

# WPLYW BOROWANIA LASEROWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE STALI HARDOX 450

Streszczenie

W pracy przedstawiono wpływ borowania laserowego na odporność na zużycie przez tarcie stali Hardox 450 w porównaniu ze stalami 18G2 i St3S oraz z żeliwem ADI. Badania odporności na zużycie przez tarcie wykonano przy użyciu trybometru Amsler; w układzie: próbka (obracający się pierścień) - płytka (przeciwpróbka ze stali C45). Stwierdzono, że warstwy borowane laserowo naniesione na stal Hardox 450 znacznie zwiększyły jej odporność na zużycie przez tarcie.

**Słowa kluczowe:** stale konstrukcyjne, borowanie laserowe, tarcie, odporność na zużycie

## Wprowadzenie

Permanentny postęp technologiczny w przemyśle stawia coraz wyższe wymagania dotyczące zwiększenia trwałości i niezawodności elementów maszyn. Koniecznością staje się stosowanie materiałów o coraz lepszych właściwościach mechanicznych i użytkowych oraz wszelkie próby modyfikacji warstwy powierzchniowej. Jedną ze znanych powszechnie technologii zwiększających trwałość i jakość jest borowanie dyfuzyjne. Proces technologiczny znalazł zastosowanie w różnych obszarach techniki w tym m. in.: górnictwie, wojsku itd. Technologię tę przeprowadza się metodą gazową, jarzeniową lub proszkową. Wytworzona struktura warstw borowanych składa się z borków FeB i Fe<sub>2</sub>B, występujących w postaci igieł o twardości dochodzącej do 2000HV (do 800°C).

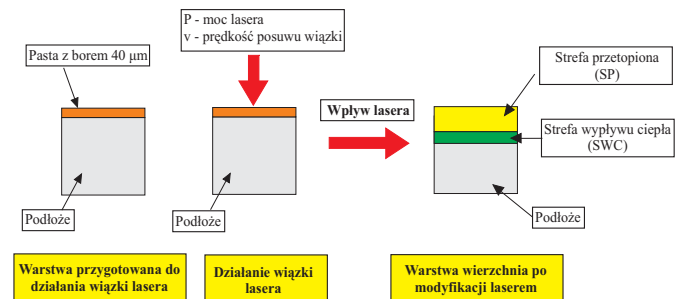
Zaletami tych warstw jest duża mikrotwardość, odporność na korozję, żaroodporność jak również odporność na zużycie przez tarcie. Natomiast do wad można zaliczyć pewną kruchość w strefie przypowierzchniowej oraz duży gradient twardości przejścia od warstwy (~1800 HV) do podłoża (700-400 HV) w zależności od temperatury odpuszczania. Wady te można jednak obniżyć poprzez wytworzenie jednofazowych warstw borowanych (Fe<sub>2</sub>B), kompleksowych warstw borowanych, jak również borowanie laserowe [3, 4, 7, 9-13, 15].

W przemyśle światowym coraz częściej stosuje się w produkcji nowoczesnych części maszyn i urządzeń technologię laserowej obróbki cieplnej, która umożliwia wykonanie warstw wierzchnich nadających wysokie właściwości użytkowe materiałom a w szczególności wzrost ich właściwości tribologicznych [1, 2, 5, 6, 8, 14].

## Przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki wykonane ze stali Hardox 450 w stanie wyjściowym i po borowaniu laserowym (przy różnych wariantach parametrów lasera) oraz stali 18G2, St3S i żeliwa sferoidalnego z przemianą izotermiczną (ADI). Wytypowane materiały są powszechnie stosowane w branży maszyn rolniczych także na elementy poddawane zużyciu przez tarcie. Badania składu chemicznego przeprowadzono na analizatorze iskrowym firmy SOLARIS CCD PLUS. Wyniki przedstawiono w tab. 1.

Technologia borowania z użyciem lasera polegała na stopowaniu borem próbki ze stali Hardox 450 (rys. 1).



Rys. 1. Schemat wytworzenia warstwy

Fig.1. Scheme of the layer forming

Na powierzchnię próbek naniesiono powłokę z borem w postaci pasty, która składała się z boru amorficznego, szkła wodnego i wody destylowanej. Całkowita grubość naniesionej pasty wynosiła ok. 40µm. Laserową obróbkę cieplną

Tab. 1. Skład chemiczny badanych stali

Table 1. Chemical composition of tested steels

Material	Skład chemiczny									
	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B	Inne
Hardox 450	0,258	1,239	0,382	0,015	0,001	0,729	0	0,033	0,002	-
18G2	0,16	1,12	0,32	0,04	0,024	0,11	0,09	0,06	-	Ti-0,001 Al-0,025 Cu-0,1 Ni-0,09 W-0,10
St3S	0,2	1,0	0,25	0,04	0,04	0,20	-	-	-	Cu-0,25
Żeliwo ADI	3,60	0,3	2,35	0,05	0,02	-	1,50	0,30	-	Mg-0,06

Tab. 2. Parametry obróbki laserowej  
Table 2. Laser processing parameters

Materiał	Zabiegi obróbki	P [%]	P [kW]	q [kW·cm <sup>-2</sup> ]	v [m·min <sup>-1</sup> ]	f [mm·obr <sup>-1</sup> ]	n [obr·min <sup>-1</sup> ]
Hardox 450	B: pasta 40µm	35	0,91	28,98	3,84	0,50	30,57
Hardox 450	B: pasta 40µm	40	1,04	33,12	2,88	0,50	22,92
Hardox 450	B: pasta 40µm	45	1,17	37,26	3,84	0,50	30,57

gdzie:

v - prędkość przesuwu wiązki laserowej [m·min<sup>-1</sup>], P - moc lasera (moc maks. lasera wynosi 2,6 [kW]), q - gęstość mocy wiązki lasera [kW·cm<sup>-2</sup>], f - posuw [mm·obr<sup>-1</sup>], n - prędkość obrotowa [obr·min<sup>-1</sup>].

wykonano za pomocą lasera technologicznego CO<sub>2</sub> firmy TRUMPH typu TLF 2600 Turbo o mocy znamionowej 2,6 kW znajdującego się w Laboratorium Techniki Laserowej Zakładu Obróbki Skrawaniem Politechniki Poznańskiej. Zastosowane parametry przedstawiono w tab. 2.

### Badania odporności na zużycie przez tarcie - AMSLER A135

Badania odporności na zużycie przez tarcie przeprowadzono na maszynie typu AMSLER - A135 zgodnie z normą PN-82/H-04332 pt. „Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera”. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego przy stałym obciążeniu  $F = 60$  daN i prędkości  $n = 200$  obr·min<sup>-1</sup>. Odporność na zużycie określono na podstawie ubytku masy, odniesionej do całkowitej drogi tarcia, przyjmując jako wskaźnik intensywności zużycia wagowego  $I_{pw}$ :

$$I_{pw} = \frac{Z_{pw}}{s} \text{ [g·m}^{-1}\text{]},$$

gdzie:

$I_{pw}$  - intensywność zużycia wagowego [g·m<sup>-1</sup>],  
 $Z_{pw}$  - użycie wagowe próbki w okresie ustalonego przebiegu zużycia [g],  
 $s$  - całkowita droga tarcia.

Współczynnik tarcia  $\mu_{sr}$  obliczono ze wzoru:

$$\mu_{sr} = \frac{M_t}{N \cdot r},$$

gdzie:

$r$  - promień przeciwi próbki wynosi 2 [cm],  
 $M_t$  - moment tarcia [daNcm],  
 $N$  - nacisk [daN].

Moment tarcia odczytywano bezpośrednio z wydruku na maszynie typu AMSLER.

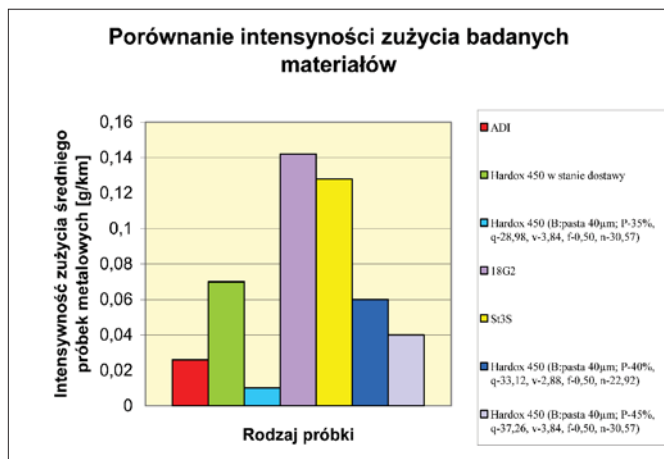
Próbkę ważono przed i po każdym procesie badań odporności na zużycie przez tarcie w odstępach, co 100 min. Pomiary ubytku masy dokonano przy użyciu wagi analitycznej SARTORIUS z dokładnością 0,0001 g.

Zaplanowano następujące cykle badań:

- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z Hardox 450 w stanie wyjściowym,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z Hardox 450 po LOC o gęstości mocy wiązki lasera  $q = 28,98$  kW/cm<sup>2</sup>,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z Hardox 450 po LOC o gęstości mocy wiązki lasera  $q = 33,12$  kW/cm<sup>2</sup>,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z Hardox 450 po LOC o gęstości mocy wiązki lasera  $q = 37,26$  kW/cm<sup>2</sup>,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z 18G2,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z St3S,
- przeciwi próbka ze stali C45 we współpracy z żeliwem ADI.

Tab. 3. Intensywność zużycia stali Hardox 450 w stanie dostawy i po LOC oraz innych materiałów  
Table 3. The intensity of the wear of Hardox 450 steel as delivered and after the LOC and other materials

Lp.	Materiał		Temperatura [°C]	Moment tarcia [kg·cm]	Zużycie [g]	Współczynnik tarcia $\mu_{sr}$	Intensywność zużycia $I_{pw}$
	Przeciwi próbka	Próbka					
1.	Stal C45	Stal Hardox 450 w stanie dostawy	109,6	25	0,1199	0,21	0,07
2.	Stal C45	Stal Hardox 450 (B: pasta 40 µm, P-35%, $q = 28,98$ kW·cm <sup>-2</sup> , $v = 3,84$ m·min <sup>-1</sup> , $f = 0,50$ mm·obr <sup>-1</sup> , $n = 30,57$ obr·min <sup>-1</sup> )	96,0	16,7	0,0146	0,14	0,01
3.	Stal C45	Stal Hardox 450 (B: pasta 40 µm, P-40%, $q = 33,12$ kW·cm <sup>-2</sup> , $v = 2,88$ m·min <sup>-1</sup> , $f = 0,50$ mm·obr <sup>-1</sup> , $n = 22,92$ obr·min <sup>-1</sup> )	112,2	20,6	0,0754	0,17	0,06
4.	Stal C45	Stal Hardox 450 (B: pasta 40 µm, P-45%, $q = 37,26$ kW·cm <sup>-2</sup> , $v = 3,84$ m·min <sup>-1</sup> , $f = 0,50$ mm·obr <sup>-1</sup> , $n = 30,57$ obr·min <sup>-1</sup> )	115,5	22	0,046	0,18	0,04
5.	Stal C45	18G2	133	37,0	0,1789	0,31	0,14
6.	Stal C45	St3S	124	37,0	0,1603	0,31	0,13
7.	Stal C45	Żeliwo ADI	136	33,0	0,0325	0,28	0,03



Rys. 2. Intensywność zużycia stali Hardox 450 w stanie dostawy i po LOC oraz innych materiałów

Fig. 2. The intensity of the wear of Hardox 450 steel as delivered and after the LOC and other materials

W tab. 3 i na rys. 2 zamieszczono wyniki z badań zużycia przez tarcie stali Hardox 450 w stanie dostawy i po LOC oraz stali 18G2, St3S i żeliwa ADI.

Przeprowadzone badania wykazały, że najmniejszą intensywnością zużycia charakteryzuje się stal Hardox 450 po borowaniu laserowym o parametrach:  $q - 28,98 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $v - 3,84 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f - 0,50 \text{ mm}\cdot\text{obr}^{-1}$ ,  $n - 30,57 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ . Najbardziej zużywającymi się materiałami są stale 18G2 i St3S.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stali Hardox 450 można stwierdzić, że:

1. Ze względu na dobre właściwości tribologiczne stali Hardox 450 celowe jest stosowanie tego materiału na elementy pracujące w warunkach tarcia. Spowoduje to podniesienie jakości elementów maszyn, przy możliwości zmniejszenia mas oraz wydłużeniu ich trwałości eksploatacyjnej.
2. Zastosowanie borowania laserowego, szczególnie na odpowiedzialne elementy współpracujące w parze ciernej, o optymalnych parametrach lasera może dodatkowo w znaczący sposób podwyższyć jeszcze właściwości tribologiczne Hardox 450.

## INFLUENCE OF LASER BORONIZING ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE HARDOX 450 STEEL

### Summary

Influence of laser boronizing on resistance to the wear through the friction of Hardox 450 steel in comparison with 18G2 and St3S steels and with the ADI cast iron was described in this work. Research on resistance to the wear through the friction was performed using Amsler tribometer, in the arrangement: sample (turning ring) - tile (counter-sample of C45 steel). They stated that boronized layers put on Hardox 450 steel had increased considerably the wear resistance through the friction.

**Key words:** constructional steels, laser boronizing, friction, wear resistance

## Bibliografia

- [1] Eroglu M.: Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: microstructure and hardness. Surface and Coatings Technology, 2009, vol. 203, pp. 2229-2235.
- [2] Kiratli N., Findik F.: Research on wear characteristics of AISI 1035 steel boronized at various parameters. Industrial Lubrication and Tribology, 2011, vol. 63/2, 127-133.
- [3] Konowrocka J., Tacikowski J.: Przegląd metod borowania dyfuzyjnego. Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła, 1973, nr 1, s. 26-32.
- [4] Lilental W.: Niektóre własności warstw borowanych dyfuzyjnie na stali 45. Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła, 1973, nr 1, s. 33-39.
- [5] Lubas J.: Practical application of boron-modified sliding pairs in I.C. engine. Tribology International, 2010, vol. 43, pp. 2046-2050.
- [6] Morimoto J., Ozaki T., Kubohori T., Morimoto S., Abe N., Tsukamoto M.: Some properties of boronized layers on steel with direct diode laser. Vacuum, 2009, vol. 83, pp. 185-189.
- [7] Nobujiro Takamoto, Toshio Katagiri: The boronizing of iron. Journal Japan Institut of Metals, 1967, 31, No 4, s. 4, s. 338-341.
- [8] Oliveira C.K.N., Castaletti L.C., Neto A.L., Totten G.E., Heck S.C.: Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel. Vacuum, 2010, vol. 84, pp. 792-796.
- [9] Pertek A., Wiśniewski K.: Właściwości aplikacyjne borowanej stali konstrukcyjnej. Inżynieria Powierzchni, 2007, nr 3, str. 75-78.
- [10] Pertek A.: Borowanie dyfuzyjne i laserowe części maszyn i narzędzi. Inżynieria Powierzchni, 2010, nr 4, s. 28-34.
- [11] Pertek A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2001.
- [12] Podzorski A.: Naborowanie stali. Przegląd Mechaniczny, 1967, Zeszyt 5, Wydanie XXVI.
- [13] Przybyłowicz K.: Teoria i praktyka borowania stali. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2000.
- [14] Safonov A.N.: Special features of boronizing iron and steel using a continuous-wave CO<sub>2</sub> laser. Metal Science and Heat Treatment, 1998, vol. 40, Nos. 1-2, pp. 6-10.
- [15] Wierchoń T.: The role of glow discharge in the formation of boride layer on steel in the plasma boriding process. Advances in low-temperature plasma, chemistry, technology, applications. Technomic Publishing Co.INC. Lancaster-Basel, USA, 1988, vol. 2.



### KOSZTY PRACY MASZYN LEŚNYCH

ISBN 978-83-927505-2-9

Książka adresowana jest przede wszystkim do prywatnych przedsiębiorców leśnych, Służb Leśnych i pracowników technicznych w Nadleśnictwach, Dyrekcjach Regionalnych oraz Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych i ma na celu przedstawienie sposobu wyliczenia kosztów usług maszynowych wykonywanych w lasach.

Wydawca: Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych  
60-963 Poznań, ul. Starołęcka 31  
tel. 061 87-12-200; fax 061 879-32-62; e-mail: office@pimr.poznan.pl; Internet: http://www.pimr.poznan.pl