



Analiza pomiarów ciśnienia fali uderzeniowej w eksperymentach laserowego umacniania udarowego

ANTONI SARZYŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy opisano metodę laserowego umacniania udarowego pozwalającą nawet dziesięciokrotnie zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową niektórych części metalowych. Opracowanie technologii tej obróbki nadającej się do wdrożenia przemysłowego wymaga m.in. pomiaru ciśnienia fal uderzeniowych. Ciśnienie fal mierzono za pomocą polimerowego czujnika ciśnienia typu PVDF. Zamieszczono porównanie wyników pomiarów oraz numerycznego modelowania wzbudzenia i propagacji fal uderzeniowych przez impulsowe promieniowanie laserowe. Do modelowania wykorzystano równania hydrodynamiki w przybliżeniu jednowymiarowym, które rozwiązywano metodą różnic skończonych. Wyjaśniono, w jaki sposób modyfikacja eksperymentu związana z pomiarem ciśnienia zakłóca proces laserowego umacniania udarowego. Mimo stosowania uproszczonego modelu numerycznego uzyskano niezłą zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Zamieszczone porównania pozwalają wyciągać wnioski dotyczące rzeczywistej wartości amplitud fal w ośrodkach bezpośrednio stykających się z czujnikiem.

Słowa kluczowe: laserowe umacnianie udarowe, fala uderzeniowa, modelowanie numeryczne, czujnik ciśnienia PVDF

Symbole UKD: 621.375.826.004.14

Wstęp

Rozwój techniki laserowej, jaki nastąpił w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, spowodował gwałtowny wzrost zastosowań promieniowania laserowego do obróbki materiałów. Zdecydowana większość tych metod wykorzystuje promieniowanie do powierzchniowej obróbki cieplnej. Istnieje także metoda wykorzystująca laserowo

wzbudzone fale uderzeniowe do powierzchniowej obróbki plastycznej na zimno. Nosi ona nazwę „laserowe umacnianie udarowe” (ang. *Laser Shock Peening* — w skrócie LSP). Metoda umożliwia nawet dziesięciokrotne zwiększenie odporności zmęczeniowej części metalowych, np. tytanowych łopatek turbin silników lotniczych. Metoda jest droga i ma jeszcze niską wydajność, ale mimo to już jest wykorzystywana na skalę przemysłową. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są intensywne prace badawcze zmierzające do zwiększenia jej efektywności i wydajności [1-7].

Optymalizacja metody wymaga m.in. pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej. Do detekcji tych fal stosuje się m.in. czujniki piezoelektryczne wykonane z polimeru PVDF [8-12]. Obszar aktywny tych czujników może mieć niewielkie wymiary, nawet $1 \times 1 \text{ mm}^2$, dzięki czemu nadają się one do detekcji fal wzbudzanych przez impulsy laserowe o małej energii. Pomiar ciśnienia fali uderzeniowej został szerzej opisany przez autora we wcześniejszych pracach [12, 13].

Badana próbka powinna być dostatecznie cienka, by nie nastąpiło zbyt silne stłumienie fali. Czujnik musi się stykać bezpośrednio z ośrodkiem, w którym propaguje się badana fala. Właściwości mechaniczne (przede wszystkim gęstość i prędkość dźwięku) materiału próbki i czujnika na ogół są różne, a to powoduje zakłócenie propagacji badanej fali. Czujnik wskazuje ciśnienie fali występującej w jego wnętrzu, które ma na ogół inną wartość niż ciśnienie fali w badanej próbce. W niniejszej pracy podjęto próbę wyjaśnienia związku między wynikiem pomiaru a wartością ciśnienia w badanej próbce.

Laserowe umacnianie udarowe

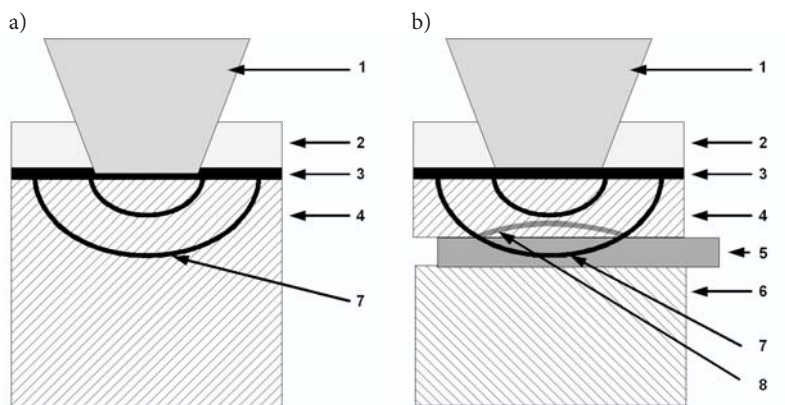
Wśród laserowych metod modyfikacji warstwy wierzchniej metali za pomocą promieniowania laserowego można wyróżnić dwie grupy: metody powierzchniowej obróbki cieplnej i metody powierzchniowej obróbki plastycznej na zimno.

W procesie powierzchniowej obróbki cieplnej energia promieniowania laserowego służy do podgrzania lub przetopienia cienkiej warstwy na powierzchni próbki w celu zainicjowania przemian chemicznych lub fazowych (albo chemicznych i fazowych jednocześnie) powodujących zmianę właściwości warstwy wierzchniej. Objętość przetopionego materiału jest bardzo mała, dzięki czemu następujące potem chłodzenie i krzepnięcie przebiega niezwykle szybko. W trakcie tradycyjnego hartowania szybkość chłodzenia może osiągać wartości w zakresie 10^3 - 10^4 K/s [14], natomiast podczas obróbki laserowej może ona osiągać nawet 10^{10} K/s [15]. Przy tak ogromnej szybkości chłodzenia można wytwarzać unikatowe stany materii, nieosiągalne innymi metodami, np. szkła metaliczne. Do obróbki cieplnej najczęściej stosuje się lasery ciągłego działania. Typowym przykładem może być laser CO_2 o mocy 1-10 kW. Metody powierzchniowej obróbki cieplnej stanowią ogromną większość laserowych technologii obróbki materiałów.

Istnieje także niewielka grupa metod wykorzystujących fale uderzeniowe do modyfikacji warstwy wierzchniej. W procesie powierzchniowej obróbki plastycznej na zimno za pomocą promieniowania laserowego, jedynym czynnikiem zmieniającym stan warstwy wierzchniej powinna być fala uderzeniowa, a przyrost temperatury powinien być ograniczony do wartości wynikającej z praw termodynamiki obowiązujących dla przemiany adiabatycznej. Układ eksperymentalny konstruuje się w taki sposób, aby energia promieniowania laserowego posłużyła do wytworzenia fali uderzeniowej o wysokiej amplitudzie i jednocześnie by fala cieplna nie wniknęła w głąb obrabianej warstwy. Wymaganie to może być trudne do spełnienia, gdyż materiał absorbujący promieniowanie laserowe, przechodząc w stan plazmy, nagrzewa się do temperatury rzędu 10^4 - 10^6 K. Aby zapobiec ogrzewaniu, obrabianą powierzchnię pokrywa się specjalną warstwą o działaniu ochronno-ablacyjno-absorpcyjnym. Warstwę absorpcyjną stanowi najczęściej czarna farba (sucha lub mokra) o grubości od 5 do 100 μm . Na warstwie absorpcyjnej umieszcza się jeszcze jedną warstwę — inercyjną (z materiału przezroczystego dla promieniowania laserowego, jak woda, szkło lub kwarc, o grubości nieprzekraczającej kilku mm), która ma zapobiegać szybkiej ekspansji plazmy w powietrze o ciśnieniu atmosferycznym. Plazma powstaje wówczas w małej objętości ograniczonej z jednej strony warstwą inercyjną, z drugiej ochronną, dlatego jej ciśnienie może osiągnąć wysoką wartość, znacznie wyższą niż bez warstwy inercyjnej. Wydłuża się jednocześnie czas życia plazmy. Taka trójwarstwowa konfiguracja **metal-warstwa absorpcyjna-warstwa inercyjna** (rys. 1) jest powszechnie stosowana w metodzie laserowego umacniania udarowego, gdyż pozwala wytworzyć szczytkowe naprężenia ściskające o wysokiej amplitudzie w warstwie obrabianej próbki o grubości 1 mm i więcej. W tej konfiguracji iloczyn amplitudy ciśnienia i czasu życia plazmy może mieć wartość nawet sto razy wyższą niż przy obróbce bez warstw [1-7, 16].

Fala uderzeniowa wytworzona przez impuls promieniowania laserowego wywołuje deformacje plastyczne w metalu. Po przejściu fali, ośrodek dążąc do przywrócenia stanu równowagi, wytwarza w odkształconej plastycznie strefie stan trwałych naprężeń ściskających, a w jej otoczeniu naprężeń rozciągających. Fala uderzeniowa traci energię podczas propagacji, przede wszystkim na dokonanie deformacji plastycznej. Powoduje to tłumienie jej amplitudy. Po przebyciu kilku milimetrów amplituda fali spada do tak małej wartości, że deformacja plastyczna już nie zachodzi. Pomiar ciśnienia fali uderzeniowej należy więc wykonywać przy zastosowaniu cienkich próbek, cieńszych niż w rzeczywistych eksperymentach LSP.

Konieczność modyfikacji eksperymentu laserowego umacniania udarowego związana z pomiarem (rys. 1) powoduje zakłócenie fali uderzeniowej. Fala uderzeniowa padając na granicę kontaktu próbka-czujnik ulega podziałowi na falę odbitą i falę przechodzącą. W przypadku słabych fal uderzeniowych można zastosować przybliżenie liniowe, wówczas podział energii między falę odbitą a przechodzącą



Rys. 1. Schematy laserowego umacniania udarowego: a) — układ do obróbki grubych próbek bez pomiaru ciśnienia; b) układ z cienką próbką i jednoczesną rejestracją profilu ciśnienia fali uderzeniowej: 1 — wiązka laserowa, 2 — warstwa inercyjna przezroczysta dla promieniowania laserowego (szkło lub woda), 3 — warstwa absorpcyjna (czarna farba), 4 — obrabiana próbka, 5 — czujnik PVDF, 6 — podłoże (płytką z teflonu, PVDF lub Al), 7 — front padającej fali uderzeniowej, 8 — front fali uderzeniowej odbitej na granicy próbka-czujnik

zależy od wartości ilorazu impedancji akustycznych stykających się ośrodków, a współczynniki transformacji wyrażają się wzorami [17]:

$$P = \frac{2A}{1+A}; \quad R = \frac{A-1}{A+1}; \quad A = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}, \quad (1)$$

gdzie: A — iloraz impedancji akustycznych;

P — względna amplituda fali przechodzącej z ośrodka 1 do ośrodka 2;

R — względna amplituda fali odbitej od granicy ośrodków.

Z wzoru (1) wynika, że w czujniku PVDF (mała impedancja $\rho_2 = 1,8 \text{ g/cm}^3$, $c_2 = 2200 \text{ m/s}$), stykającym się np. z brązem (duża impedancja $\rho_1 = 8,5 \text{ g/cm}^3$, $c_1 = 4500 \text{ m/s}$), amplituda fali uderzeniowej będzie o rząd niższa od tej w warstwie brązu. Jednak w układzie pomiarowym występują wielokrotne odbicia, co prowadzi do interferencji fal, a to znacznie komplikuje fizykę zjawiska. Ponadto amplituda fali uderzeniowej nie powinna przekraczać kilku GPa, gdyż fale o wyższej amplitudzie mogłyby powodować niszczenie obrabianych próbek metali. Fala o amplitudzie do 10 GPa w każdym metalu może być uważana za falę słabą, gdyż moduł sprężystości przyjmuje w tym przypadku wartości w granicach 100-200 GPa. Jednak w przypadku polimeru PVDF jest to już silna fala, gdyż jego moduł sprężystości ma wartość zaledwie 8 GPa. Z tych powodów rzeczywistą wartość amplitudy fali uderzeniowej w czujniku PVDF i jej związek z wartością ciśnienia w badanej próbce trzeba obliczać numerycznie.

Numeryczne modelowanie generacji fali uderzeniowej

Opracowano kod hydrodynamiczny [18, 19], za pomocą którego modelowano absorpcję promieniowania, ciśnienie, temperaturę i gęstość ekspandującej plazmy oraz wzbudzenie i propagację fal uderzeniowych. Układ równań różniczkowych cząstkowych opisujących proces wynika z praw zachowania masy, pędu i energii. W przypadku jednowymiarowym i w geometrii płaskiej ma on następującą postać (nie uwzględniono przemian fazowych, takich jak topnienie czy parowanie) [19]: równanie zachowania masy

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

równanie zachowania pędu

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z}, \quad (3)$$

równanie zachowania energii

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = -p \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial q^+}{\partial z} + \frac{\partial q^-}{\partial z} - \rho K_{re} - Q_s, \quad (4)$$

gdzie:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial z} \quad (5)$$

jest tzw. pochodną substancjalną.

W równaniach (2-4), poszczególne wielkości oznaczają: ρ — gęstość; v — prędkość masowa; p — ciśnienie; ε — energia wewnętrzna właściwa; t — czas, z — zmienna przestrzenna, T — temperatura, 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} — współczynnik opisujący uśrednione oddziaływanie promieniowania własnego (promieniowania ośrodków wzbudzonych, promieniowania plazmy) z materią.

W obliczeniach numerycznych potrzebne są charakterystyki stosowanych materiałów (termodynamiczne, mechaniczne i optyczne) opisywane kilkudziesięcioma stałymi [18, 19]. Z powodu trudności ze zdobyciem kompletu danych dla wszystkich stosowanych materiałów, przyjęto, że warstwę absorpcyjną stanowi grafit, obrabianym metalem jest aluminium lub brąz, a działanie warstwy inercyjnej sprowadzono do warunku na ciśnienie brzegowe. Takie przybliżenie pozwala na

jakościowy opis zjawiska. Wpływ warstwy inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia modelowano w ten sposób, że na zewnętrznym brzegu warstwy absorpcyjnej zadawano ciśnienie zewnętrzne według wzoru:

$$P_{zewn} = \rho_{zewn} v_b^2, \quad (6)$$

gdzie v_b prędkość zewnętrznej powierzchni warstwy absorpcyjnej (wyznaczana w wyniku rozwiązania układu równań 2-4), 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 [18-20]. Stopień jonizacji węgla wyznaczano z modelu Thomasa-Fermiego [19]. Współczynnik absorpcji promieniowania laserowego obliczano tak jak w plazmie [19-21]. Transport promieniowania opisano w przybliżeniu ciała szarego [19]. Równania (1-3) rozwiązywano numerycznie metodą różnic skończonych, stosując jawny schemat różnicowy.

Podczas obliczeń zauważono pewne niedoskonałości opracowanego programu, np. dyfuzję o charakterze numerycznym, która powodowała szybkie rozmywanie frontów fal uderzeniowych. Negatywny wpływ tej dyfuzji ograniczono, zwiększając liczbę węzłów siatki numerycznej w pewnych przypadkach nawet do 10 000, co wydłużyło czasy obliczeń aż do sześciu godzin na komputerze z procesorem Intel Core 2 Quad Q6600 2,4 GHz. Uzyskano jednak zaskakująco dobre wyniki, które w sposób jakościowy pozwoliły wyjaśnić pochodzenie kształtu poszczególnych profili ciśnienia.

Program nie będzie dokładniej opisywany, gdyż w najbliższym czasie zostanie opracowana jego nowa wersja, mniej ogólna, ale znacznie szybsza i lepiej dostosowana do warunków eksperymentu.

Porównanie wyników obliczeń i pomiarów

Wykonano liczne pomiary fal uderzeniowych wzbudzanych przez impulsowe promieniowanie laserowe. Prawdliwość niektórych pomiarów można było łatwo zweryfikować, jednak część wyników budziła wątpliwości, gdyż trudno było wyjaśnić pochodzenie kształtu profilu ciśnienia fali uderzeniowej czy rozrzut amplitud.

Ponadto pojawił się także problem interpretacji wyników. Czujnik wskazuje ciśnienie, które występuje w jego wnętrzu. Pojawia się zatem pytanie: *Jakie ciśnienie występowało w ośrodkach granicznych z czujnikiem?* Właśnie amplituda fali w ośrodkach sąsiednich jest najbardziej interesująca, gdyż jej wartość decyduje o wynikach obróbki laserowej.

Aby wyjaśnić te kwestie, przeprowadzono modelowanie komputerowe. W trakcie eksperymentu nie kontrolowano wielu parametrów, gdyż głównym celem wykonywanych pomiarów było uruchomienie metody. Nieznane są charakterystyki mechaniczne, termodynamiczne i optyczne zastosowanej warstwy absorpcyjnej, którą była czarna farba natryskiwana na próbkę. W niektórych eksperymentach suszono farbę, w innych farba była mokra. Nieznana była grubość warstwy absorpcyjnej i inercyjnej. Nieznany był skład chemiczny warstwy absorpcyjnej. W programie warstwę absorpcyjną potraktowano jak grafit, gdyż jest to jeden z nielicznych materiałów, dla którego znaleziono komplet niezbędnych danych.

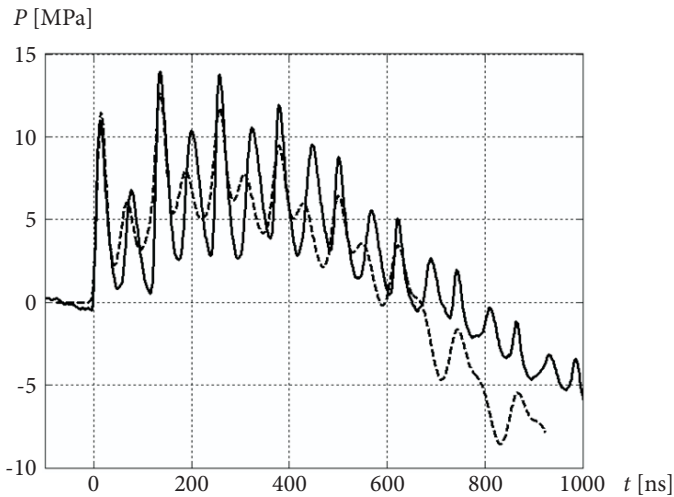
Spośród kilkuset pomiarów zaprezentowane zostaną cztery wybrane przykłady.

Dla każdego z tych przypadków przeprowadzono modelowanie komputerowe. Brak danych spowodował, że obliczenia trzeba było powtarzać wielokrotnie, dopasowując przede wszystkim grubość i wartość współczynnika absorpcji warstwy absorpcyjnej oraz niekiedy charakterystyki mechaniczne (moduł Younga i gęstość) innych ośrodków, w taki sposób, by w obliczeniach odtworzyć wyniki pomiarów. Zadane do obliczeń wartości modułów Younga oraz gęstości niewiele różniły się od danych rzeczywistych. Grubości poszczególnych warstw (z wyjątkiem absorpcyjnej) były znane. Podłoże i warstwa inercyjna miały dużą grubość, dzięki czemu nie dochodziło w nich do cyrkulacji fal. Zmieniało też grubość warstwy czujnika (w zakresie od 75 do 80 μm), co miało na celu uwzględnienie obecności filmu olejowego przyklejającego czujnik do sąsiednich ośrodków. Z obliczeń wynikało, że film olejowy mógł mieć grubość najwyżej 5 μm . W obliczeniach gęstość energii promieniowania zaabsorbowanego przez próbkę dobierano w zakresie od 1 do 3 J/cm^2 , tak by otrzymać fale o takiej samej amplitudzie jak w eksperymencie. Najważniejszym parametrem decydującym o podobieństwie wyników obliczeń do wyników pomiarów był krok siatki numerycznej, który musiał być dostatecznie mały. Szczególne trudności wprowadzała granica czujnik–podłoże. Czujnik miał grubość zaledwie 75 μm , a podłoże co najmniej 4 mm (50 razy więcej!). Poprawne modelowanie odbicia i wnikania fali uderzeniowej na tej granicy było możliwe tylko wtedy, gdy w obydwu warstwach krok przestrzenny miał zbliżoną wartość.

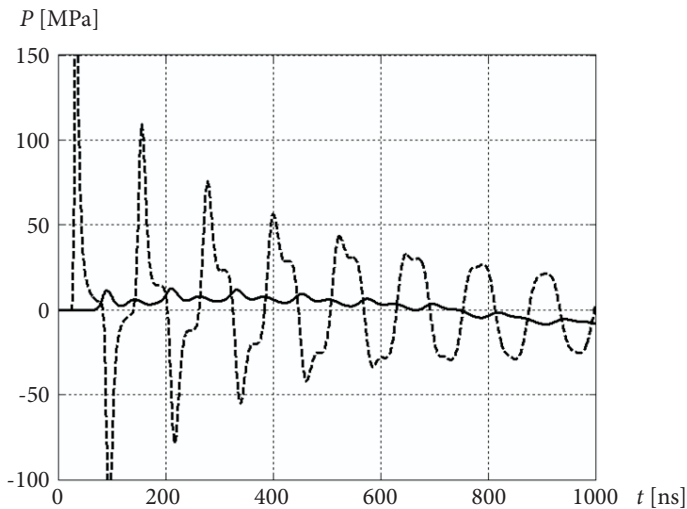
W pierwszym prezentowanym przypadku nie stosowano warstwy inercyjnej, promieniowanie laserowe padało bezpośrednio na warstwę absorpcyjną, którą stanowiła czarna sucha farba naniesiona na płytkę z brązu o grubości 0,3 mm. Pod płytką umieszczony był czujnik PVDF o grubości 75 μm , pokryty cienką warstwą oleju mineralnego o nieznannej grubości (z obliczeń wynikało, że mogła mieć grubość najwyżej kilku mikrometrów). Zadaniem warstwy oleju było zapewnienie dobrego kontaktu mechanicznego polimeru PVDF z sąsiednimi ośrodkami. Obrabiane próbki były umieszczone na podłożu, czyli płycie aluminiowej o grubości około 10 mm. Stosowano impuls laserowy o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm.

W tym przypadku stosunkowo łatwo uzyskano podobieństwo wyników obliczeń do wyników pomiarów. W trakcie obliczeń stwierdzono, że grubość warstwy absorp-

cyjnej ma niezbyt wielki wpływ na profil ciśnienia fali uderzeniowej działającej na czujnik. Wyniki modelowania numerycznego przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Porównanie eksperymentalnego (linia ciągła) i obliczonego (linia przerywana) profilu ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls promieniowania laserowego o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm, w konfiguracji farba-brąz(0,3 mm)-PVDF-podłożeAl



Rys. 3. Porównanie obliczonych wartości ciśnienia w środku warstwy brązu (linia przerywana) i w środku warstwy czujnika (linia ciągła). Impuls promieniowania laserowego o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm, w układzie o konfiguracji farba-brąz(0,3 mm)-PVDF-podłożeAl

Profil ciśnienia fali uderzeniowej ma bardzo skomplikowany kształt. Jest to skutek konfiguracji układu eksperymentalnego. Fala uderzeniowa propaguje się przez układ wielowarstwowy. Każda z warstw ma inne charakterystyki mechaniczne (prędkość dźwięku i gęstość). Na granicy każdej warstwy fala padająca dzieli się na falę odbitą i przechodzącą. Podział energii fali padającej między falę przechodzącą a odbitą zależy od ilorazu impedancji akustycznych stykających się ośrodków (impedancja akustyczna jest to iloczyn gęstości ośrodka i prędkości dźwięku, por. formuła 1).

Wskutek wielokrotnych podziałów powstaje skomplikowany kształt widoczny na rysunku 2. W prezentowanym przypadku wyższe piki są generowane przez falę uderzeniową cyrkulującą we wnętrzu płytki z brązu, zaś niższe piki przez falę cyrkulującą w warstwie czujnika. Stosunkowo niezłą zgodność obserwuje się w zakresie czasów 0-600 ns. Później zgodność jest gorsza, co może być skutkiem efektów dwuwymiarowych (np. powierzchniowe fale Rayleigha czy odbicie fal od płytek mocujących).

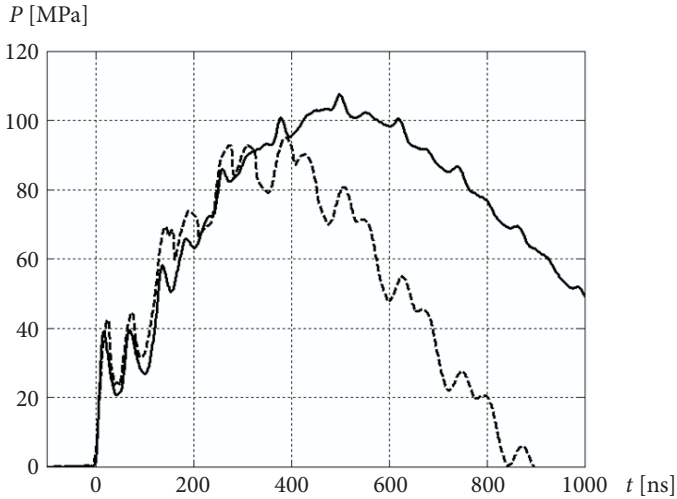
Amplituda fali rejestrowanej przez czujnik nie przekracza 15 MPa, natomiast w warstwie brązu amplituda ta jest o rząd wyższa (rys. 3). Z rysunku 3 można wnioskować, że większość energii fali uderzeniowej nie opuszcza warstwy brązu. Efektywność przekazu energii fali uderzeniowej z warstwy brązu do warstw sąsiednich jest niewielka. Dlatego fala uderzeniowa cyrkuluje głównie we wnętrzu płytki z brązu i powoli traci energię do warstw sąsiednich.

W drugim przypadku zmodyfikowano konfigurację eksperymentu przez dodanie warstwy inercyjnej w postaci słupa wody o grubości kilku milimetrów. Stosowano impuls laserowy o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm.

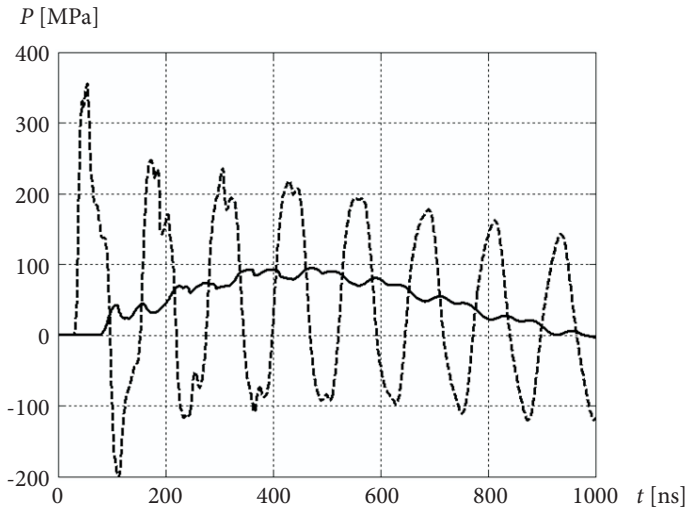
Ten przypadek sprawił najwięcej trudności. Skomplikowane oddziaływania w układzie wielowarstwowym oraz nieznanne charakterystyki warstw spowodowały konieczność żmudnego i stopniowego dobierania w trakcie obliczeń grubości i właściwości optycznych warstwy absorpcyjnej. Obliczenia dla tego przypadku pokazały, że opracowany program ma zbyt małą dokładność i należy przygotować jego nową wersję, mniej ogólną, ale szybszą, dokładniejszą i lepiej dopasowaną do potrzeb eksperymentu.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Na rysunku 4 obserwujemy dość dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów tylko do czasów 400 ns. Potem pojawia się rozbieżność obydwu krzywych. Nie udało się uzyskać lepszej zgodności. Może to być skutek efektów dwuwymiarowych, siłą rzeczy nieuwzględnionych w programie jednowymiarowym przestrzennie.

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie ciśnień w środkach warstwy brązu i czujnika. Również i w tym przypadku iloraz amplitud fal zależy od stosunku impedancji akustycznych sąsiadujących ośrodków. Iloraz amplitud fal uderzeniowych w warstwie brązu i czujnika przybiera wartości w zakresie od 2 do 3 (rys. 5), a więc znacznie mniej niż w poprzednim przypadku.



Rys. 4. Porównanie eksperymentalnego (linia ciągła) i obliczonego (linia przerywana) profilu ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls promieniowania laserowego o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm, w układzie o konfiguracji woda-farba-brąz (0,3 mm)-PVDF-podłożeAl

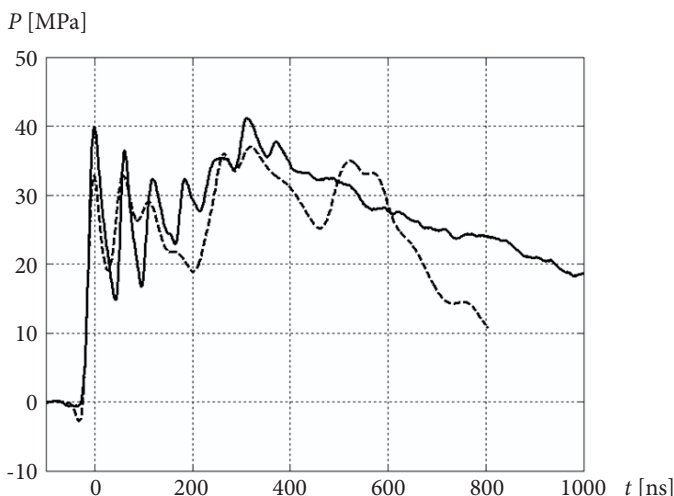


Rys. 5. Porównanie wartości ciśnienia w środku warstwy brązu (linia przerywana) i w środku warstwy czujnika (linia ciągła). Impuls promieniowania laserowego o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm, w układzie o konfiguracji woda-farba-brąz(0,3 mm)-PVDF-podłożeAl

W trzecim przypadku zamieniono płytkę z brązu na płytkę aluminiową o grubości 1 mm. Jako podłoże nadal stosowano płytkę aluminiową o grubości 10 mm, a rolę warstwy inercyjnej pełnił słup wody o grubości kilku milimetrów. Stosowano

impuls laserowy o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm. Płytkę obrabianą i podłoże były wykonane ze stopów aluminiowych różnych gatunków o odmiennych właściwościach.

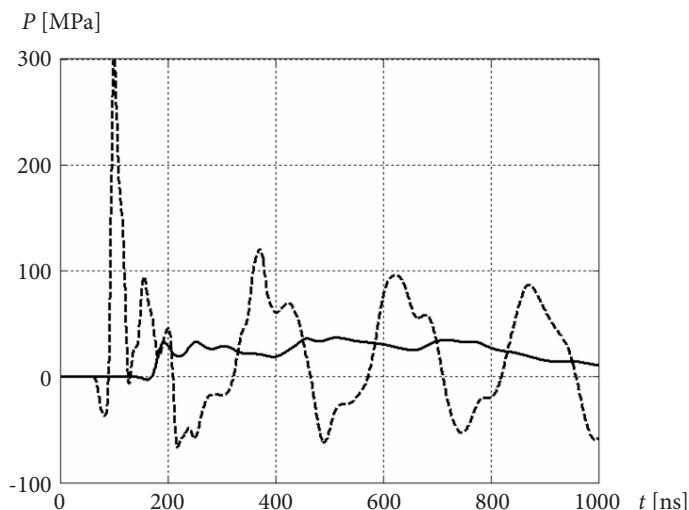
Pozostałe warunki eksperymentu były takie same jak w przypadku II. Impuls ciśnienia fali uderzeniowej miał jednak w tym przypadku mniejszą amplitudę, bo tylko 40 MPa, podczas gdy poprzednio osiągnięto ponad 100 MPa (we wnętrzu czujnika!). Rozrzut amplitud może być skutkiem fluktuacji charakterystyk impulsu laserowego, bądź innych właściwości warstwy absorpcyjnej. Porównanie wyników pomiarów i obliczeń przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Również w tym przypadku obserwujemy niezłą zgodność ilościową do czasu około 400 ns, potem różnice się zwiększają (rys. 6).



Rys. 6. Porównanie eksperymentalnego (linia ciągła) i obliczonego (linia przerywana) profilu ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls promieniowania laserowego o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm, w układzie o konfiguracji woda-farba-Al(1 mm)-PVDF-podłożeAl

Z rysunku 7 wynika, że iloraz amplitud ciśnień fal uderzeniowych w czujniku PVDF oraz w płytce aluminiowej ma wartość rzędu 10, co oznacza, że amplituda fali uderzeniowej w płytce aluminiowej jest znacznie wyższa niż we wnętrzu czujnika. Po pierwszym cyklu cyrkulacji fali w płytce Al iloraz tych amplitud spada jednak do wartości około 2-3.

W czwartym przypadku jako podłoże zastosowano warstwę handlowego polimeru PVDF, dzięki czemu znacznie zmniejszono odbicie fal na granicy czujnik-podłoże, a to spowodowało znaczne uproszczenie kształtu profilu ciśnienia fali uderzeniowej rejestrowanej przez czujnik. Nie stosowano warstwy inercyjnej.



Rys. 7. Porównanie wartości ciśnienia w środku warstwy aluminium (linia przerywana) i w środku warstwy czujnika (linia ciągła). Impuls promieniowania laserowego o energii około 140 mJ, czasie trwania 15 ns i długości fali 532 nm, w układzie o konfiguracji woda-farba-Al(1 mm)-PVDF-podłożeAl

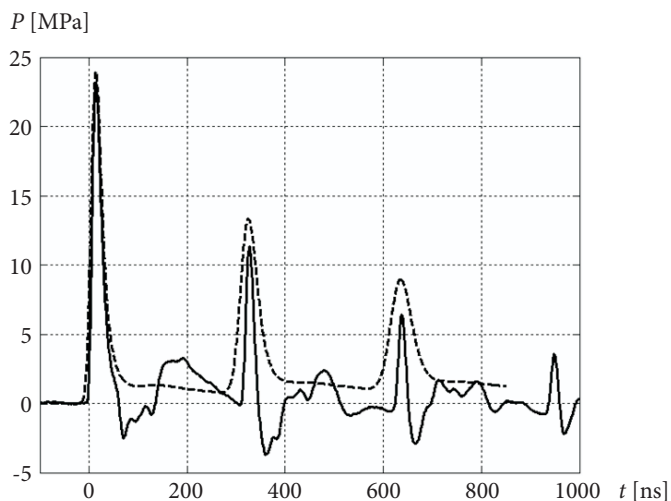
Obrabianym materiałem była płytko aluminiowa o grubości 1 mm. Zarejestrowano niezdeformowany przez odbicia profil ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej w płytce aluminiowej przez impuls laserowy. Stosowano impuls laserowy o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm.

Podczas obróbki laserowej rzeczywistych próbek geometria eksperymentu jest prostsza, przede wszystkim nie występuje w niej czujnik ani podłoże. Zmniejsza się liczba powierzchni odbijających fale uderzeniowe, a kształt profilu ciśnienia ulega znacznemu uproszczeniu. Handlowy polimer PVDF (przynajmniej w założeniu) miał wyeliminować odbicie na granicy czujnik–podłoże. Okazało się, że ma on jednak nieco inne właściwości niż polimer użyty do wyrobu czujnika i odbicia występują, chociaż nie tak silne jak przy podłożu aluminiowym.

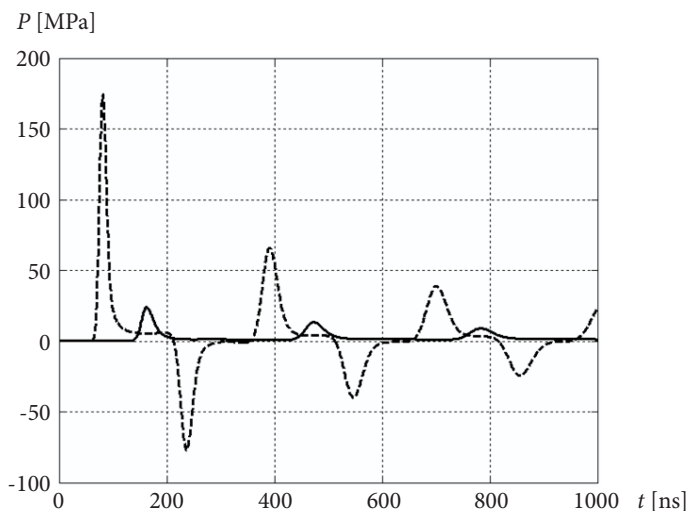
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń dla tego przypadku. Maksymalna amplituda ciśnienia fali uderzeniowej we wnętrzu czujnika przyjmuje wartość około 24 MPa (rys. 9), natomiast we wnętrzu płytki aluminiowej około 180 MPa, a więc o rząd więcej.

W tym przypadku na początku obserwujemy niezłą zgodność wyników obliczeń i pomiarów (rys. 8), która stopniowo pogarsza się, co jest skutkiem dyfuzji numerycznej, charakterystycznej dla stosowanego programu komputerowego. Dyfuzja numeryczna najsilniej ingerowała, gdy impuls ciśnienia był stosunkowo krótki i wysoki.

Amplituda fali uderzeniowej we wnętrzu płytki aluminiowej również w tym przypadku była o rząd wyższa niż we wnętrzu czujnika PVDF (rys. 9).



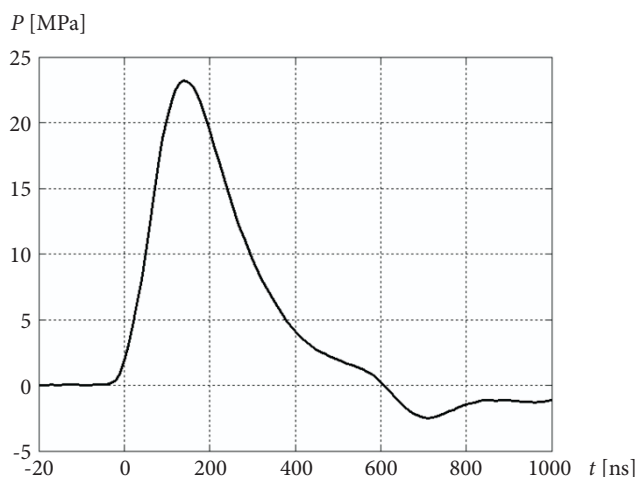
Rys. 8. Porównanie eksperymentalnego (linia ciągła) i obliczonego (linia przerywana) profilu ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls promieniowania laserowego o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm, w układzie o konfiguracji farba-Al(1 mm)-PVDF-podłożePVDF



Rys. 9. Porównanie wartości ciśnienia w środku warstwy aluminium (linia przerywana) i w środku warstwy czujnika (linia ciągła). Impuls promieniowania laserowego o energii około 60 mJ, czasie trwania 4 ns i długości fali 1064 nm, w układzie o konfiguracji woda-farba-Al(1 mm)-PVDF-podłożeAl

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzono komputerowe modelowanie oddziaływania promieniowania laserowego z materiałem w warunkach odpowiadających eksperymentom laserowego umacniania udarowego. Celem prowadzonych obliczeń było wyjaśnienie związku między ciśnieniem zmierzonym przez czujnik a ciśnieniem fali występującej we wnętrzu obrabianych materiałów. W wyniku obliczeń ustalono, że amplituda fali we wnętrzu czujnika jest najczęściej znacznie niższa od tej we wnętrzu obrabianych materiałów. Dowodzi to, że pomiar może wpływać na charakterystyki mierzonego sygnału. W rzeczywistych eksperymentach laserowego umacniania udarowego konfiguracja eksperymentu jest znacznie prostsza. Obrabiana próbka jest zwykle wyraźnie grubsza (co najmniej kilka mm), a w układzie nie występuje czujnik ani podłoże. Warstwy te silnie zmieniają kształt profilu ciśnienia fali uderzeniowej. W rzeczywistych eksperymentach profil fali uderzeniowej działającej na obrabianą próbkę może mieć kształt zaprezentowany na rysunku 10. Na rysunku 10 pokazano zmierzony profil ciśnienia fali (jest to początkowy fragment rysunku 8). Fala uderzeniowa we wnętrzu obrabianej płytki będzie miała ciśnienie o rząd wielkości wyższe.



Rys. 10. Profil ciśnienia fali uderzeniowej w eksperymentach laserowego umacniania udarowego zarejestrowany za pomocą czujnika PVDF

Opanowano umiejętność pomiaru ciśnienia fal uderzeniowych wzbudzanych przez impulsowe promieniowanie laserowe. Poprawna interpretacja uzyskanych wyników wymaga przeprowadzenia modelowania numerycznego w celu obliczenia rzeczywistej wartości amplitud fal w obrabianej próbce. Uzyskane wyniki umożliwiają rozpoczęcie pracy dotyczącej opracowania podstaw technologii laserowego umacniania udarowego. Optymalizacja tej obróbki musi uwzględniać

wiele parametrów jednocześnie, takich jak właściwości optyczne, mechaniczne i termodynamiczne warstwy inercyjnej oraz absorpcyjnej, będzie więc kosztowna, pracochłonna i długotrwała.

Przeprowadzone rozważania pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Amplituda fali uderzeniowej we wnętrzu czujnika PVDF stykającego się z badaną próbką metalową jest zazwyczaj znacznie niższa niż we wnętrzu próbki.
2. Poprawna analiza pomiarów ciśnienia fal uderzeniowych za pomocą czujników PVDF musi uwzględniać zmiany wartości ciśnienia zachodzące podczas przechodzenia fal przez granice ośrodków o różnych impedancjach akustycznych.
3. Czujnik ciśnienia wytwarza sygnał zależny od ciśnienia fali uderzeniowej występującej we wnętrzu czujnika.
4. Metodą modelowania numerycznego zweryfikowano poprawność pomiarów profilu ciśnienia fal uderzeniowych wzbudzanych przez impulsowe promieniowanie laserowe.
5. Uzyskane wyniki umożliwiają rozpoczęcie pracy dotyczącej optymalizacji eksperymentu laserowego umacniania udarowego (dobór właściwości optycznych, mechanicznych i termodynamicznych poszczególnych materiałów w celu zwiększenia odporności zmęczeniowej wybranych materiałów).

Artykuł wpłynął do redakcji 7.09.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2009 r.

LITERATURA

- [1] K. DING, L. YE, *Laser shock processing — Performance and process simulation*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] W. NAPADŁEK, A. SARZYŃSKI, *Influence of Laser Shock Peening on Topography of Ti-6Al-2Cr-2Mo Titanium Alloy Surface Layer (Wpływ umacniania laserowego na topografię warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo)*, Inżynieria Materiałowa, 3-4 (157-158), 2007, 707-711.
- [5] W. H. ZHU, T. X. YU, Z. Y. LI, *Laser-induced shock waves in PMMA confined foils*, International Journal of Impact Engineering 24, 2000, 641-657.
- [6] XIN HONG, SHENGBO WANG, DAHAO GUO, HONGXING WU, JIE WANG, YUSHENG DAI, XIAOPING XIA, YANNING XIE, *Confining Medium and Absorptive Overlay: Their Effects on a Laser-induced Shock Wave*, Optics and Lasers in Engineering, 29, 1998, 447-455.
- [7] S. COUTURIER, T. DE RESSÉGUIER, M. HALLOUIN, J. P. ROMAIN, F. BAUER, *Shock profile induced by short laser pulses*, J. Appl. Phys., 79, 12, 15 June 1996, 9338-9342.
- [8] www.ktech.com/research_development/applied_physics/The_piezoelectric_properties_of_PVDF.pdf

- [9] F. BAUER, *Properties of ferroelectric polymers under high pressure and shock loading*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 105, 1995, 212-216.
- [10] F. BAUER, *PVDF Shock Sensors: Applications to Polar Materials and High Explosives*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47, 6, November 2000, 1448-1454.
- [11] F. BAUER, *Ferroelectric Polymers for High Pressure and Shock Compression Sensors*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 698, Materials Research Society, EE2.3.1-12, 2002.
- [12] A. SARZYŃSKI, *Pomiar ciśnienia fali uderzeniowej za pomocą polimerowego czujnika piezoelektrycznego*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 54, 9, 2008, 627-630.
- [13] A. SARZYŃSKI, *Zastosowanie piezoelektrycznych czujników PVDF do rejestracji czasowego profilu ciśnienia fal uderzeniowych*, Biul. WAT, 57, 2, 2008, 153-163.
- [14] K. PRZYBYŁOWICZ, *Metaloznawstwo*, WNT, wyd. 5, Warszawa, 1996.
- [15] С. И. АНИСИМОВ, Я. А. ИМАС, Г. С. РОМАНОВ, Ю. В. ХОДЬКО, *Действие излучения большой мощности на металлы*, Наука, Москва, 1970.
- [16] T. BURAKOWSKI, J. MARCZAK, W. NAPADŁEK, 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, 3, 2004, 83-102.
- [17] H. KOLSKY, *Stress waves in solids*, (tłum. ros.), Г. КОЛЬСКИЙ, *Волны напряжений в твердых телах*, Издательство Иностранной Литературы, Москва, 1955.
- [18] K. JACH, A. MORKA, M. MROCKOWSKI, R. PANOWICZ, A. SARZYŃSKI, W. STĘPNIEWSKI, R. ŚWIERCZYŃSKI, J. TYL, *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2000.
- [19] J. MARCZAK, *Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej*, Wydawnictwo Bel Studio, Warszawa, 2004.
- [20] S. ELIEZER, A. GHATAK, H. HORA, E. TELLER, *An introduction to equations of state — Theory and applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [21] M. VON ALLMEN, A. BLATTER, *Laser-Beam Interactions with Materials*, Springer, 1995.

A. SARZYŃSKI

Analysis of shockwave pressure measurements in laser shock processing experiments

Abstract. The method of laser shock processing is described in the paper. The method allows us to significantly improve the fatigue strength of metal parts (ten times in the case of titanium blades of turbine). In the course of development of laser shock processing method appropriate for industrial applications, measurement of laser induced shockwave pressure is necessary. Shockwave pressure was measured with the use of PVDF pressure gauges. A comparison of both, numerical modelling of laser induced shockwaves and results of shockwave pressure measurements is presented in the work. One dimensional equations of hydrodynamic were used for mathematical description of the process. The equations were solved with the use of finite difference method. In spite of a very simple numerical model used, quite good agreement was obtained. It was shown that modification of the experimental setup related to measurements influences shockwave pressure profile. The comparison of numerical and experimental results indicates what is the true value of pressure in media contacting with PVDF gauge. In the course of laser shock processing without pressure measurement, the shockwave pressure profile is quite simple.

Keywords: laser shock processing, shockwave, numerical modeling, PVDF pressure gauge

Universal Decimal Classification: 621.375.826.004.14