

Grzegorz KINAL^{*}, Aneta BARTKOWSKA^{}**

MOŻLIWOŚCI KSZTAŁTOWANIA ODPORNOŚCI NA PROCESY ZUŻYWANIA LASEROWO BOROWANYCH WARSTW POWIERZCHNIOWYCH ELEMENTÓW STALOWYCH ORAZ ŻELIWNYCH

POSSIBILITIES OF SHAPING THE WEAR RESISTANCE OF THE LASER BORONIZED SURFACE LAYERS ON MACHINE PARTS PRODUCED WITH STEEL AND CAST IRON

Słowa klucze:

borowanie laserowe, mikrotwardość, odporność na zużycie przez tarcie, chropowatość

Key words:

laser boriding, microhardness, wear resistance, roughness

^{*} Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Polska, tel. 61 647-59-46, e-mail: grzegorz.kinal@put.poznan.pl.

^{**} Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Materiałowej, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Polska, tel. 61 665-35-72, e-mail: aneta.bartkowska@put.poznan.pl.

Streszczenie

W artykule przedstawiono znaczenie technik laserowych w kształtowaniu warstw powierzchniowych elementów z żeliwa oraz stali. Laserowe borowanie przeprowadzono z użyciem lasera CO₂ o mocy nominalnej 2600W dla ścieżek wielokrotnych. Borowanie laserowe stopów żelaza pozwoliło na uzyskanie mikrotwardości warstwy powierzchniowej w zakresie 1300÷1100 HV0,1. Na podstawie badań tribologicznych oraz pomiarów chropowatości stwierdzono, że borowanie laserowe elementów stalowych i żeliwnych wpływa na wzrost odporności na zużycie przez tarcie.

WPROWADZENIE

Obecnie istniejącą tendencją w wytwarzaniu warstw powierzchniowych jest poszukiwanie korzystnego powiązania właściwości z późniejszym ich zastosowaniem eksploatacyjnym [L. 1, 2]. Dlatego poszukuje się technologii wytwarzania warstw powierzchniowych, które poprawiłyby właściwości obecnie stosowanych materiałów. Jedną z metod obróbki powierzchniowej materiałów jest laserowe stopowanie, w wyniku którego zwiększa się twardość i odporność na zużycie przez tarcie [L. 3–9]. Do pierwiastków, które w istotny sposób wpływają na poprawę tych właściwości zalicza się między innymi bor [L. 4–12]. Warstwy borowane dyfuzyjnie mają liczne zalety, do których należy duża twardość do 2000 HV, odporność na zużycie przez tarcie czy odporność na działanie licznych roztworów kwaśnych i alkalicznych [L. 4, 12]. Jednak proces ten jest stosunkowo energochłonny i w związku z tym inną metodą wprowadzenia do warstwy powierzchniowej boru może być wykorzystanie techniki wiązkowej, jaką jest laserowe borowanie. Laserowe borowanie polega na przetapianiu warstwy boru pod postacią pierwiastka lub fazy, zmieniając skład chemiczny i strukturę, a co za tym idzie i właściwości warstwy powierzchniowej [L. 4–10]. Intensywne chłodzenie przetopionej warstwy materiału wzbogaconego pozwala otrzymać drobnokrystaliczne, silnie przesycone roztwory, jak i również roztwory złożone z pierwiastków trudno tworzących stopy w normalnych, zbliżonych do równowagi termodynamicznej warunkach. Istnieją liczne publikacje ukazujące wpływ pierwiastków, m.in. B, Cr, Si, C, na właściwości warstwy [L. 3–11].

Major [L. 5], wykorzystując wiązkę laserową wprowadzał węgliki VC i Mo₂C do stali szybko tnącej SW7M oraz borki CrB, VB₂ i B₄C do stali 45 za pomocą lasera CO₂ o mocy 6 kW. Stwierdził, że laserowe stopowanie stali węglkami prowadzi do wzrostu ilości fazy węglkowej, natomiast wprowadzenie do warstwy borków powoduje powstanie eutektyki borkowej z fazami M₃(CB)/M₂B i M₂B.

Natomiast Morimoto i in. [L. 10] przeprowadzili stopowanie za pomocą lasera diodowego stali S45C mieszaniną proszkową składającą się z 20÷50% proszku B_2O_3 i proszku FeB, którą naniesiono na stal i poddano prasowaniu. W wyniku borowania laserowego otrzymano warstwę powierzchniową ze strefą przetopioną o różnej twardości w zależności od zastosowanego składu proszku stopującego oraz od parametrów lasera. Stosując moc wiązki lasera 200W i prędkość przemieszczania wiązki lasera względem materiału 0,4 mm/s, otrzymano twardość rzędu 1158HV dla 60% FeB i 40% B_2O_3 . W porównaniu z borowaniem elektrolitycznym stopowanie laserowe charakteryzowało się mniejszym gradientem twardości między strefą powierzchniową a podłożem. Również badania zużycia erozyjnego wykazały wyższość stali po laserowym borowaniu nad stałą nieobrobioną laserowo [L. 10].

Celem badań niniejszej pracy jest ocena możliwości zwiększenia odporności na zużycie przez tarcie borowanych laserowo elementów stalowych oraz żeliwnych.

METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na próbkach ze stali konstrukcyjnej C45 i żeliwa sferoidalnego EN-GJS-600 o składzie chemicznym przedstawionym w **Tabeli 1**.

Badania mikrostruktury, mikrotwardości i odporności na zużycie przez tarcie stali oraz żeliwa przeprowadzono na próbkach w postaci tulei (dla stali C45 średnica zewnętrzna tulei wyniosła $D = 20$ mm, średnica wewnętrzna $d = 12$ mm oraz wysokość $h = 12$ mm, natomiast dla żeliwa EN-GJS-600 średnica zewnętrzna tulei wyniosła $D = 44$ mm oraz długość $h = 60$ mm).

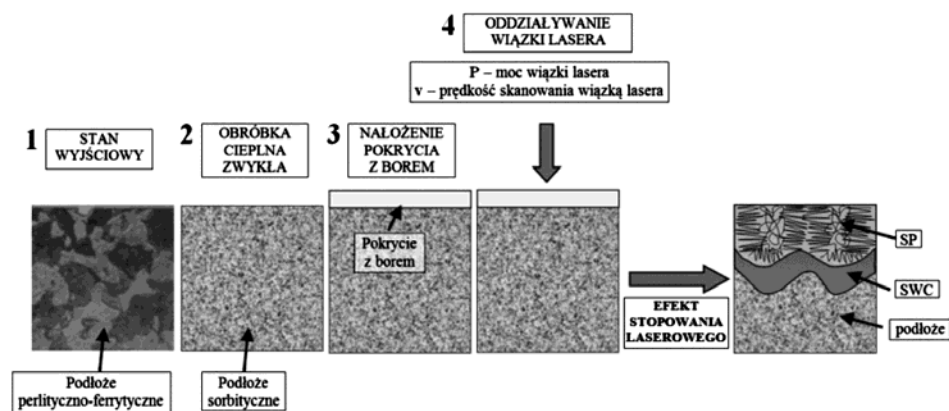
Przed procesem laserowej obróbki cieplnej (LOC) próbki stalowe były hartowane z temperatury $850^{\circ}C$ w wodzie i odpuszczane w temperaturze $560^{\circ}C$ w czasie 1 h. W obu przypadkach (dla próbek stalowych i żeliwnych) przed obróbką laserową nałożono pokrycie z borem, które składało się z boru amorficznego, szkła wodnego i wody destylowanej, po czym przetopiono je wiązką lasera. Całkowita grubość naniesionego pokrycia wynosiła średnio $40 \mu m$. Pomiary grubości pokrycia dokonano z użyciem ultrametru A2002M.

Tabela 1. Skład chemiczny stali i żeliwa [%wag.]

Table 1. The chemical composition of steel and cast iron [wt%]

Materiał	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr
C45	0,42	0,71	0,18	0,008	0,032	0,22	0,07
EN-GJS-600	3,50	0,40	2,72	0,053	0,008	0,44	0,02

Laserową obróbkę cieplną prowadzono z wykorzystaniem lasera molekularnego CO₂ firmy TRUMPF (typ TLF 2600 Turbo) o rozkładzie gęstości mocy promieniowania w wiązce lasera TEM₀₁ znajdującego się w Laboratorium Techniki Laserowej Politechniki Poznańskiej. W czasie LOC stali zastosowano moc wiązki lasera $P = 1,04$ kW, prędkość skanowania wiązką lasera $v = 2,88$ m/min (48 mm/s), średnica wiązki o przekroju kołowym $d = 2$ mm oraz skok linii śrubowej $f = 0,50$ mm/obr., który wpływał na rozłożenie ścieżek laserowych na powierzchni obrabianej. Schemat etapów wytwarzania warstwy borowanej laserowo na stali przedstawiono na **Rysunku 1**.



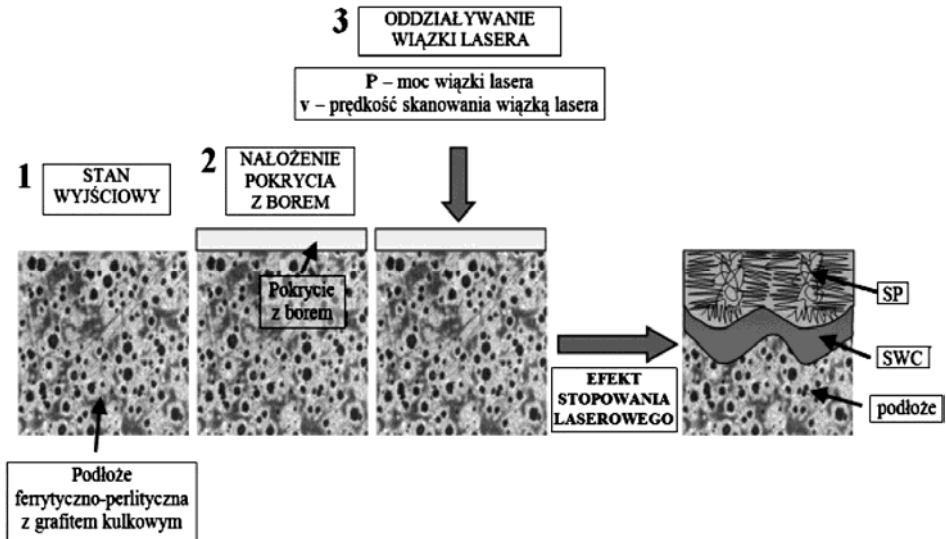
Rys. 1. Schemat laserowego borowania stali

Fig. 1. Scheme of laser boriding steel

Laserowe borowanie tulei żeliwnych wykonano za pomocą wiązki lasera $P = 600$ W, prędkości skanowania wiązką lasera $v = 0,18$ m/min (3 mm/s) z zastosowaniem wiązki o przekroju kołowym wynoszącym $d = 6$ mm oraz dla $f = 2$ mm/obr. Czopy wykonane z żeliwa sferoidalnego borowano laserowo po linii śrubowej, co w obszarze współpracy tulei z półpanewkami pozwoliło przy nakładaniu się kolejno przetapianych obszarów uzyskać ciągłą warstwę powierzchniową. Schemat etapów powstawania warstwy powierzchniowej borowanej laserowo na żeliwie przedstawiono na **Rysunku 2**.

Parametry obróbki laserowej zastosowane podczas tworzenia warstwy powierzchniowej na próbkach ze stali i z żeliwa ustalono na podstawie badań wstępnych, które pozwoliły na wyselekcjonowanie takich parametrów, aby uzyskać warstwę ciągłą o odpowiedniej grubości w stosunku do grubości zastosowanego pokrycia, mikrotwardości, odporności na zużycie czy chropowatości powierzchni.

Po laserowym borowaniu badanych materiałów otrzymano warstwę powierzchniową, która składa się ze: strefy przetopionej (SP), strefy wpływu ciepła (SWC) oraz podłoża, na które nie oddziaływała wiązka lasera (**Rys. 1 i 2**).



Rys. 2. Schemat laserowego borowania żeliwa

Fig. 2. Scheme of laser boriding cast iron

Badania odporności na zużycie przez tarcie przeprowadzono dla próbek stalowych na maszynie tarcowej typu Amsler MBT – 01, natomiast dla próbek żeliwnych badania zużycia prowadzono na stanowisku ZPG – IV.

W przypadku badania odporności na zużycie przez tarcie warstw borowanych na stali para trąca pracowała w układzie: próbka – obracający się pierścień / przeciwpółka – płyta z węgla spiekane S20S o twardości 1430 HV. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego przy stałym obciążeniu $F = 147 \text{ N}$ i prędkości obrotowej próbki $v = 0,26 \text{ m/s}$. Odporność na zużycie określano na podstawie ubytku masy próbki (Δm [mg]), odniesionej do powierzchni tarcia (S [cm^2]) w jednostce czasu (t [h]), przyjmując jako wskaźnik intensywności zużycia I_z . Pomiarów ubytku masy dokonano z użyciem wagi analitycznej WA34 z dokładnością $0,0001 \text{ g}$ w odstępach co $0,5 \text{ h}$.

Badania odporności na zużywanie warstw borowanych na żeliwie prowadzono w warunkach, gdzie parę trąca stanowiła próbka będąca obracającym się pierścieniem, natomiast przeciwpółkę stanowiły dwie półpanewki firmy GLYCO osadzone nieruchomo w obudowie, poprzez które doprowadzany był grawitacyjnie olej mineralny Lotosa 15/W40 otworem smarującym. Próba zużyciowa obejmowała zmiany nacisków powierzchniowych wynikających ze zmian ciśnienia w hydraulicznym układzie obciążającym w zakresie $0 \div 25 \text{ MPa}$. Zwiększanie obciążenia próbki odbywało się w odstępach równych 15 min przy stałej prędkości obrotowej wału równej 1300 obr./min . Określenia wielkości zużycia dokonywano na podstawie profilogramów wykonywanych w obszarze współpracy panewek z czopem po zakończeniu próby tarcowej.

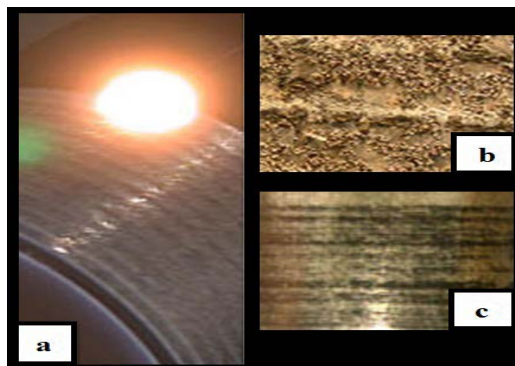
Obserwacje mikrostruktury stopów żelaza przeprowadzono na zglądach metalograficznych trawionych 2% roztworem kwasu azotowego. Badania te wykonano na mikroskopie świetlnym Metaval produkcji Carl Zeiss Jena wyposażonym w kamerę Moticam 2300 3.0 MP Live.

Badania mikrotwardości przeprowadzono z użyciem mikrotwardościomierza typu Zwick 3212B, stosując obciążenie HV0,1.

Profilogramy powierzchni próbek po laserowym borowaniu i po badaniach zużyciowych stali i żeliwa wykonano na profilografometrze Carl Zeiss Jena współpracującym z komputerem i oprogramowaniem firmy SAJD.

WYNIKI BADAŃ

Rysunek 3 przedstawia powierzchnię żeliwnej tulei po laserowym borowaniu dla ścieżek wielokrotnych (rastry). Na **Rysunku 3a** przedstawiono widok żeliwnej tulei borowanej laserowo w czasie laserowego nagrzewania, na **Rysunku 3b** bezpośrednio po nagrzewaniu laserowym (widoczne pofalowanie powierzchni), natomiast na **Rysunku 3c** widok próbki po badaniach zużyciowych.

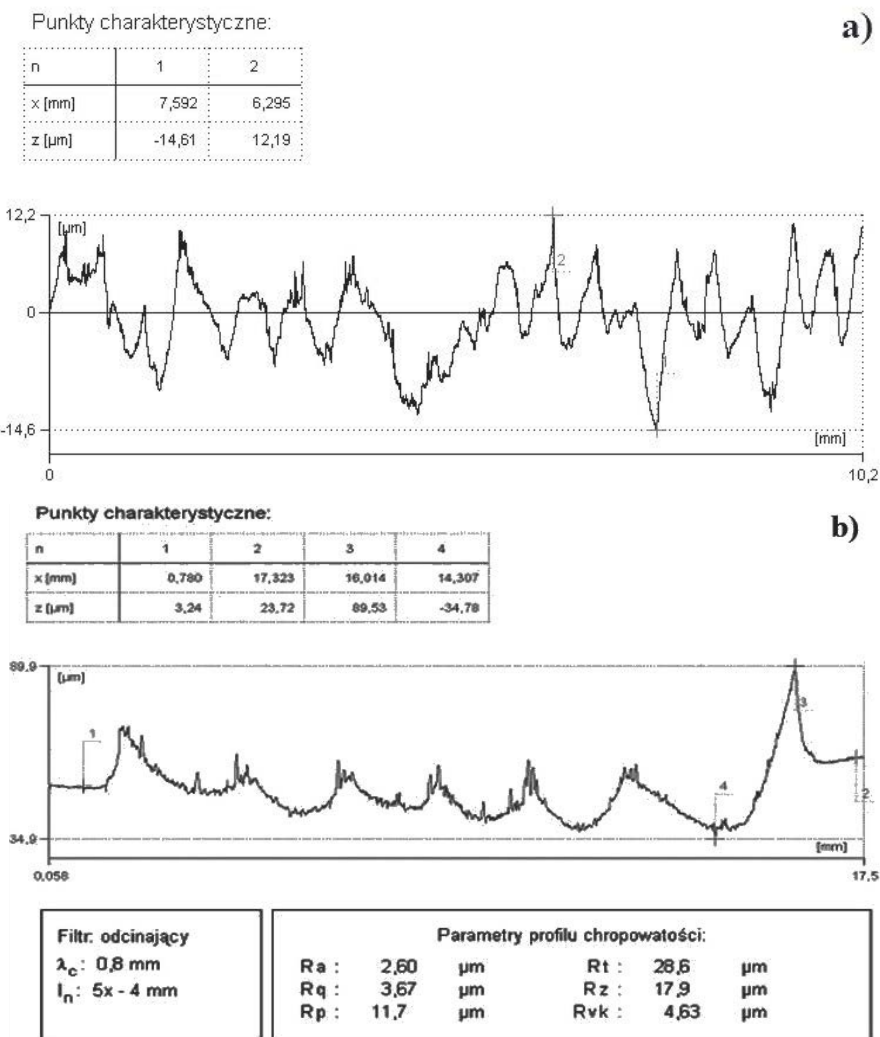


Rys. 3. Widok powierzchni żeliwnej tulei borowanej laserowo: a) w czasie nagrzewania laserowego, b) bezpośrednio po nagrzewaniu laserowym, c) po próbie tarciowej

Fig. 3. View of cast iron sleeve surface laser boriding: a) during the laser heating, b) immediately after the laser heating, c) after friction test

Potwierdzeniem pofalowania powierzchni widocznych podczas obserwacji makroskopowych są profilogramy badanych próbek (**Rys. 4**). Przebiegi profilogramów wskazują na regularnie powtarzające się zagłębienia i wzniesienia, których suma jest większa w przypadku tulei żeliwnych w stosunku do nieregularnie powtarzających się wzniesień i zagłębień tulei stalowych poddanych borowaniu laserowemu. Zaobserwowano także, że mierzony parametr R_a na czopie żeliwnym w miejscu oddziaływania wiązki lasera, który na początku wynosił około 2 μm , po obróbce poprzez szlifowanie przyjmuje wartość na

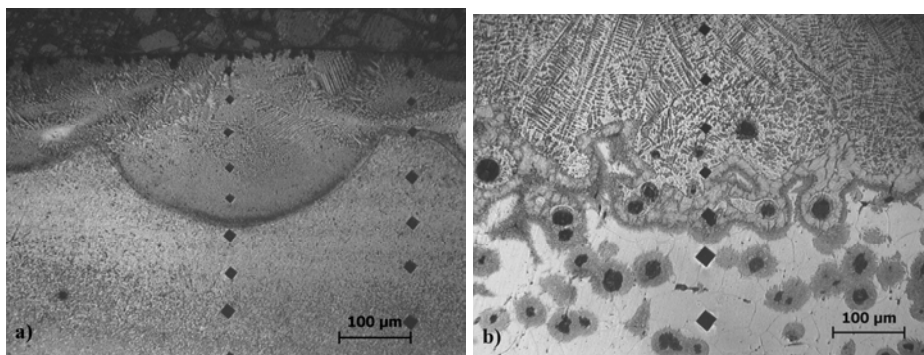
poziomie $0,098 \pm 0,017$, co przy współpracy z panewką o zbliżonej wartości wspomnianego parametru pozwala na skrócenie okresu docierania. Charakter przebiegu zmian profilu chropowatości powierzchni dla próbek stalowych i żeliwnych przedstawiono na **Rysunku 4**.



Rys. 4. Profilogramy powierzchni próbek po borowaniu laserowym – ścieżki wielokrotne: a) próbka stalowa, b) próbka żeliwna

Fig. 4. Sensory profiles surface of sample after laser boriding – multiple tracks: a) steel sample, b) cast iron sample

Rysunek 5a przedstawia mikrostrukturę stali C45 po laserowym borowaniu. Otrzymana mikrostruktura składa się ze strefy przetopionej (SP), strefy wpływu ciepła (SWC) oraz podłoża. Grubość otrzymanej strefy przetopionej mieści się w zakresie 200 μm w osi wytworzonych ścieżek laserowych. Strefa przetopiona ma mikrostrukturę eutektyki borkowej z martenzytem. Strefa wpływu ciepła składa się z martenzytu, natomiast podłoże ma strukturę sorbityczną. Na **Rysunku 5b** przedstawiono mikrostrukturę żeliwa sferoidalnego o strukturze ferrytyczno-perlitycznej po laserowym borowaniu. Strefa przetopiona ma grubość ok. 400 μm . Na granicy przejścia między strefą przetopioną a podłożem ferrytyczno-perlitycznym widać rozmieszczone kulki grafitu.



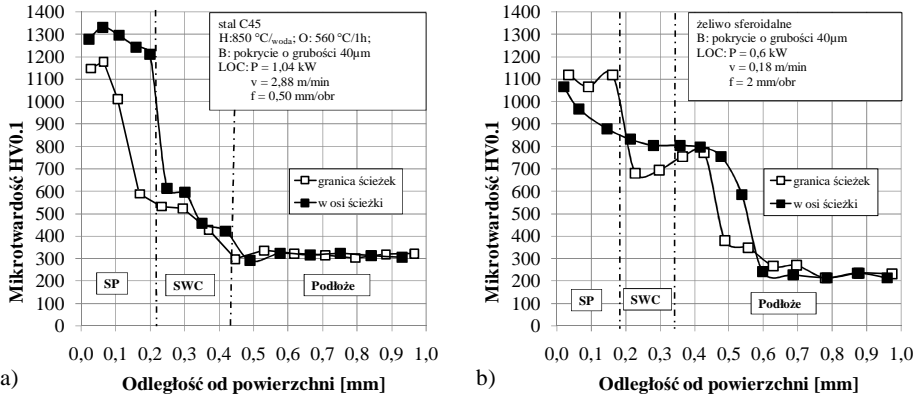
Rys. 5. Mikrostruktura stali (a) i żeliwa (b) po borowaniu laserowym

Fig. 5. Microstructure of steel and cast iron after laser boriding

Na **Rysunku 6** zestawiono wyniki pomiarów mikrotwardości stali (**Rys. 6a**) i żeliwa (**Rys. 6b**) po borowaniu laserowym w osi ścieżki i na granicy ścieżek laserowych. Warstwa borowana laserowo na stali ma mikrotwardość w zakresie 1300÷1200 HV_{0,1}, po czym maleje do wartości ok. 600 HV_{0,1} w strefie wpływu ciepła, a następnie do sorbitycznego podłoża o mikrotwardości rzędu 320 HV_{0,1}.

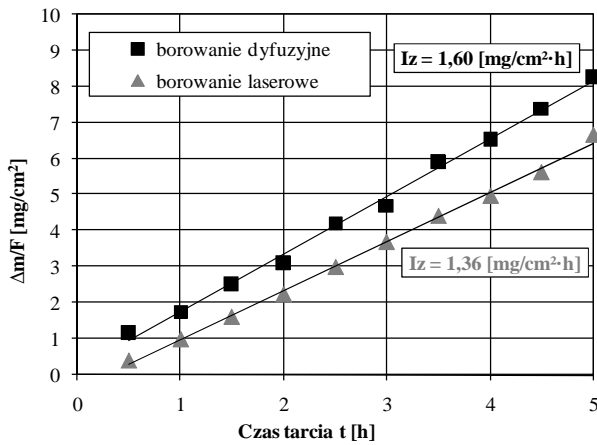
Rysunek 6b przedstawia wyniki pomiarów mikrotwardości żeliwa sferoidalnego, którego wartość w strefie przetopionej wynosi ok. 1100 HV_{0,1} i łagodnie przechodzi do podłoża o mikrotwardości rzędu 210 HV_{0,1}. Niewielkie wahania mikrotwardości w obszarze podłoża są spowodowane występującą mikrostrukturą, w której są ziarna ferrytu oraz kulki grafitu w otoczce perlitu.

Porównano wyniki odporności na zużycie przez tarcie stali borowanej laserowo z borowaną dyfuzyjnie, które wcześniej ulepszano cieplnie (**Rys. 7**). Stwierdzono, że warstwy borowane laserowo charakteryzowały się mniejszym wskaźnikiem intensywności zużycia ($I_z = 1,36 \text{ [mg/(cm}^2 \cdot \text{h)]}$) w stosunku do warstw borowanych dyfuzyjnie ($I_z = 1,60 \text{ [mg/(cm}^2 \cdot \text{h)]}$).



Rys. 6. Profile mikrotwardości stali (a) i żeliwa (b) po borowaniu laserowym

Fig. 6. Microhardness profiles of steel (a) and cast iron (b) after laser boriding

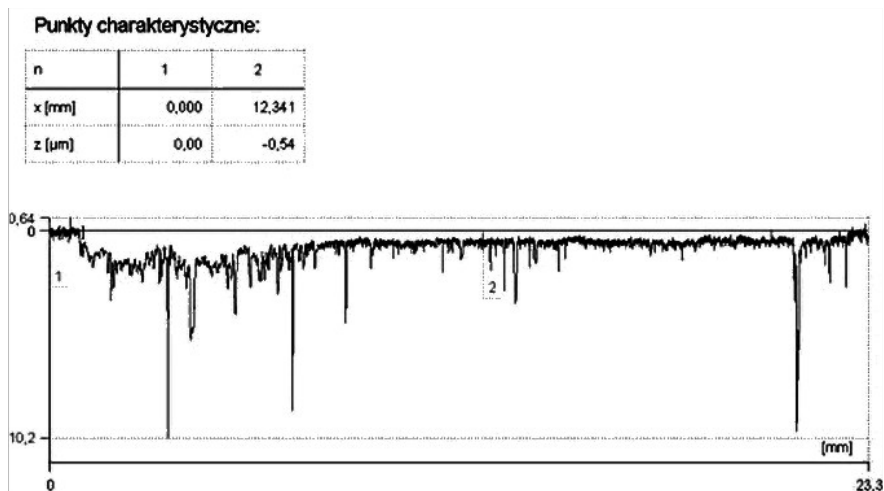


Rys. 7. Odporność na zużycie przez tarcie warstwy borowanej dyfuzyjnie i laserowo na stali C45

Fig. 7. Wear resistance of diffusion borided and laser borided layer on C45 steel

Wcześniej przeprowadzone badania [L. 13] próby tarciowej tulei żeliwnej borowanej laserowo i nieobrobionej laserowo wykazały poprawę odporności na zużycie wskutek zastosowania obróbki laserowej. W wyniku pomiarów zagłębień profilu chropowatości w miejscu współpracy czopa z panewkami stwierdzono, że występują mniejsze zagłębienie w miejscach czopów borowanych laserowo w stosunku do czopów na próbkach nieobrobionych laserowo [L. 13]. Na Rysunku 8 przedstawiono profilogram powierzchni próbki żeliwnej po borowaniu laserowym i próbie tarciowej. Wcześniej badania wykazały, że czopy nieobrobione laserowo charakteryzowały się średnio 2,5-krotnie

większym zagłębieniem profilu w miejscu wytarcia w porównaniu z obniżeniem na profilu czopów obrobionych laserowo.



Rys. 8. Profilogram powierzchni próbki żeliwnej po borowaniu laserowym i próbie tarciowej
 Fig. 8. Sensory profile surface of cast iron sample after laser boriding and friction test

Profile uzyskane na tulejach borowanych laserowo po pracy na maszynie tarciowej wykazywały zużycie równe $0,56 \pm 0,05 \mu\text{m}$ (**Rys. 8**).

PODSUMOWANIE

- W wyniku procesu borowania laserowego otrzymano ścieżki wielokrotne (rastry) o budowie strefowej.
- Warstwy borowane laserowo wytworzone na stali i żeliwie mają wyrównaną mikrotwardość w obszarze strefy przetopionej, która wynosi $1300 \div 1100 \text{ HV}_{0,1}$ i maleje stopniowo przez strefę wpływu ciepła do podłoża.
- Po procesie borowania laserowego w strefie przetopionej mikrotwardość jest czterokrotnie większa w stosunku do podłoża.
- Borowanie laserowe wpływa na zwiększenie odporności na procesy zużyciowe.

LITERATURA

1. Wierzchoń T., Szawłowski J.: Inżynieria powierzchni a potrzeby materiałowe przemysłu. Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej, XIII Seminarium grupy SECO/WARWICK Polska, 22–23.09.2010, s. 5÷19.

2. Burakowski, T. Michalski, J. Senatorski, J. Tacikowski, J.: Zużycie tribologiczne przy różnych naciskach powierzchniowych wybranych stali po typowych obróbkach dyfuzyjnych. *Inżynieria Powierzchni*, 2 (2011), s. 3÷11.
3. Kusiński J.: Technologie laserowe. *Problemy Eksploatacji*, 3 (2004), s. 33÷47.
4. Pertek A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego. *Wyd. Politechniki Poznańskiej*, Poznań, (2001).
5. Major B.: Laser Processing for Surface Modification by Remelting and Alloying of Metallic System. *Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques – Chapter 7*. Elsevier (2006), s. 241÷274.
6. Bartkowska A., Pertek-Owsianna A., Przystacki D.: Hartowanie i borowanie laserowe stali konstrukcyjnej C45. *Inżynieria Materiałowa*, 6 (2013), s. 610÷614.
7. Wiśniewski K., Pertek A.: Parameters of Laser Boriding Process. *Intertech 2011, IV International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists 18-20 May 2011, Poznań, Poland*, s. 96÷98.
8. Paczkowska M., Ratuszek W., Waligóra W.: Microstructure of laser boronized nodular iron. *Surface & Coatings Technology* 205 (2010), s. 2542÷2545.
9. Kinal G., Waligóra W.: Results of the test of laser boronizing of machine elements made of gray cast iron. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2 (2005), s. 54÷58.
10. Morimoto J., Ozaki T., Kubohori T., Morimoto S., Abe N., Tsukamoto M.: Some properties of boronized layers on steels with direct diode laser. *Vacuum*, 83 (2009), s. 185÷189.
11. Pertek A., Kulka M., Jankowiak M., Józwiak K.: Laser heat treatment of borided layers, *Inżynieria Materiałowa*, 5 (2001), s. 716÷719.
12. Przybyłowicz K.: *Teoria i praktyka borowania stali*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce (2000).
13. Kinal G., Paczkowska M.: Badania zużyciowe stopowanych laserowo czopów wału korbowego z żeliwa sferoidalnego. *Inżynieria Materiałowa*, 6 (2012), s. 697÷700.

Summary

This paper presents the importance of laser techniques in shaping parts of surface layers with cast iron and steel. Laser boronizing was carried out using a CO₂ laser with a nominal power of 2600W for multiple tracks. Laser boriding of iron alloys allowed us to obtain a microhardness of the surface layer in the range of 1300 –1100 HV_{0,1}. Based on the tribological research and measurements roughness, it was found that the laser boriding of steel and cast iron parts affects the increase in wear resistance.

