

**Antoni SARZYŃSKI**

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI

## Pomiar ciśnienia fali uderzeniowej za pomocą polimerowego czujnika piezoelektrycznego

Dr inż. Antoni SARZYŃSKI

Ukończył studia na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w roku 1973. W roku 1992 obronił doktorat na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako adiunkt w Instytucie Optoelektroniki WAT. Jest współautorem kilkudziesięciu publikacji z dziedziny fizyki plazmy, układów laserowych dużej mocy, fizyki wybuchu, interferometrii, spektrometrii i oddziaływania promieniowania laserowego z materia.



e-mail: asarzyński@wat.edu.pl

### Streszczenie

W pracy zamieszczono literaturowe informacje dotyczące piezoelektrycznych czujników ciśnienia typu PVDF, pozwalających mierzyć ciśnienie fali uderzeniowej o amplitudzie do 45 GPa z rozdzielczością czasową 5 ns. Zamieszczono formuły wzorcowania czujników. Opisano przykłady wykorzystania czujników w takich dziedzinach jak: kontrola ruchu drogowego, badanie właściwości materiałowych, pomiar ciśnienia fali uderzeniowej. Przedstawiono wyniki własnych pomiarów fal uderzeniowych wzbudzanych przez impuls promieniowania laserowego.

**Słowa kluczowe:** fala uderzeniowa, obróbka laserowa, laserowe umacnianie udarowe, czujnik ciśnienia PVDF.

### Shockwave pressure measurement with the use of polymer piezoelectric pressure gauge

#### Abstract

The review of publications on the subject of PVDF piezoelectric pressure gauges is presented in the paper. PVDF gauges allow to measure pressures up to 45 GPa with temporal resolution of about 5 ns. The calibration formulas of pressure gauges are included (fig. 1). Some examples of application of PVDF gauges in such areas like medicine, traffic control, material properties investigation and shockwave are presented. Results of author's measurements of laser induced shockwave are described (fig. 4 – 6). Influence of such parameters as sample thickness and acoustic impedance of layers on pressure profile is shown. The experimental setup will be used for optimization of laser shock processing technology.

**Keywords:** shockwave, laser processing, laser shock processing, PVDF pressure gauge.

### 1. Wstęp

Rozwój techniki laserowej, jaki nastąpił w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, spowodował burzliwy wzrost zastosowań promieniowania laserowego do powierzchniowej obróbki materiałów. Zdecydowana większość tych metod wykorzystuje promieniowanie do powierzchniowej obróbki cieplnej. Istnieje także metoda wykorzystująca laserowo generowane fale uderzeniowe do powierzchniowej obróbki plastycznej na zimno. Nosi ona nazwę „laserowe umacnianie udarowe” (ang. Laser Shock Peening – 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 wytwarzanej przez promieniowanie laserowe. Potrzeba pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej istnieje także podczas zabiegów medycznych z użyciem promieniowania impulsowego. Fale uderzeniowe powstają podczas detonacji materiałów wybuchowych (i również mogą być

wykorzystane do obróbki materiałów), podczas trzęsień ziemi, w kopalniach itp. We wszystkich tych przypadkach istnieje potrzeba pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej, w celu zwiększenia wydajności obróbki lub minimalizacji zniszczeń jakie fala może spowodować.

Detekcja fal uderzeniowych propagujących się w ciałach stałych pozwala wyznaczać równania stanu oraz związki konstytutywne, a także weryfikować poprawność modeli numerycznych służących do modelowania propagacji fal w ciałach stałych.

Do detekcji fal uderzeniowych stosuje się m.in. czujniki piezoelektryczne wykonane z polimeru PVDF [8, 9] (polifluorek winylidenu  $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$ ). Mają one wiele zalet: są bardzo cienkie (25  $\mu\text{m}$ ), giętkie, odporne na wysokie obciążenia, mają zakres pomiarowy od 10 MPa do 45 GPa, wytrzymują wysokie napięcia, mają wysoką odporność chemiczną, obwód pomiarowy ma prostą budowę, nie wymagają zasilania i wytwarzają sygnał elektryczny o wysokiej amplitudzie. 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.

Za wadę tych czujników należy uznać dużą wartość współczynnika piroelektrycznego. Zmiana temperatury czujnika podczas pomiaru i związany z tym efekt piroelektryczny może generować dodatkowy sygnał zakłócający pomiar. Kolejną wadą jest wrażliwość na wysokie temperatury. O ile czujniki manganinowe można stosować przy temperaturze nawet 600 °C [10], to czujniki PVDF zachowują swoje właściwości pomiarowe tylko do 80 °C, a po podgrzaniu do 130 °C ulegają zniszczeniu.

Szeroki zakres ciśnień rejestrowanych przez czujniki PVDF (od 10 MPa do 45 GPa) – o rząd wielkości większy niż w przypadku czujników kwarcowych (do 4 GPa) lub z niobianu litu (do 1.4 GPa) umożliwia badanie takich zjawisk jak fale uderzeniowe czy detonacyjne.

### 2. Przykłady zastosowań czujników

Mimo swego prototypowego charakteru, czujniki PVDF już znalazły wiele zastosowań. Można tu wymienić takie dziedziny jak: kontrola ruchu drogowego, ochrona obiektów, pomiar sił itp.

Polimer PVDF jest dobrym izolatorem. Można go więc zastosować do budowy kabla koncentrycznego, w którym piezoelektryczny polimer pełni rolę izolatora między wewnętrznym rdzeniem, a zewnętrznym ekranem. Tak zbudowany kabel wytwarza sygnał elektryczny pod działaniem nacisku, może więc pełnić rolę detektora takich obciążeń impulsowych jak: przejazd samochodu, przejście piechura itp. W ten sposób można skonstruować liczniki natężenia ruchu drogowego, czy też detektory informujące o wtargnięciu intruza na chroniony teren [11].

Wykorzystując odwrotny efekt piezoelektryczny, czyli deformację polimeru przez przyłożone napięcie, można budować siłowniki, głośniki, generatory drgań lub fal naprężeń itp. [11].

Czujniki PVDF można wykorzystywać do wyznaczania prędkości dźwięku w próbkach skał znajdujących się pod obciążeniem statycznym, co może odpowiadać warunkom w głębi Ziemi. Badania takie prowadzi firma geologiczna poszukująca bogactw naturalnych [12].

Nawet przyroda doceniła wartość efektu piezoelektrycznego i wykorzystywała go do utrzymywania naszych kości w dobrej kondycji. U kosmonautów odbywających długotrwałe loty w warunkach nieważkości zaobserwowano zanik tkanki kostnej. Odkryto, że jest to skutek braku efektu piezoelektrycznego wywołanego przez siłę grawitacji. Po tym odkryciu wszczepiono w kość zwierzęcia czujnik piezoelektryczny i przez elektryczne pobudzenie spowodowano przyrost dodatkowej tkanki kostnej [12]. W pracy

[13] opisano pomiar ciśnienia fali uderzeniowej rozbijającej kamienie nerkowe za pomocą miniaturowego czujnika z piezoelektryka PZT, a w [14] zastosowanie czujnika PVDF do pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej powstającej w gałce ocznej podczas zabiegu laserowego.

Dzięki swej wysokiej odporności na obciążenia mechaniczne czujniki PVDF mogą być także stosowane do pomiaru ciśnienia fal uderzeniowych i detonacyjnych [15 - 22].

### 3. Właściwości czujników PVDF

Producenci przeprowadzili badania odpowiedzi czujników obciążonych ciśnieniem fali uderzeniowej. W tych eksperymentach falę uderzeniową wytwarzano za pomocą precyzyjnego działu gazowego lub prochu [6, 8, 15 - 19]. Przetworniki nie mogą być kalibrowane indywidualnie, gdyż przy wysokich ciśnieniach ulegają zniszczeniu [8]. Dlatego czynnikiem warunkującym wykonywanie pomiarów ilościowych jest powtarzalność procesu produkcji. W opisanych wyżej eksperymentach wykazano, że czujniki PVDF mogą być produkowane w powtarzalny sposób i stosowane do pomiaru impulsów ciśnienia o amplitudzie do 45 GPa [8].

W eksperymentach dotyczących wzorcowania czujników znane jest ciśnienie fali, zatem można opracować równanie krzywej pozwalającej obliczyć ciśnienie jako funkcję wzbudzonego ładunku. Autor opracował tę krzywą wykorzystując dane i wzory zamieszczone w pracach [17, 19, 21, 22] (rys. 1). Krzywe te można zaaproboksimować przybliżonymi równaniami:

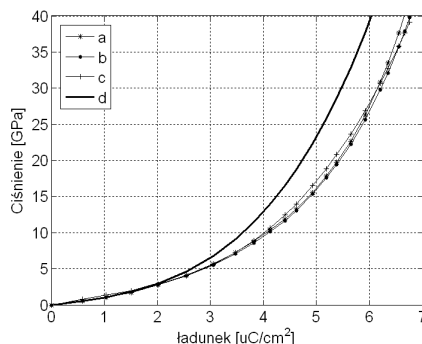
$$P(Q) = 0.92828 \cdot Q - 0.21543 \cdot Q^2 + 0.33703 \cdot Q^3 - 0.075970 \cdot Q^4 + 0.0071192 \cdot Q^5 \quad (1a)$$

$$P(Q) = 0.73976 \cdot Q + 0.19339 \cdot Q^2 + 0.082014 \cdot Q^3 - 0.018421 \cdot Q^4 + 0.0027655 \cdot Q^5 \quad (1b)$$

$$P(Q) = 1.4813 \cdot Q - 0.31836 \cdot Q^2 + 0.14131 \cdot Q^3 \quad (1c)$$

$$P(Q) = 0.58 \cdot Q + 0.38 \cdot Q^{1.6} + 0.055 \cdot Q^{3.5} \quad (1d)$$

gdzie  $P$  [GPa] - ciśnienie,  $Q$  [ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ] - gęstość ładunku na jednostkę powierzchni aktywnej czujnika.



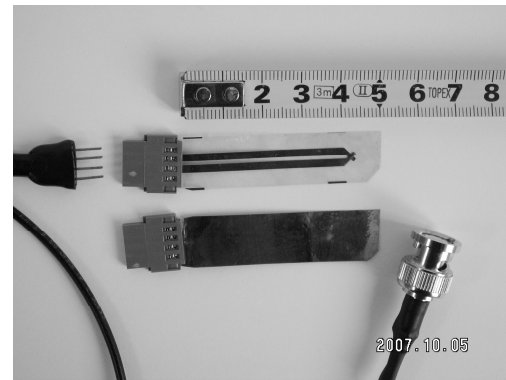
Rys. 1. Zależność ciśnienia od gęstości ładunku dla czujnika PVDF (a, b, c, d - wzory 1a, 1b, 1c i 1d odpowiednio)

Fig. 1. Dependence of pressure on charge density for PVDF gauges (a, b, c, d - formulas 1a, 1b, 1c and 1d respectively)

Formułę (1a) wyznaczono wykorzystując rys. 5 z pracy [17], (1b) rys. 6 z pracy [19]. Formuła (1c) pochodzi z pracy [21], zaś (1d) z firmy Dynasen [22]. Formuły (1a, 1b i 1c) dają wyniki zgodne z dokładnością do kilku procentów. Krzywe (a, b, c) dotyczą czujników tego samego typu wytwarzanych przez współpracujące firmy Ktech i Piezotech. Zbieżność tych trzech wyników zwiększa wiarygodność opracowanych formuł. Krzywa (1d) odbiega nieco od pozostałych, jednak dotyczy ona produktu wytwa-

zanego przez firmę Dynasen. Wszystkie obliczenia prowadzono w systemie MATLAB.

Na rys. 2 zamieszczono zdjęcie czujników używanych podczas prezentowanych dalej pomiarów.



Rys. 2. Czujniki PVDF (u góry tylko w teflonowej izolacji, u dołu w ekranie metalowym)

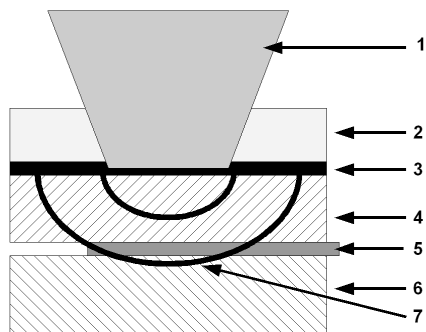
Fig. 2. PVDF gauges (top with Teflon insulation only, bottom with Teflon insulation and metal shielding)

### 4. Pomiar ciśnienia fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls promieniowania laserowego

Promieniowanie laserowe idealnie nadaje do zastosowań w inżynierii materiałowej, gdyż jest formą czystej energii i nie zawiera żadnych domieszek, które mogłyby zmienić skład obrabianego materiału. Jedną z metod obróbki laserowej wykorzystuje laserowo wzbudzone fale uderzeniowe do przeprowadzenia powierzchniowej obróbki plastycznej na zimno (laserowe umacnianie udarowe). Układ eksperymentalny konstruuje się w taki sposób, aby promieniowanie laserowe nie spowodowało podgrzania obrabianej warstwy wierzchniej, a jedynym czynnikiem zmieniającym jej właściwości była fala uderzeniowa. Szerszy opis tej technologii można znaleźć w pracach [1 - 5, 7]. Szkic konfiguracji układu eksperymentalnego pokazano na rys. 3.

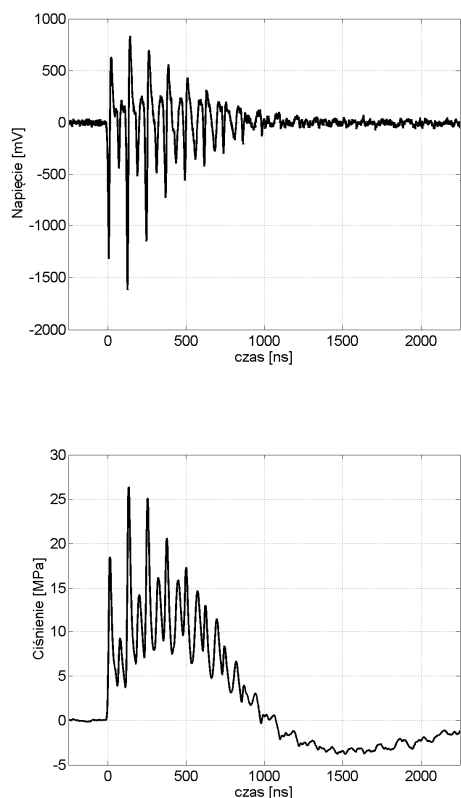
Zbudowano stanowisko badawcze do pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej wytwarzanej przez impulsowe promieniowanie laserowe. Zaprojektowano i zbudowano mechaniczny układ mocowania czujników i próbek metali przeznaczonych do laserowego umacniania udarowego. Obrabianą próbkę metalu pokrywano warstwą absorpcyjną i inercyjną (rys. 3). Zadaniem tych warstw jest zwiększenie ciśnienia i wydłużenie czasu życia plazmy wytwarzanej przez impuls promieniowania. Warstwa absorpcyjna zapobiega także wnikaniu fali cieplnej z plazmy do obrabianej próbki. Zaprojektowano i zbudowano elektroniczny układ pomiaru sygnału czujnika. Sygnał czujnika rejestrowano za pomocą oscyloskopu Tektronix TDS620B 500 MHz, 2.5 GS/s. W przyszłości stanowisko będzie stosowane przede wszystkim do optymalizacji laserowego umacniania udarowego.

Jako obrabianą próbkę stosowano płytkę z brązu o grubości 0.3 mm oraz aluminium o grubości 1 i 2 mm. Jako podłoże stosowano aluminium, teflon oraz handlowy polimer PVDF, wszystkie o grubości około 10 mm. Do wzbudzenia fali uderzeniowej stosowano dwa lasery Nd:YAG o parametrach impulsów: energia 100 mJ, czas trwania 4ns, długość fali 1064 nm oraz 140 mJ, 15 ns, 532 nm. Głównym celem prowadzonych eksperymentów było opanowanie metod pomiaru ciśnienia fal uderzeniowych wzbudzanych przez promieniowanie laserowe oraz eliminacja zakłóceń elektromagnetycznych. Optymalizacja konfiguracji eksperymentu w tym wstępnym etapie badań była sprawą drugorzędą.



Rys. 3. Schemat układu do laserowego umacniania udarowego z 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 (płytkę z brązu lub stopu Al), 5 – czujnik PVDF, 6 – podłoże (płytkę z teflonu, PVDF lub Al), 7 – front fali uderzeniowej

Fig. 3. Scheme of an experimental setup for laser shock processing with simultaneous acquisition of shockwave pressure profile. 1 – laser beam, 2 – inertial layer transparent for laser radiation (glass or water), 3 – absorption layer (black paint), 4 – processed sample (bronze or aluminum plate), 5 – PVDF gauge, 6 – substrate (Teflon, PVDF or Al plate), 7 – front of the shockwave



Rys. 4. Napięcie czujnika PVDF (z lewej) i odpowiadające mu ciśnienie fali (z prawej). Konfiguracja farba-brąz-PVDF-Al

Fig. 4. Voltage of PVDF gauge (on the left) and corresponding wave pressure (on the right). Configuration paint-bronze-PVDF-Al

Na rys. 4 zamieszczono wyniki jednego z pierwszych pomiarów. Sygnał był wzbudzony przez falę uderzeniową w konfiguracji farba-brąz-PVDF-Al. Nie stosowano warstwy inercyjnej. Piki ciśnienia w zakresie do 1000 ns są skutkiem wielokrotnego odbicia fal na granicach ośrodków. Maksymalne ciśnienie nie przekracza 30 MPa.

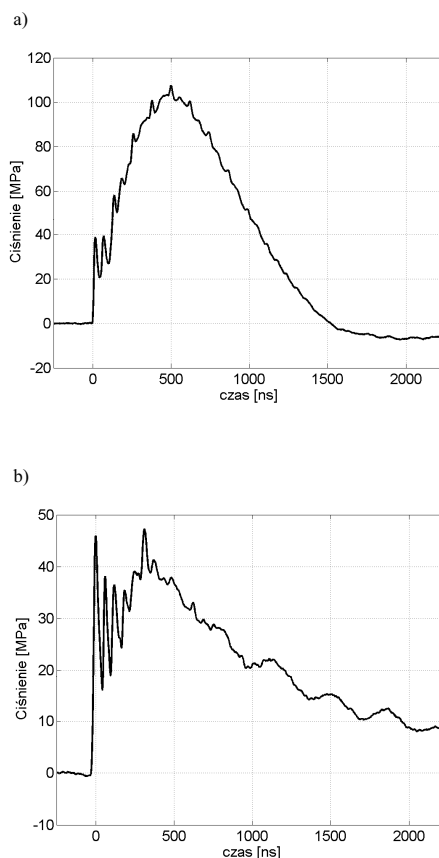
Warstwa inercyjna jest przezroczysta dla padającego promieniowania. Impuls laserowy wzbudza falę uderzeniową w warstwie absorpcyjnej (3), a następnie w ośrodkach do niej przylegających (rys. 3), w tym w obrabianej płytce metalowej (4). Fala dociera do tylnej powierzchni płytki i częściowo odbija się, a częściowo przenika do kolejnego ośrodka, którym jest polimer PVDF (5).

Każda granica ośrodków dzieli falę padającą na falę odbitą i przechodzącą, co w układzie z rysunku 3, składającym się z pięciu warstw, prowadzi do skomplikowanego ciągu fal rejestrowanych przez czujnik (rys. 4).

Należy podkreślić, że czujnik PVDF dostarcza informacji o ciśnieniu występującym w warstwie polimeru. Maksymalne ciśnienie fali uderzeniowej w płytce z brązu było o rząd wyższe i wynosiło około 300 MPa. Podział energii fali padającej między fale przechodzące i odbite zależy od ilorazu impedancji akustycznych sąsiadujących ośrodków (impedancja akustyczna jest iloczynem gęstości ośrodka i prędkości dźwięku).

Zastosowanie warstwy inercyjnej pozwala od 2 do 5 razy zwiększyć wartość ciśnienia maksymalnego (rys. 5 i 6). Duży wpływ na ciśnienie fali wywiera także obrabiana próbka. Zamiana płytki z brązu o grubości 0,3 mm na płytkę aluminiową o grubości 1 mm powoduje dużą zmianę ciśnienia (rys. 5). Oscylacje w zakresie od 0 do 300 ns są skutkiem wielokrotnego odbicia fal od płytek Al graniczących z czujnikiem PVDF (rys. 5b).

Dobór materiału podłoża o impedancji akustycznej zbliżonej do impedancji czujnika PVDF pozwala wyeliminować odbicie fal na granicy czujnik-podłoże. Na rys. 6 przedstawiono wyniki dla układu, w której rolę podłoża pełnił teflon, dzięki czemu znacznie spadła amplituda fal odbitych. Na rys. 6 przedstawiono porównanie ciśnień fal wzbudzonych w płytce o grubości 1 oraz 2 mm w układzie bez warstwy inercyjnej. Odstęp czasowy między kolejnymi odbitymi falami jest dokładnie proporcjonalny do grubości płytki. Można stąd obliczyć prędkość propagacji fali podłużnej w aluminium, wynosi ona około 6500 m/s i jest bliska prędkości dźwięku. Na rysunku 6 widoczny jest impuls ciśnienia niezdeformowany przez odbicia na granicy czujnik-podłoże.

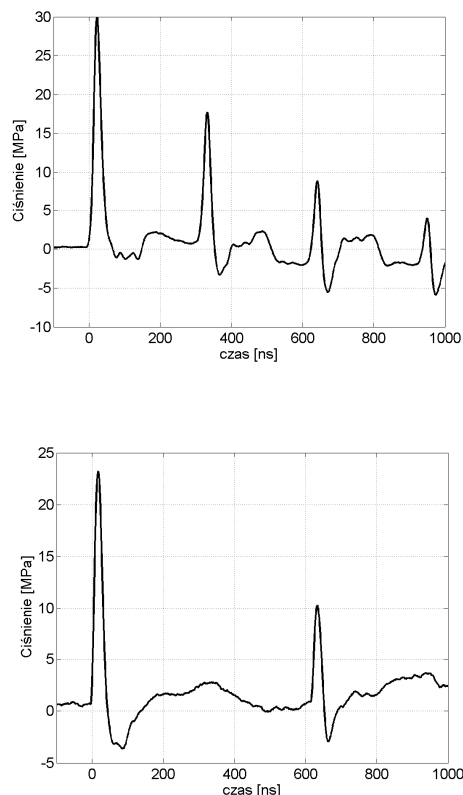


Rys. 5. Wpływ konfiguracji układu eksperymentalnego na ciśnienie fali

a) - konfiguracja woda-farba-brąz-PVDF-Al;  
b) - konfiguracja woda-farba-Al(1 mm)-PVDF-Al

Fig. 5. Influence of experiment configuration setup on pressure of the stress wave

a) water-paint-bronze-PVDF-Al configuration;  
b) water-paint-Al(1 mm)-PVDF-Al configuration



Rys. 6. Wpływ grubości (a – 1 mm, b – 2 mm) obrabianej płytki Al na ciśnienie fali. Farba-Al-PVDF-teflon

Fig. 6. Influence of processed sample thickness (a – 1 mm, b – 2 mm) on pressure of the stress wave; paint-Al-PVDF-teflon

## 5. Podsumowanie

Z przeglądu literatury wynika, że czujniki PVDF należy zaliczyć do prototypowej aparatury naukowo-badawczej. Ich stosowanie wymaga dużej staranności przy przygotowaniu próbek oraz mechanicznych układów mocowania. Nie wolno dopuścić do występowania szczelin powietrznych między warstwami poszczególnych materiałów.

Koszt pojedynczego czujnika wynosi około 1000 zł. Przy wysokiej amplitudzie badanych ciśnień, czujnik w trakcie pomiaru najczęściej ulega zniszczeniu. Próbkę do badań muszą być wykonane z dużą starannością. Używana aparatura jest droga (oscylloskopy, oprogramowanie do obróbki danych). Wszystkie te czynniki znacznie podnoszą koszty eksperymentów.

Mimo tych zastrzeżeń czujniki PVDF należy uznać za wartościowe urządzenia pomiarowe, gdyż mogą one dostarczyć bezcennych danych dotyczących właściwości materiałów, przebiegów ciśnień fal uderzeniowych oraz propagacji fal w ciałach stałych.

Opanowano umiejętność pomiaru ciśnienia fal uderzeniowych wzbudzanych przez impulsowe promieniowanie laserowe. 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 i absorpcyjnej, będzie więc kosztowna, pracochłonna i długotrwała.

## 6. Literatura

[1] K.Ding, L.Ye, Laser shock processing – Performance and process simulation, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2006  
 [2] W.Napadłek, A.Sarzyński, Influence Of Laser Shot Peening on Topography of Ti-6Al-2Cr-2Mo Titanium Alloy Surface Layer, AMT 2007, Inżynieria materiałowa, rok XXVIII, w druku

[3] 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  
 [4] G. Banas, An application of PVDF gauges for pressure measurements during laser shock processing, Transactions on Engineering Sciences vol 8, Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects II, pp.239-246, 1995, Ed. M.H. ALIABADI, Wessex Institute of Technology, Southampton  
 [5] 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  
 [6] Bauer F., PVDF shock compression sensors in shock wave physics, CP706, Shock Compression of Condensed Matter – 2003 ed.M.D.Furnish, Y.M.Gupta, J.W.Forbes, pp.1121 – 1126  
 [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, pp.9338-9342  
 [8] www.ktech.com/research\_development/applied\_physics/The piezoelectric properties of PVDF.pdf  
 [9] J.S.Harrison, Z.Ounaies, Piezoelectric Polymers, NASA Report No. 2001-43, [http://www.teccenter.org/electroactive\\_polymers/assets/pdfs/piezo\\_polymers/icas\\_e\\_piezo.pdf](http://www.teccenter.org/electroactive_polymers/assets/pdfs/piezo_polymers/icas_e_piezo.pdf)  
 [10] A.V. Bushman, G.I. Kanel', A.L. Ni, V.E. Fortov, Intense Dynamic Loading of Condensed Matter, Taylor & Francis, 1993  
 [11] Piezo Film Technical Manual, Measurement Specialties Inc., www.msiusa.com, <http://www.media.mit.edu/reserv/classes/MAS836/Readings/MSI-techman.pdf>  
 [12] N.Noury, E.Chamberod, Ph.Benech, A.V. Kalinin, A. Bleuze, An instrumentation based on the piezopolymer P(VDF – TrFE) for the analysis of the elastic parameters of rocks under stress, Ultrasonics 36, pp.257 – 262, 1998  
 [13] V.Stankevič, Č.Šimkevičius, Semiconductor pressure-pulse sensor, Sensors and Actuators, A 51, pp.159 – 163, 1996  
 [14] Krueger R. R., Seiler T., Gruchman T., Mrochen M., Berlin M. S., Stress Wave Amplitudes during Laser Surgery of the Cornea, Ophthalmology Vol. 108, No. 6, pp.1070 – 1074, June 2001  
 [15] F.Bauer, Properties of ferroelectric polymers under high pressure and shock loading, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 105 (1995) 212 – 216  
 [16] F.Bauer, Ferroelectric PVDF polymer for high pressure and shock compression sensors, 11th International Symposium on Electrets, 2002, pp.219-222  
 [17] F.Bauer, PVDF Shock Sensors: Applications to Polar Materials and High Explosives, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 47, no. 6, November 2000, pp.1448-1454  
 [18] F.Bauer, Advances in Piezoelectric PVDF Shock Compression Sensors, 10th International Symposium on Electrets, IEEE 1999 pp.647-650  
 [19] F.Bauer, PVDF gauge piezoelectric response under two-stage light gas gun impact loading, CP620, Shock Compression of Condensed Matter – 2001 edited by M. D. Furnish, N. N. Thadhani, and Y. Horie © 2002 American Institute of Physics, pp.1149-1152  
 [20] F.Bauer, Ferroelectric Polymers for High Pressure and Shock Compression Sensors, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 698, 2002 Materials Research Society, pp.EE2.3.1-12  
 [21] R. V.Hodges, L. E.McCoy, J. R.Toolson, Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Gauges for Measurement of Output Pressure of Small Ordnance Devices, Propellants, Explosives, Pyrotechnics 25, pp.13-18 (2000)  
 [22] <http://www.dynasen.com/pdf/PVF2%2011%20%26%204.pdf>