

# Borowanie laserowe i możliwości jego zastosowania

## Laser boronizing and its potential application

### Streszczenie

W artykule przedstawiono przykłady elementów maszyn, których części narażone są na szczególnie trudne warunki eksploatacyjne. W przypadku tych części występuje potrzeba stosowania lokalnej obróbki powierzchniowej w celu nadania im odpowiednich właściwości. Przedstawiony został zarys i możliwości obróbki laserowej, w tym borowania laserowego. Na podstawie badań własnych określono wpływ tej obróbki na strukturę warstwy powierzchniowej elementów z żeliwa sferoidalnego. Wykazano, że obróbka laserowa umożliwia wprowadzanie boru w warstwy powierzchniowe obrabianego elementu, możliwe jest uzyskanie drobnoziarnistej, jednorodnej struktury z borami żelaza, a mikrotwardość warstwy powierzchniowej elementu z badanego materiału po takiej obróbce wzrasta ok. 5-krotnie.

### Abstract

The paper contains examples of machine components which parts are exposed to intensive exploitation conditions. Thus, local surface layer modification of those parts is required in order to achieve appropriate properties. Laser treatment including laser boronizing possibilities are presented. Influence of laser boronizing on surface layer structure of nodular iron components has been determined on the basis of presented investigations. It has been proved laser treatment makes possible boron implementing in surface layers of the treating material and such a method allows obtaining a fine-crystalline, homogenous structure with iron borides. Microhardness of surface layer of investigated sample after such treatment increases approximately five times.

### Wstęp

Niektóre części elementów maszyn poddawane są oddziaływaniu różnych niesprzyjających czynników skracających ich trwałość.

W przypadku elementów przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego (zwłaszcza w specjalnie wyłożonych silnikach spalinowych [1]) na różnego rodzaju intensywne zużycia, np. adhezyjne lub na utlenianie, narażone są powierzchnie robocze głównie [2÷8]:

- wałów korbowych (szczególnie czopy, których warstwy powierzchniowe współpracują z łożyskami);
- wałków rozrządu (czopy, koła napędu, a szczególnie krzywki zazwyczaj stanowiące całość z wałem rozrządu oraz współpracujące z krzywkami denka popychacza) [9, 10];
- wałów wykorbionych;
- tulejek;
- tulei cylindrowych (gładzie tulei) [11];
- pierścieni tłokowych;
- tłoków (zwłaszcza rowki na pierścieniu);
- kadłubów silników (np. gniazda zaworów w głowicach);
- kół zębatych;
- części hydraulicznych maszyn i in.

Części elementów silników Diesla w statkach, turbiny, pompy, czy też śruby statków dodatkowo narażone są np. na erozję kawitacyjną [7]. Intensywnemu zużyciu poddawa-

ne są również narzędzia do obróbki plastycznej: walce do walcowania blach czy matryce do tłoczenia karoserii [12]. We wszystkich wymienionych przypadkach elementów maszyn wymagana jest wysoka twardość i odporność na zużycie warstw powierzchniowych, a czasami nawet zwiększona odporność na zmęczenie, odporność na korozję, żaroodporność i żarowytrzymałość.

Właściwości te mogą zostać osiągnięte za pomocą odpowiedniej obróbki cieplno-chemicznej. Jedną z metod umożliwiających modyfikację struktury warstwy powierzchniowej elementów maszyn jest obróbka laserowa. Technologie laserowe oparte są na bardzo szybkich przemianach zachodzących w obrabianym materiale. Efekty wywołane w naświetlanym wiązką laserową materiale zależą przede wszystkim od wytworzonej na jego powierzchni temperatury, która z kolei zależy głównie od ilości energii dostarczanej do materiału podczas naświetlania [13]. Energia ta jest proporcjonalna do gęstości mocy wiązki laserowej oraz czasu jej działania. W konsekwencji, sterując tymi dwoma parametrami, można wywołać różne temperatury w warstwach powierzchniowych naświetlanego materiału [3]. W zależności od tych parametrów możliwe jest np.:

- spawanie,
- przecinanie, wycinanie,
- znakowanie,
- obróbka cieplna.

Lasery stosuje się do różnych operacji obróbki cieplnej, takich jak: hartowanie bezprzetopieniowe, szkliwienie, stopowanie, platerowanie, czy też utwardzanie detonacyjne (udarowe) [3]. Obróbki te stosowane są przede wszystkim dla stali (zarówno węglowych, jak i stopowych). Niemniej jednak

znalazły zastosowanie również dla żeliw oraz innych metali i ich stopów, np.: miedzi, aluminium, tytanu [3]. W skład laserowych obróbek cieplnych wchodzi technologie bezprzetopieniowe, przetopieniowe i odparowaniowe [3].

Podczas gdy hartowanie przetopieniowe przez wytworzenie drobnoziarnistej oraz bardziej jednorodnej chemicznie i strukturalnie od materiału obrabianego strefy przetopionej pozwala na zwiększenie twardości i odporności na zużycie, to stopowanie laserowe, w zależności od zastosowanego pierwiastka lub pierwiastków, pozwala dodatkowo na zwiększenie odporności na korozję i żaroodporności [3]. Stop, jaki powstaje w strefie przetopionej w wyniku jednoczesnego przetopienia substancji stopującej i cienkiej warstewki materiału podłoża, po wymieszaniu stopionych materiałów i szybkim skrzepnięciu charakteryzuje się innym składem chemicznym, strukturą i właściwościami niż materiał podłoża i materiał stopujący [13]. Stopowanie laserowe warstw powierzchniowych ma wiele zalet, w porównaniu ze stosowanymi tradycyjnie obróbkami cieplno-chemicznymi. Szybkie schłodzenie stopu oprócz tego, że umożliwia wytworzenie struktury drobnokrystalicznej, pozwala uzyskać również silnie przesycone roztwory i fazy metastabilne, a nawet struktury amorficzne. Umocnienie warstwy przetopionej wynika więc z: rozpuszczenia obcych atomów, zachodzących przemian fazowych i rozdrobnienia ziarn [15-18]. Za pomocą laserowego wzbogacania można uzyskiwać warstwy powierzchniowe o strukturze i właściwościach odpowiadających stopom nierdzewiejącym lub wysokostopowym [1].

Jednym z pierwiastków, które można wykorzystać w procesie stopowania laserowego, jest bor. Pierwiastek ten, tworzący z żelazem stabilne i twarde fazy, stosowany jest przede wszystkim w obróbce dyfuzyjnej stali i żeliw. Warstwy uzyskane metodą borowania dyfuzyjnego charakteryzują się utrzymującą się do 800°C dużą twardością i żaroodpornością w powietrzu. Warstwy te, pod warunkiem zachowania ich ciągłości, wykazują również odporność na utlenianie w kwasach nieorganicznych, wodnych roztworach kwasów: solnego, siarkowego, fosforowego, fluorowodorowego oraz we wrzących kwasach organicznych i nieorganicznych, a także odporność na działanie wody wodociągowej i morskiej. Ponadto, charakteryzują się one odpornością na stopione metale i stopy o temperaturze 900-1000°C [19].

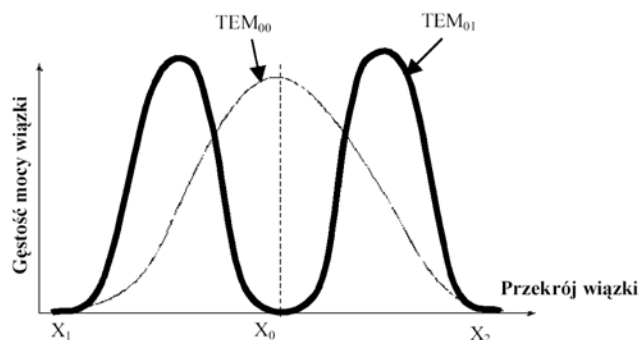
Jednakże wadą dyfuzyjnego wprowadzania boru jest stekstrowana, iglasta budowa warstw powierzchniowych. Dodatkowo warstwy te są zazwyczaj dwufazowe, tzn. zawierają kruchy borek FeB przy powierzchni. Stanowi to przyczynę ograniczonego stosowania tej metody.

Proces dyfuzyjnego borowania jest realizowany w temperaturze powyżej 900°C, a więc po jego zakończeniu (w celu uzyskania odpowiednich właściwości obrobionego elementu) konieczna jest obróbka cieplna [19]. Poza tym, jest to proces długotrwały, a ze względu na stosowane media będące źródłami boru (proszki, pasty) jest niestety mało ekologiczny [19]. Dodatkowo, stosowanie obróbki dyfuzyjnej w przypadkach, gdzie warstwy modyfikowane nie są potrzebne na całych elementach maszyn, wymaga zabezpieczenia ich części, co powoduje, że zabieg taki generuje dodatkowe koszty. Dotyczy to wałków krzywkowych. Resztę powierzchni poza krzywkami i czopami chroni się przed nasycaaniem [11].

Celem prezentowanych badań było określenie wpływu stopowania borem za pomocą oddziaływania wiązki laserowej na strukturę warstwy powierzchniowej jednego z dość dostępnych i stosunkowo tanich materiałów, jakim jest żeliwo, które w budowie maszyn należy do najpowszechniej stosowanych materiałów odlewniczych [20].

## Metodyka badań

Do badań wybrano żeliwo sferoidalne, ponieważ łączy ono dobre własności odlewnicze zwykłego żeliwa szarego i dobre właściwości wytrzymałościowe [21]. Próbki do badań wykonano ze sferoidalnego żeliwa ferrytyczno-perlitycznego EN-GJS 500. Wytop przeznaczony do badań miał następujący skład chemiczny (w %): 3,82 C, 2,53 Si, (CE = 4,587), 0,33 Mn, 0,02 Cr, 0,06 Mg, 0,042 P, 0,013 S i 0,257 Cu, resztę stanowiło Fe. W badaniach wykorzystano laser molekularny CO<sub>2</sub> o pracy ciągłej (firmy Trumpf), maksymalnej mocy 2600 W i modzie TEM<sub>01</sub> (rozkład gęstości mocy w przekroju wiązki emitowanej przez ten laser jest symetryczny wokół osi wiązki o maksimum gęstości oddalonym od osi o ok. 1/4 średnicy wiązki, znajdujący się w laboratorium Technik Laserowych na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej (rys. 1).



**Rys. 1.** Rozkłady gęstości mocy w przekroju wiązki laserowej;  $X_0$  – środek wiązki,  $X_{1,2}$  – krawędzie wiązki [24]

**Fig. 1.** Distribution of power density across the laser beam cross-section;  $X_0$  – beam centre;  $X_{1,2}$  – beam edges [24]

Parametry obróbki laserowej: moc wiązki  $P$ , czas oddziaływania wiązki na materiał  $t$ , średnica wiązki  $d$ , prędkość posuwu wiązki względem próbki  $v$  zostały ustalone w taki sposób, aby uzyskać różne szybkości chłodzenia warstwy powierzchniowej obrabianego elementu w trakcie tej obróbki

**Tablica I.** Parametry obróbki laserowej

**Table I.** Laser treatment parameters

$v$ , mm·s <sup>-1</sup>	$t$ , s	$P$ , W	$E_j$ , J·mm <sup>-2</sup>	$g$ , W·mm <sup>-2</sup>
16,00	0,25	2010	40	160
8,00	0,50	1005	40	80
5,33	0,75	670	40	53
4,00	1,00	502	40	40
3,27	1,25	411	40	33
16,00	0,25	1507	30	120
8,00	0,50	754	30	60
5,33	0,75	502	30	40
4,00	1,00	377	30	30
3,27	1,25	308	30	25
16,00	0,25	1005	20	80
8,00	0,50	502	20	40
5,33	0,75	335	20	27
4,00	1,00	251	20	20
3,27	1,25	205	20	16

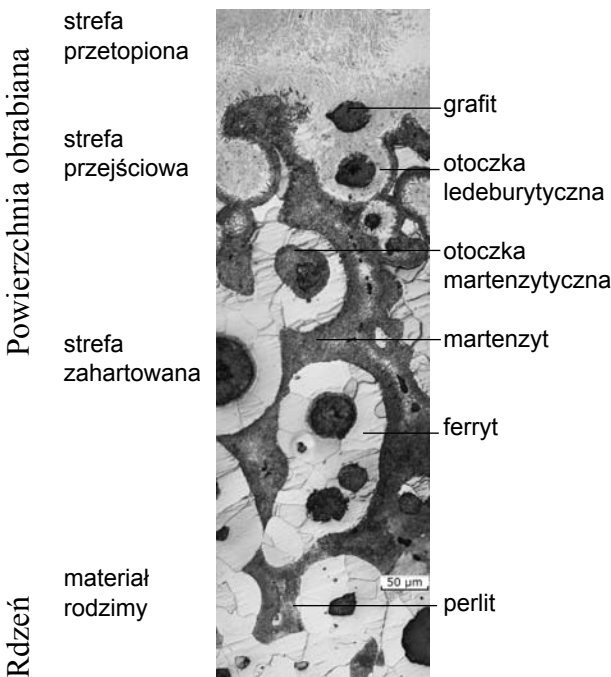
gdzie:  $v$  – prędkość posuwu wiązki laserowej,  $t$  – jednostkowy czas oddziaływania,  $P$  – moc wiązki laserowej,  $E_j$  – energia jednostkowej wiązki laserowej,  $g$  – gęstość mocy wiązki laserowej.

(tabl. 1). Wartość średnicy wiązki laserowej była stała i wynosiła 4 mm. Zastosowano między innymi 7-krotną różnicę prędkości posuwu od 3,27 do 16,00 mm·s<sup>-1</sup>. Dzięki dobranym kombinacjom parametrów uzyskano obliczeniową szybkość chłodzenia od ok. 7·10<sup>2</sup>°C·s<sup>-1</sup> do blisko 104°·C·s<sup>-1</sup>. Wartości te oszacowano na podstawie zależności zamieszczonych w literaturze [22], uwzględniających między innymi parametry obróbki i właściwości fizyczne obrabianego materiału. Sposoby wyznaczania rozkładu temperatury i szybkości chłodzenia od powierzchni w głąb próbki oraz szacowania średnich szybkości chłodzenia w uzyskanej strefie zostały przedstawione szczegółowo w opracowaniu [23].

Przed borowaniem laserowym na próbki nałożono substancję zawierającą pierwiastek stopujący.

Efekty obróbki laserowej badano za pomocą mikroskopu optycznego Epiquant firmy ZEISS sprzężonego z kamerą CCD i odpowiednio oprogramowanym komputerem. Próbkę poddano badaniom mikrotwardości przy użyciu mikrotwardościomierza 3212 firmy ZWICK metodą Vickersa. Określenie rozkładów stężenia pierwiastków w warstwie powierzchniowej zostało przeprowadzone za pomocą spektroskopu elektronów Auger (AES) firmy RIBER. Powyższe badania wykonano w Laboratorium Warstwy Wierzchniej Instytutu Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Do badań struktury zastosowano również mikroskop skaningowy Cambridge Stereoscan i dyfraktometri rentgenowskie: Bruker D8 Advances i HZG4 znajdujące się w Pracowni Krystalografii i Rentgenografii Katedry Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

## Wyniki i analiza badań



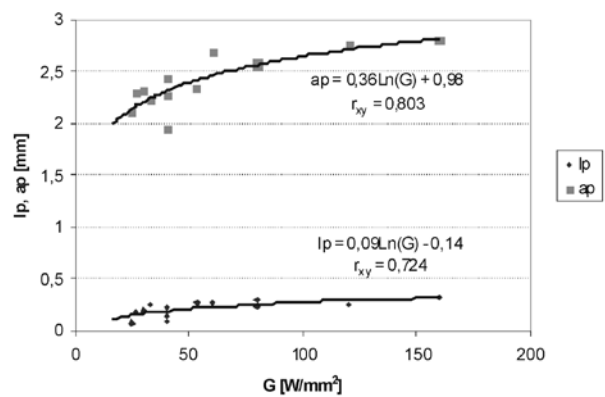
**Rys. 2.** Przekrój poprzeczny przez strefy żeliwa sferoidalnego uzyskany po borowaniu laserowym z parametrami obróbki:  $P = 2010$  W,  $t = 0,25$  s; mikroskop optyczny, trawione nitałem

**Fig. 2.** Cross-section of nodular iron surface layer zones after laser boronizing, with following treatment parameters:  $P = 2010$  W,  $t = 0.25$  s; optical microscope, etched with nitride acid

Struktura warstwy powierzchniowej po borowaniu laserowym żeliwa sferoidalnego składała się z trzech stref: przetopionej, przejściowej i zahartowanej ze stanu stałego (rys. 2). Strefę przetopioną uzyskano w 13 zastosowanych wariantach kombinacji parametrów. Strefa przetopiona we wszystkich przypadkach charakteryzowała się wysokim stopniem rozdrobnienia i ujednorodnienia struktury (w szczególności w porównaniu z dwoma pozostałymi strefami i materiałem rodzimym). W strefie zaobserwowano nierozpuszczone do końca kulki grafitu. Natomiast w strefie przejściowej wyróżnić można było elementy przetopione (ledeburyt zahartowany) i nieprzetopione (martenzyt, ferryt, grafit). W strefie przejściowej i zahartowanej występowały ponadto otoczki ledeburytyczne i martenzytyczne wokół kulek grafitu, charakterystyczne dla żeliwa sferoidalnego. Ich występowanie może przyczynić się do wzmocnienia fazy grafitu w tych strefach.

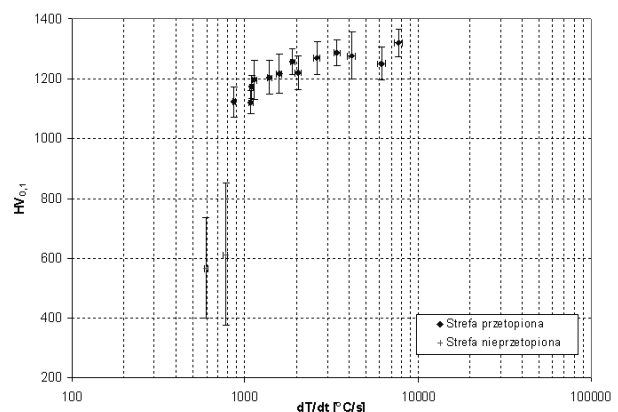
W zależności od zastosowanych parametrów można uzyskać różne głębokości i szerokości strefy przetopionej (rys. 3). Na podstawie pomiarów mikrotwardości stref przetopionych można stwierdzić średnio 5-krotny wzrost mikrotwardości w stosunku do materiału obrabianego. Ponadto można spodziewać się wyższej mikrotwardości, gdy zastosuje się większą szybkość chłodzenia podczas obróbki laserowej (rys. 4).

W strefach przetopionych stwierdzono obecność boru metodą AES. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe rozkłady pierwiastków w strefie przetopionej od powierzchni dla wariantów, w których uzyskano szybkości chłodzenia: 1000°·C·s<sup>-1</sup> (a) i 8000°·C·s<sup>-1</sup>.



**Rys. 3.** Wpływ gęstości mocy wiązki laserowej na wymiary strefy borowanej ( $l_p$  – grubość strefy przetopionej,  $a_p$  – szerokość strefy przetopionej)

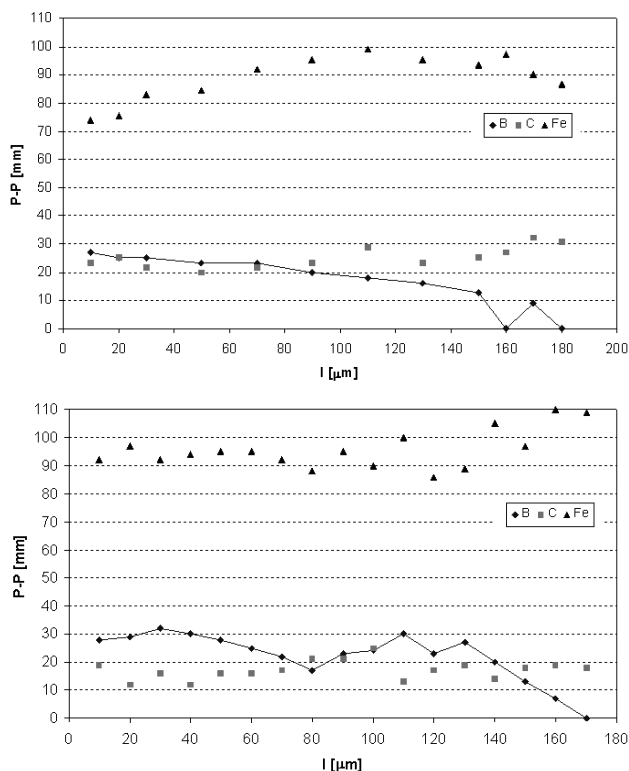
**Fig. 3.** Influence of laser beam power density on boronized zone dimensions ( $l_p$  – melted zone thickness,  $a_p$  – melted zone width)



**Rys. 4.** Zależność mikrotwardości strefy powierzchniowej od obliczeniowej szybkości chłodzenia dla próbek pokrytych borem

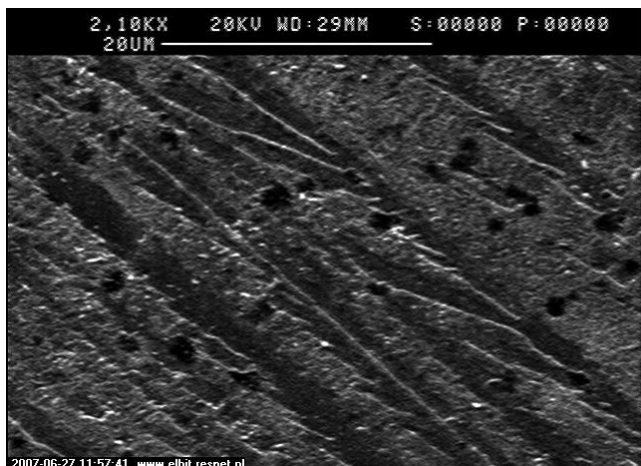
**Fig. 4.** Between surface zone microhardness and calculated cooling rate for boronized samples

Analiza struktury strefy przetopionej wykazała, że dla próbek, w których zastosowano dłuższy czas oddziaływania i niższą moc wiązki laserowej, można było zaobserwować dużą różnorodność w kształtach wydzielen (rys. 6, 7). W przypadku dłuższego czasu nagrzewania uwidoczniły się stosunkowo duże fazy borków żelaza. Dłuższy czas nagrzewania umożliwił ich wzrost. Tak duże wydzielenia nie były obserwowane przy krótkich czasach nagrzewania. W przypadku strefy borowanej laserowo, chłodzonej z szybkością ok.  $8000^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ , można zaobserwować m.in. superdrobnokrystaliczną strukturę, której nie odnaleziono po chłodzeniu z prędkością np.



**Rys. 5.** Rozkład C, B i Fe w strefie przetopionej w żeliwie sferoidalnym w wartościach *peak to peak* [mm] dla wariantów obrabianych laserowo z parametrami: a –  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1,25\text{ s}$ ; b –  $P = 2010\text{ W}$ ,  $t = 0,25\text{ s}$

**Fig. 5.** Distribution of C, B, and Fe in melted zone of nodular iron in peak-to-peak values [mm] in laser-treated samples with following parameters: a –  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1.25\text{ s}$ ; b –  $P = 2010\text{ W}$ ,  $t = 0.25\text{ s}$



**Rys. 6.** Struktura strefy przetopionej żeliwa sferoidalnego uzyskana po borowaniu laserowym z parametrami obróbki:  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1,25\text{ s}$ ; mikroskop skaningowy, trawione nitałem

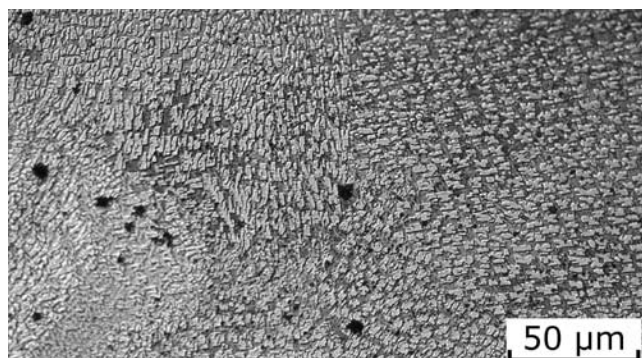
**Fig. 6.** Part of melted zone structure of nodular iron after laser boronizing with parameters:  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1.25\text{ s}$ ; scanning microscope, etched with nitride acid

ok.  $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  (rys. 8). Natomiast, bez względu na zastosowaną szybkość chłodzenia w trakcie borowania laserowego, widoczne, były widoczne wydzielenia w kształcie igieł.

Za pomocą dyfrakcji RTG wykazano we wszystkich badanych przypadkach obecność  $\text{Fe}_3(\text{C lub/i B})$  i  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Fazy te mogły przybrać kształt odpowiednio: igieł (pierwotne kryształy cementytu lub borocementytu wydzielone prosto z cieczy), oraz wielokątów lub drobnych regularnych wydzielen borków żelaza wchodzących najprawdopodobniej w skład eutektyki borkowej (rys. 6÷8). Pomimo że dyfrakcja RTG wykazała istnienie takich samych faz bez względu na zastosowane parametry obróbki laserowej, to w przypadku zastosowanych wyższych mocy i krótszych czasów oddziaływania wiązki laserowej na materiał wykonane dyfraktogramy wskazywały na większe ilości nowo powstałych faz, np.:  $\text{Fe}_3(\text{C lub/i B})$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_y$  w strefie przetopionej.

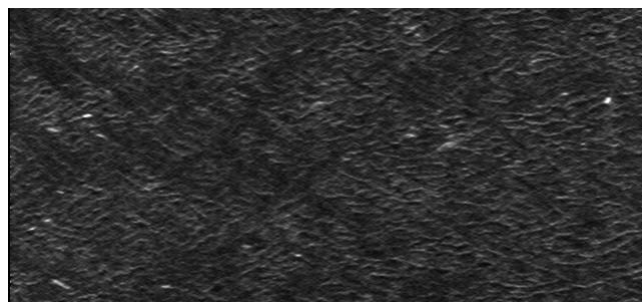
Większa ilość nowo powstałych, twardych faz, występująca miejscami superdrobnokrystaliczna struktura oraz prawdopodobnie większe przesycenie roztworów stałych w strefie przetopionej w przypadku próbek, dla których zastosowano parametry pozwalające uzyskać wyższe szybkości chłodzenia, mogły spowodować wyższą średnią mikrotwardość strefy przetopionej o ok. 200 HV<sub>0,1</sub> (rys. 4).

Czas trwania nagrzewania laserowego wpłynął również na ilość rozpuszczonych kulek grafitu w strefie przetopionej. W przypadku stref przetapianych, do których wytworzenia zastosowano dłuższe czasy obróbki, można było obserwować mniejszą ilość kulek grafitu. Dłuższy czas obróbki laserowej w tych przypadkach pozwolił na dyfuzję węgla z kulek do ciekłego stopu. Na większą zawartość węgla w osnowie strefy przetopionej w przypadku dłuższego czasu obróbki wskazują badania AES (rys. 5).



**Rys. 7.** Fragment struktury strefy przetopionej żeliwa sferoidalnego uzyskanej po borowaniu laserowym z parametrami obróbki:  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1,25\text{ s}$ ; mikroskop optyczny, trawione nitałem

**Fig. 7.** Part of melted zone structure of nodular iron after laser boronizing with parameters:  $P = 411\text{ W}$ ,  $t = 1.25\text{ s}$ ; optical microscope, etched with nitride acid



**Rys. 8.** Fragment struktury strefy przetopionej żeliwa sferoidalnego uzyskanej po borowaniu laserowym z parametrami obróbki:  $P = 2010\text{ W}$ ,  $t = 0,25\text{ s}$ ; mikroskop skaningowy, trawione nitałem

**Fig. 8.** Part of melted zone structure of nodular iron after laser boronizing with parameters:  $P = 2010\text{ W}$ ,  $t = 0.25\text{ s}$ ; scanning microscope, etched with nitride acid

## Podsumowanie

Obróbka laserowa umożliwia kształtowanie tylko wybranych części elementów maszyn narażonych na wyjątkowo trudne warunki pracy. Jest ona szczególnie przydatna wtedy, kiedy lokalna obróbka powierzchniowa jest nie tylko wystarczająca, ale i wymagana. Warto jest również dodać, iż za pomocą skoncentrowanej wiązki laserowej można intensywnie nagrzewać powierzchnie o dowolnie skomplikowanym kształcie; możliwe jest precyzyjne sterowanie dawką energii, zachowanie pierwotnych wymiarów elementów obrabianych, łatwa jest również automatyzacja procesu [25].

Poza możliwością tworzenia struktur nadających określone własności warstwom powierzchniowym elementów, należy również wspomnieć o eliminacji w przypadku obróbki laserowej pewnych negatywnych aspektów, które związane są z konwencjonalną obróbką cieplno-chemiczną, np. czasochłonnością (kilkanaście godzin) i nieekologicznością (media aktywne).

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy ich wyników można stwierdzić, że obróbka laserowa umożliwia wprowadzanie boru w warstwy powierzchniowe obrabianego elementu. Dzięki takiej modyfikacji możliwe jest uzyskanie drobnoziarnistej struktury o wysokim stopniu jej ujednorodnienia, zawierającej borki żelaza. Po takiej obróbce nie występuje iglasta budowa warstwy charakterystyczna dla borowania dyfuzyjnego. Ponadto, przeprowadzone badania RTG nie wykazały występowania kruchej borki FeB. Obecność strefy przejściowej powinna zapewnić dobre połączenie strefy naborowanej z materiałem rodzimym. Dzięki borowaniu laserowemu mikrotwardość obrabianego elementu z żeliwa sferoidalnego można podwyższyć średnio ok. 5-krotnie. W związku z tym warstwy wytworzone w ten sposób powinny charakteryzować się zwiększoną odpornością na zużycie.

## Literatura

- [1] Major B.: Laserowa modyfikacja stali węglkami i borkami, VII Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin-Świnoujście, 1996.
- [2] Bartkowiak K., Waligóra W.: Możliwości wykorzystania obróbki laserowej w budowie maszyn, Journal of Research and Application in Agricultural Engineering, Vol. 46/3, s. 27.
- [3] Burakowski, T.; Wierchoń, T.: Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa 1995.
- [4] Gadag S.P., Srinivasan M.N.: Cavitation erosion of laser-melted ductile iron, Journal of Materials Processing Technology 51 (1995).
- [5] Hebda M., Janecki J.: Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn, WNT, Warszawa 1972.
- [6] Hwang J.-H., Lee Y.-S., Kim D.-Y., Youn J.-G.: Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 11, no 3, June, 2002.
- [7] Li Z., Zheng Q., Li J., Hu W., Wang H., Tian H.: Laser surface treatment of high-phosphorous cast iron, Journal of Applied Physics 58 (10), 15 November 1985.
- [8] Sakwa W.: Żeliwo, Wydawnictwo „Śląsk”, 1974.
- [9] Podgórecki K.: Hartowanie płomieniowe stali i żeliwa, PWT, Warszawa 1955.
- [10] Sert, H., Can, A., Arican, H., Selcuk, B., Toprak, H., Wear behaviour of different cam spindles, Wear 260, (2006).
- [11] Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe, WNT, Warszawa 2007.
- [12] Piaskowski, J.; Jankowski, A.: Żeliwo sferoidalne WNT, Warszawa 1974.
- [13] Waligóra. W.: Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej. Rozprawy, nr 302, Politechnika Poznańska, Poznań 1994.
- [14] Burakowski T.: Lasery technologiczne i ich zastosowanie w inżynierii powierzchni metali, PM, Zeszyt 11-12/93.
- [15] Brienan E.M., Snow D.B., Brown C.O., Kear B.H.: New developments in lasers surface melting using continuous prealloyed powder feed. Rapid Solidification Processing 2, 1980.
- [16] Komvopoulos K., Nagarathman K.: Processing and characterization of laser-cladded coating materials. Journal of Engineering Materials and Technology. 112, 4, 1990.
- [17] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej. Wyd. Naukowe Akapit, Kraków 2000.
- [18] Kusiński J.: Metalurgiczne podstawy kształtowania struktury i własności warstwy wierzchniej materiałów podczas obróbki laserowej, V Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin – Świnoujście 1996.
- [19] Pertek-Owsiana A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymywanych w procesie borowania gazowego, WPP 2001, Rozprawy nr 365.
- [20] Labrecque C., Gagne, M.: Review Ductile Iron: Fifty years of continuous development, Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 37, no. 5, 1998.
- [21] Dobrzański L. A.: Metaloznawstwo z wprowadzeniem do nauki o materiałach, WNT, Warszawa 1998.
- [22] Kusiński J.: Zmiany struktury i własności mechanicznych stali pod wpływem obróbki laserowej, Metalurgia i odlewnictwo, Zeszyty naukowe 132, Kraków 1989.
- [23] Paczkowska M., Waligóra W.: The influence of the cooling rate on structure of laser boronizing layer on nodular iron, The International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale Arizona, USA October 30th – November 02nd (2006).
- [24] Program Badawczy (DPB) realizowany w Politechnice Poznańskiej, etap II–1998, nr tematu DPB-22-047/98-BW: Wykorzystanie techniki laserowej w technologii i eksploatacji elementów maszyn oraz w fizyce półprzewodników. Kierownik programu: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kawalec, Biblioteka Inst. Maszyn Rob. i Pojazdów Samochodowych, Poznań 1998.
- [25] Napadałek W., Przetakiewicz W.: Wpływ obróbki laserowej na właściwości wybranych elementów silnika spalinowego, Inżynieria Materiałowa, nr 5, 2002.

Praca finansowana z grantu nr N504 006 31/0304 realizowanego w latach 2006 i 2007.