesującego.
- 3) W ocenie grubości faz azotków metodą prądów wirowych należy uwzględnić ewentualne zmiany temperatury oraz potencjału azotowego podczas procesu azotowania gazowego.

## Literatura

1. B. Pachutko, L. Małdziński: Ocena wpływu strefy azotków żelaza w warstwach azotowanych gazowo, na selektywność wskazań przyrządu Wirotest 03. Obróbka Plastyczna Metali 2002 nr 2 s. 5-12.
2. J. Ratajski: Monitorowanie wzrostu warstwy azotowanej za pomocą czujnika magnetycznego – podstawy metody. Inżynieria Powierzchni 1999 nr 3 s. 11-20.
3. J. Ratajski: Monitorowanie wzrostu warstwy azotowanej za pomocą czujnika magnetycznego – przykłady zastosowań. Inżynieria powierzchni 2001 nr 1 s. 56-64.

4. B. Pachutko: Badania grubości warstw azotowanych na matrycach ze stali WCL metodą prądów wirowych. *Obróbka Plastyczna Metali* 2003 nr 2 s. 21-27.
5. H. J. Spies, S. Böhmer, H. J. Berg, H. P. Winkler: Kontrola struktury i własności stref związków powstających w wyniku azotowania gazowego stopów żelaza. *Metaloznawstwo Obróbka Ciepła Inżynieria Powierzchni* 1989 nr 101 - 102 s. 45-47.
6. L. Małdziński: Termodynamiczne, kinetyczne i technologiczne aspekty wytwarzania warstwy azotowanej na żelazie i stalach w procesach azotowania gazowego. Politechnika Poznańska. *Rozprawy nr 373, Poznań* 2002.
7. L. Berkowski, J. Borowski: Badanie odporności na zużycie cierne azotowanej stali narzędziowej NC11LV. *Obróbka Plastyczna Metali* 2002 nr 2 s. 29-35.
8. T. Frączek, L. Jeziorski, J. Jasiński, T. Pabin, K. Sadurski, T. Babul, Z. Obuchowicz: Fluid nitriding of X40CrMoV5-1 steel. *Materiały The 9 th International Seminar of IFHTSE Nitriding Technology – Theory and Practice*. Polska, Warszawa 2003, s. 445-451.
9. X. Tong, D. Fan: Study on different nitriding processes and wear resistance of tool steels. *Materiały The 9 th International Seminar of IFHTSE Nitriding Technology – Theory and Practice*. Polska, Warszawa 2003, s. 483-488
10. J. Szawłowski, L. Kamiński, A. Skoczyła: Warstwy azotowane w stalach WLW i WCLV – stabilność mikrostruktury i właściwości. *Inżynieria Materiałowa* 2002 nr 5 s. 305-310.

*Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Komitet Badań Naukowych:*

*Praca BM 901 62 003 – Badanie możliwości oceny określenia grubości warstw azotków metodą prądów wirowych*

## APPLICATION OF THE WIROTEST 301 APPARATUS FOR EXAMINATION OF THE THICKNESS OF IRON NITRIDE ZONE ON WCL STEEL

### Abstract

The paper presents the results of the examination of  $\epsilon + \gamma'$  nitride zone thickness on WCL steel by the eddy current method with the magnetizing current frequency of 1 and 0.5 MHz. In the examinations, the Wirotest 301 apparatus and a screened and unscreened sensor have been used. The samples were gas nitrided at 540°C for 4 to 40 hours with the nitrogen potential of  $N_p = 3.6 \text{ atm}^{-1/2}$  and at 500°C for 22, 48 and 76 hours with the potential of  $N_p = 14.2 \text{ atm}^{-1/2}$ . Tests have also been performed on WCL steel samples whose nitride zone thickness has been determined by the metallographic method during earlier examinations.

Samples nitrided at a lower temperature differed in their hardness after toughening. It has been shown that the dependence of the average indications of the Wirotest 301 apparatus on the thickness of the nitride zone,  $g_{\epsilon+\gamma}$ , of the samples nitrided at 500°C can be described with a linear regression and the  $R^2$  coefficients were about 0.95 for both sensors used. An analogous relationship of  $W = f(g_{\epsilon+\gamma})$  for the samples nitrided at 540°C is best described by the polynomial function of the second order whose  $R^2$  coefficient has reached its largest value when the samples were examined with the screened sensor. The sample hardness in the range of 45-51 HRC in the toughened condition does not significantly influence the nitriding process and, consequently, the thickness of the nitride zone. The examination methodology described can be applied to estimate the thickness of the nitride layers on nitrided products. An important thing is the choice of a sensor with the detection field adapted to the side of the object under examination as well as the performance of preliminary examinations determining the dependence of the  $W$  indications on the thickness of the examined phase  $\epsilon$ ,  $\epsilon + \gamma'$  or  $\gamma'$  at various frequencies of the magnetizing current.

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