

RESULTS OF THE TEST OF LASER BORONIZING OF MACHINE ELEMENTS MADE OF GRAY CAST IRON

S u m m a r y

This paper presents the research on establishing a laser boronizing technology of machine elements made of gray cast iron. Significant microhardness and following high tribological resistance are characteristic for surface layers created with the use of this technology.

BADANIA EFEKTÓW BOROWANIA LASEROWEGO ELEMENTÓW Z ŻELIWA SZAREGO

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono badania zmierzające do opanowania technologii borowania laserowego elementów wykonanych z żeliwa szarego. Warstwy powierzchniowe wykonane tą technologią cechują się znaczną mikrotwardością i tym samym dużą odpornością na zużycie tribologiczne.

1. Wstęp

Ważnym problemem technologicznym współczesnego przemysłu maszynowego i samochodowego jest sprostanie coraz wyższym wymaganiom dotyczącym zwiększenia trwałości i niezawodności elementów maszyn i pojazdów.

Materiałem konstrukcyjnym wytwarzanym już od setek lat i szeroko stosowanym w przemyśle samochodowym, budowlanym oraz budowie maszyn jest żeliwo. Umiejętność wytwarzania żeliwa ciągliwego, modyfikowanego, sferoidalnego oraz różnych gatunków żeliwa specjalnego pozwoliło zbliżyć ten materiał pod względem własności mechanicznych do stali. Ogólnie żeliwo charakteryzuje się między innymi: dużą zdolnością do tłumienia drgań, dobrą obrabialnością, dobrą odpornością na ścieranie, małą podatnością na odkształcenia plastyczne, małą rozszerzalnością cieplną oraz niskim kosztem wytwarzania lanych półfabrykatów. Żeliwo, ze względu na łatwość kształtowania skomplikowanych elementów konstrukcyjnych oraz mały koszt wytwarzania, jest stosowane w różnych gałęziach przemysłu, także w przemyśle motoryzacyjnym.

W budowie pojazdów samochodowych stosowane są przede wszystkim różne gatunki żeliwa szarego, sferoidalnego (coraz szerzej stosowane żeliwo sferoidalne ADI (ang. Austempered Ductile Iron)) oraz ciągliwego. Wykonuje się z nich przykładowo takie elementy silników spalinowych jak: tuleje cylindrowe, głowice, pierścienie tłokowe (żeliwo szare), wały korbowe, wałki rozrządu, dźwignie i popychacze zaworów (żeliwo sferoidalne), a także znane jest zastosowanie żeliwa ciągliwego do wytwarzania pierścieni tłokowych (silnik ZI Opel 2,26/R4) lub korbowodów przy zastosowaniu modyfikacji żeliwa magnezem [2, 12].

W znacznej części odlew z żeliwa mogą być stosowane w stanie surowym, jednak często okazuje się, że możliwości samego procesu wytwarzania odlewu są niewystarczające w stosunku do rosnących wymagań im stawianym. W takim przypadku dopiero obróbka cieplna lub cieplno-chemiczna daje pożądane rezultaty [8]. Ogólnie przyjmuje się, że tego rodzaju procesy mają za zadanie poprawić własności odlewu, co w konkretnych przypadkach może oznaczać obniżenie lub podwyższenie twardości, podwyższenie

wytrzymałości na rozciąganie lub zwiększenie plastyczności, usunięcie naprężeń [8], a także uzyskanie twardej i odpornej na zużycie warstwy powierzchniowej przedłużającej znacząco żywotność elementu. Jednym z takich procesów jest borowanie.

Borowanie polega na wzbogacaniu warstwy powierzchniowej w bor i jest rodzajem obróbki cieplno-chemicznej. Borowanie jest interesującą obróbką powierzchniową ze względu na prosty i tani sposób zwiększenia twardości, a tym samym odporności na zużycie ścierne czy korozyjne [1,10]. Wyraźny wzrost mikrotwardości borowanej warstwy jest spowodowany powstaniem bardzo twardych i odpornych na ścieranie boroków żelaza. Atrakcyjność tak wytworzonych warstw na materiałach stalowych spowodowała, że w krajach wysoko rozwiniętych borowanie znajduje coraz szersze zastosowanie. Należy także podkreślić że nieustannie trwają prace nad ulepszaniem starych i wynalezieniem nowych metod borowania [10].

Okazuje się również, iż bor jako pierwiastek jest także atrakcyjnym dodatkiem stopowym żeliwa w stanie surowym. Stosowany wraz z innymi dodatkami stopowymi wpływa korzystnie na strukturę i własności żeliw. Dodany w ilości 0,03-0,06% do żeliwa powoduje rozdrobnienie i ujednorodnienie jego struktury tak w przypadku osnowy jak i wydzieleniu grafitu. Pozytywny wpływ boru na strukturę daje się zauważyć także przez poprawę stabilności oporów tarcia i zwiększenie odporności na zużycie [7].

Obok konwencjonalnych sposobów wytwarzania warstw powierzchniowych pojawiają się zupełnie nowe sposoby wytwarzania takich warstw wykorzystujące skoncentrowane wiązki fotonów (lasery), elektronów, jonów, a także plazmy. Technologie te charakteryzujące się energooszczędnością, pozwalają uzyskać warstwę powierzchniową o wysokich własnościach użytkowych oraz dają możliwość automatyzacji procesu spełniając jednocześnie wymagania ekologiczne [3].

Rozwijająca się technika laserowa sprawiła, że lasery są coraz powszechniej stosowanymi narzędziami w wielu dziedzinach techniki, także do obróbki materiałów [3-6, 9-11]. Ważniejsze zastosowania to: grawerowanie, drażnienie, cięcie, spawanie, kształtowanie oraz laserowa obróbka po-

wierzchniowa. Tego rodzaju obróbka powierzchniowa znalazła zastosowanie również dla elementów wykonywanych z żeliwa. W praktyce nie stosuje się obróbki laserowej całej powierzchni przedmiotu, a obróbce poddawane są jedynie obszary powierzchni roboczych elementów.

Stosunkowo niewiele badań prowadzi się nad modyfikacją warstwy powierzchniowej różnych gatunków żeliw stąd też niezbyt liczne publikacje na ten temat. Jednak w pracach tych wykazuje się pozytywne skutki oddziaływania lasera na różnego rodzaju materiały żeliwne [4-6, 11]. Obserwuje się kilkukrotny wzrost twardości, uzyskanie odporności na korozję czy w końcu poprawę odporności na zużycie ściernic warstwy powierzchniowej żeliwa. Szczególnie przyszłościowe wydaje się zastosowanie lasera do stopowania warstw powierzchniowych. W niniejszej pracy przedstawiono badania zmierzające do opanowania technologii borowania laserowego elementów wykonanych z żeliwa szarego.

2. Metodyka badań

W przeprowadzonych badaniach laserowemu borowaniu poddano próbkę z żeliwa EN-GJL-200 wykonaną w postaci wałka o różnych średnicach w części chwytowej i części poddanej obróbce laserowej. Skład chemiczny żeliwa poddanego badaniu przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Skład chemiczny żeliwa EN-GJL-200
Table 1. EN-GJL-200 cast iron chemical composition

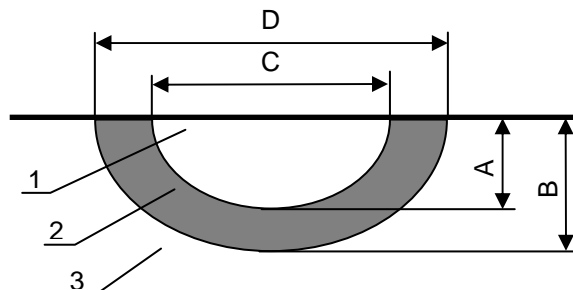
Skład chemiczny [%]									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	V	Mo	Ni
3,52	2,17	0,55	0,195	0,085	0,10	0,218	0,024	0,002	0,056

Próbkę w części poddanej obróbce laserowej przetoczono na tokarce uniwersalnej, a następnie powstałą powierzchnię odtłuszczono i pokryto powłoką zawierającą bor. Powłokę tę uzyskano nakładając pędzlem równomiernie dwie warstwy. Drugą warstwę nakładano dopiero po dokładnym wyschnięciu pierwszej. W taki sposób przygotowane próbki zamocowano częścią chwytową w uchwycie tokarki współpracującej z laserem molekularnym CO₂ TRUMPF TLF 2600t o maksymalnej mocy wiązki równej 2600 [W] i rozkładzie gęstości mocy TEM₀₁. Do badań wykorzystano laser znajdujący się w laboratorium Technik Laserowych Politechniki Poznańskiej.

Obróbkę laserową przeprowadzono wiązką o przekroju kołowym i średnicy $d = 2$ [mm], zmieniając moc oraz prędkość przesuwu wiązki względem przedmiotu obrabianego. Po przeprowadzonej obróbce laserowej próbkę przecięto i wykonano zgrądy metalograficzne prostopadle do kierunku przesuwu wiązki laserowej. Pomiarów twardości i wymiarów stref powstałych w wyniku obróbki laserowej wykonano przy pomocy mikrotwardościomierza Zwick 3212. Natomiast obserwacje mikroskopowe i zdjęcia struktury wykonano wykorzystując mikroskop metalograficzny typu Epiquant. Wykonano również badanie stężenia pierwiastków w głąb obszaru poddanego borowaniu laserowemu metodą spektroskopii elektronów Augera (AES).

3. Wyniki badań i ich analiza

Po przeprowadzonej obróbce laserowej ocenie poddano obszary materiału próbki powstałe w skutek oddziaływania wiązki lasera. Na podstawie obserwacji struktury i pomiarów mikrotwardości stwierdzono powstanie w materiale stref o zmodyfikowanej strukturze o kształcie schematycznie przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Schemat przekroju poprzecznego obszaru materiału poddanego oddziaływaniu wiązki lasera; 1 – strefa przetopiona; 2 – strefa zahartowana; 3 – rdzeń próbki; A – maksymalna głębokość strefy przetopionej; B – maksymalna głębokość stref o zmodyfikowanej strukturze; C – maksymalna szerokość strefy przetopionej; D – maksymalna szerokość stref o zmodyfikowanej strukturze

Fig. 1. Transverse section of area after laser beam influence scheme: 1 – melted zone; 2- hardened zone; 3 – core; A –melted zone maximum depth; B – modified zone maximum depth; C – melted zone maximum width; D – modified zones maximum width

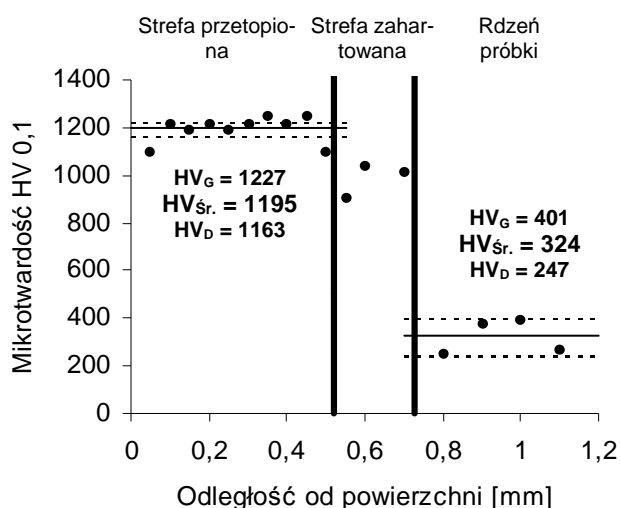
Obszar o zmodyfikowanej strukturze składa się ze strefy przetopionej i zahartowanej. Strefa przetopiona to obszar materiału znajdujący się przy samej powierzchni, lokalnie przetopiony o budowie dendrytycznej i krystalizujący w postaci żeliwa białego. W wyniku oddziaływania ciepła pochodzącego od obszaru przetopionego powstał obszar lokalnie zahartowany nazwany strefą zahartowaną. Wykonano pomiary szerokości i głębokości powstałych stref, które zestawione z parametrami obróbki laserowej zaprezentowano w tab. 2.

Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono, że dla stosowanych wariantów obróbki laserowej, maksymalna uzyskana głębokość strefy przetopionej wyniosła 0,6 [mm], a minimalna 0,12 [mm]. Maksymalna i minimalna szerokość wspomnianej strefy wyniosła odpowiednio 1,44 [mm] i 0,77 [mm]. Kolejno wykonano pomiary i obliczenia, które pozwoliły utworzyć rozkłady mikrotwardości w głąb stref powstałych w wyniku obróbki laserowej. Jeden z takich rozkładów zaprezentowano na rysunku 2. W efekcie analizy rozkładów mikrotwardości wykonanych dla wszystkich wariantów obróbki laserowej stwierdzono stałą i kilkukrotnie wyższą mikrotwardość strefy przetopionej w stosunku do mikrotwardości rdzenia. Maksymalna średnia mikrotwardość tej strefy w przeprowadzonych badaniach wyniosła 1232 [HV0,1], co daje około czterokrotny wzrost mikrotwardości w stosunku do rdzenia próbki. W przypadku strefy zahartowanej przesuwając się w kierunku rdzenia próbki stwierdzono tendencję do zmniejszania się mikrotwardości.

Tab. 2. Wymiary geometryczne stref powstałych w wyniku laserowego borowania żeliwa EN-GJL-200

Table 2. Geometrical dimensions of zones formed after EN-GJL-200 cast iron laser boronizing

Parametry obróbki laserowej		Wymiar [mm]			
Moc wiązki P [W]	Prędkość wiązki względem próbki v [mm/s]	A	B	C	D
1300	6	0,60	0,74	1,44	1,80
1040	6	0,52	0,73	1,27	1,69
520	6	0,22	0,39	1,16	1,40
260	6	0,12	0,29	0,77	1,13
1300	12	0,51	0,68	1,18	1,57
1040	12	0,40	0,56	1,22	1,60
520	12	0,16	0,34	1,00	1,30



Rys. 2. Rozkład mikrotwardości w głąb stref powstałych w wyniku borowania laserowego żeliwa EN-GJL-200, przy zastosowaniu mocy wiązki lasera P = 1040 [W], prędkości wiązki względem próbki v = 6 [mm/s] i jej średnicy d = 2 [mm]; granice przedziałów ufności (HV_G i HV_D) dla wartości średniej podano na poziomie istotności 0,1

Fig. 2. Microhardness distribution on the section of zones formed after EN-GJL-200 cast iron laser boronizing. Laser treatment conditions: Beam power P = 1040 [W], beam speed in relation to the sample v = 6 [mm/s] and laser beam diameter d = 2 [mm]. Confidence intervals borders (HV_G i HV_D) for average value on significance level 0,1

Przyczyną tak wysokiej mikrotwardości strefy przetopionej jest wprowadzony w obszar tej strefy pierwiastek bor. Potwierdzeniem tego faktu są prezentowane na rys. 3 wyniki badań stężenia pierwiastków wykonane metodą AES.

Wykorzystując mikroskop optyczny połączony z komputerem dokonano także obserwacji powstałych stref o zmodyfikowanej strukturze. Działania te miały na celu określenie rodzaju, jednorodności oraz spójności struktury powstałych stref. Obserwacje mikroskopowe strefy przetopionej wykazały powstanie struktury dendrytycznej. Materiał tej strefy ma charakterystyczną budowę drobnodendrytyczną, gdzie osie główne dendrytów skierowane są zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła. W strefach zahartowanych obszarów poddanych obróbce laserowej można podejrzewać powstanie struktury martenzytycznej, co potwierdzają pomiary mikrotwardości oraz widoczne miejscami igły martenzytu (rys. 4).

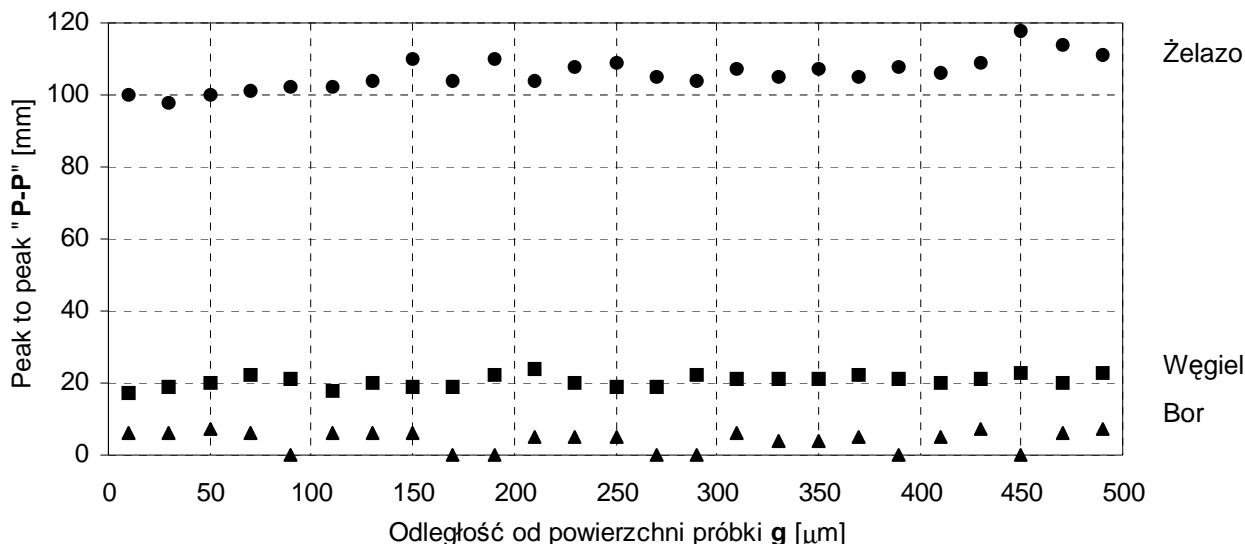
Przeprowadzone badania wykazały również pojawiające się wady w strukturze strefy przetopionej wywołane obróbką laserową. W większości przyjętych wariantów obróbkowych stwierdzono występowanie wyraźnych pęknięć i ciemnych kulistych obszarów określonych jako pęcherze (rys. 5.).

Pęknięcia we wszystkich badanych przypadkach miały swój początek na granicy strefy przetopionej oraz zahartowanej i kierowały się ku powierzchni próbki. Miejsce występowania pęcherzy to często granica stref o zmodyfikowanej strukturze lub dowolne miejsce powyżej tej granicy (rys. 5). Należy stwierdzić, że występowanie takich wad w strukturze strefy przetopionej może istotnie wpływać na własności i spójność strefy przetopionej ze strefą zahartowaną i dalej z materiałem rdzenia.

4. Podsumowanie

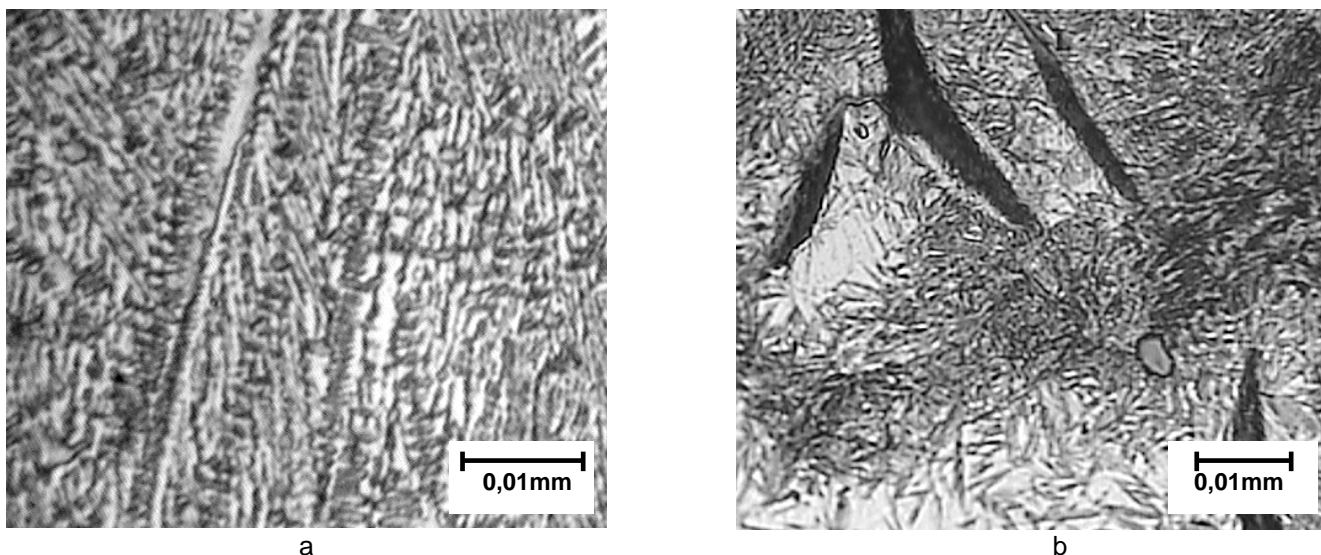
Trwałość oraz niezawodność maszyn i pojazdów w znacznym stopniu zależy od materiałów z jakich ich poszczególne elementy tworzące zespoły są wykonane. Należy jednak zaznaczyć, że własności użytkowe wielu elementów zależą nie tylko od możliwości przeniesienia obciążeń mechanicznych przez cały czynny przekrój elementu lub własności fizykochemicznych, lecz bardzo często, także lub głównie od struktury i własności warstw powierzchniowych. Klasyczne techniki obróbki cieplnej lub cieplnochemicznej warstwy powierzchniowej materiałów zaczynają być wspierane coraz częściej obróbką laserową. Zaprezentowane wyniki badań prowadzą do stwierdzenia, że istnieje możliwość modyfikacji warstwy powierzchniowej elementów z żeliwa

EN-GJL-200 poprzez borowanie laserowe. Badania wykazały również, że w ten sposób można uzyskać warstwę powierzchniową o różnej grubości charakteryzującą się około czterokrotnie wyższą mikrotwardością w stosunku do mikrotwardości rdzenia materiału. Wzrost ten spowodowany jest przez pierwiastek bor wprowadzony poprzez stopowanie laserowe. Tworzy on z żelazem bardzo twarde borki. Wyniki pomiarów twardości pozwalają przypuszczać powstanie w strefie przetopionej warstwy Fe_2B . Podwyższona mikrotwardość warstwy powierzchniowej żeliwa pozwala przewidywać zwiększoną odporność tej warstwy na różnego rodzaju zużycie. Po borowaniu laserowym pojawiają się jednak wady w strukturze obrabianego elementu (pęknięcia, pęcherze). Niezbędne są więc dalsze badania dla takiego opanowania tej technologii, aby uzyskiwać struktury pozbawione tych wad.



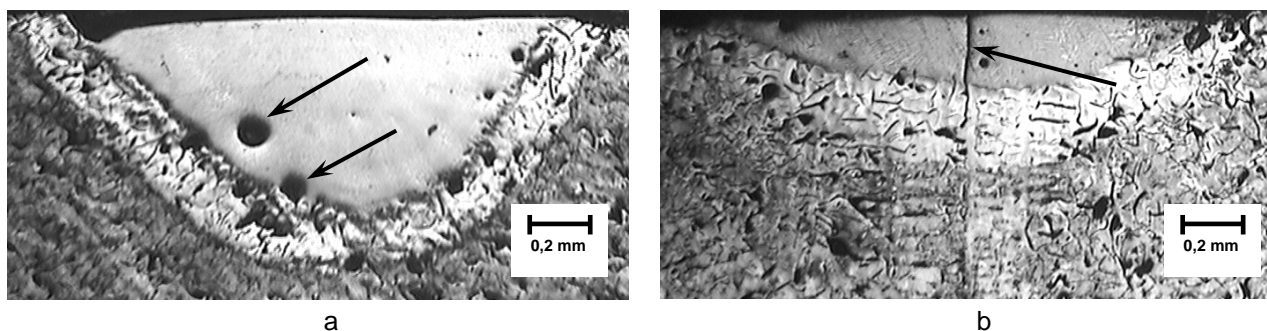
Rys. 3. Przykładowy rozkład stężenia boru i innych pierwiastków w głąb obszaru strefy przetopionej żeliwa EN-GJL-200 po borowaniu laserowym przy: prędkości wiązki względem próbki $v = 6$ [mm/s], mocy $P=1040$ [W] i średnicy wiązki lasera $d = 2$ [mm], wyznaczony metodą spektroskopii elektronów Augera (AES)

Fig. 3. Example of bor and other elements distribution on the section from surface of EN-GJL-200 cast iron after laser boronizing appointed with Auger electron spectroscopy (AES) method. Laser treatment conditions: Beam power $P = 1040$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 6$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 2$ [mm]



Rys. 4. Struktura metalograficzna żeliwa EN-GJL-200 poddanego borowaniu laserowemu przy mocy wiązki lasera $P = 1040$ [W], prędkości wiązki lasera względem próbki $v = 6$ [mm/s] i średnicy wiązki $d = 2$ [mm]: a – strefa przetopiona ; b – strefa zahartowana

Fig. 4. EN-GJL-200 cast iron microstructure after laser boronizing. Laser treatment conditions: Beam power $P = 1040$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 6$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 2$ [mm]: a – melted zone; b – hardened zone



Rys. 5. Wady w strukturze żeliwa EN-GJL-200 poddanego borowaniu laserowemu: a – pęcherze (moc wiązki lasera $P = 1300$ [W], prędkość wiązki lasera względem próbki $v = 12$ [mm/s] i średnica wiązki $d = 2$ [mm]), b – pęknięcia (moc wiązki lasera $P = 520$ [W], prędkość wiązki lasera względem próbki $v = 6$ [mm/s] i średnica wiązki $d = 2$ [mm])

Fig. 5. The structural defects of the EN-GJL-200 cast iron microstructure after laser boronizing treatment: a – blowholes (beam power $P = 1300$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 12$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 2$ [mm]), b – cracks (beam power $P = 520$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 6$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 2$ [mm])

Literatura

- [1] Bartkowiak K.: Analiza wpływu borowania laserowego na odporność na zużycie sworzni tłokowych (rozprawa doktorska). Politechnika Poznańska Poznań 2002.
- [2] Binczyk F.: Konstrukcyjne stopy odlewnicze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2003.
- [3] Burakowski T.: Inżynieria powierzchni wczoraj, dziś i jutro. Inżynieria powierzchni, nr 1-1996.
- [4] Kimpel A., Kobic J., Janicki D., Burdek M., Marczak Z.: Przetopienie laserowe warstwy wierzchniej walców z żeliwa sferoidalnego stopowego, Inżynieria materiałowa, nr 2-2003.
- [5] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej. Wydawnictwo Naukowe "Akapit" Kraków 2000.
- [6] Napadłek W., Przetakiewicz W., Raczkowski D., Bojar Z.: Utwardzanie laserowe żeliwa szarego niskostopowego. II Ogólnopolska Konferencja Naukowa nt: Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni. Łódź 1994.
- [7] Nosal S.: Wpływ obróbki cieplnej żeliwa stosowanego do produkcji pierścieni tłokowych na zużycie żeliwa Zl-Cu1,4PV i ZlCu1,4VB. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Maszyny Robocze i Pojazdy, 1991, nr 36.
- [8] Pachowski M.: Obróbka cieplna odlewów żeliwnych. "Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła", nr 53-54, wrzesień-grudzień 1981.
- [9] Pertek A., Kulka M., Jankowiak M., Józwiak K., Nowak I.: Wpływ obróbki laserowej po borowaniu i nawęglaniu na strukturę i własności stali konstrukcyjnych. Inżynieria powierzchni nr 2-2002.
- [10] Przybyłowicz K.: Teoria i praktyka borowania stali. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej Kielce 2001.
- [11] Riahi M.: Surface treatment of cast iron by adding different alloying elements to form a metallic glass structure layer using an industrial carbon dioxide laser. Journal of Materials Processing Technology 58 (1996).
- [12] Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2003.