

Grzegorz KINAL\*

## BADANIE WŁAŚCIWOŚCI ŻELIWA SFEROIDALNEGO STOPOWANEGO LASEROWO

### INVESTIGATION OF DUCTILE IRON ALLOYED LASER

#### Słowa klucze:

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

#### Key words:

laser boriding, microhardness, wear resistance, roughness

#### Streszczenie

Zwrócono uwagę na możliwości wykorzystania stopowania laserowego borem w odniesieniu do elementów wykonanych z żeliwa. Zaprezentowano wyniki badań pozwalające na wytworzenie ciągłej warstwy na powierzchni zewnętrznej tulei z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-600 przez borowanie laserowe. Obróbkę laserową przeprowadzono, wykorzystując laser molekularny CO<sub>2</sub> typu TLF 2600t firmy Trumpf o modzie TEM<sub>01</sub>. Przedstawiono również wyniki badań tarciovych, w których porównano wartości zużycia czopów borowanych laserowo oraz bez obróbki powierzchniowej współpracujących z dwiema półpanewkami. Zaobserwowano wzrost odporności na zużycie przez tarcie dla próbek z wytworzoną ciągłą warstwą borowaną laserowo w stosunku do próbek odniesienia.

---

\* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Polska, tel. 61 647 5946, e-mail: grzegorz.kinal@put.poznan.pl.

## WPROWADZENIE

Pojęcia energooszczędność, materiałoszczędność czy ekologiczność na obecnym etapie rozwoju cywilizacji nabierają coraz ważniejszego znaczenia. Ustawodawcy różnych krajów narzucają pewne normy zmuszające do poszukiwania zupełnie nowych rozwiązań w technice, które pozwolą spełnić nowe wymogi funkcjonowania obiektów technicznych. Przykładowo mniejsze straty energii uzyskiwane są przez zmniejszenie oporów tarcia w wyniku zmniejszenia masy poruszających się części maszyn oraz na skutek poprawy właściwości tribologicznych powierzchni trących (by pokonać opory tarcia, zużywa się przeciętnie 30÷50% doprowadzanej energii, a w przemyśle włókienniczym nawet ponad 80%) [L. 1, 8].

Silniki budowane na potrzeby rynku samochodowego posiadają wykonywane z żeliwa sferoidalnego pierścienie tłokowe, koła zębate mechanizmu rozrządu, wały rozrządu, korbowody czy wały korbowe. W zasadzie nie stosuje się tłoków żeliwnych ze względu na ich duży ciężar (znane zastosowanie to przykładowo silnik z zapłonem samoczynnym samochodu Robur). Odlewane wały korbowe ze względu na dobre własności wytrzymałościowe, dużą odporność na zmęczenie i dobre tłumienie drgań skrętnych można spotkać w silnikach takich pojazdów jak: BMW 318, VW Golf 1,4, Peugeot 405 1,9/R4 [L. 2, 7, 9].

Szeroko pojęte osiągnięcia inżynierii powierzchni dają możliwość zwiększenia trwałości, niezawodności elementów, zespołów, a w konsekwencji całych coraz bardziej dziś skomplikowanych obiektów technicznych.

Czopy różnych wałów (np. wału korbowego czy rozrządu) są najczęściej poddawane konwencjonalnemu azotowaniu, nawęglaniu, węgloazotowaniu czy hartowaniu powierzchniowemu.

Bardzo pozytywne efekty w postaci kilkukrotnego wzrostu twardości i wzrostu odporności na zużycie przez tarcie wykazują elementy stalowe [L. 5, 6], a także żeliwne [L. 3] poddane procesowi borowania. Warstwy borowane charakteryzuje się oprócz wysokiej twardości dużą odpornością na procesy zużywania ściernego, korozyjnego, przez fretting, erozję i na zacieranie [L. 6].

Wydaje się, że coraz częściej stosowaną technologią stwarzającą cały czas nowe możliwości ukonstytuowania warstwy powierzchniowej elementów z różnych materiałów jest powierzchniowa obróbka laserowa [L. 4]. Korzyści z jej zastosowania w połączeniu z pozytywnym wpływem boru wprowadzonego w warstwę powierzchniową mogą rozszerzać możliwości stosowania różnych rodzajów elementów żeliwnych.

Celem badań była ocena możliwości wytworzenia jednorodnej warstwy powierzchniowej na zewnętrznej powierzchni walcowej elementu z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-600.

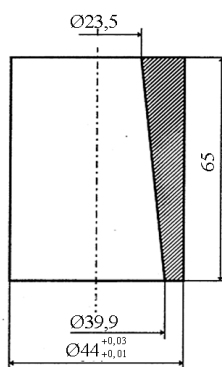
## METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem elementów wykonanych z żeliwa EN-GJS-600. Skład chemiczny żeliwa, z którego wykonano próbki do badań przedstawiono w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Skład chemiczny żeliwa EN-GJS-600**

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

Skład chemiczny [%]						
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr
3,50	0,40	2,72	0,053	0,008	0,44	0,02



**Rys. 1. Kształt i wymiary próbek biorących udział w badaniach**

Fig. 1. The shape and dimensions of samples involved in the study

W celu wytworzenia próbek (**Rys. 1**) materiał w postaci odlanego wałka poddano obróbce skrawaniem. Po obróbce toczeniem powierzchnie zewnętrzne próbek (osiem sztuk) poddano szlifowaniu na szlifierce do wałków. Próbki odniesienia (próbki niepoddane borowaniu laserowemu) stanowiły losowo wybrane cztery próbki, natomiast kolejne cztery próbki poddano borowaniu laserowemu.

Zewnętrzna powierzchnie próbek przeznaczonych do borowania laserowo pokryto amorficznym borem w postaci zawiesiny nakładanej równomiernie na powierzchnie. Przygotowane w ten sposób próbki z pokryciem zamocowano kolejno w uchwycie tokarki współpracującej z laserem molekularnym CO<sub>2</sub> TRUMPF TLF 2600t o maksymalnej mocy wiązki równej 2600 [W] i rozkładzie gęstości mocy TEM<sub>01</sub> i rozpoczęto proces przetapiania pokrycia z warstwą powierzchniową próbki. Proces obróbki laserowej prowadzono w sposób ciągły, nagrzewając warstwę powierzchniową po spirali tak, aby nastąpiło przetopienie nałożonego pokrycia zawierającego amorficzny bor z podłożem.

Parametry obróbki laserowej zastosowane podczas tworzenia warstwy powierzchniowej ustalono na podstawie badań wstępnych, które pozwoliły na dobranie parametrów tak, aby uzyskać ciągłą warstwę o planowanej grubości,

mikrotwardości czy chropowatości. Borowanie laserowo przeprowadzono przy następujących parametrach:

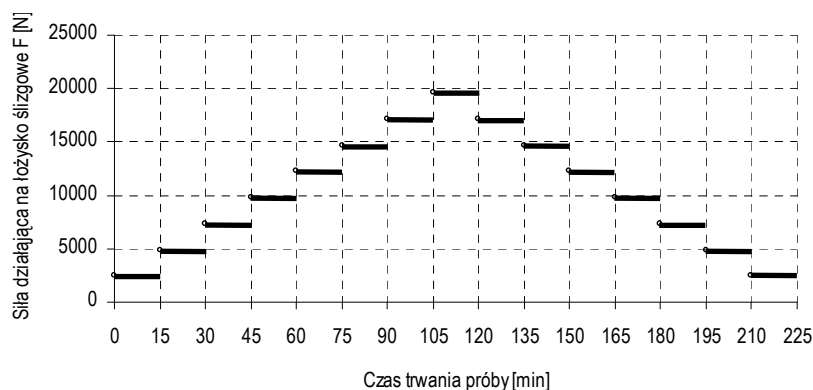
- moc wiązki laserowej  $P = 600 \text{ W}$ ,
- prędkość liniowa wiązki względem materiału obrabianego  $v = 3 \text{ mm/s}$ ,
- czas oddziaływania wiązki laserowej na materiał przy ustalonej średnicy wiązki to  $t = 2 \text{ s}$ ,
- posuw wiązki laserowej wzdłuż osi wałka poddanego obróbce laserowej wyniósł  $f = 2 \text{ mm/obr.}$

W dalszej kolejności powierzchnie zewnętrzne trzech próbek borowanych laserowo przeszlifowano po obróbce laserowej celem usunięcia pofalowania powierzchni (głębokość szlifowania  $0,1 \text{ mm}$ ). Po jednej próbce z grupy próbek niepoddanych borowaniu laserowemu oraz borowanych laserowo przeznaczono do obserwacji mikrostruktury i pomiarów mikrotwardości. W tym celu wykonano zgięty metalograficzne poprzeczne (przecinając próbki wzdłuż tworzącej wałka). Na tak przygotowanych zgiętych metalograficznych prowadzono obserwacje mikrostruktury i pomiary mikrotwardości, które przeprowadzono zarówno w głąb warstwy powierzchniowej aż do materiału rdzenia, jak i wzdłuż w strefie przetopionej (dla próbki borowanej laserowo) na głębokości około  $0,1 \text{ mm}$  od powierzchni. Obserwację mikroskopową prowadzono z wykorzystaniem metalograficznego mikroskopu optycznego firmy ZAISS pracującego w układzie odwróconym, wyposażonego w kamerę oraz współpracującego z komputerem i systemem komputerowej analizy obrazu o nazwie MultiScan. Pomiary mikrotwardości wykonano z wykorzystaniem twardościomierza 3212 firmy ZWICK sposobem Vickersa przy obciążeniu  $100\text{G}$ .

Dalsze badania obejmowały przeprowadzenie próby zużyciowej na stanowisku do przyspieszonych badań łożysk ślizgowych ZPG-IV.

Prowadząc ocenę wytworzonych warstw, stosowane trzy powtórzenia. W badaniach przeciwpróbki stanowiły dwie półpanewki produkowane przez firmę GLYCO. Półpanewki współpracowały z czopem na szerokości  $19,1 \text{ mm}$ . Współpraca elementów węzła tribologicznego odbywała się z zastosowaniem smarowania grawitacyjnego prowadzonego w sposób ciągły z wykorzystaniem oleju silnikowego mineralnego Lotos SAE 15W40.

Budowa stanowiska pozwalała na prowadzenie badań zużycia w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych w przypadku skojarzenia czopa wału i współpracujących z nim półpanewek. Przeprowadzając próbę zużyciową, dokonywano zmiany ciśnienia w stosownym siłowniku hydraulicznym, co odpowiadało określonej wartości siły obciążającej łożysko ślizgowe. Zmiany wartości siły działającej na łożysko ślizgowe przeprowadzano co stały okres czasu i o stałą wartość siły zgodnie ze schematem na **Rysunku 2**.



**Rys. 2. Przebieg zmian siły obciążającej łożysko ślizgowe w funkcji czasu dla przeprowadzonych badań zużycia**

Fig. 2. The course change the loading force bearing a function of time for the study of wear

Prędkość obrotowa próbki była stała i wynosiła 1000 obr./min. Przeprowadzone pomiary bicia wykazały, że bicie promieniowe próbek zamontowanych na wale zawierało się w granicach  $0,02 \pm 0,04$  mm (uwzględniając obie grupy próbek).

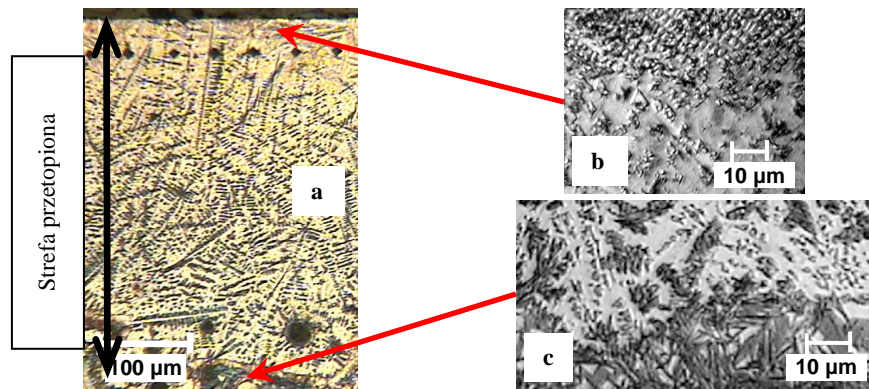
Po przeprowadzonych badaniach zużyciowych wielkość zużycia określano przez wykonanie w miejscach współpracy czopów z panewkami, profilogramów powierzchni, odnosząc je do obszarów powierzchni niepoddanych procesowi zużycia. Na każdej z próbek wykonano trzy profilogramy co  $120^\circ$ , ustalając wartość średnią powstałego zagłębienia w wyniku procesu zużycia się próbki. W dalszej kolejności ustalono wartość średnią zagłębienia dla danej grupy próbek. Profilogramy powierzchni próbek przed i po zużyciu wykonano z zastosowaniem profilometru stykowego firmy ZAISS wyposażonego w głowice z przetwornikiem indukcyjnym i oprogramowanie SUFORM firmy SAJD METROLOGIA pozwalające na pomiary i analizę odchyłek prostoliniowości i chropowatości powierzchni. Pomiary prowadzono, wykorzystując ramię pomiarowe zakończone diamentową końcówką stykową (bez ślizgacza) w kształcie ostrosłupa o zaokrąglanym wierzchołku. Głowica pomiarowa ma możliwość przemieszczania się w dwóch prostopadłych osiach, natomiast stolik, na którym spoczywała próbka daje możliwość ruchu w płaszczyźnie poziomej. Zakres pionowy w czasie pomiarów podczas stosowania głowicy indukcyjnej wynosił  $\pm 200$   $\mu\text{m}$ . Przesuw iglicy pomiarowej pozwala na wykonanie profilogramu o maksymalnej długości do 100 mm. Zastosowana prędkość przesuwu końcówki pomiarowej w czasie pomiarów wynosiła 0,1 mm/s (możliwości przyrządu to 0,01 mm/s do 1 mm/s). Pomiary przeprowadzono, ustalając odcinek elementar-

ny  $\lambda_c = 0,8$  mm, gdzie adekwatnie odcinek pomiarowy  $L_n$  wynosił 4 mm. W analizie wyników chropowatości wykorzystano filtrację odcinającą.

Wszystkie badania przeprowadzono z wykorzystaniem urządzeń znajdujących się w Laboratoriach: Podstaw Trwałości (Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych) oraz Technik Laserowych Politechniki Poznańskiej.

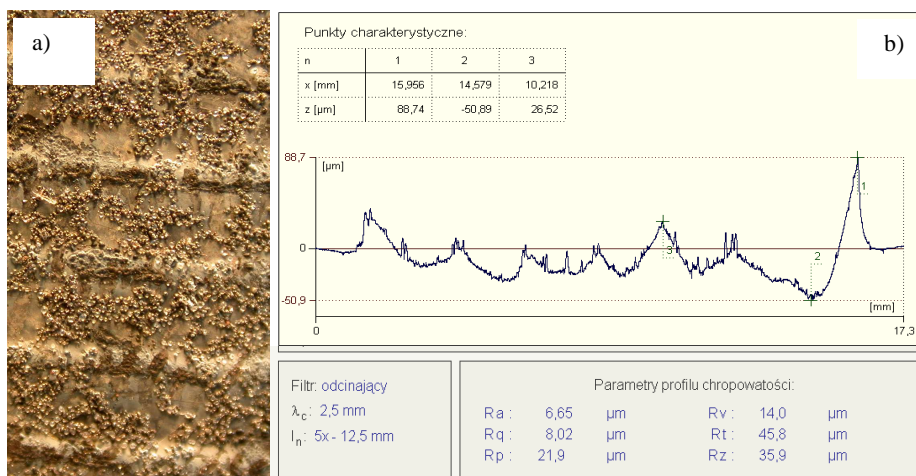
## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przeprowadzona obróbka laserowa pozwoliła na wytworzenie jednorodnej warstwy powierzchniowej wolnej od wad w postaci pęknięć widocznych na powierzchni i pod powierzchnią (**Rys. 3** oraz **4a**). Warstwa powierzchniowa boro-owana laserowo wykazywała budowę strefową, gdzie wyróżniono strefę przetopioną oraz strefę zahartowaną. Strefa przetopiona to obszar materiału doprowadzonego do temperatury topnienia, który po wymieszaniu się z amorficznym borem i procesie szybkiej krystalizacji stworzył nowy stop o podwyższonej mikrotwardości. Pod strefą przetopioną zalegała strefa zahartowana powstała w wyniku nagrzania się materiału rodzimego (rdzenia) z obszaru strefy przetopionej i następnie schłodzenia na skutek transportu ciepła w głąb materiału, ale również przez strefę przetopioną na powierzchnię. W strefie przetopionej zaobserwowano powstanie struktury dendrytycznej (**Rys. 3a**) oraz struktury charakterystycznej dla borków żelaza (**Rys. 3b**). Koniec strefy przetopionej to początek występowania struktury iglastego martenzytu (**Rys. 3c**) i dalej kulek grafitu i obszarów ferrytu.



**Rys. 3. Struktura strefy przetopionej: a) widok całej strefy na zglądzie poprzecznym, b) widok struktury borków żelaza, c) widok struktury iglastego martenzytu na granicy strefy przetopionej i zahartowanej**

**Fig. 3. The structure of melted zone: a) view of the entire zone to destroy the cross, b) view of the structure of the iron borides, c) view of the structure of martensite on the border softwood melted zone and hardened**

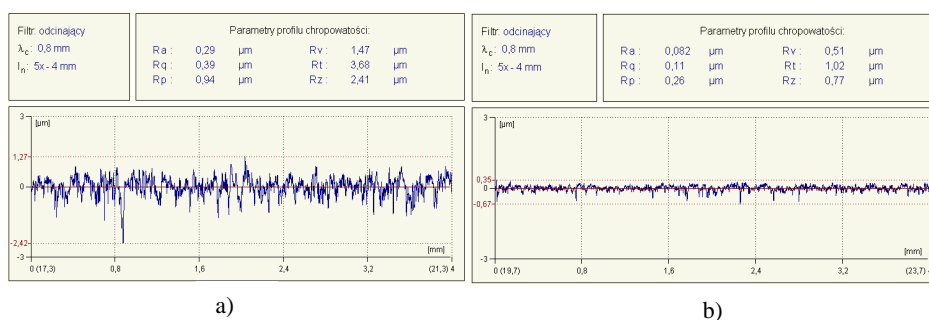


Rys. 4. Przykładowa próbka borowana laserowo: a) widok powierzchni (pow. około 3x), b) profilogram wraz z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni

Fig. 4. Sample Sample Borowe laser: a) view the surface (an area. about 3x), b) sensory profile along with selected parameters of surface roughness

Strefa przetopiona na powierzchni próbki charakteryzowała się pofalowaniem powierzchni oraz wartością parametru Ra przyjmującego poziom poniżej  $7 \mu\text{m}$  (Rys. 4b).

Obserwacje zmian parametru Ra na powierzchni próbki w miejscu borowania laserowego po procesie szlifowania (który nastąpił po obróbce laserowej) pozwoliły zauważyć, że parametr ten przyjmował wartość poniżej  $0,1 \mu\text{m}$  (Rys. 5b). Przykładowe profilogramy wykonane na powierzchni próbki borowanej laserowo i szlifowanej oraz próbki odniesienia po szlifowaniu przy tych samych parametrach przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 5. Profilogramy powierzchni próbek: a) odniesienia po szlifowaniu, b) borowanej laserowo i szlifowanej w celu usunięcia pofalowania

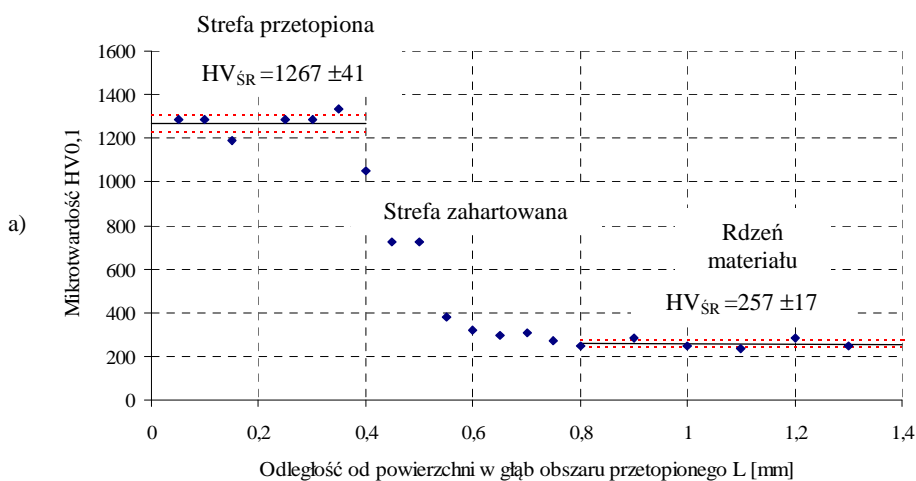
Fig. 5. Sensory profile of the sample surface: a) reference after grinding, b) borowanej laser and the ground to remove the wobble

Należy dodać, iż wspomniany parametr mierzony na powierzchni próbek po szlifowaniu, ale przed laserowym borowaniem przyjmował wartość powyżej  $0,1 \mu\text{m}$  dla wszystkich badanych próbek, w tym próbek odniesienia (**Rys. 5a**). Zmniejszenie się wartości mierzonego parametru  $R_a$  (ponadtrzyipółkrotne) wynikające z borowania laserowego próbki przy współpracy jej powierzchni z panewką o zbliżonej wartości wspomnianego parametru pozwala przypuszczać, że dzięki temu wystąpi krótki okres docierania (wartość parametru  $R_a$  dla nowych panewek wyniosła  $R_a = 0,11 \pm 0,04 \mu\text{m}$ ).

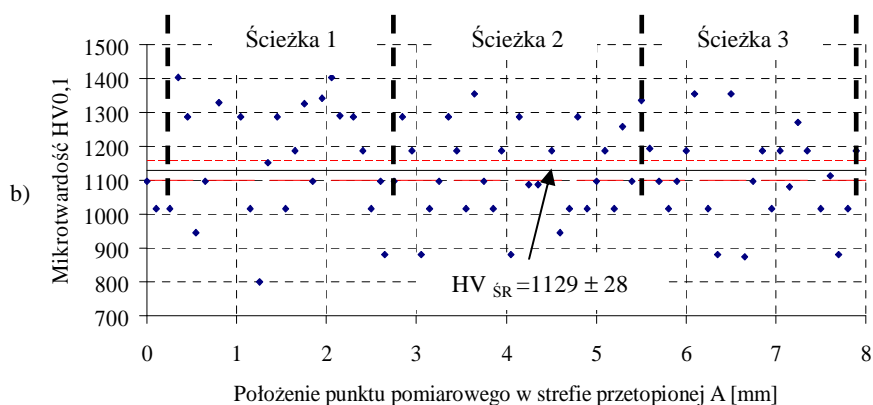
Analiza przebiegu profili wykonanych wzdłuż tworzącej walcowego czopa z uwzględnieniem obszaru poddanego obróbce laserowej wskazała na konieczność zdjęcia warstwy materiału celem usunięcia pofalowania powierzchni. Jednak ilość materiału, który należy usunąć teoretycznie jest mała i nie przekracza  $200 \mu\text{m}$  (uwzględniając tak zwaną wypływkę powstałą w procesie przetapiania), co pozwala w bardzo krótkim czasie usunąć zbędny materiał, skracając czas przygotowania powierzchni (**Rys. 4a**).

Pomiary mikrotwardości metodą Vickersa na przekroju poprzecznym utworzonej warstwy powierzchniowej (strefa przetopiona) w wyniku borowania laserowego pokazują zwiększenie mikrotwardości w stosunku do rdzenia (**Rys. 6a**), jak i w stosunku do tej samej warstwy na próbkach niepoddanych obróbce powierzchniowej.

Porównanie mikrotwardości warstwy powierzchniowej (do głębokości  $0,3 \text{ mm}$ ) próbki borowanej laserowo oraz niepoddanej obróbce powierzchniowej wskazało czterokrotną różnicę w mikrotwardości warstw powierzchniowych badanych dwóch grup próbek. Ponadto mikrotwardość w strefie przetopionej próbki borowanej wydaje się utrzymywać na stałym poziomie (**Rys. 6a**).



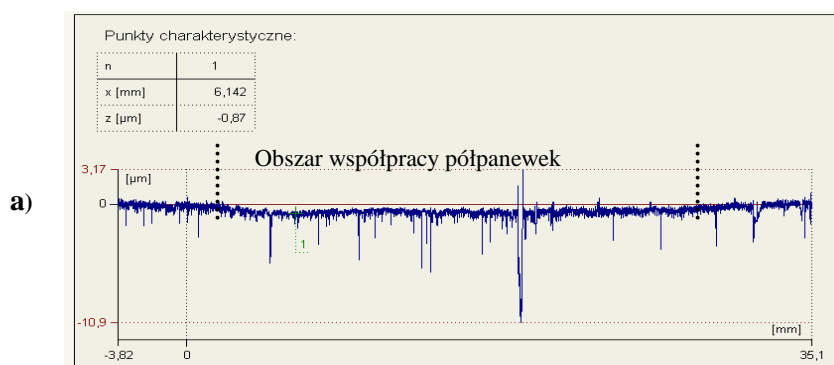


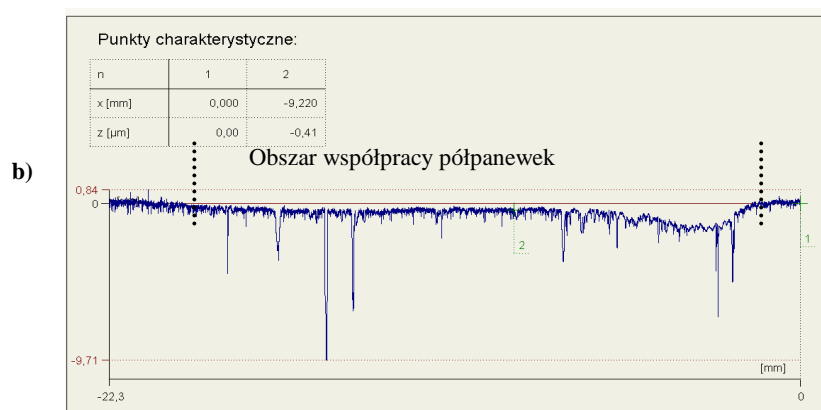


**Rys. 6.** Zmiany mikrotwardości w warstwie powierzchniowej próbki borowanej laserowo: a) w głąb uzyskanej warstwy do osiągnięcia mikrotwardości materiału rdzenia, b) wzdłuż strefy przetopionej na głębokości 0,1 mm w obszarze trzech „ścieżek”. Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1

Fig. 6. Changes microhardness of the surface layer of the sample laser borowed a) into the resulting layer to achieve the microhardness of the core material, b) along the melted zone at a depth of 0.1 mm in the three "tracks". The limits of the confidence intervals for the mean values are given at a significance level of 0.1

W strefie zahartowanej pomiary wykazały stopniowe zmniejszanie się mikrotwardości do osiągnięcia wartości odpowiadającej rdzeniowi, co jest również wartością mikrotwardości grupy próbek odniesienia. Wykonane ponadto na głębokości 0,1 mm od powierzchni pomiary mikrotwardości w poprzek powstałej warstwy powierzchniowej dla próbki borowanej laserowo wykazały także stałą mikrotwardość. Zaobserwowano, że mimo ponownego oddziaływania ciepła na obszary wcześniej przetopione w wyniku tworzenia rastru nie wpłynęło to na tyle na mikrotwardość, by ją istotnie zmienić (**Rys. 6b**).





**Rys. 7. Przykładowe profilogramy powierzchni wykonane na żeliwnych próbkach poddanych próbie tarciowej: a) próbka bez obróbki powierzchniowej, b) próbka poddana borowaniu laserowemu**

Fig. 7. Sample Sensory profile surfaces made of cast iron samples treated sample frictional a) sample without surface treatment, b) the sample treated borowaniu laser

W celu oceny odporności na zużycie przygotowanych próbek współpracujących z półpanewkami na maszynie tarciowej wykonano profile w obszarze współpracy półpanewki z próbką i częściowo poza nią (**Rys. 7.**). Zagłębienie profilu obrazowało w ten sposób wielkość zużycia badanej próbki. Analiza profilogramów uzyskanych dla grupy próbek borowanych laserowo oraz próbek bez obróbki powierzchniowej wykazała wyraźnie wyższą odporność na zużycie próbek borowanych laserowo. Zaobserwowano na powierzchni wszystkich badanych próbek niepoddanych obróbce powierzchniowej większą głębokość śladu współpracy z półpanewkami w stosunku do wszystkich próbek poddanych borowaniu laserowemu. Pomiary wykazały, że zużycie dla próbek borowanych laserowo wyniosło średnio  $0,50 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , natomiast dla drugiej grupy badanych próbek wyniosło  $1,25 \pm 0,24 \mu\text{m}$ . Obserwacje materiału warstwy powierzchniowej w miejscach bezpośredniego kontaktu z półpanewkami, ale również pod powierzchnią nie wykazały wykruszeń na powierzchni oraz mikropęknięć pod powierzchnią.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski i spostrzeżenia:

- istnieje możliwość wytworzenia ciągłej (wolnej od wad) i jednorodnej, charakteryzującej się podwyższoną i stałą mikrotwardością, warstwy powierzchniowej przez borowanie laserowe na powierzchni walcowej elementu z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-600,

- wytworzona warstwa borowana laserowo charakteryzuje 2,5-krotnie mniejszym zużyciem w stosunku do elementów niepoddanych obróbce laserowej.

## LITERATURA

1. Burakowski T.: Inżynieria powierzchni wczoraj, dziś i jutro. Inżynieria Powierzchni, nr 1-1996.
2. Jaśkiewicz Z.: Poradnik inżyniera samochodowego. Elementy i materiały. WKiŁ Warszawa 1990.
3. Kinal G., Bartkowska A.: Możliwości kształtowania oporności na procesy zużywania laserowo borowanych warstw powierzchniowych elementów stalowych oraz żeliwnych. Tribologia. Sigma-Not nr 3/2014 (255), s. 97–107.
4. Kusiński J., Przybyłowicz J., Woldan A.: Laserowe stopowanie warstwy wierzchniej i nadtapianie powłok na podłoża metalowe. VI Sympozjum techniki laserowej. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999.
5. Pertek-Owsiana A., Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymywanych w procesie borowania gazowego, WPP 2001, Rozprawy nr 365.
6. Przybyłowicz K.: Teoria i praktyka borowania stali. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2001.
7. Sert H., Can a., Arıkan H., Selcuk B., Toprak H.: Wear behavior of different surface treated cam spindles. Elsevier, Wear 2006, s.1013–1019.
8. Trojanowski J., Kamiński M., Wierchoń T.: Niskotemperaturowe azotowanie stali austenitycznych w warunkach wyładowania jarzeniowego, Inżynieria Powierzchni, nr 2-2002.
9. Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2003.

## Summary

**Attention was drawn to the possibility of using laser alloying with boron in relation to components made of cast iron. The results of tests allowing the formation of a continuous layer on the surface of the outer sleeve made of cast iron EN-GJS-600 by laser boronizing are presented. Laser processing was carried out using a molecular CO<sub>2</sub> laser TLF type 2600T, Trumpf TEM01 mode. It also presents the results of friction, which compared the use of plugs with boronated laser surface treatment and without cooperating with the two half-shells. There was an increase in the resistance to wear in the tested samples with a continuous layer of the resulting boronated laser relative to the reference samples.**

