

THE EFFECTS OF LASER TREATMENT ON THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF SELECTED IRON MACHINE PARTS – ASSESSMENT

Summary

The paper presents examples of the possible use of a very popular material – cast iron – in various branches of industry and reports several studies on ductile cast iron. The aim of studies was to examine the transformations of the microstructure, the possible introduction of boron, as well as the characteristic properties (microhardness, abrasive wear resistance) of surface layers obtained by laser hardening and boronizing. The laser treatment reported in this paper has been performed with the pre-heating of elements, using CO₂ molecular laser of TLF 2600t type, produced by Trumpf, with TEM₀₁ mode.

OCENA WPŁYWU OBRÓBKİ LASEROWEJ WYBRANYCH ŻELIWNYCH ELEMENTÓW MASZYN NA ICH ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE ŚCIERNE

Streszczenie

W publikacji zaprezentowano przykładowe możliwości wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu bardzo popularnego materiału, jakim jest żeliwo. W opisywanych badaniach, prowadzonych na żeliwie sferoidalnym, sprawdzono zmiany mikrostruktury, możliwość wprowadzania boru, a także własności użytkowe (mikrotwardość, odporność na zużycie ściernie) warstw powierzchniowych, uzyskanych poprzez laserowe hartowanie i borowanie. Obróbkę laserową prowadzono z wstępnym podgrzaniem elementów przed obróbką wykorzystując laser molekularny CO₂ typu TLF 2600t, firmy Trumpf o modzie TEM₀₁.

1. Wprowadzenie

Wydaje się, że najpopularniejszym stopem odlewniczym, stosowanym w budowie maszyn są żeliwa. W latach siedemdziesiątych XX w. udział masowy elementów żeliwnych w różnych konstrukcjach wynosił około 85% w stosunku do wyrobów stalowych. Przyczyną takiej popularności tego materiału była i jest niska cena surowców, niski koszt wytwarzania, prostota urządzeń do wytapiania i oczywiście korzystne własności mechaniczne żeliw [2, 8].

Najszerze zastosowanie, nie tylko w budowie pojazdów samochodowych, ma prawdopodobnie żeliwo szare o graficie płatkowym. Dzięki obecności w jego strukturze płatków grafitu stanowiących środek smarujący materiał ten ma dość dobre własności ślizgowe. W budowie silników spalinowych można spotkać zastosowanie tego materiału najczęściej na pierścienie tłokowe, tuleje cylindrowe lub kadłuby. W przypadku rozwiązań konstrukcyjnych kadłubów silników z tzw. suchymi tulejami cylindrowymi są one wykonywane przeważnie ze stopów żeliw austenitycznych o dużej zawartości niklu (12÷17%) i chromu (ok. 2%) lub ze znacznie tańszych silchromów. Te ostatnie to żeliwa stopowe z małymi dodatkami Cr (ok. 0,5%) i Mo (ok. 0,2%), o dużej zawartości fosforu (0,4÷0,7%), który nadaje im dużą twardość. Żeliwne kadłuby silników spalinowych można spotkać w pojazdach samochodowych marki Mercedes-Benz M 119 (5,0 V8 ZI), Opel 2,6 R4, Nissan V6, BMW R6 i R4/1.8, Audi 2,5 R5, czy Ford Cargo 5,9 R6 ZS TD [1, 3, 9, 11]. Żeliwo szare o graficie płatkowym znalazło także zastosowanie na prowadnice, gniazda i dźwignie zaworów dolotowych oraz wylotowych, kolektory wylotowe, wałki rozrządu hartowane indukcyjnie oraz mało obciążone elementy, takie jak: pokrywy, osłony, koła pasowe klinowe napędu pomp cieczy chłodzącej itp.

Do wytwarzania elementów o złożonych kształtach, które nie można wykonywać z żeliwa szarego o graficie płatkowym ze względu na kruchość, ani ze stali ze względu na gorszą lejniwość stosuje się żeliwo ciągliwe lub sferoidalne znajdujące ciągle coraz szersze zastosowanie. Pomimo wielu zalet żeliwa ciągliwego (np. dobra lejniwość, mała kruchość, dobra plastyczność) i szarego płatkowego jako materiału konstrukcyjnego zauważa się zastępowanie jego nowoczesnym tworzywem odlewniczym, którym jest żeliwo sferoidalne w tym ADI (skrót z ang. *Austempered Ductile Iron*) lub mało jeszcze znane w Polsce żeliwo wermikularne w tym AVCI (skrót z ang. *Austempered Vermicular Cast Iron*) [1]. Dobre własności wytrzymałościowe i plastyczne, lepsze od własności żeliwa ciągliwego przy mniejszej energochłonności produkcji, decydują o coraz większym wykorzystaniu żeliwa sferoidalnego.

Zwykle żeliwo sferoidalne, jak i żeliwo ADI, ciągle znajduje coraz szersze zastosowanie w budowie maszyn rolniczych, maszyn roboczych, kolejnictwie, czy w przemyśle zbrojeniowym. Przykładowe zastosowanie żeliwa sferoidalnego, w tym także żeliwa ADI przedstawia się następująco. Najczęściej spotykane zastosowania w rolnictwie to elementy mechanizmu wiążącego wiązałek, maszyn żniwnych i kosiarek, elementy urządzeń do wysiewania nawozów, lemiesz pługów, haki do holowania, piasty kół, wały kierownicze czy drążki sterownicze. Przemysł budowy maszyn wykorzystuje ten materiał konstrukcyjny między innymi do produkcji zębów koparek, kół łańcuchowych, łopatek sortowników, kruszarek do nawierzchni drogowej, ogni w gaśnicach, prowadnic i wałków, kół zębatych, czy różnych obudów. Dla kolei z żeliwa sferoidalnego wykonuje się klocki hamulcowe, koła do wózków konserwacyjnych, haki urządzeń sprzęgających czy nawet elementy torów (rozjazdy). Przemysł zbrojeniowy z żeliwa sferoidal-

nego produkuje pociski, opancerzenia, korpusy rakiet, wirniki silników oraz elementy mechanizmów jezdnych pojazdów gąsienicowych. W budowie pojazdów samochodowych znane jest zastosowanie tego materiału na dźwignie, drążki sterownicze, zwrotnice kół, łoża silnika, wieszaki resorów, wahacze, piasty kół, bębny i tarcze hamulcowe, elementy konstrukcji osi, obudowy mechanizmu różnicowego, części napędów hydraulicznych, różnego rodzaju obudowy. Biorąc pod uwagę dość dużą wytrzymałość i plastyczność w połączeniu z dobrymi wynikami nagłego obciążania części w warunkach tarcia suchego, na bębny i tarcze hamulcowe najlepiej stosować żeliwo sferoidalne o strukturze ferrytycznej. Biorąc pod uwagę odporność na cykliczne zmiany temperatury jest to materiał lepszy od żeliwa szarego z grafitem płatkowym [4, 10, 12].

Elementami żeliwnymi, które ze względu na warunki eksploatacyjne podlegają intensywnemu zużywaniu ściernemu, mogą być przykładowo tarcze dociskowe sprzęgieł oraz tarcze i bębny hamulcowe pojazdów samochodowych. Powierzchnia robocza tarczy hamulcowej jest narażona na zużycie ściernie ziarnami, które mogą być umocowane przez pewien czas w okładzinie czarnej lub przemieszczać się po powierzchni tarcia okładziny i części roboczej tarczy hamulcowej. Ziarna ściernie (piasek, pył, produkty zużycia korozyjnego), dociskane z różnymi siłami do obracającej się powierzchni roboczej tarczy powodują bruzdowanie powierzchni wywołując powstawanie rowków. Wspomniane rowki na powierzchni roboczej tarczy hamulcowej istotnie wpływają na pogorszenie skuteczności hamulców w momencie wymiany okładzin ciernych (niepełna współpraca okładziny klocka z powierzchnią roboczą tarczy).

Dla uzyskania określonych własności przeciwzużyciowych elementów żeliwnych stosowane są różne sposoby konstytuowania warstwy wierzchniej. Obok konwencjonalnych obróbek powierzchniowych żeliw (różnego rodzaju hartowanie powierzchniowe, dyfuzyjne wzbogacanie lub zubożanie warstwy powierzchniowej) pojawiają się zupełnie nowe sposoby modyfikacji tej warstwy wykorzystujące najnowsze osiągnięcia techniki, takie jak przykładowo obróbka laserowa. Znałe są pozytywne skutki tworzonych laserowo warstw na żeliwach szarych płatkowych gdzie przykładowo autorzy informują o kilkukrotnym wzroście odporności na ścieranie i tym samym poprawie trwałości eksploatacyjnej w odniesieniu do tulei cylindrowej poddanej laserowemu przetapianiu [6, 7]. Niewiele jest jednak informacji na temat badań z zakresu obróbki laserowej żeliw sferoidalnych zaznaczyć należy jednak, że prowadzący badania informują o powstawaniu pęknięć w tworzonych laserowo warstwach dla różnych rodzajów żeliw [5]. Sytuacja taka może mieć miejsce na skutek tego, iż żeliwo sferoidalne jest jeszcze materiałem stosunkowo nowym, problemy z wytworzeniem jednorodnej warstwy spowodowały chwilowy brak zainteresowania tego rodzaju obróbką.

Wdrażanie nowych gatunków żeliw, a także rozwój obróbek powierzchniowych, w tym obróbek laserowych, stwarzają nie zawsze zbadane jeszcze możliwości wykorzystania tych materiałów. Sensownym w związku z powyższym wydaje się podjęcie prac dotyczących tej problematyki.

Celem prezentowanych badań była ocena możliwości poprawy odporności na zużycie ściernie warstw powierzchniowych elementów (próbek) z żeliwa sferoidalnego poprzez hartowanie i borowanie laserowe.

2. Metodyka badań

Chcąc osiągnąć założony cel badań postanowiono badania podzielić na dwa etapy, tj.:

- opracowanie sposobu hartowania i borowania laserowego elementów (próbek) z żeliwa,
- ocena wpływu utworzonej warstwy powierzchniowej na elementach z badanego żeliwa na ich odporność na zużycie ściernie.

Prowadzone wcześniej badania nad uzyskaniem jednorodnej warstwy powierzchniowej na elementach żeliwnych pozwoliły zakwalifikować do dalszych badań jedno z żeliw sferoidalnych o osnowie ferrytyczno-perlitycznej.

Do badań przygotowano cztery grupy prostopadłościennych próbek, które postanowiono poddać laserowemu hartowaniu z przetopieniem, laserowemu borowaniu, hartowaniu z chłodzeniem w oleju oraz przygotowano próbki w stanie wyjściowym (nieulepszane cieplnie). Liczność każdej grupy wynosiła 8÷10 sztuk. Próbki przygotowano jako prostopadłościenną, wszystkie o jednakowych wymiarach 9×9×20 mm, które to próbki w części poddanej obróbce laserowej połączono w pakiety (po trzy sztuki w pakiecie) i przeszlifowano na szlifierce do płaszczyzn. Następnie na powierzchnie próbek poddanych borowaniu laserowemu naniesiono pokrycie zawierające amorficzny bor (dla próbek hartowanych laserowo nie stosowano żadnego pokrycia na powierzchni). Pomiary grubości pokrycia na poszczególnych próbkach wykazały zmianę tej grubości w zakresie 38÷60 [μm]. Przygotowane w pakietach próbki do borowania i hartowania laserowego wygrzewano w piecu elektrycznym (temperatura 350°C, czas 2 godziny) by następnie po wyjęciu próbek z pieca i osiągnięciu przez nie temperatury około 300°C, (mierzonej na powierzchni próbek) przeprowadzić obróbkę laserową.

Obróbkę laserową prowadzono korzystając z lasera molekularnego CO₂ typu TLF 2600t, firmy Trumpf o modzie TEM₀₁ znajdującego się w Laboratorium Technik Laserych Zakładu Obróbki Skrawaniem Politechniki Poznańskiej.

Przeprowadzając zaplanowane zabiegi powierzchniowej obróbki laserowej zastosowano wiązkę lasera o przekroju kołowym i średnicy d=4 mm, moc wiązki laserowej wyniosła P=2000 [W] natomiast prędkość przemieszczania wiązki lasera względem powierzchni próbki wynosiła v = 8 mm/s. Dla tak dobranych parametrów obróbki laserowej czas nagrzewania materiału wynosił $\tau_n = 0,5$ s, a energia jednostkowa $E_j = 80$ J/mm². Zastosowane parametry obróbki laserowej pozwoliły na uzyskanie określonych wymiarów strefy przetopionej potrzebnych dla ostatecznego wytworzenia żeliwnych próbek posiadających określoną warstwę przeciwzużyciową.

Grupę próbek utwardzanych konwencjonalnie uzyskano przez poddanie prostopadłościennego elementu hartowaniu w oleju 900°C i następnie odpuszczaniu w temperaturze 240°C.

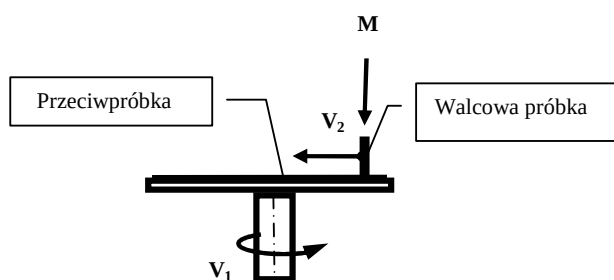
Badania zużycia ściernego przeprowadzono w Laboratorium Zakładu Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej wykorzystując do tego celu maszynę H4-B. Walcowe próbki wykorzystywane w badaniach zużycia ściernego wytworzono przez wycięcie ich metodą elektroiskrową z próbek prostopadłościennych, po wcześniejszym przeszlifowaniu na szlifierce do płaszczyzn dla uzyskania zbliżonych wartości chropowatości powierzchni (dotyczy to, także próbek nieulepszonych cieplnie). Liczność każdej z grup próbek walcowych wynosiła

Tab. 1. Warunki badań zużycia ściernego
Table 1. Abrasive wear test conditions

Ścierniwo	Prędkość przesuwu próbki względem papieru ściernego V2 [m/s]	Prędkość obrotowa tarczy z papierem ściernym V1 [obr/min]	Droga tarcia L [mm]	Nacisk jednostkowy P [MPa]
papier ścierny P500	0,2÷0,6	59,3	27695	0,32

10 sztuk. Przygotowane próbki poddano testom zużycia ściernego w warunkach tarcia suchego, stosując ruch roboczy próbki po spirali Archimedes'a po powierzchni zamocowanego na tarczy papieru ściernego P 500 (rys. 1).

Kontakt walcowej próbki (średnica próbki $D = 2$ mm) z papierem ściernym odbywał się jej powierzchnią czołową, a zamocowana i umieszczona w obsadzie maszyny próbka obciążana była siłą $M = 1$ N. Pozostałe warunki badań zużycia ściernego zaprezentowano w tab. 1.



Rys. 1. Schemat badań zużycia ściernego na maszynie H4-B
Fig. 1. Scheme of abrasive wear test on H4-B test stand

W celu przeprowadzenia pomiarów mikrotwardości i obserwacji mikroskopowych struktury warstwy powierzchniowej dla każdej grupy próbek wykonano zglądy metalograficzne. Badania wykonano na twardościomierzu Zwick 3212 oraz mikroskopie metalograficznym Epiquant. Wykonano również badanie stężenia pierwiastków metodą spektroskopii elektronów Augera (AES) w strefie przetopionej próbki borowanej laserowo (analizę przeprowadzono korzystając z aparatury typu LAS 620 firmy RIBER). W ramach badań wykonano, także profilogramy pewnych powierzchni obrabianych laserowo na zmodernizowanym profilografometrze ME10 połączonym z komputerem korzystając z programu SUFORM.

3. Wyniki badań i ich analiza

Przed przystąpieniem do badań zużycia ściernego dla wybranych losowo próbek z każdej grupy wykonano zglądy metalograficzne przeprowadzając obserwacje powstałych struktur dla próbek utwardzanych w różny sposób.

Mikroskopowe obserwacje wytworzonych warstw dla zaplanowanych obróbek laserowych z wstępnym podgrzaniem elementów z żeliwa sferoidalnego pozwoliły wyróżnić strefę przetopioną i strefę zahartowaną (rys. 2).

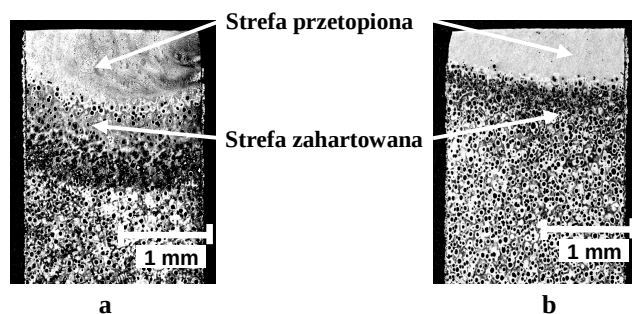
W strefie przetopionej obserwowano występowanie struktury dendrytycznej charakterystycznej dla materiału w postaci lanej. Dendryty obserwowano w strefie przetopionej zarówno po hartowaniu (rys. 3 d) jak i po borowaniu laserowym.

Osie powstałych dendrytów ustawione były zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła podczas krzepnięcia ma-

teriału wcześniej doprowadzonego do stanu ciekłego. Obszary stref przetopionych uzyskane w skutek doprowadzenia określonej energii charakteryzowały się przetopieniem materiału do głębokości około 0,51 mm (przy borowaniu) i 0,47 mm przy hartowaniu laserowym. Mniejsza głębokość strefy przetopionej przy hartowaniu (mimo tych samych parametrów obróbki laserowej) mogła wynikać z gorszej absorpcji promieniowania laserowego przez powierzchnie nieposiadającą pokrycia absorpcyjnego.

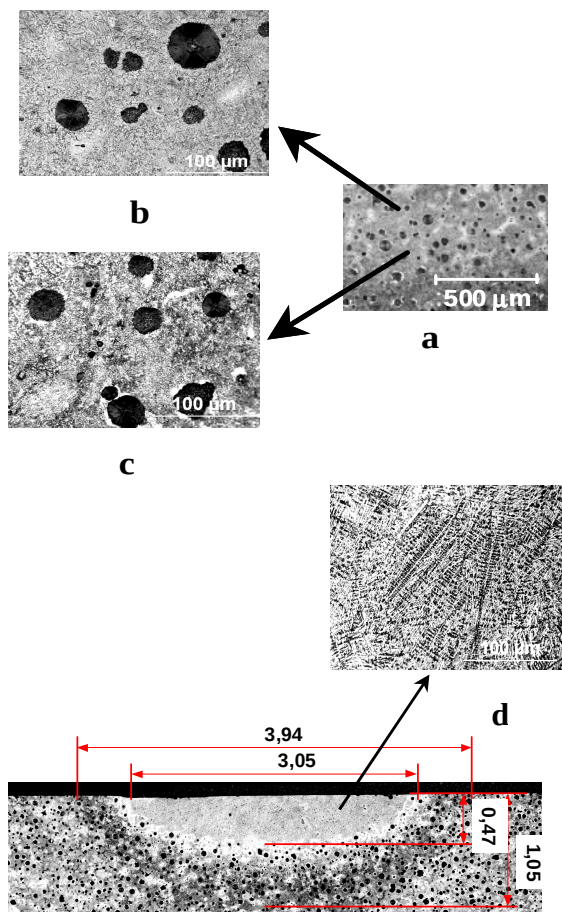
Struktura strefy zahartowanej w obu przypadkach obróbki laserowej to grafit kulkowy oraz martenzyt ulegający zmianie w głąb strefy zahartowanej. Potwierdzeniem martenzytycznej budowy tej strefy mogą być wykonane pomiary mikrotwardości oraz widoczne igły martenzytu. Bardziej drobne igły martenzytu widoczne są bliżej granicy ze strefą przetopioną (rys. 3 b) natomiast w kierunku materiału rdzenia igły martenzytu są coraz grubsze i występują wokół kulek grafitu liczne jasno trawiące się obszary ferrytu (rys. 3 c).

W obszarze strefy przetopionej po osiągnięciu stanu ciekłego przez materiał w wyniku oddziaływania wiązki lasera na pokrycie zawierające bor dochodzi do mieszania się boru z materiałem próbki w obszarze cienkiej warstwy przy powierzchni. Skutkiem tego jest możliwość powstania struktury twardych węglików, węglikoborków lub borków. Wprowadzenie pierwiastka stopowego, jakim był bor potwierdzają przeprowadzone badania spektroskopii elektronów Augera. W badaniach uzyskano dwa widma różniczkowe elektronów Augera. Jedno z nich uzyskano w środkowej części strefy przetopionej po borowaniu laserowym, a drugie widmo w materiale rdzenia. Z porównania obu widm wyraźnie widać na widmie ze strefy przetopionej pojawiający się bor, którego nie ma na widmie z rdzenia materiału próbki. Widmo różniczkowe na rys. 4 potwierdza wprowadzenie boru w tworzoną warstwę powierzchniową.

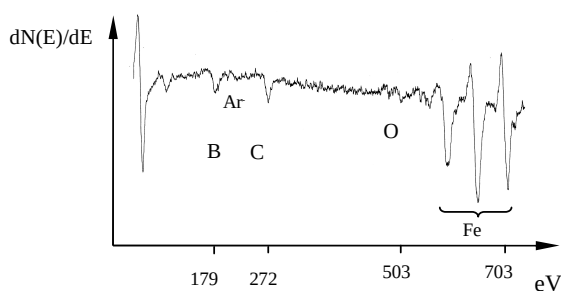


Rys. 2. Struktury metalograficzne widoczne na przekroju poprzecznym walcowych próbek przeznaczonych do badań zużycia ściernego poddanych obróbce laserowej: **a** – próbka z warstwą borowaną laserowo, **b** – próbka z warstwą hartowaną laserowo

Fig. 2. Metallographic structures on the cross-section of cylindrical specimens for abrasive wear tests, submitted to the laser treatment.: **a** – laser-boronized material, **b** – laser-hardened material



Rys. 3. Mikrostruktura materiału próbki z żeliwa sferoidalnego poddanego hartowaniu laserowemu z przetopieniem warstwy materiału: a, b, c – struktura strefy zahartowanej (zmieniająca się struktura martenzytyczna), d – struktura dendrytyczna obserwowana w strefie przetopionej
 Fig. 3. The microstructure of ductile iron specimens subjected to laser hardening with surface layer melting: a, b, c – the structure of the hardened zone (transformation of the martensitic structure), d – dendritic structure observed in the melted zone

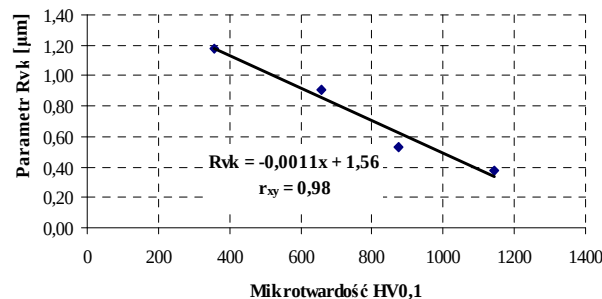
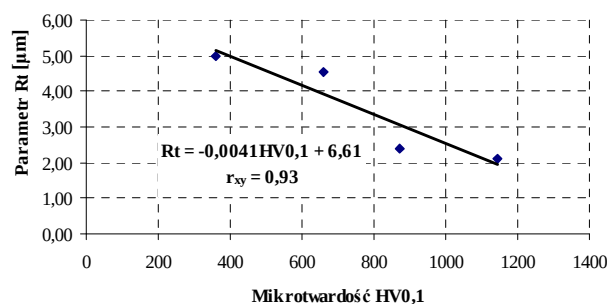
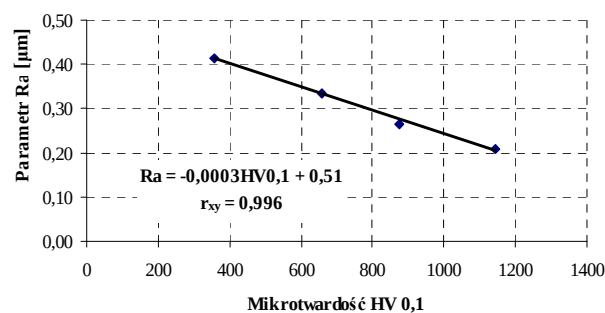


Rys. 4. Widmo różniczkowe elektronów Augera uzyskane dla środkowej części strefy przetopionej uzyskanej przez borowanie laserowe
 Fig. 4. Differential Auger electron spectrum for the central part of the melted zone obtained by laser boronizing

Na strukturę próbki poddanej hartowaniu w oleju złożyły się widoczne kulki grafitu i powstały w wyniku hartowania martenzyt. Próbkę była zahartowana w całej swojej objętości. W strukturze próbki niepoddanej obróbce cieplnej można było wyodrębnić grafit otoczony jasnym ferrytem oraz perlit. Nie zaobserwowano żadnych wad odlewniczych w badanej próbce.

Wykonane profilogramy powierzchni próbek poddanych zużyciu wykonano na pojedynczych losowo wybranych próbkach. W związku z trudnościami zaobserwowania ukierunkowania śladów zużycia profilogramy wykonano w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach na powierzchni tarcia. Badaniu poddano próbki borowane i hartowane laserowo, hartowane w oleju oraz próbki niepoddane obróbce cieplnej.

Spośród licznych parametrów, które mierzono, zainteresowano się całkowitą wysokością profilu chropowatości R_t , zredukowaną głębokością wgłębień R_{vk} oraz średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości R_a . W ramach analizy obliczono wartości średnie powyższych parametrów dla uzyskanych profili po różnych obróbkach powierzchniowych i zużyciu ściernym. Zaobserwowano malejące wartości całkowitej wysokości profilu chropowatości kolejno po hartowaniu w oleju następnie hartowaniu laserowemu i borowaniu. Podobnie zależnie od sposobu utwardzania powierzchni malały pozostałe parametry. Sytuacja taka może świadczyć o utwardzeniu badanych powierzchni w różnym stopniu. Różną mikrotwardość warstw powierzchniowych badanych próbek potwierdzają przedstawione pomiary na rys. 6.

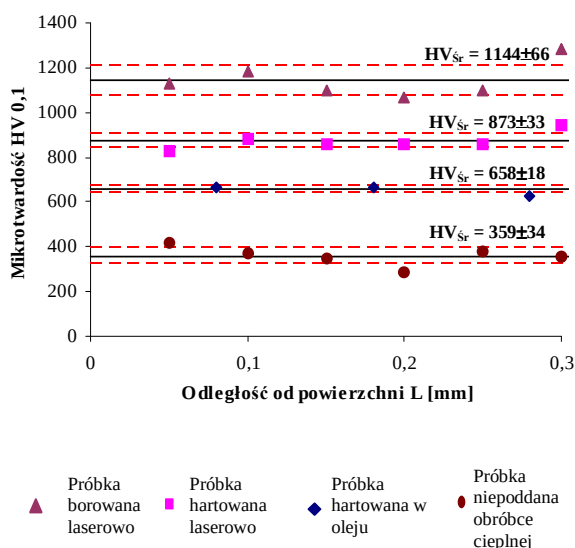


Rys. 5. Zmiany parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_t oraz R_{vk} zależnie od mikrotwardości wynikającej z zastosowanych różnych obróbek powierzchni próbek poddanych zużyciu ściernemu

Fig. 5. Changes in R_a , R_t and R_{vk} surface roughness parameters depending on microhardness resulting from different treatments applied to surface samples subjected to abrasive wear

Zaobserwowano, iż rosnąca mikrotwardość warstwy powierzchniowej wynikająca ze stosowania różnych sposobów umacniania takiej warstwy pozwala uzyskać mniejsze chropowatość powierzchni przy tych samych warunkach zużycia ściernego. Badając wpływ utwardzenia powierzchni na jej strukturę geometryczną wykonano wykresy przedstawione na rys. 5.

Wykresy ukazują pewną korelację pomiędzy całkowitą wysokością profilu, zredukowaną głębokością wgłębień oraz średnią arytmetyczną rzędnych profilu a mikrotwardością. Zwiększająca się stopniowo mikrotwardość utwardzonego żeliwa sferoidalnego poddanego zużyciu ściernemu powoduje stopniowe zmniejszenie się parametru R_a , R_t , oraz R_{vk} charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni. Rozkłady mikrotwardości od powierzchni w głąb stref przetopionych (wykonane w środkowej części badanych stref) wykazały stałą i różną dla hartowania i borowania mikrotwardość. Średnia mikrotwardość strefy przetopionej poddanej zużyciu ściernemu (do głębokości około 0,3 mm od powierzchni) powstałej przez borowanie laserowe wyniosła 1144 ± 66 HV 0,1 natomiast po hartowaniu laserowym wyniosła 873 ± 33 HV 0,1 (rys. 6).

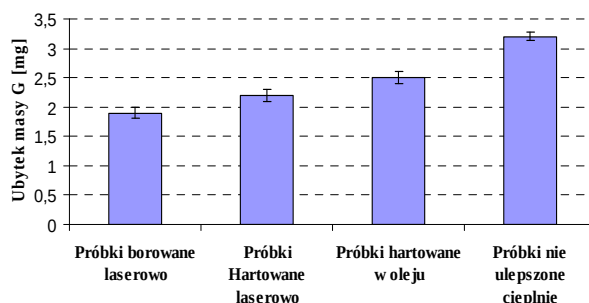


Rys. 6. Rozkład mikrotwardości w głąb warstw poddanych zużyciu ściernemu dla pojedynczych próbek po borowaniu laserowym, hartowaniu laserowym, hartowaniu w oleju i dla próbki nie poddanej obróbce cieplnej. Granice przedziałów ufności dla wartości średniej podano na poziomie istotności 0,1

Fig. 6. Distribution of microhardness towards the bottom of layers subjected to abrasive wear of individual samples after laser boronizing, laser hardening, hardening in oil and a sample not subjected to heat treatment. Limits of confidence intervals for the mean values are given on 0.1 significance level

Wprowadzony pierwiastek pozwolił na podniesienia mikrotwardości warstwy powierzchniowej żeliwa sferoidalnego ponad 3-krotnie. Natomiast przeprowadzone hartowanie laserowe pozwoliło na ponad 2-krotny wzrost mikrotwardości w stosunku do rdzenia. Należy zauważyć, iż hartowanie badanego żeliwa sferoidalnego w oleju pozwala uzyskać niższy wzrost mikrotwardości niż w wyniku, któregośkolwiek z przeprowadzonych powierzchniowych obróbek laserowych.

Stała i różniąca się mikrotwardość warstw powierzchniowych badanych próbek pozwala sądzić również o ich różnej odporności na zużycie ściernie. W związku z powyższym stosując stałą drogę tarcia takie samo obciążenie i przeciwpróbkę w postaci papieru ściernego przeprowadzono porównawcze badania zużycia ściernego opisywanych wcześniej czterech grup próbek. Przeprowadzone badanie zużycia ściernego potwierdziły różnice w zużyciu ściernym między poszczególnymi grupami próbek (rys. 7).



Rys. 7. Wartości zużycia ściernego próbek wykonanych z żeliwa sferoidalnego poddanego różnym obróbkom powierzchniowym. Granice przedziałów ufności dla wartości średniej podano na poziomie istotności 0,1

Fig. 7. The values of wear of ductile iron samples subjected to various surface treatments. Limits of confidence intervals for the mean values are given on the 0.1 significance level

Na podstawie wyników badań zużycia ściernego stwierdzono, że odporność na zużycie próbek żeliwnych zależy od rodzaju zastosowanej obróbki i wzrasta w następującym porządku: próbki hartowane w oleju, próbki hartowane laserowo, próbki borowane laserowo. Borowanie laserowe pozwoliło na około czterdziestoprocentowe, a hartownie laserowe na około trzydzieste procentowe zmniejszenie zużycia w stosunku do próbek niepoddanych obróbce cieplnej. Wyniki badań zużycia ściernego pozwalają, także zauważyć możliwość uzyskania mniejszego zużycia ściernego o około 24% przy borowaniu laserowym i 12% procent przy hartowaniu laserowym w stosunku do hartowania w oleju.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona powierzchniowa obróbka laserowa oraz badania jej efektów, wraz z badaniami zużycia ściernego, pozwoliły stwierdzić, że:

- możliwe jest hartowanie z przetopieniem oraz borowanie laserowe z podgrzaniem elementów wykonanych z badanego żeliwa sferoidalnego podgrzanych do temperatury około 300°C przed powierzchniową obróbką laserową,
- laserowe borowanie i hartowanie z przetopieniem wywołuje zmiany w strukturze materiału powodując powstanie strefy przetopionej (dla borowania zawierającej bor) oraz martenzytycznej strefy zahartowanej,
- poprzez borowanie laserowe można uzyskać warstwy powierzchniowe, które do głębokości około 0,3 mm charakteryzują się stałą i ponad trzykrotnie wyższą mikrotwardością w stosunku do mikrotwardości rdzenia,
- hartownie laserowe z przetopieniem warstwy powierzchniowej daje możliwość uzyskania warstwy, która do głębokości około 0,3 mm może charakteryzować

- się stała i ponad dwukrotnie wyższą mikrotwardością w stosunku do mikrotwardości rdzenia,
- elementy żeliwne z warstwami zawierającymi bor wykazują mniejsze wartości zużycia ściernego o około 40% w porównaniu z elementami nie poddanymi obróbce cieplnej,
 - elementy żeliwne z warstwami uzyskanymi w wyniku laserowego hartowania z przetopieniem warstwy materiału wykazują mniejsze wartości zużycia ściernego o około 30% w porównaniu z elementami nie poddanymi obróbce cieplnej,
 - zużycie ściernie elementów borowanych powierzchniowo jest o 24% mniejsze niż zużycie elementów hartowanych konwencjonalnie (hartowanie w oleju),
 - zużycie ściernie elementów hartowanych z przetopieniem warstwy materiału jest o około 12% mniejsze niż zużycie elementów hartowanych w oleju.

5. Literatura

- [1] Binczyk F.: Konstrukcyjne stopy odlewnicze. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [2] Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Warszawa: WNT, 2002, s. 664.
- [3] Jezierski J.: Technologia tłokowych silników wysokoprężnych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.
- [4] Jeznacki J.: Materiałoznawstwo samochodowe. Warszawa: WKiŁ, 1982, s. 49-53.
- [5] Klimpel A., Kobic J., Janicki D., Burdek M., Marczak Z.: Przetopienie laserowe warstwy wierzchniej walców z żeliwa sferoidalnego stopowego. Inżynieria materiałowa, 2003, nr 2.
- [6] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej. Kraków: Wydawnictwo Naukowe "Akapit", 2000.
- [7] Napadłek W., Bogdanowicz Z., Kowalczyk S.: Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej tulei cylindrowych stosowanych w silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, z. 6, s. 583-592.
- [8] Mistur L.: Technologia spajania i cięcia żeliwa. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1972.
- [9] Nowak B.: Regeneracja typowych elementów pojazdów samochodowych. Warszawa: WKiŁ, 1985.
- [10] Reński A.: Budowa samochodów. Układy hamulcowe i kierownicze oraz zawieszenia. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
- [11] Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [12] Wojciechowski A., Sobczak J.: Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Transportu Samochodowego, 2001.