



Zastosowanie metody różnic skończonych do modelowania fali ciśnienia generowanej nanosekundowym impulsem laserowym w stali i aluminium

ANTONI SARZYŃSKI, WOJCIECH NAPADŁEK*, JAN MARCZAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Techniki Wojskowej, Instytut Optoelektroniki,

*Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Mechanicznych i Transportu,

00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki prac teoretycznych i eksperymentalnych, dotyczących umacniania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych za pomocą impulsowego promieniowania laserowego. Opisano wyniki numerycznego modelowania impulsu ciśnienia generowanego przez impuls laserowy oraz propagacji fali uderzeniowej. Przedstawiono wyniki modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej wybranych stopów. Stosowano laser Nd:YAG o energii w impulsie około 0,5 J i czasie trwania 10 ns. Badania modyfikowanej powierzchni obejmowały obserwacje za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) oraz analizę topografii powierzchni przy użyciu profilometru.

Słowa kluczowe: warstwa powierzchniowa, kulowanie laserowe, generacja fali uderzeniowej, topografia powierzchni

Symbole UKD: 621.793

1. Wprowadzenie

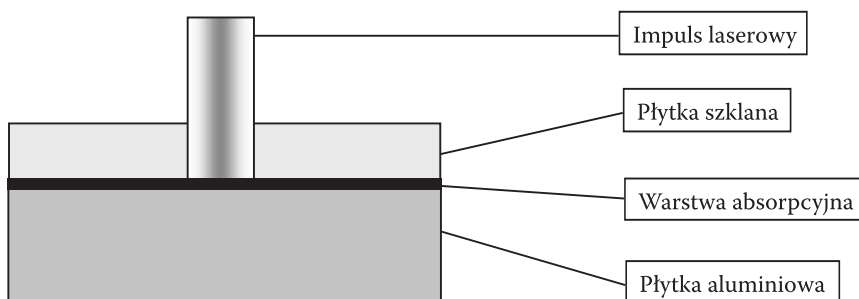
Wkrótce po zbudowaniu pierwszego lasera zauważono, że za pomocą promieniowania impulsowego o wysokim natężeniu (10^9 - 10^{10} W/cm²) można łatwo generować fale uderzeniowe w ciałach stałych [1-5]. Pierwsze eksperymenty polegały na bezpośrednim naświetlaniu odkrytej powierzchni metalu przez impuls laserowy [5]. Szybko odkryto, że można znacznie zwiększyć amplitudę tego impulsu ciśnienia i wydłużyć czas jego trwania, jeśli przed obróbką powierzchnia metalu zostanie pokryta cienką (ułamki milimetra) warstwą absorbującą promie-

niowanie laserowe oraz grubszą (kilka milimetrów) warstwą inercyjną hamującą szybkość ekspansji plazmy [1-3, 7, 8].

Promieniowanie laserowe może działać bezpośrednio na odsłoniętą powierzchnię metalu. Następuje wówczas lokalne topienie (czasami niepożądane) i uszkodzenie powierzchni, a amplituda impulsu ciśnienia nie osiąga wartości najwyższej z możliwych, gdyż metale na ogół dobrze odbijają promieniowanie, a powstająca plazma może swobodnie ekspandować i zwiększać swoją objętość oraz odbijać promieniowanie, co powoduje, że tylko niewielka część energii impulsu jest wykorzystana na wytworzenie impulsu ciśnienia, duża jej część bezproduktywnie podgrzewa gorącą plazmę, natomiast większość energii ulega odbiciu przez plazmę.

Obrobioną powierzchnię można pokryć cienką warstwą absorpcyjną (farba, ołów itp. o grubości kilku mikrometrów), która ma zwiększyć absorpcję promieniowania (przynajmniej w fazie początkowej) oraz nie dopuścić do penetracji fali cieplnej w głąb metalu. Również w tym przypadku szybka ekspansja plazmy do atmosfery ogranicza amplitudę impulsu ciśnienia wytwarzanego w próbce.

Szybkość ekspansji plazmy można ograniczyć za pomocą tzw. warstwy inercyjnej (płytki szklanej, warstwy wodnej lub innego dielektryka przezroczystego dla promieniowania) o grubości kilku milimetrów umieszczonej na warstwie absorpcyjnej. Taka trójwarstwowa konfiguracja **metal + warstwa absorpcyjna + warstwa inercyjna** (rys. 1) jest powszechnie stosowana przy laserowej obróbce mającej na celu wytworzenie na powierzchni metali trwałej warstwy z naprężeniami ściskającymi (tzw. kulowanie laserowe lub umacnianie falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym, ang. *Laser Shot Peening* — LSP) [1-3]. Warstwa inercyjna może o rząd wielkości zwiększyć amplitudę impulsu ciśnienia oraz kilkakrotnie wydłużyć czas jego trwania.



Rys. 1. Konfiguracja układu eksperymentalnego

W niniejszym artykule opisano wyniki numerycznego modelowania wpływu warstwy inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia powstającego w próbkach aluminium i stali. Przedstawiono także wyniki prac eksperymentalnych.

2. Numeryczne modelowanie generacji fali uderzeniowej

Opracowano kod hydrodynamiczny [9, 10], za pomocą którego modelowano absorpcję promieniowania oraz ciśnienie, temperaturę i gęstość ekspandującej plazmy. Podstawowy układ równań różniczkowych cząstkowych opisujących interesujący nas problem wynika z praw zachowania masy, pędu i energii. W przypadku jednowymiarowym i geometrii płaskiej ma on następującą postać (w równaniach nie uwzględniono przemian fazowych, takich jak topnienie czy parowanie) [9]:

równanie zachowania masy:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

równanie zachowania pędu

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

równanie zachowania energii

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = -p \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial q^+}{\partial z} + \frac{\partial q^-}{\partial z} - \rho K_{re} - Q_S, \quad (3)$$

gdzie:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial z} \quad (4)$$

jest tzw. pochodną substancjalną.

W równaniach (1)-(3), poszczególne wielkości oznaczają: ρ — gęstość; v — prędkość masową; p — ciśnienie; ε — energię wewnętrzną właściwą; t — czas; z — zmienną przestrzenną; T — temperaturę; χ — współczynnik przewodnictwa cieplnego; Q_S — straty energii na jonizację; q^+ , q^- — strumienie promieniowania laserowego pochłaniane w ośrodku, przy czym: q^+ — strumień padający; q^- — strumień odbity od powierzchni krytycznej i wracający w kierunku powierzchni; K_{re} — człon opisujący uśrednione oddziaływanie promieniowania własnego (promieniowania ośrodków wzbudzonych, promieniowania plazmy) z materiałem.

W obliczeniach numerycznych potrzebne są charakterystyki stosowanych materiałów (termodynamiczne, mechaniczne i optyczne) opisywane kilkudziesięcioma stałymi [11]. Dane takie dla większości materiałów z różnych przyczyn są nieosiągalne, dlatego użyto danych dla materiałów o znanych charakterystykach. Podejście takie jest całkowicie wystarczające do przeprowadzenia obliczeń o charakterze jakościowym. Dlatego przyjęto, że warstwę absorpcyjną stanowi

grafit, obrabianym metalem jest aluminium lub stal, a działanie warstwy inercyjnej sprowadzono do warunku na ciśnienie brzegowe. Wpływ warstwy inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia modelowano w ten sposób, że na zewnętrznym brzegu warstwy absorpcyjnej zadawano ciśnienie zewnętrzne w następujący sposób:

$$P_{zewn} = \rho_{zewn} v_b^2, \quad (5)$$

gdzie: v_b — prędkość zewnętrznej powierzchni warstwy absorpcyjnej;
 ρ_{zewn} — gęstość warstwy inercyjnej przylegającej do warstwy absorpcyjnej (powietrze, woda lub ciężkie szkło);
 $\rho_{zewn} = 0,001 \text{ g/cm}^3$ (powietrze), 1 g/cm^3 (woda) oraz ∞ (sztywna ściana).
 Ostatni warunek wymuszano, zadając $v_b = 0$ (zerowa prędkość zewnętrznej płaszczyzny warstwy absorpcyjnej).

Dla grafitu zastosowano równanie stanu w formie Grüneisena [9, 10, 13]. Stopień jonizacji węgla wyznaczano z modelu Thomasa-Fermiego [12]. Współczynnik absorpcji promieniowania laserowego obliczano tak jak w plazmie [4, 9, 10]. Transport promieniowania opisano w przybliżeniu ciała szarego [10]. Równania (1)-(3) rozwiązywano numerycznie metodą różnic skończonych, stosując jawny schemat różnicowy.

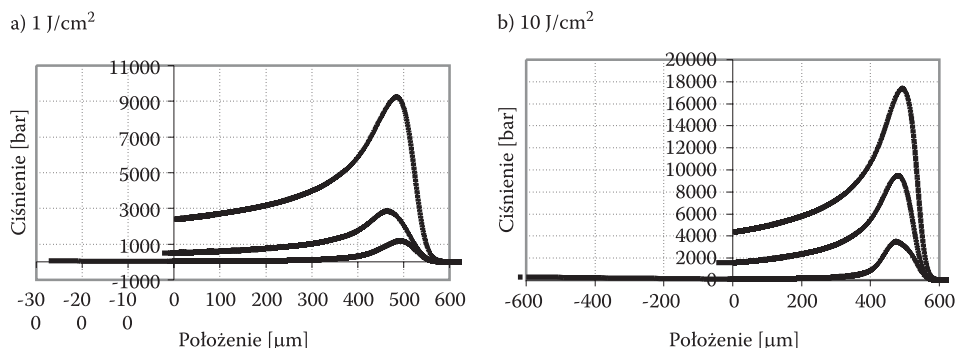
3. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych

Wykonano obliczenia numeryczne, których celem było oszacowanie wpływu warstwy absorpcyjnej i inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia powstającego w obrabianych próbkach metalu.

Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla impulsu laserowego o kształcie trójkąta i czasie trwania 10 ns. Przyjęto, że warstwę absorpcyjną stanowi grafit o grubości 5 μm , a obrabianym metalem jest blacha aluminiowa lub stalowa o grubości 0,6 mm (taka grubość została wymuszona przez moc obliczeniową użytego komputera). Obliczenia prowadzono do czasu 100 ns, dlatego impuls ciśnienia nie docierał do tylnej ścianki blachy. Promieniowanie, które weszło do warstwy absorpcyjnej nagrzewa ją, jonizuje i wytwarza plazmę. Promieniowanie propaguje się do tzw. koncentracji krytycznej, gdzie ulega odbiciu i propaguje się w kierunku zewnętrznym.

Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady ciśnienia w folii aluminiowej dla dwóch gęstości energii impulsu laserowego 1 i 10 J/cm^2 , po upływie 100 ns od początku impulsu laserowego.

Warstwy: absorpcyjna i inercyjna zwiększają amplitudę impulsu ciśnienia od trzech do dziesięciu razy. Prędkość propagacji impulsu w zasadzie nie zależy od

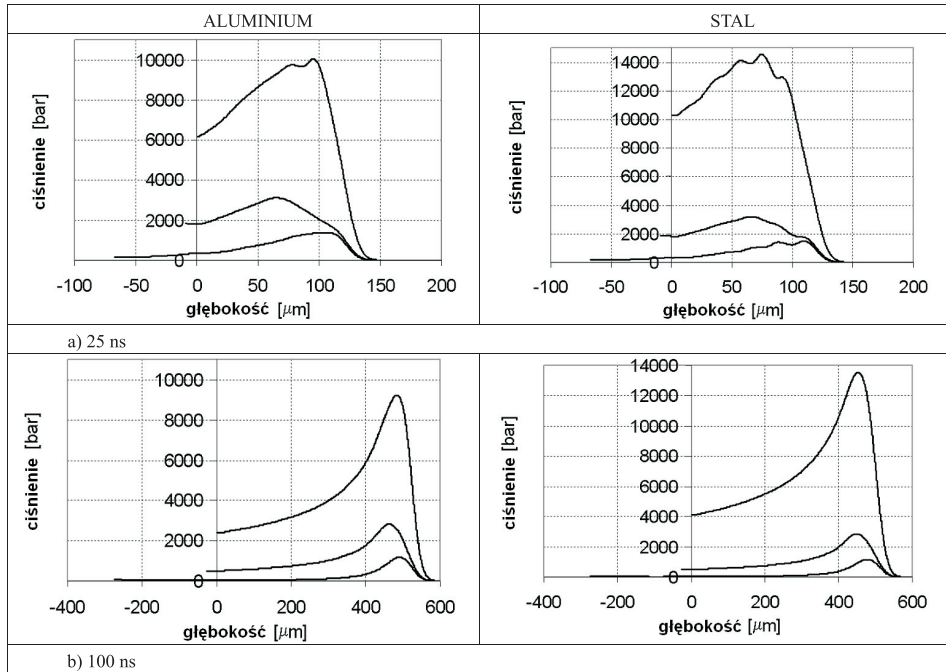


Rys. 2. Wpływ warstwy inercyjnej na kształt impulsu ciśnienia propagującego się w próbce aluminium po upływie 100 ns od początku impulsu laserowego, dla dwóch gęstości energii impulsu laserowego, połowkowy czas trwania impulsu $\tau = 10$ ns (dolna krzywa — brak warstwy inercyjnej; środkowa krzywa — wodna warstwa inercyjna; górna krzywa — sztywna ściana)

jego amplitudy, co wynika z faktu, że występujące tu fale uderzeniowe są falami słabymi. Zmiany gęstości wynoszą co najwyżej 10%. Silne fale uderzeniowe w ciałach stałych występują dopiero przy ciśnieniach powyżej 10^5 - 10^6 barów (10-100 GPa), natomiast tutaj amplituda impulsu ciśnienia nie przekracza 5 GPa.

Zwiększenie gęstości energii do 100 J/cm^2 (maksymalne natężenie wiązki miało więc średnią wartość 10 GW/cm^2) spowodowało wzrost amplitudy impulsu ciśnienia do wartości około 5 GPa, ale nawet przy tym ciśnieniu prędkość propagacji fali uderzeniowej w zasadzie niewiele odbiega od prędkości dźwięku, a kompresja za frontem fali nie przekracza 10%.

Amplituda impulsu ciśnienia zależy przede wszystkim od parametrów warstw: absorpcyjnej i inercyjnej. Wpływ podłoża na kształt impulsu ciśnienia daje się zauważyć tylko przy krótkich czasach (rys. 3a). Amplituda impulsu ciśnienia w zasadzie nie zależy od rodzaju podłoża. Tylko przy najsilniejszym warunku brzegowym (sztywna ściana — bardzo ciężki ośrodek inercyjny w praktyce niespotykany) amplituda impulsu ciśnienia w stali wzrasta o około 40% w porównaniu z aluminium. Gdy warstwa inercyjna jest dostatecznie ciężka, to również właściwości obrabianego podłoża wpływają na charakterystyki impulsu ciśnienia (rys. 3).



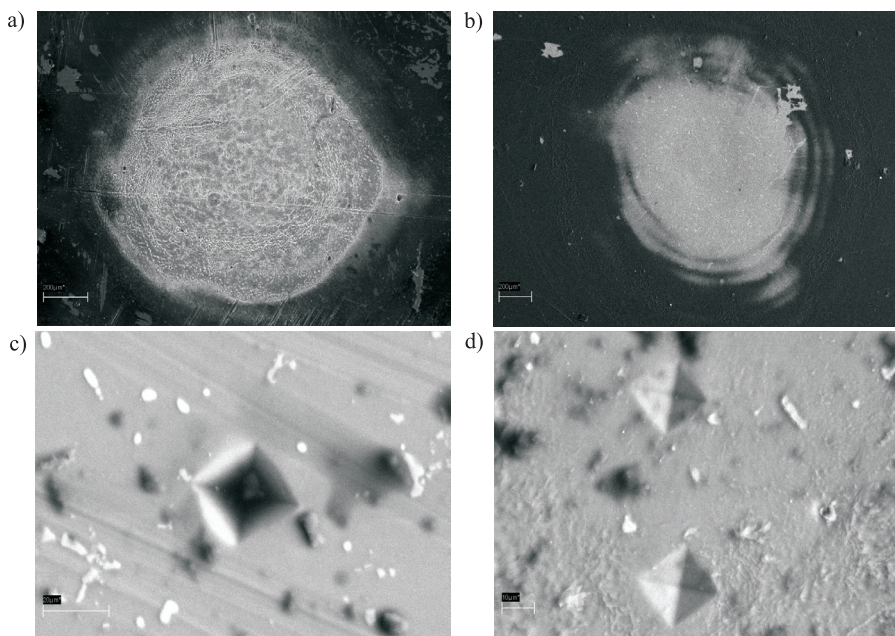
Rys. 3. Rozkłady ciśnienia w dwóch chwilach czasu przy gęstości energii impulsu laserowego 1 J/cm^2 i czasie trwania 10 ns, dla trzech warstw inercyjnych i dwóch rodzajów podłoża (dolne krzywe — powietrze, brak warstwy inercyjnej; środkowe krzywe — wodna warstwa inercyjna; górne krzywe — sztywna ściana)

4. Badania własne

W celu umocnienia warstwy powierzchniowej stopu aluminium PA 31 (ENAW-2618A) przeprowadzono laboratoryjne badania porównawcze przy wykorzystaniu specjalistycznego lasera impulsowego ReNOVALaser 5-Nd:YAG z Q -modulacją. W badaniach stosowano długość fali $\lambda = 1,064 \text{ μm}$.

Udarowe umacnianie laserem Nd:YAG daje możliwość wykonywania kontrolowanego i powtarzalnego procesu, który zależnie od przyjętych warunków obróbki (zwłaszcza gęstości energii q i czasu trwania impulsu) może być prowadzony przy małych gęstościach energii bez uszkodzania podłoża (przy zastosowaniu powłoki absorpcyjnej oraz poprzez wielokrotne powtórzenie procesu w strefie umacnianej) lub przy znacznie większych wartościach q , powodujących rozwinięcie powierzchni (rys. 4 i 5).

Na rysunku 4 przedstawiono ogólny widok warstwy powierzchniowej po kulowaniu, a na rysunku 5 — profilogramy obrazujące odkształcenie plastyczne.



Rys. 4. Topografia powierzchni stopu aluminium PA31 (ENAW-2618A) po obróbce impulsem lasera Nd: YAG przy gęstości energii ok. 33 J/cm^2 , jeden impuls laserowy: a) powierzchnia próbki szlifowana, pokryta grafitem koloidalnym; b) powierzchnia próbki polerowana, pokryta grafitem koloidalnym i ograniczona warstwą inercyjną (woda + szkło); c, d) widok charakterystycznych odcisków węgelnika po badaniach mikrotwardości (50G) w materiale wyjściowym (c) oraz w materiale umocnionym kulowaniem laserowym w wariancie z rysunku b (d) — pomiar w środkowej strefie umocnienia; mikroskopia elektronowa skaningowa (SEM)

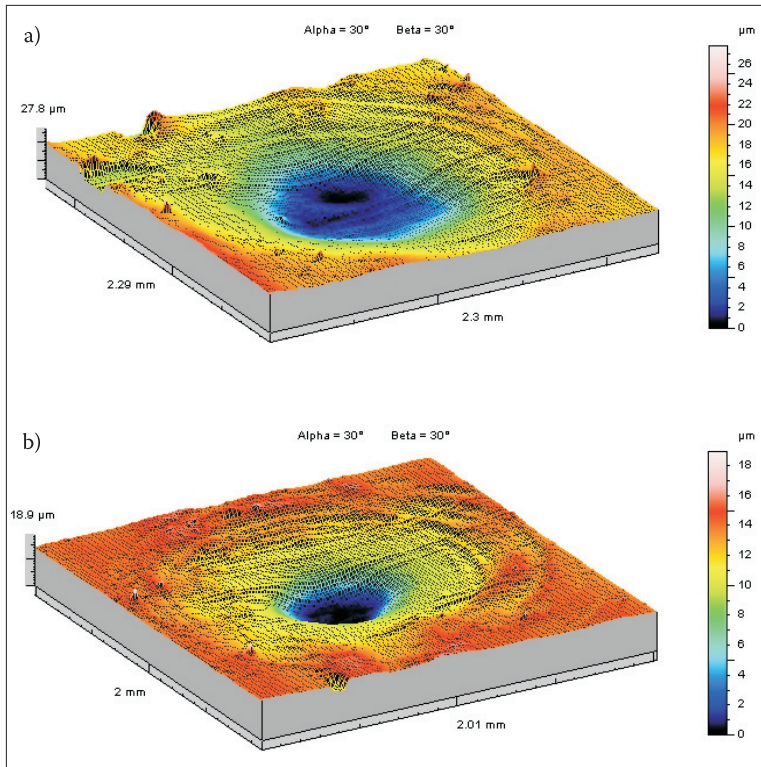
Efekt ten jest spotęgowany w obecności medium inercyjnego, jakim jest np. woda lub woda i szkło.

Zastosowanie powłoki absorpcyjnej z systemem warstw inercyjnych (woda lub woda + szkło) pozwala na uzyskanie ciśnień nawet do ok. 5 GPa, czyli na uzyskanie znacznych odkształceń plastycznych stopu aluminium (rys. 5), a tym samym znacznych naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej. Przeprowadzone pomiary mikrotwardości w środku strefy umocnienia wykazały jej wzrost nawet do 40% w stosunku do materiału wyjściowego.

Obecność powłoki absorpcyjnej o odpowiedniej grubości pozwala również na znaczne zmniejszenie efektu ablacji laserowej materiału aluminium (rys. 4 i 5). Zastosowanie systemu z warstwą inercyjną ma również istotny wpływ na topografię powierzchni, tj. ogranicza wzrost jej chropowatości.

Aby osiągnąć zamierzony efekt, tj. znaczne umocnienie warstwy wierzchniej stopu aluminium PA31(ENAW-2618A) bez ubocznych efektów nadtopień, w drugim etapie badań zostaną przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne

z absorpentami i warstwami inercyjnymi o różnych grubościach. Pozwoli to na opracowanie podstaw technologii udarowego umacniania laserowego w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 5. Efekty umocnienia stopu aluminium PA31 (ENAW-2618A) w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej generowanej impulsem laserowym (laser Nd:YAG, różne gęstości energii, absorpent — grafit koloidalny); profilogramy stref umocnionych i odkształconych plastycznie: a) 20 J/cm^2 , jeden impuls laserowy; b) 33 J/cm^2 , jeden impuls laserowy (por. rys. 4d)

5. Wnioski

1. Przeprowadzone badania wstępne dowiodły, że przy odpowiednio dobranych parametrach technologicznych procesu kulowania laserowego (gęstość energii w wiązce laserowej, czas ekspozycji, powłoka absorpcyjna i inercyjna) możliwe jest uzyskanie znacznego odkształcenia plastycznego świadczącego o umocnieniu warstwy wierzchniej.
2. Dzięki prowadzeniu umocnienia laserowego metodą LSP przy różnych gęstościach energii w wiązce laserowej bez warstwy absorpcyjnej, uzyskiwano umocnienie oraz różne rozwinięcie powierzchni. Zastosowanie odpowiednio

dobranej warstwy absorpcyjnej i inercyjnej pozwala na uzyskanie zamierzonych efektów bez nadtopień warstwy powierzchniowej.

3. W następnym etapie badań przebiegi ciśnień wyznaczone w niniejszej pracy zostaną wykorzystane w modelowaniu numerycznym metodą elementów skończonych (MES), jako zadane ciśnienie brzegowe. Możliwe będzie wówczas oszacowanie deformacji plastycznej oraz naprężeń własnych.
4. Aby zrealizować postawiony cel badań związanych z doбором parametrów technologicznych umacniania stopu PA31 falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym, w najbliższym czasie zostaną przeprowadzone eksperymenty w zakresie:
 - pomiaru stanu naprężeń własnych po kulowaniu laserowym przy różnych parametrach obróbki laserowej (q , t , różne absorbenty i warstwy inercyjne), różnych układach stref umocnionych;
 - badań właściwości mechanicznych ($R_{0,2}$, R_m , HB) oraz zmęczeniowych na próbkach i porównanie ich z właściwościami materiału wyjściowego.

Praca została wykonana w ramach grantu PBG nr 3T08C03926.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w sierpniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] N. B. DAHOTRE, T. S. SUDARSHAN (eds), *Lasers in Surface Engineering*, ASM International, 1998.
- [2] G. HAMMERSLEY, L. A. HACKEL, F. HARRIS, *Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening*, *Optics and Lasers in Engineering*, 34, 2000, 327-337.
- [3] C. S. MONTROSS, T. WEI, L. YE, G. CLARK, Y-W. MAI, *Laser shock processing and its effect on microstructure and properties of metal alloys: a review*, *International Journal of Fatigue*, 24, 2002, 1021-1036.
- [4] M. YON ALLMEN, A. BLATTER, *Laser-Beam Interactions with Materials*, Springer, 1995.
- [5] С. И. АНИСИМОВ, Я. А. ИМАС, Г. С. РОМАНОВ, Ю. В. ХОДЬКО, *Действие излучения большой мощности на металлы*, Наука, Москва, 1970.
- [6] K. PRZYBYŁOWICZ, *Metaloznawstwo*, wyd. 5, WNT, Warszawa, 1996.
- [7] J. MARCZAK, A. SARZYŃSKI, *Fotony w oczyszczaniu powierzchni*, *Problemy Eksploatacji — Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji*, t. 54, nr 3, 2004, 103-122.
- [8] T. BURAKOWSKI, J. MARCZAK, W. NAPADLEK, A. SARZYŃSKI, *Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej stopów metali falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym — stan aktualny oraz perspektywy*, *Problemy Eksploatacji — Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji*, t. 54, nr 3, 2004, 83-102.
- [9] K. JACH, A. MORKA, M. MROCZKOWSKI, R. PANOWICZ, A. SARZYŃSKI, W. STĘPNIEWSKI, R. ŚWIERCZYŃSKI, J. TYL, *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2001.

- [10] J. MARCZAK, *Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej*, Wydawnictwo Bel Studio, Warszawa, 2004.
- [11] V. E. FORTOV, I. V. LOMONOSOV, *Thermodynamics of Extreme States of Matter*, Chernogolovka: Inst. Chem. Phys., 1998.
- [12] S. ELIEZER, A. GHATAK, H. HORA, E. TELLER, *An introduction to equations of state — Theory and applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [13] G. I. KERLEY, L. CHHABILDAS, *Multicomponent-Multiphase Equation of State for Carbon*, Sandia Report, SAND2002-2619, September, 2001.

A. SARZYŃSKI, W. NAPADŁEK, J. MARCZAK

Numerical modelling of shock waves in metals generated by a laser pulse

Abstract. The paper presents the description of strengthening of the top layer of selected constructional materials using pulse laser radiation. The preliminary results of modification of the characteristics of selected alloys surface layers will be presented. The source of radiation was Nd:YAG laser with pulse energy of 0.5 J and pulse width of 10 ns. Investigations cover observations with scanning microscope (SEM) as well as topographic surface analysis using profilometer.

Keywords: superficial layer, laser ball peening, shock wave generation, surface topography

Universal Decimal Classification: 621.793