

THE STRUCTURAL DEFECTS OF LASER TREATED ZONES OF CAST IRON ELEMENTS AND THE WAY OF ELIMINATING OF THEM

Summary

The paper presents findings of surface laser treatment of three different kinds of cast iron (gray, ductile and alloy). Research revealed appearance of numerous defects of surface layer structure created by means of laser treatment. Results of studies over ductile cast iron laser treatment with processing conditions allowing to avoid defects in the form of cracks have been also shown.

NIECIĄGŁOŚCI W STRUKTURZE STREF POWSTAŁYCH W ELEMENTACH ŻELIWNYCH PO OBRÓBCE LASEROWEJ ORAZ SPOSÓB ICH ELIMINACJI

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań powierzchniowej obróbki laserowej przeprowadzonej na trzech różnych rodzajach żeliw (szare, sferoidalne i stopowe). Badania wykazały możliwość powstawania licznych wad w strukturze warstwy powierzchniowej tworzonej w wyniku obróbki laserowej. Zeprezentowano również wyniki badań obróbki laserowej przeprowadzonej dla żeliwa sferoidalnego, w których warunki obróbki pozwoliły uniknąć wad w postaci pęknięć.

Wprowadzenie

Jedną z najstarszych technologii wytwarzania elementów maszyn i urządzeń, a także przedmiotów codziennego użytku jest odlewnictwo. Jak się okazuje nie ustalono do dnia dzisiejszego dokładnej daty i miejsca początków tej technologii. Przyjmuje się, że początek stosowania procesów metalurgicznych do wytwarzania przedmiotów użytkowych przypada na okres od 7000 do 5000 p.n.e. (odlewianie złota i miedzi). Technikę wytwarzania żeliwa najwcześniej opanowali Chińczycy (około 500 p.n.e.), a Europejczycy doszli do tej umiejętności dopiero około 1400 n.e. Wykonywane wówczas odlewy były wykorzystywane głównie w rolnictwie. Wytwarzane narzędzia (łopaty, łańcuchy, lemiesz itp.) odlewano z żeliwa białego, które następnie poddawano wyżarzaniu. Uzyskiwano w ten sposób właściwości zbliżone do współczesnego żeliwa ciągliwego oraz sferoidalnego perlitycznego lub ferrytycznego [1]. Obecnie z różnych rodzajów żeliw w maszynach rolniczych wykonuje się przykładowo różnego rodzaju koła zębate, wsporniki, osłony rozdrabniaczy „siewników czy kombajnów (żeliwo szare), elementy mechanizmów wiążących wiązałek czy kosiarek (żeliwo ciągliwe). Z żeliwa wykonywane są również wały korbowe, wały rozrządu, pierścienie tłokowe czy tuleje cylindrowe do silników napędzających ciągniki lub inne maszyny rolnicze.

Współcześnie można by stwierdzić, iż technologia odlewania żeliwa zapewniła dominację metali w technice. Postępujący rozwój technologii odlewania stali stopów metali nieżelaznych i specjalnych pozwolił taką pozycję ugruntować. Obecnie po istotnym wzroście zainteresowania tradycyjnymi stopami metalowymi obserwuje się systematycznie zmniejszenie zapotrzebowania na stal, staliwo i żeliwo szare. Obserwuje się jednak wzrost zastosowania żeliwa sferoidalnego ADI (Austempered Ductile Iron), które poddawane jest specjalnej obróbce cieplnej [1].

Rosnące nieustannie wymagania dotyczące parametrów wytrzymałościowych oraz własności użytkowych elemen-

tów spowodowały poszukiwanie nowych sposobów wytwarzania materiałów i kształtowania ich warstwy powierzchniowej. Coraz częściej przy spełnionych wymaganiach wytrzymałościowych elementu nieustannie pracuje się nad wytwarzaniem jeszcze bardziej trwałych warstw powierzchniowych, także na elementach wykonanych z żeliwa. Warstwy powierzchniowe tworzone w konwencjonalny sposób (dyfuzyjne: azotowanie, borowanie czy nawęglanie) zaczynają być wypierane lub wspierane przez bardziej energooszczędne i ekologiczne technologie wykorzystujące skoncentrowane wiązki elektronów, jonów, plazmy a także fotonów – lasery [2, 5, 10].

Rozwijająca się technika laserowa sprawiła, że lasery są coraz powszechniej stosowanymi narzędziami w wielu dziedzinach techniki, także do obróbki materiałów [6]. W odniesieniu do żeliwa prowadzi się badania nad wykorzystaniem wiązki lasera do obróbki powierzchniowej [3].

Przykładowo, przeprowadzono próby wytwarzania powłok amorficznych na żeliwie szarym uzyskując warstwę powierzchniową ze szkła metalicznego [11]. Podjęto również próby wytworzenia warstwy diamentopodobnej na żeliwie oraz można znaleźć informacje o efektach hartowania laserowego elementów z żeliwa szarego lub sferoidalnego [3, 6, 9, 12].

Z badań własnych [4] oraz badań autorów publikacji [3, 9] wynika jednak możliwość występowania wad w strukturze warstwy powierzchniowej spowodowanych obróbką laserową.

Celem badań prezentowanych w tym artykule jest przedstawienie rodzajów wad powstających po obróbce laserowej różnych rodzajów żeliw oraz sposobu tego rodzaju obróbki nie powodującej tych wad.

Metodyka badań

W badaniach wykorzystano wybrane gatunki żeliwa stopowego, sferoidalnego i szarego. Powierzchnię próbek w części poddanej obróbce laserowej szlifowano, a następnie odłuszczone i pokryto powłoką absorpcyjną o grubości 40 [µm].

Przygotowane powierzchnie próbek poddano oddziaływaniu wiązki lasera molekularnego CO₂ TRUMPF TLF 2600 t (moc maksymalna lasera 2600 [W], rozkład gęstości mocy TEM₀₁). Urządzenie laserowe wykorzystywane w badaniach znajduje się w Laboratorium Technik Laserowych Zakładu Obróbki Skrawaniem Politechniki Poznańskiej.

Przeprowadzając obróbkę laserową zastosowano wiązkę lasera o przekroju kołowym (średnica wiązki lasera wyniosła $d = 2$ i 4 [mm]) oraz zmienną moc tej wiązki w zakresie $P = 300$ - 2500 [W]. Dla zastosowanych średnic wiązki lasera zmieniając prędkość przesuwu wiązki względem próbki uzyskano różne czasy nagrzewania poszczególnych fragmentów materiału $\tau_j = 0,3$ - $3,2$ [s].

Celem zbadania efektów przeprowadzonej obróbki, warstwy powierzchniowe próbek przecięto i wykonano zgłady metalograficzne prostopadle do kierunku przesuwu wiązki laserowej.

Obserwacje mikroskopowe struktury oraz pomiary mikrotwardości wykonano wykorzystując urządzenia Laboratorium Warstwy Wierzchniej Instytutu Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. Badania przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym typu Epiquant i twardościomierzu Zwick 3212.

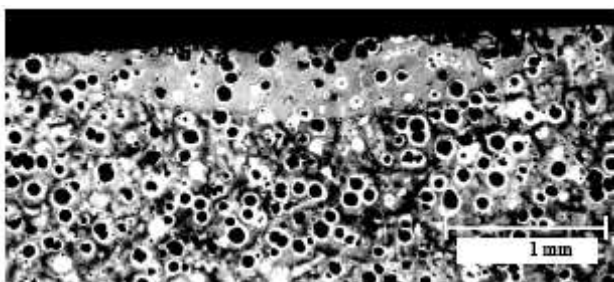
Rodzaje spotykanych wad warstwy powierzchniowej powstałej w wyniku obróbki laserowej

Na podstawie obserwacji mikrostruktury dla zastosowanych parametrów obróbki laserowej stwierdzono, iż uzyskano w warstwie powierzchniowej przetopienia lub jego brak.

Obróbka laserowa nie powodująca przetopienia warstwy powierzchniowej nie spowodowała wad w tych warstwach dla wszystkich użytych w badaniach rodzajów żeliw.

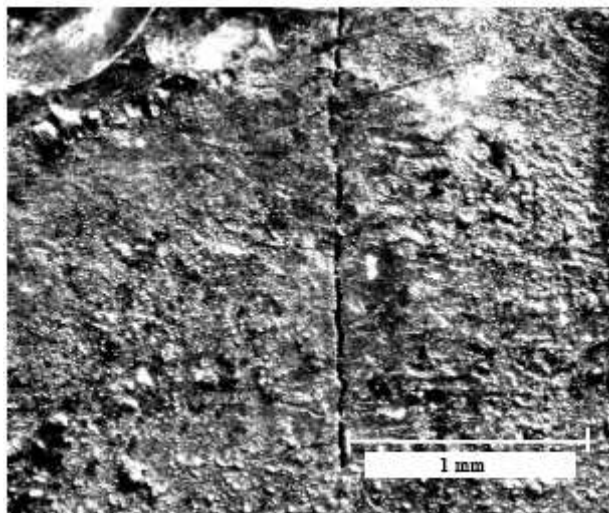
Na powierzchni próbek widoczne były jedynie odbarwienia spowodowane oddziaływaniem ciepła pochodzącego od wiązki lasera, a na zgładach poprzecznych można było obserwować słabiej trawiący się obszar zahartowany (rys. 1).

Wszystkie zbadane przypadki obróbki laserowej, w których nastąpiło przetopienie warstwy powierzchniowej, wskazywały na występowanie różnego rodzaju wad dla próbek z wszystkich zastosowanych rodzajów żeliw.



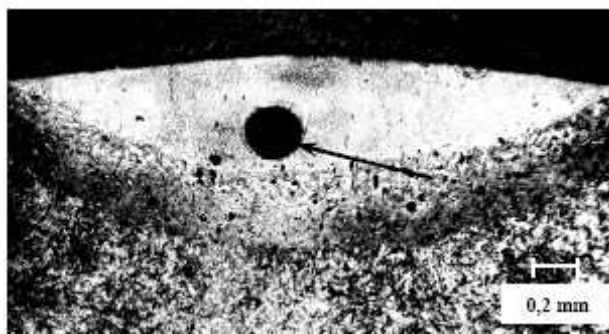
Rys 1. Obszar zahartowany powstały w strukturze żeliwa sferoidalnego poddanego obróbce laserowej (brak przetopienia warstwy powierzchniowej) (moc wiązki $P = 300$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 4$ [mm])

Fig. 1. Hardened zone of ductile cast iron after laser treatment (lack of surface layer penetration) (beam power $P = 300$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 8$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])



Rys. 2. Pojedyncze pęknięcie wzdłuż obszaru przetopionego widoczne na powierzchni żeliwa szarego poddanego obróbce laserowej (moc wiązki $P = 1200$ [W], prędkości wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 4$ [mm])

Fig. 2. Surface crack along melted zone of gray cast iron after laser treatment (beam power $P = 1200$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 8$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])



Rys. 3. Pęcherz widoczny w strukturze obszaru przetopionego żeliwa szarego poddanego obróbce laserowej (moc wiązki $P = 2010$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 4$ [mm])

Fig. 3. Blowhole in structure of melted zone of gray cast iron after laser treatment (beam power $P = 2010$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 8$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])

Obserwacje mikroskopowe prowadzone na powierzchni oraz pod nią w obszarach przetopionych uzyskanych przez obróbkę laserową pozwoliły na wyróżnienie dwóch rodzajów wad: obszarów przypominających kształtem pęcherze i pory (rys. 3) oraz pęknięć (rys 2, 4 i 6).

Obszary przypominające swym kształtem pęcherze umiejscowione były często na granicy stref określonych jako strefa przetopiona i zahartowana. Zaobserwowano jednak także przypadki, w których pęcherze znajdowały się w dowolnym miejscu powyżej tej granicy w obszarze strefy przetopionej. Wady w postaci pęknięć były widoczne zarówno na powierzchni jak i pod nią. Zaobserwowano pojedyncze pęknięcia wzdłuż obszaru przetopionego powstałego w wyniku oddziaływania wiązki lasera na powierzchni próbek dla każdego zastosowanego w badaniach żeliwa (rys. 2).



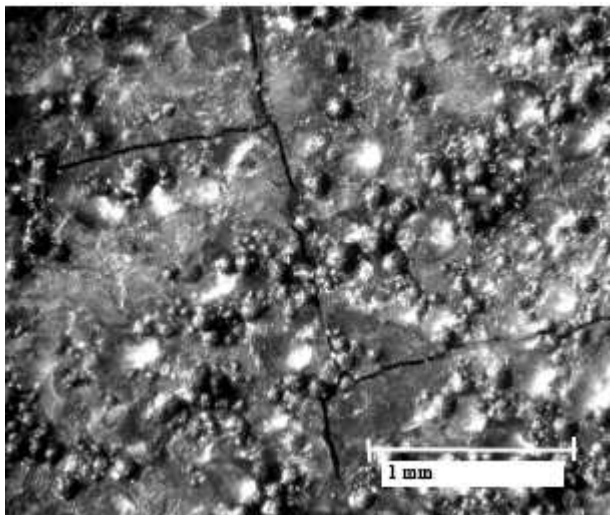
Rys. 4. Pęknięcie widoczne w strukturze obszaru przetopionego żeliwa szarego poddanego obróbce laserowej (moc wiązki $P = 520$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 6$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 2$ [mm])

Fig 4. Crack in structure of melted zone of gray cast iron after laser treatment (beam power $P = 520$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 6$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 2$ [mm])



Rys. 5. Pęknięcie połączone z obszarem przypominającym pęcherz lub por widoczne w strukturze żeliwa stopowego po obróbce laserowej (moc wiązki lasera $P = 1884$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 10,7$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 4$ [mm])

Fig. 5. Crack combined with blowhole in alloy cast iron structure after laser treatment (beam power $P = 1884$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 10,7$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])



Rys. 6. Pęknięcia podłużne łączące się z poprzecznymi widoczne na powierzchni próbki z żeliwa szarego poddanego obróbce laserowej (moc wiązki lasera $P = 1200$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d = 4$ [mm])

Fig. 6. Longitudinal and transversal cracks of gray cast iron after laser treatment (beam power $P = 1200$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 8$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])

Pęknięcia podłużne miały swój początek na granicy stref określonych jako strefa przetopiona i zahartowana (rys. 4), stwierdzono jednak także przypadki, iż pęknięcie tego rodzaju miało swój początek w obszarze przypominającym pęcherz (tylko dla żeliwa szarego i stopowego) (rys. 5).

W wyniku obserwacji makroskopowych powierzchni obszarów poddanych obróbce laserowej zaobserwowano także pęknięcia podłużne łączące się z poprzecznymi (rys. 6).

Wady bardziej lub mniej zbliżone kształtem do spotykanych w spawalnictwie pęcherzy gazowych zaobserwowano wyraźnie dla próbek z żeliwa szarego i stopowego poddanego obróbce laserowej. Tego rodzaju wad nie stwierdzono dla żeliwa sferoidalnego.

Tworzenie się wad w postaci pęcherzy i por może być spowodowane wydzielającymi się gazami w czasie krzepnięcia żeliwa. Jeżeli szybkość krzepnięcia żeliwa jest stosunkowo mała, to gazy zdążą się wydzielić. Natomiast przy dużej szybkości chłodzenia gazy zostają zatrzymane przez krzepnące żeliwo pozostając między zakrzepniętymi kryształami w postaci pęcherzy. Gazy takie jak tlen, wodór, azot, tlenek węgla, dwutlenek węgla czy dwutlenek siarki pochodzą z procesów metalurgicznych, a ilość ich wewnątrz odlewu zależy od szybkości krzepnięcia żeliwa [8]. Za powstawanie obszarów określonych jako pory czy pęcherze odpowiedzialne mogą być również cząstki grafitu (kulki i płatki), które nie uległy całkowitemu rozpuszczeniu w strefie przetopionej.

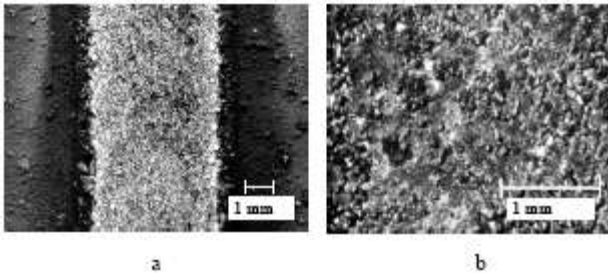
Widoczne na i pod powierzchnią szczeliny stanowią pęknięcia mogące powstawać na skutek naprężeń, które przekroczyły granice wytrzymałości materiału. Naprężenia te powstają na skutek lokalnego charakteru obróbki laserowej prowadzonej przy bardzo dużych szybkościach nagrzewania i chłodzenia przetopionej warstwy [5, 7].

Powstające wady po obróbce laserowej warstwy powierzchniowej żeliwa stanowią poważny problem, gdyż za ich przyczyną tworzona warstwa jest pozbawiona jednorodności i spójności z podłożem.

Obróbka laserowa elementów żeliwnych z podgrzaniem

Obróbkę laserową z podgrzaniem próbek przed tą obróbką przeprowadzono na próbkach wykonanych z żeliwa sferoidalnego. Powierzchnie próbek w części poddanej obróbce laserowej przeszlifowano, odtłuszczono i pokryto powłoką absorpcyjną o grubości około 40 [μm]. Próbki tak przygotowane umieszczono w piecu elektrycznym i nagrzewano tak długo, aż w całej objętości osiągnęły temperaturę około 350 [°C]. Następnie próbki pojedynczo wyjmowano z pieca układano na stole lasera i gdy stwierdzono na powierzchni próbki temperaturę 300 [°C] przeprowadzono obróbkę laserową. Pomiar temperatury na powierzchni próbki, bezpośrednio przed obróbką laserową, wykonywano metodą stykową za pomocą miernika cyfrowego z termoparą. Po przeprowadzonej obróbce laserowej próbki chłodzono w otoczeniu (temperatura otoczenia około 25 [°C]).

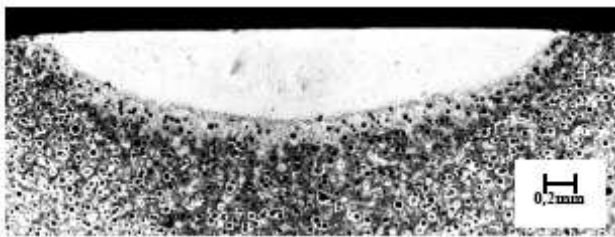
Obróbkę laserową oraz badanie jej efektów prowadzono korzystając z urządzeń opisanych powyżej. Prowadząc badania zastosowano wiązkę lasera o przekroju kołowym i średnicy $d = 4$ [mm], zmieniano moc wiązki laserowej w zakresie $P = 300-2000$ [W] oraz stosowano stały czas nagrzewania materiału $\tau_j = 0,5$ [s].



Rys. 7. Powierzchnia próbki z żeliwa sferoidalnego bezpośrednio po obróbce laserowej (a) oraz po dokładnym jej oczyszczeniu (b) (moc wiązki lasera $P=1800$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d=4$ [mm])

Fig. 7. Surface of ductile cast iron specimen after laser treatment: a-raw, b-clean and enlarged (beam power $P=1800$ [W], beam speed in relation to the sample $v=8$ [mm/s] and laser beam diameter $d=4$ [mm])

Po przeprowadzonej obróbce laserowej, zbadano jej efekty. Poddano obserwacjom zarówno powierzchnię obszarów poddanych obróbce laserowej jak i ich strukturę widoczną na zglądach poprzecznych.



Rys. 8. Struktura metalograficzna próbki z żeliwa sferoidalnego poddanego obróbce laserowej z podgrzaniem (moc wiązki lasera $P=2000$ [W], prędkość wiązki względem próbki $v = 8$ [mm/s] i średnica wiązki lasera $d=4$ [mm])

Fig 8. Metallographic structure of ductile cast iron after laser treatment with preheat (beam power $P = 2000$ [W], beam speed in relation to the sample $v = 8$ [mm/s] and laser beam diameter $d = 4$ [mm])

Szczegółowe obserwacje obszaru przetopionego widocznego na powierzchni oraz pod nią pozwoliły stwierdzić brak nieciągłości w strukturze strefy przetopionej po obróbce laserowej przeprowadzonej z podgrzaniem wstępnym próbek (brak wad opisanych wcześniej). Nie zaobserwowano żadnych pęknięć tak na powierzchni jak i w głąb obszaru przetopionego dla wszystkich zastosowanych parametrów obróbki (rys. 7 i 8).

Wolną od wad strefę przetopioną uzyskano dla wszystkich próbek wykonanych z badanego żeliwa sferoidalnego niezależnie od przyjętych parametrów obróbki laserowej.

Porównanie badań obróbki laserowej żeliw z podgrzaniem i bez podgrzania materiału przed obróbką pozwala stwierdzić, że podgrzanie materiału żeliwa sferoidalnego przed obróbką laserową daje możliwość uniknięcia powstania wad w tworzonej warstwie powierzchniowej. Dzieje się tak, gdyż podgrzanie materiału powoduje zmniejszenie szybkości nagrzewania i chłodzenia przetopionej warstwy, a tym samym zmniejszenie naprężeń wywołanych obróbką laserową powodujących pęknięcia.

Podsumowanie

Powierzchniowa obróbka laserowa elementów żeliwnych należy do jednego z trudniejszych procesów, którym poddaje się żeliwo (podobnie jak jego spawanie). Realizując obróbkę laserową elementów żeliwnych o temperaturze otoczenia spodziewać się można wystąpienia w tworzonej warstwie powierzchniowej licznych wad. Stanowią one poważny problem, ponieważ powodują brak spójności tworzonej w ten sposób warstwy powierzchniowej. Powstające pęknięcia są szczelinami, które mogą powodować łuszczenie pewnych obszarów powstałej warstwy, a pęcherze stanowiące kuliste ubytki warstwy przypadkowo rozmieszczone w obszarze przetopionym tworzonej warstwy zmniejszają przykładowo jej nośności.

Jak wykazały badania sposobem na uniknięcie niepożądanych efektów powodujących nieciągłość w powstającej po obróbce laserowej warstwy powierzchniowej (czyli jej wad) jest podgrzanie elementu (w całej jego objętości) do temperatury około 300 [°C] w przypadku żeliwa sferoidalnego. Podgrzewanie takie powoduje zmniejszenie zarówno szybkości nagrzewania jak i przede wszystkim szybkości chłodzenia.

Literatura

- [1] Binczyk F.: Konstrukcyjne stopy odlewnicze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2003
- [1] Burakowski T.: Inżynieria powierzchni wczoraj, dziś i jutro. Inżynieria powierzchni, nr 1-1996
- [2] Klimpel A., Kobic J., Janicki D., Burdek M., Marczak Z.: Przetopienie laserowe warstwy wierzchniej walców z żeliwa sferoidalnego stopowego, Inżynieria materiałowa, nr 2-2003
- [3] Kinal G.: Możliwość wykorzystania borowania laserowego żeliw w budowie maszyn rolniczych, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, Vol. 49 (3), Poznań 2004, s. 38-42
- [4] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej. Wydawnictwo Naukowe "Akapit" Kraków 2000
- [5] Kusiński J., Przybyłowicz K.: Strukturalne aspekty laserowego przetapiania stopów żelaza. I Ogólnopolska Konferencja Naukowa nt: Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni. Łódź 1994
- [6] Maocai W., Weitao W.: Microstructure of laser-surface-alliied cast iron with Cr-Al-Y alloy, Surface and Coatings Technology 72 (1995), 181-188
- [7] Mistur L.: Technologia spajania i cięcia żeliwa. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1972
- [8] Napadłek W., Przetakiewicz W., Raczkowski D., Bojar Z.: Utwardzanie laserowe żeliwa szarego niskostopowego. I Ogólnopolska Konferencja Naukowa nt: Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni. Łódź 1994
- [9] Pertek A., Kulka M., Jankowiak M., Józwiak K., Nowak I., Wpływ obróbki laserowej po borowaniu i nawęglaniu na strukturę i właściwości stali konstrukcyjnych. Inżynieria Powierzchni, nr 2/2002, str. 16-25
- [10] Riahi M.: Surface treatment of cast iron by adding different alloying elements to form a metallic glass structure layer using an industrial carbon dioxide laser. Journal of Materials Processing Technology 58 (1996)
- [11] Xiao R., Li Z.: Formation of diamond-clusters within a surface layer of carbon steel/cast iron induced by excimer laser irradiation, Applied Surface Science 127-129 (1998), 826-830.