

## INFLUENCE OF BORONIZING ON MICROSTRUCTURE AND SELECTED PROPERTIES OF CONSTRUCTIONAL STEEL

### Summary

The article presents a comparative research of influence of boronizing on the properties of C45 and 41Cr4 steels. Microstructure, phase composition, microhardness, fracture toughness and wear resistance of the steels were studied.

**Key words:** constructional steels, boronizing, microstructure, physicochemical properties

## WPLYW BOROWANIA DYFUZYJNEGO NA MIKROSTRUKTURĘ I WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI STALI KONSTRUKCYJNEJ

### Streszczenie

W artykule przedstawiono porównawcze badania wpływu borowania dyfuzyjnego na właściwości stali C45 i 41Cr4. Zbadano mikrostrukturę, skład fazowy, mikrotwardość, odporność na kruche pękanie i odporność na zużycie przez tarcie tych stali.

**Słowa kluczowe:** stale konstrukcyjne, borowanie dyfuzyjne, mikrostruktura, właściwości fizykochemiczne

### 1. Wprowadzenie

Proces dyfuzyjnego borowania znajduje coraz szersze zastosowanie jako metoda obróbki cieplno-chemicznej zapewniającej znaczne podwyższenie trwałości części maszyn. Warstwy borowane cechują się bardzo dużą odpornością na ścieranie i są zwykle stosowane, gdy smarowanie jest niewielkie lub gdy nie może być w ogóle stosowane. Duża twardość warstw borkowych do 2000 HV, duża odporność korozyjna w wodnych roztworach kwasów nieorganicznych i organicznych także w roztworach soli i zasad stanowią zalety, dzięki którym znalazły one zastosowanie techniczne nie tylko dla stopów żelaza, ale również niklu, kobaltu i innych stopów [1-5].

Proces borowania dyfuzyjnego przeprowadzono już ponad sześćdziesiąt lat temu. Na świecie stosowany był m.in. w Niemczech [6], Rosji [7] i Japonii [8]. W Polsce prekursorami byli Tacikowski, Liliental i inni w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie [9-11].

Proces borowania dyfuzyjnego ma na celu wytworzenie na powierzchni żelaza i stali twardej warstwy, wynikającej z występowania faz borków żelaza FeB i Fe<sub>2</sub>B [1, 3].

Warstwy powstałe w wyniku borowania dyfuzyjnego cechują się:

- żaroodpornością do temperatury 800°C,
- odpornością korozyjną w wielu roztworach kwaśnych i alkalicznych,
- odpornością na działanie stopionych metali i stopów, co ma znaczenie dla ochrony przed zużyciem części urządzeń do topienia metali oraz form odlewniczych.

Ze względu na duże wymagania stawiane przez rozwój techniki, konstruktorzy mają do dyspozycji wiele gatunków materiałów jak również i metod obróbki warstw wierzchnich w celu polepszenia właściwości użytkowych.

Niniejszy artykuł dotyczy badań wpływu borowania dyfuzyjnego na mikrostrukturę, mikrotwardość, odporność na kruche pękanie oraz odporność na zużycie przez tarcie

warstw borowanych dyfuzyjnie wytworzonych na stalach C45 i 41Cr4.

### 2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki wykonane ze stali C45 i 41Cr4. Skład chemiczny tych stali przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stali C45 i 41Cr4

Table 1. Chemical composition of C45 and 41Cr4 steels

Materiał	Skład chemiczny [% wag.]						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
C45	0,42	0,71	0,18	0,008	0,032	0,11	-
41Cr4	0,43	0,64	0,29	0,017	0,026	1,02	0,02

Przed przystąpieniem do badań wykonano proces obróbki cieplno-chemicznej polegający na borowaniu dyfuzyjnym i następnie hartowaniu z temperatury 850°C i niskim odpuszczaniu w temperaturze 150°C w czasie 1h. Próbki hartowano odpowiednio dla danego gatunku stali w wodzie i oleju. Borowanie było prowadzone metodą gazowo-kontaktową. Próbki umieszczono w retorcie i zasypano mieszaniną borującą, która składała się z boru amorficznego, wypełniacza (sadzy) i aktywatora (KBF<sub>4</sub>). Sadza jako wypełniacz obniża potencjał borujący i zapobiega spiekaniu mieszaniny. Natomiast aktywator, przyspiesza proces dyfuzji atomów boru z mieszaniny borującej do powierzchni elementu. Uszczelniona retorta została umieszczona w piecu w temperaturze 950°C i wygrzewana przez cztery godziny.

### 3. Cel pracy

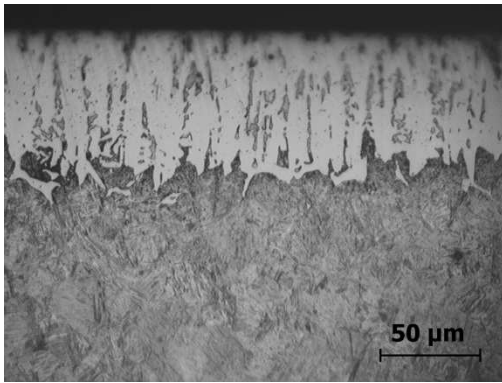
Celem pracy była ocena wpływu borowania dyfuzyjnego na właściwości stali C45 i 41Cr4. Przeprowadzono następujące badania:

- mikrostruktury,
- analizy składu fazowego,
- mikrotwardości i twardości HV,
- odporności na zużycie przez tarcie Iz,
- odporności na kruche pękanie Kc.

#### 4. Badania mikrostruktury

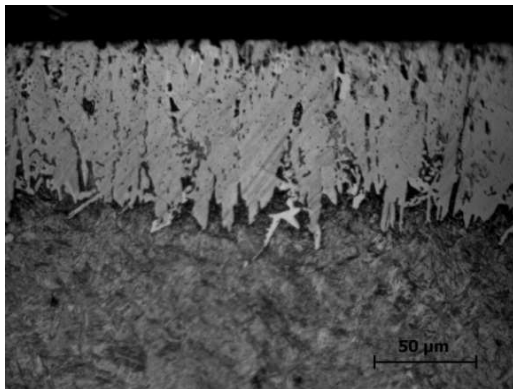
Do obserwacji mikrostruktury stali C45 i 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym wykorzystano mikroskop świetlny Metaval produkcji Carl Zeiss Jena. Rejestrację obrazów mikrostruktur wykonano, sprzężoną z mikroskopem, kamerą Moticam 2300 na zglądach trawionych 2% roztworem alkoholowym kwasu azotowego.

Mikrostrukturę warstwy borowanej na stali C45 przedstawiono na rysunku 1, natomiast stali 41Cr4 na rysunku 2. Otrzymane warstwy mają budowę iglastą o dobrym powiązaniu borków z podłożem. Grubość otrzymanych warstw mieści się w zakresie 70-80  $\mu\text{m}$ . Pod warstwą borków żelaza występuje podłoże martenzytyczne.



Rys. 1. Mikrostruktura stali C45 po borowaniu dyfuzyjnym; B: 950°C/4h, H: 850°C<sub>woda</sub>, O: 150°C/1h

Fig. 1. Microstructure of C45 steel after diffusion boriding, B: 950°C/4h, H: 850°C water, O: 150°C/1h



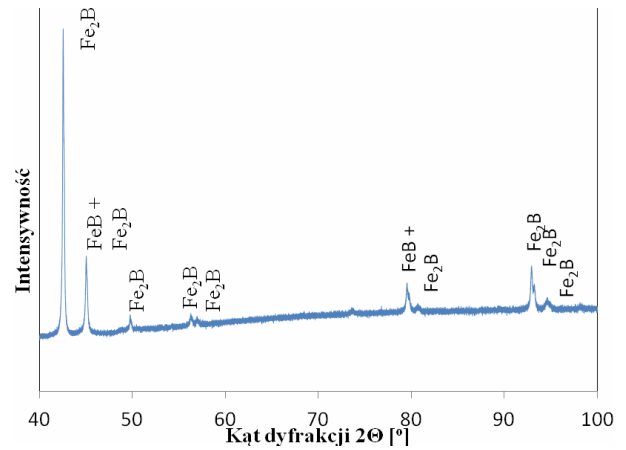
Rys. 2. Mikrostruktura stali 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym; B: 950°C/4h, H: 850°C<sub>olej</sub>, O: 150°C/1h

Fig. 2. Microstructure of 41Cr4 steel after diffusion boriding; B: 950°C/4h, H: 850°C oil, O: 150°C/1h

#### 5. Dyfrakcja rentgenowska

Analizę składu fazowego warstwy borowanej na stali C45 przeprowadzono na dyfraktometrze rentgenowskim EMPYREAN firmy PANalytical, z zastosowaniem promieniowania Cu K $\alpha$  o długości fali  $\lambda = 1,5418 \cdot 10^{-10}$  m i głąbo-

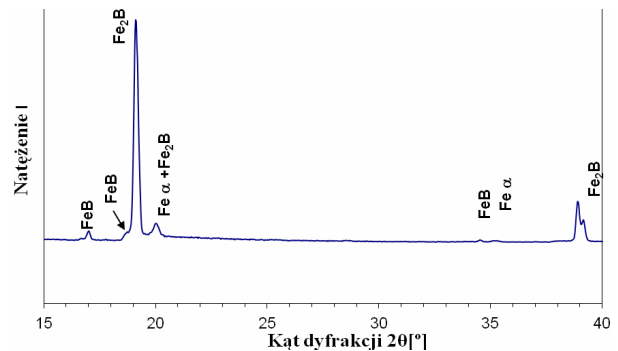
kości wnikańia promieniowania 0,021  $\mu\text{m}$ , znajdującym się w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Poznańskiej.



Rys. 3. Dyfraktogram rentgenowski warstwy borowanej CuK $\alpha$  na stali C45

Fig. 3. X-ray diffraction of CuK $\alpha$  borided layer on C45 steel

Dyfrakcję rentgenowską warstwy borowanej, wytworzonej na stali 41Cr4, wykonano na dyfraktometrze Krystalloflex 4 firmy Siemens, z użyciem promieniowania lampy molibdenowej MoK $\alpha$  o długości fali  $\lambda = 0,7107 \cdot 10^{-10}$  m i głębokości wnikańia promieniowania 108  $\mu\text{m}$ , znajdującym się w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Badania dla stali C45 prowadzono w zakresie kątowym 2 $\theta$  od 40° do 100°, natomiast dla stali 41Cr4 w zakresie od 15° do 40°. Na podstawie widm przeprowadzono jakościową analizę fazową powstałych warstw wierzchnich. Wyniki badania przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 4. Dyfraktogram rentgenowski warstwy borowanej MoK $\alpha$  na stali 41Cr4

Fig. 4. X-ray diffraction of MoK $\alpha$  borided layer on 41Cr4 steel

Przeprowadzone badania analizy składu fazowego wykazały obecność w warstwie borków żelaza FeB i Fe<sub>2</sub>B.

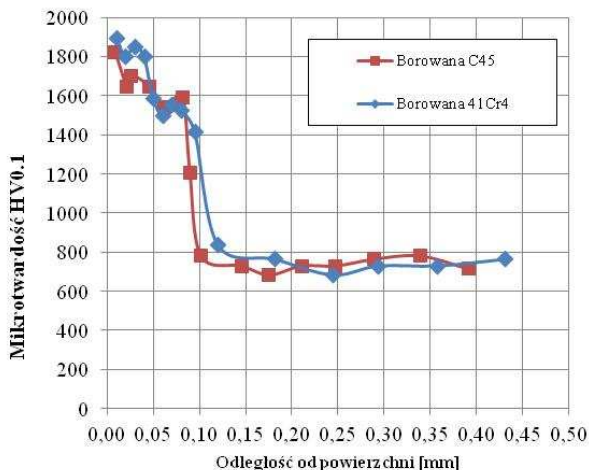
#### 6. Badania mikrotwardości i twardości

Badanie mikrotwardości próbek wykonanych ze stali C45 i 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 na mikrotwardościomierzu typu Zwick 3212B. Próbki obciążane były nominalną wartością siły obciążającej  $F = 0,9807\text{N}$  o symbolu twardości HV0,1.

Wyniki badań mikrotwardości przedstawiono na rysunku 5, a zależność twardości od obciążenia węglnika stali C45 i 41Cr4 przedstawiono na rysunku 6.

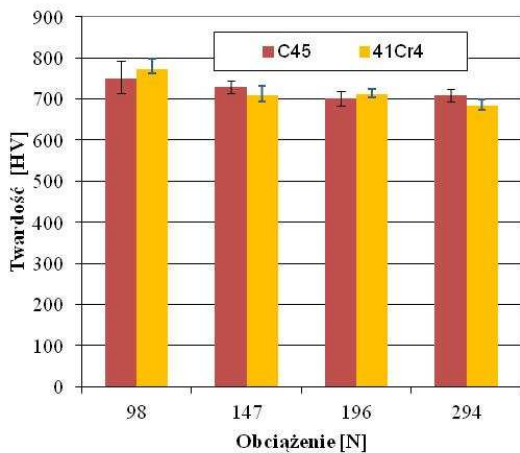
Mikrotwardość warstw borowanych dyfuzyjnie dla stali C45 i 41Cr4 w zakresie borków FeB wynosi ok. 1700-1900 HV, a borków Fe<sub>2</sub>B ok. 1500-1600HV (rys. 5).

Mikrotwardość podłoża o strukturze martenzytycznej wynosi ok. 700 HV 0,1.



Rys. 5. Profile mikrotwardości warstwy borowanej na stalach C45 i 41Cr4

Fig. 5. Microhardness of borided layer on C45 and 41Cr4 steels



Rys. 6. Zależność twardości od obciążenia węglnika dla stali C45 i 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym

Fig. 6. Dependence of indentation hardness on load for C45 and 41Cr4 steels after diffusion boriding

Na rysunku 6 przedstawiono zależność twardości HV od obciążenia. Stwierdzono, że niezależnie od zastosowanego obciążenia twardość badanych stali jest porównywalna. Im większe obciążenie, tym twardość spada, ze względu na większy udział podłoża w stosunku do warstwy. Na wykresie zaznaczono średnie wartości twardości dla przyjętych wartości z dziesięciu pomiarów.

## 7. Badania odporności na kruche pękanie

Do badań odporności na kruche pękanie otrzymanych warstw borowych na stalach C45 i 41Cr4 zastosowano metodę Palmqvista. Polegała ona na wykonaniu odcisków Vickersa i obserwacji rozprzestrzeniania się pęknięć z naroży wykonanych

odcisków. Następnie wyznaczono krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{IC}$  wg wzoru:

$$K_{IC} = AP/c^{3/2} \text{ [MPa}\sqrt{\text{m}}]$$

gdzie:

P – obciążenie [N],

c – promieniowa długość pęknięcia mierzona od środka odcisku [m],

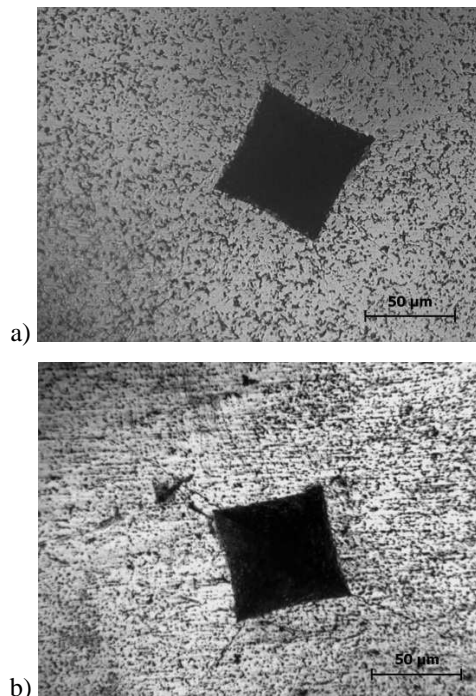
A – stała;  $[A=0,028 (E/H)^{1/2}]$ ,

H – twardość,

E – moduł Younga [MPa] ( $\text{Fe}_2\text{B} - 2,9 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ).

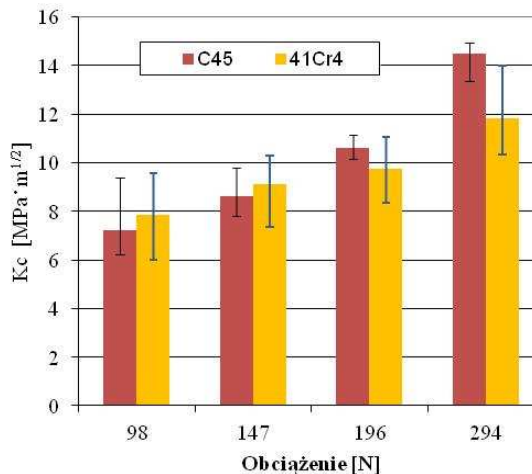
Na każdej próbce wykonano po 10 odcisków przy obciążeniach: 294N, 196N, 147N i 98N.

Przykładowe obrazy odcisków wraz z pęknięciami dla stali C45 i 41Cr4 przedstawiono na rysunku 7. Wyniki badań odporności na kruche pękanie przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Odciski Vickersa z pęknięciami na stalach C45 (a) i 41Cr4 (b) po borowaniu dyfuzyjnym; P = 196N

Fig. 7. Vickers indentation with cracks on C45 (a) and 41Cr4 (b) steels after diffusion boriding; P = 196N



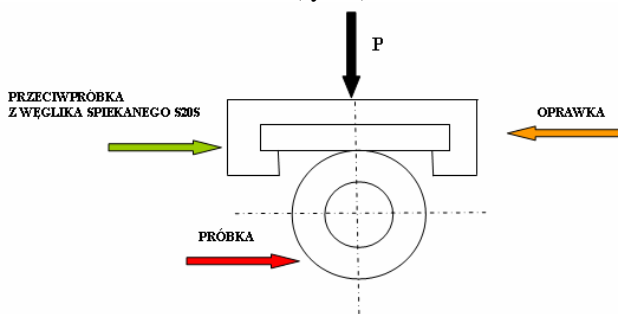
Rys. 8. Odporność na kruche pękanie stali C45 i 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym

Fig. 8. Fracture toughness of C45 and 41Cr4 steels after diffusion boriding

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że uzyskana wartość  $K_C$  zależy od obciążenia. Większe obciążenie wpływa na to, że badanie obejmuje większe objętości materiału i  $K_C$  rośnie (rys. 8).

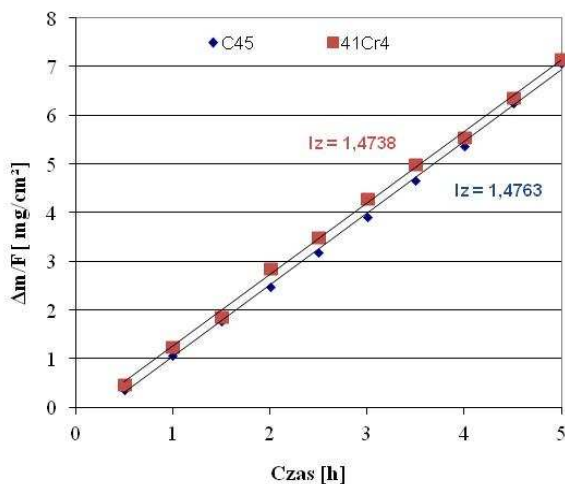
## 8. Badania odporności na zużycie przez tarcie

Do badań odporności na zużycie przez tarcie zastosowano próbki w kształcie pierścienia o wymiarach: średnica zewnętrzna 20 mm, średnica wewnętrzna 12 mm i wysokość 12 mm. Badania przeprowadzono na maszynie tarciowej typu Amsler MBT-01 w układzie: próbka-obracający się pierścień/płytko-przeciwpróbka z węgla spiekane S20S o twardości 1430HV (rys. 9).



Rys. 9. Schemat pary trącej  
Fig. 9. Scheme of the friction pair

Badania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego przy stałym obciążeniu  $P = 147\text{N}$  i prędkości próbki  $v = 0,26\text{ m/s}$  ( $n = 250\text{ obr/min}$ ). Odporność na zużycie określano na podstawie ubytku masy próbki, odniesionej do powierzchni tarcia (zużycie wagowe) i czasu, przyjmując jako wskaźnik intensywności zużycia  $I_z = \Delta m / (F \cdot \tau)$  [ $\text{mg} / (\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ].



Rys. 10. Odporność na zużycie przez tarcie stali C45 i 41Cr4 po borowaniu dyfuzyjnym  
Fig. 10. Resistance to frictional wear of C45 and 41Cr4 steels after diffusion boriding

Badania odporności na zużycie przez tarcie przedstawiono na rysunku 10. Ubytki masy wykazują zależność liniową od czasu, przy czym badane stale nie różnią się w sposób istotny odpornością na zużycie przez tarcie, gdyż wskaźniki zużycia  $I_z$  mają porównywalne wartości.

## 9. Wnioski

Badania strukturalne, składu fazowego, mikrotwardości, odporności na kruche pękanie i odporności na zużycie przez tarcie stali C45 i 41Cr4 pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Struktura warstwy dyfuzyjnej badanych stali ma budowę iglastą o dobrym powiązaniu warstwy z podłożem, o strukturze martenzytycznej.
2. Badania dyfrakcji rentgenowskiej wykazały obecność borków żelaza FeB i  $\text{Fe}_2\text{B}$  w warstwie borowanej.
3. Badania wykazały, że warstwy borowane dyfuzyjnie niezależnie od stali charakteryzują się dużą mikrotwardością w zakresie 1500 -1900 HV.
4. Odporność na zużycie przez tarcie borowanej stali 41Cr4 jest porównywalna do stali C45.
5. Przeprowadzone badania wykazały, że stale po borowaniu niewiele różnią się od siebie swoimi właściwościami.

## 10. Bibliografia

- [1] Przybyłowicz K.: Teoria i praktyka borowania stali. Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2000.
- [2] Jamrozek J., Przybyłowicz K., Depczyński W., Zielińska M.: Borowanie kobaltu i jego stopów. Inżynieria Materiałowa, 2003, nr 6, s. 494-496.
- [3] Pertek A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2001.
- [4] Pertek A., Wiśniewski K.: Właściwości aplikacyjne borowanej stali konstrukcyjnej. Inżynieria Powierzchni, 2007, nr 3, s. 75-78.
- [5] Pertek A.: Borowanie dyfuzyjne i laserowe części maszyn i narzędzi. Inżynieria Powierzchni, 2010, nr 4, s. 28-34.
- [6] Matuschka v. A.G.: Borieren. Carl Hanser Verlag, Munchen, Wien, 1977.
- [7] Ljachovic L. S.: Borirovanie stali. Metallurgija, Moskwa, 1967.
- [8] Nobujiro Takamoto, Toshio Katagiri: The boronizing of iron. Journal Japan Institut of Metals, 1967, 31, No 4, s. 338- 341.
- [9] Konowrocka J., Tacikowski J.: Przegląd metod borowania dyfuzyjnego. Metaloznawstwo i Obróbka Ciepna, 1973, nr 1, s. 26-32.
- [10] Podżorski A.: Naborowanie stali. Przegląd Mechaniczny, 1967, Zeszyt 5, Wydanie XXVI.
- [11] Liliental W.: Niektóre własności warstw borowanych dyfuzyjnie na stali 45. Metaloznawstwo i Obróbka Ciepna, 1973, nr 1, s. 33-39.