

THE COMPARISON OF GREY CAST IRONS IN THE ASPECTS OF THE POSSIBILITY OF THEIR LASER HEAT TREATMENT

Summary

Presented paper refers to analysis of properties of different gray cast irons (with flake and spheroidal graphite) with ferrite, ferrite-pearlite, pearlite as well as unstable (for example bainite, martensite) matrixes in the aspects of influence of these properties on the final laser heat treatment effect. The analysis showed that it is possible to expect essential differences in surface layer between cast irons with different graphite shape. It was shown that the range of changes caused by laser heat treatment performed in the same conditions for cast irons with spheroidal graphite can be several times larger than for cast irons with flake graphite. Consequently, to achieve the same effects it is necessary to apply higher laser beam fluence for flake cast irons than spheroidal cast irons.

Key words: cast iron; heat treatment; laser; physical properties; density; specific heat capacity; thermal conductivity; analysis; laboratory experimentation

PORÓWNANIE GATUNKÓW ŻELIWI SZARYCH POD WZGLĘDEM MOŻLIWOŚCI ICH LASEROWEJ OBRÓBKIE CIEPLNEJ

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy właściwości różnych gatunków żeliwi szarych (z grafitem w postaci płatków i sferoidów) o osnowach ferrytycznych, ferrytyczno-perlitycznych i perlitycznych, a także nierównowagowych przede wszystkim pod względem wpływu badanych właściwości na końcowy efekt laserowej obróbki cieplnej. Analiza wykazała, że można spodziewać się istotnych różnic w warstwie powierzchniowej pomiędzy różnymi gatunkami żeliwi szarych po ich obróbce laserowej, a w szczególności zaobserwować wyraźne różnice pomiędzy żeliwami o różnym kształcie grafitu. Wykazano, że zasięg zmian, jakie powoduje laserowa obróbka cieplna przeprowadzona w tych samych warunkach dla żeliw z grafitem sferoidalnym może być nawet parokrotnie większy niż żeliw z grafitem płatkowym. W celu uzyskania podobnych efektów należy w związku z tym zastosować wyższe wartości fluencji wiązki laserowej w przypadku żeliw płatkowych niż żeliw sferoidalnych.

Słowa kluczowe: żeliwo; obróbka cieplna; laser; właściwości fizyczne; gęstość; ciepło właściwe; przewodność cieplna; analiza; badania laboratoryjne

Wykaz symboli:

ρ – gęstość [g/cm^3],
 C_p – ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$],
 λ – przewodność cieplna [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],
 α – współczynnik przewodzenia temperatury [m^2/s],
 P – moc wiązki laserowej [W],
 t – czas oddziaływania wiązki laserowej na materiał [s],
 v – prędkość przesuwu wiązki laserowej [mm/s],
 r – promień wiązki laserowej [mm],
 F – fluencja wiązki laserowej [J/mm^2],
 E – gęstość mocy wiązki laserowej [W/mm^2],
 T_{max} – maksymalna temperatura uzyskana w cyklu nagrzewania laserowego [$^{\circ}\text{C}$].

1. Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych problemów współczesnego przemysłu, w tym przemysłu maszyn rolniczych, jest sprostanie coraz wyższym wymaganiom dotyczącym zwiększenia trwałości i niezawodności ich elementów przez modyfikację ich warstwy powierzchniowej. Materiałem konstrukcyjnym szeroko stosowanym w różnych gałęziach przemysłu jest żeliwo. Związane jest to m.in. z jego zadowalającymi właściwościami mechanicznymi (czasem lepszymi od staliw i bliskim stali, np. żeliwa sferoidalne), dobrą zdolnością tłumienia drgań, a także z rozwojem technologii ich wytwarzania i obróbek powierzchniowych stwarzających nowe możliwości zastosowania [1].

Pośród wielu metod modyfikacji warstwy powierzchniowej żeliw w tym konwencjonalnych obróbek powierzch-

niowych (różnego rodzaju hartowanie powierzchniowe, dyfuzyjne wzbogacanie lub zubożanie warstwy wierzchniej) swoje miejsce znalazła również laserowa obróbka cieplna (LOC). Samo przetapianie laserowe umożliwia wytworzenie warstw powierzchniowych o drobnoziarnistej strukturze zahartowanego żeliwa białego. Przetapianie laserowe poza zwiększeniem mikrotwardości pozwala uzyskać zwiększenie odporności na różnego rodzaju zużycia (między innymi erozyjne i korozyjne), a w konsekwencji zwiększenie trwałości elementu [2, 3, 4, 5, 6].

Konstytuowanie warstwy powierzchniowej za pomocą laserowej obróbki cieplnej i uzyskanie pożądanego efektu (zasięg zmian struktury, skład chemiczny, właściwości użytkowe, stan powierzchni) wymaga poznania szeregu różnych czynników oddziaływujących na ten końcowy efekt. Znaczenie mają tzw. parametry wejściowe związane z rodzajem stosowanego lasera, a przede wszystkim emitowaną przez niego wiązką, rozkładem energii w wiązce, czy też parametry określające nadmuch gazów osłonowych. Do parametrów wejściowych należą również parametry związane z obrabianym materiałem np. stanem powierzchni oraz właściwościami fizycznymi (np. temperaturą topnienia), a pośród nich właściwościami cieplnymi, takimi jak na przykład ciepło właściwe czy przewodność cieplna [5].

Należy zaznaczyć, że nawet w przypadku samych żeliw szarych można odnotować znaczące różnice np. wartości przewodności cieplnej, która mieści się w przypadku tych materiałów w zakresie 30-60 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [7]. Z tego powodu obróbka laserowa z tymi samymi parametrami wiązki laserowej materiałów o różnych właściwościach cieplnych może

spowodować zupełnie różne efekty.

Zasięg zmian wprowadzanych przez LOC np. głębokość, na jaką warstwa musi charakteryzować się odpowiednią mikrotwardością jest istotna nie tylko z punktu widzenia konkretnego zastosowania elementu, ale również planowania nadatków na obróbkę wykańczającą. Dlatego celem podejmowanych badań było ustalenie wpływu rodzaju żeliw oraz związanych z nimi właściwości cieplnych na możliwości modyfikacji warstwy powierzchniowej za pomocą LOC.

2. Metodyka badań

Badaniom poddano żeliwa najczęściej stosowane w przemyśle maszyn, a mianowicie było to sześć rodzajów żeliw szarych z grafitem płatkowym i osnową:

- ferrytyczną EN-GJL-100,
- ferrytyczno-perlityczną EN-GJL-150,
- perlityczną: EN-GJL-200, EN-GJL-250, EN-GJL-300 i EN-GJL-350,

oraz osiem rodzajów żeliw z grafitem sferoidalnym i osnową:

- ferrytyczną EN-GJS-350, EN-GJS-400 i EN-GJS-450,
- ferrytyczno-perlityczną EN-GJS-500 i EN-GJS-600,
- perlityczną EN-GJS-700,
- nierównowagową EN GJS-800 i EN GJS-900.

W tab. 1 przedstawiono właściwości fizyczne takie jak gęstość ρ , ciepło właściwe C_p i przewodność cieplna λ oraz wartość obliczonego współczynnika przewodzenia temperatury α badanych żeliw.

Tab. 1. Właściwości fizyczne analizowanych żeliw [7]
Tab. 1. The physical properties of analyzed cast irons [7]

L.p.	Oznaczenie	Gęstość	Ciepło właściwe	Przewodność cieplna	Współczynnik przewodzenia temperatury
		ρ [g/cm ³]	C_p [J/kg*K]	λ [W/m*K]	α x10 ⁶ [m ² /s]
1.	EN-GJL-100	6,8	460	60	19,18
2.	EN-GJL-150	7	460	59	18,32
3.	EN-GJL-200	7,1	480	54	15,85
4.	EN-GJL-250	7,2	500	50	13,89
5.	EN-GJL-300	7,3	525	46	12,00
6.	EN-GJL-350	7,4	545	42	10,41
7.	EN-GJS-350	7,1	460	36	11,02
8.	EN-GJS-400	7,1	460	36	11,02
9.	EN-GJS-450	7,1	461	35	10,69
10.	EN-GJS-500	7,1	473	32	9,53
11.	EN-GJS-600	7,1	473	32	9,53
12.	EN-GJS-700	7,1	473	32	9,53
13.	EN-GJS-800	7,1	473	32	9,53
14.	EN-GJS-900	7,1	460	35,5	10,87

W celu określenia wpływu różnych właściwości poszczególnych żeliw na temperaturę w warstwie powierzchniowej podczas nagrzewania, skorzystano z zależności zmieszanej w publikacji [8]. Zależność ta, pozwala między innymi wyznaczyć zmianę temperatury od powierzchni w głąb nagrzewanego wiązki laserową materiału. Wartość wspomnianej temperatury zależy od szeregu zmiennych –

przede wszystkim parametrów wiązki laserowej, tj.:

- mocy P ,
- czasu oddziaływania na materiał t ,
- szybkości przesuwu v ,
- promienia r ;

oraz właściwości fizycznych materiału obrabianego, tj.:

- gęstości ρ ,
- ciepła właściwego C_p ,
- przewodności cieplnej λ ,
- współczynnika przewodzenia temperatury α .

Wpływ ma jednak także temperatura otoczenia T_0 i współczynnik absorpcji promieniowania A . Wartości temperatury otoczenia i współczynnika absorpcji promieniowania przyjęto do obliczeń jako stałe.

Podczas analizy zastosowano szereg kombinacji parametrów wiązki laserowej, jakie można zastosować w przypadku lasera molekularnego CO₂ firmy TRUMPF o maksymalnej mocy 2600W i modzie TEM₀₁, typ TLF 2600t, znajdującego się w Laboratorium Technik Laserowych Politechniki Poznańskiej. Zakresy parametrów wiązki laserowej, jakie zastosowano podczas analizy przedstawiono w tab. 2. W związku z tym można było uzyskać gęstość mocy w zakresie od 20 do 400 W/mm², a fluencję od 10 do 80 J/mm².

Tab. 2. Zakres parametrów laserowej obróbki cieplnej
Tab. 2 The range of laser heat treatment parameters

Moc wiązki laserowej		Prędkość przesuwu wiązki względem próbki		Czas oddziaływania wiązki na materiał	
P [W]		v [mm/s]		t [s]	
min	maks	min	maks	min	maks
250	2500	1	80	0,05	4,00

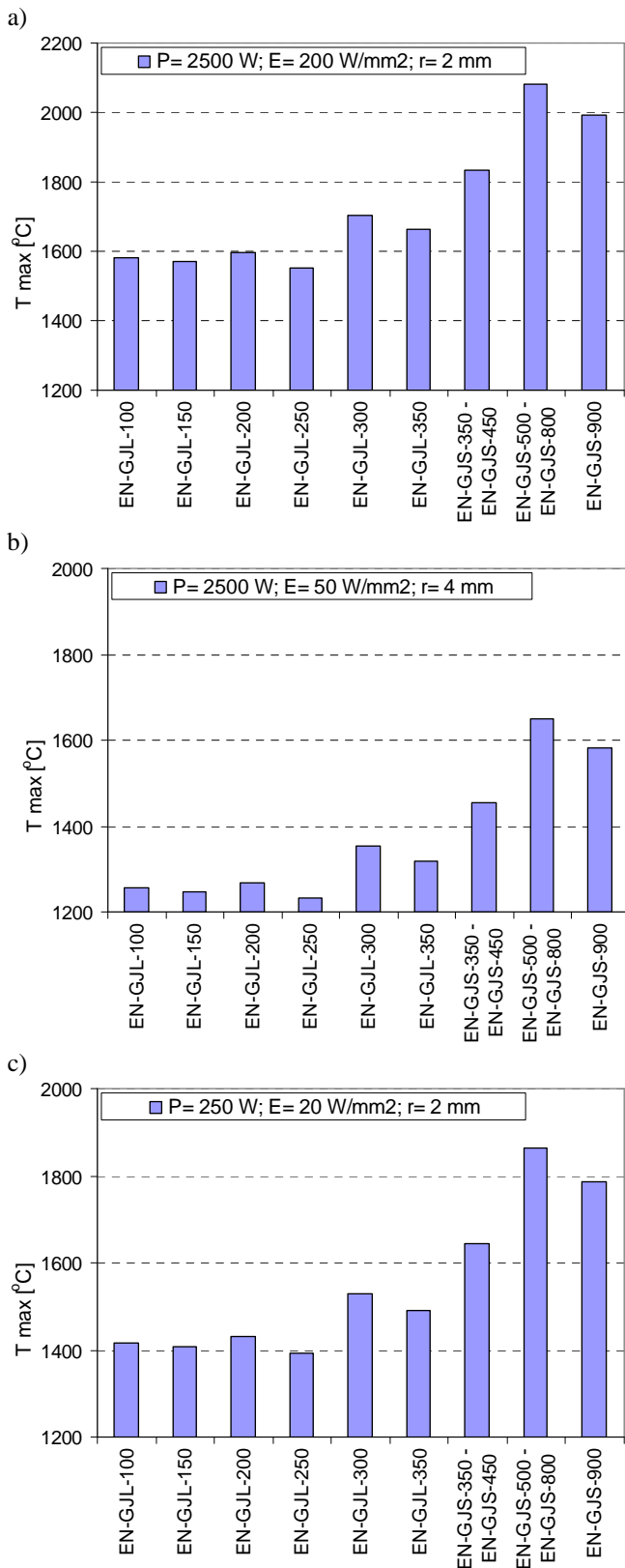
Analizie poddano głębokość warstwy zmodyfikowanej, którą charakteryzuje zasięg zmian, jaki powodowany jest za pomocą LOC w przypadku różnych żeliw dzięki wytworzeniu w warstwie powierzchniowej odpowiedniej temperatury. Warstwa zmodyfikowana, w zależności od zastosowanych parametrów LOC i wytworzonej temperatury, może składać się ze strefy przetopionej, przejściowej i zahartowanej ze stanu stałego lub tylko zahartowanej ze stanu stałego.

3. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie właściwości żeliw szarych (tab. 1) i wspomnianej zależności zaproponowanej w pracy [8] umożliwiającej prognozowanie temperatur podczas obróbki laserowej w materiale wyznaczono dla różnych wariantów kombinacji parametrów wiązki laserowej temperaturę na powierzchni próbki T_{max} (rys. 1) podczas obróbki laserowej.

Ze względu na te same lub zbliżone wartości właściwości cieplnych żeliw EN-GJS-350, EN-GJS-400 i EN-GJS-450 oraz EN-GJS-500, EN-GJS-600, EN-GJS-700 i EN-GJS-800 potraktowano je wspólnie i oznaczono jako: EN-GJS-350÷EN-GJS-450 oraz EN-GJS-500÷EN-GJS-800.

Na podstawie dokonanych obliczeń można jednoznacznie stwierdzić, że stosując te same parametry wiązki laserowej i zapewniając te same warunki obróbki, temperatura wytworzona na powierzchni poszczególnych żeliw różni się w sposób istotny. Np. pomiędzy żeliwami płatkowymi EN-GJL-100, EN-GJL-150, EN-GJL-200 i EN-GJL-250 a żeliwami sferoidalnymi o osnowie ferrytyczno-perlitycznej, perlitycznej bądź nierównowagowej EN-GJS-500÷EN-GJS-800 różnica ta może wynosić nawet 400°C przy analizowanych kombinacjach parametrów (rys. 1).

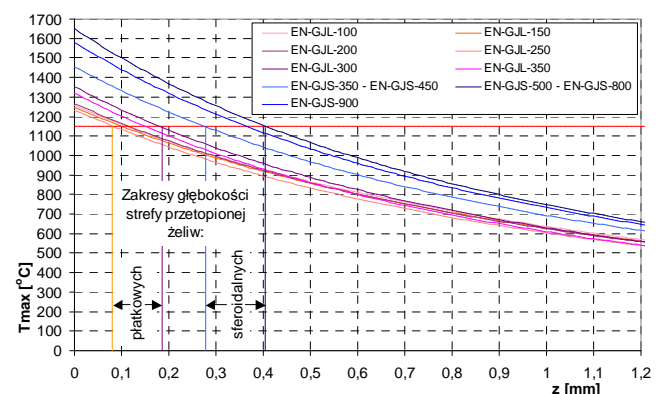


Rys. 1. Temperatury T_{max} na powierzchni badanych żeliw poddanych LOC przy tych samych parametrach wiązki laserowej dla trzech przykładowych wariantów: a) $P = 2500\text{ W}; E = 200\text{ W/mm}^2; r = 2\text{ mm}$; b) $P = 2500\text{ W}; E = 50\text{ W/mm}^2; r = 4\text{ mm}$; c) $P = 250\text{ W}; E = 20\text{ W/mm}^2; r = 2\text{ mm}$
 Fig 1. The T_{max} temperatures on the surface of cast irons during laser heat treatment with the same laser beam parameters in three following variants: a) $P = 2500\text{ W}; E = 200\text{ W/mm}^2; r = 2\text{ mm}$; b) $P = 2500\text{ W}; E = 50\text{ W/mm}^2; r = 4\text{ mm}$; c) $P = 250\text{ W}; E = 20\text{ W/mm}^2; r = 2\text{ mm}$

W związku z tym można również spodziewać się różnych zmian temperatur T_{max} od powierzchni w głąb z obrabianych żeliw. Zmianę temperatury T_{max} od powierzchni w głąb materiałów poddanych LOC dla różnych rodzajów żeliw wyznaczono również na podstawie tej samej zależności. Przykład takiej zmiany prezentuje rys. 2. Widoczny jest wyraźny wpływ właściwości cieplnych analizowanych żeliw na uzyskiwane temperatury w ich warstwie powierzchniowej.

Przy założonych parametrach: mocy wiązki laserowej $P=250\text{ W}$, prędkości przesuwu wiązki laserowej względem próbki $v=1\text{ mm/s}$ i czasie oddziaływania $t=4\text{ s}$ (rys. 2) można się spodziewać wyraźnie odmiennych skutków LOC badanych żeliw. Pomimo zastosowania identycznych parametrów obróbki laserowej dokonana analiza wskazuje, że uzyskać można wyższą temperaturę oraz większy zasięg oddziaływania LOC w tworzonej warstwie w przypadku żeliw sferoidalnych w stosunku do żeliw płatkowych.

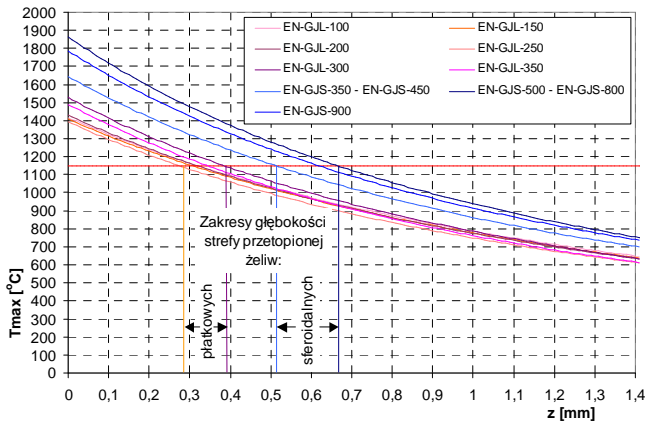
Głębokości stref przetopionych, czy też zahartowanych ze stanu stałego mogą znacznie różnić się pomiędzy tymi żeliwami przy zastosowaniu tych samych parametrów. Przyjmując np. jedną średnią temperaturę topnienia 1150°C dla żeliw można już zauważyć, że w analizowanym przypadku warstwa powierzchniowa żeliw płatkowych ulec może przetopieniu na głębokość do ok. $0,3\text{ mm}$, a warstwa żeliw sferoidalnych może być nawet dwukrotnie większa. Należy wziąć po uwagę, że temperatura topnienia zależy od zawartości węgla, a żeliwa sferoidalne o większej jego zawartości (ok. $3,6\text{-}4,2\%$ C) mają niższą temperaturę topnienia od płatkowych ($2,5\text{-}4\%$ C), co dodatkowo sprzyja większym głębokościom przetopienia w przypadku żeliw sferoidalnych.



Rys. 2. Przykład zmian temperatury T_{max} od powierzchni w głąb z materiałów poddanych LOC dla różnych rodzajów żeliw (moc wiązki laserowej $P = 250\text{ W}$, prędkość przesuwu wiązki laserowej względem obrabianego materiału $v = 1\text{ mm/s}$, czas jej oddziaływania $t = 4\text{ s}$ i promień $r = 2\text{ mm}$)

Fig. 2. The example of T_{max} temperature changes from the surface to the core z of treated material by laser heating for different cast iron types ($P = 250\text{ W}$ laser beam power, $v = 1\text{ mm/s}$ its scanning speed, $t = 4\text{ s}$ interaction time and $r = 2\text{ mm}$ radius)

Różnice w uzyskanych temperaturach na przekroju obrabianego materiału podczas LOC pomiędzy analizowanymi żeliwami okazują się być jeszcze większe przy zastosowaniu innych parametrów. Na rys. 3 przedstawiono przykład zmian temperatury od powierzchni w głąb obrabianych żeliwach przy założeniu mocy wiązki 10-krotnie wyższej, 16-krotnie większej prędkości i 8-krotnie krótszym czasie oddziaływania uzyskując inną gęstość mocy wiązki oraz fluencję niż w pierwszym przykładzie.



Rys. 3. Przykład zmian temperatury T_{max} od powierzchni w głąb z materiałów poddanych LOC dla różnych rodzajów żeliw (moc wiązki laserowej $P = 2500$ W, prędkość przesuwu względem obrabianego materiału $v = 16$ mm/s, czas jej oddziaływania $t = 0,5$ s i promień $r = 2$ mm)

Fig. 3. The example of T_{max} temperature changes from the surface to the core z of treated material by laser heating for different cast iron types ($P = 2500$ W laser beam power, $v = 16$ mm/s its scanning speed, $t = 0,5$ s interaction time and $r = 4$ mm radius)

Pomimo iż, zmiany temperatury od powierzchni w głąb rdzenia są różne od zmian dla przykładu pierwszego (rys. 2) co do wartości jak i przebiegu krzywych reprezentujących temperatury, to można również w tym przypadku stwierdzić, że rezultatem LOC żeliw sferydalnych powinien być większy zasięg warstwy zmodyfikowanej niż w przypadku żeliw płatkowych. Ponadto, różnice pomiędzy głębokościami warstwy zmodyfikowanej w żeliwach sferydalnych i płatkowych powinny zmieniać się proporcjonalnie w zależności od zastosowanych parametrów wiązki laserowej. Różnice te, są istotne nie tylko przy prognozowaniu głębokości umocnionej warstwy powierzchniowej pod względem określonych wymagań tej warstwy dla danego elementu, ale również przy planowaniu jego obróbki wykańczającej.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski:

- właściwości cieplne istotnie wpływają na możliwości uzyskiwanych temperatur na powierzchni materiałów podczas ich obróbki laserowej (różnice tych temperatur w przypadku żeliw szarych może wynosić 400°C przy zachowanych tych samych warunkach obróbki laserowej),

- zmiana temperatury od powierzchni w głąb obrabianego żeliwa również różni się znacząco dla poszczególnych gatunków co powoduje, że zasięg zmian jakie powoduje laserowa obróbka cieplna w obrębie analizowanych żeliw szarych może być wyraźnie zróżnicowany pomimo stosowania tych samych parametrów wiązki laserowej,

- uzyskiwana głębokość zmodyfikowanych stref zależy nie tylko od zastosowanych parametrów wiązki laserowej, ale również od właściwości cieplnych obrabianego materiału np. współczynnika przewodności temperaturowej α czy też przewodności cieplnej λ ,

- niższy współczynnik przewodności temperaturowej α , czy też przewodności cieplnej λ charakterystyczny dla żeliw sferydalnych powoduje, że głębokości zmodyfikowanych stref w przypadku obróbki z tymi samymi parametrami LOC tych żeliw mogą być nawet parokrotnie większe niż żeliw płatkowych.

Uzyskane wyniki badań stwarzają możliwość precyzyjniej ustalać odpowiednie parametry wiązki laserowej w odniesieniu do różnych żeliw szarych oraz planować odpowiedni naddatek na obróbkę wykańczającą.

5. Bibliografia

- [1] Praca zbiorowa pod red. A. Tabora: Diagnostyka pojazdów samochodowych – budowa, eksploatacja, naprawa. Kraków: PK, 2006.
- [2] Grum, J.; Šturm, R.: Microstructure Analysis of Nodular Iron 400-12 After Laser Surface Melt Hardening, Materials Characterization, 1996, 37: 81-88.
- [3] Martynek P.; Kusiński J.; Suliga, I., Siwek, A.: Zmiany struktury i odporności na ścieranie żeliwa sferydalnego po obróbce laserowej, III Ogólnopolska Konferencja Obróbka powierzchniowa, Częstochowa-Kule, 1996.
- [4] Kusiński, J.: Metalurgiczne podstawy kształtowania struktury i własności warstwy wierzchniej materiałów podczas obróbki laserowej. V Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin – Świnoujście, 1996: 275-287.
- [5] Burakowski, T.; Wierchoń, T.: Inżynieria powierzchni metali. Warszawa: WNT, 1995.
- [6] Paczkowska M.: Wpływ parametrów obróbki laserowej na budowę warstwy powierzchniowej żeliwa sferydalnego, Inżynieria Materiałowa, 2009, nr 6: 505-508.
- [7] Dobrzański, L. A.: Leksykon materiałoznawstwa. Verlag Dashofer, wersja 1,03, 2000.
- [8] Kusiński J.: Zmiany struktury i własności mechanicznych stali pod wpływem obróbki laserowej, Metalurgia i odlewnictwo, Zeszyty naukowe 132, Kraków, 1989.