

Zastosowanie laserowo indukowanych fal uderzeniowych do badania dynamicznych właściwości materiałów

WPROWADZENIE

Badania nad nowymi materiałami i warstwami oraz metodami ich wytwarzania wymagają stosowania nowych, szybkich i precyzyjnych metod diagnostycznych. Znajomość właściwości mechanicznych materiałów i warstw wierzchnich w warunkach statycznych, a przede wszystkim dynamicznych jest niezbędna do właściwego projektowania maszyn i urządzeń. Bardzo duże prędkości odkształceń występują w trakcie tarcia, obróbki mechanicznej materiałów oraz eksploatacji podzespołów wykorzystywanych w wielu dziedzinach techniki. Właściwości materiałów przy dużych prędkościach odkształceń w znaczący sposób różnią się od właściwości w warunkach statycznych. W szczególności dotyczy to twardości dynamicznej, naprężeń własnych i adhezji warstw do podłoża, dynamicznej granicy plastyczności i wytrzymałości.

Zastosowanie krótkich impulsów laserowych do badania właściwości materiałów i warstw pozwala na poznanie procesów zachodzących w materiałach przy prędkościach odkształceń powyżej 10^6 s^{-1} , które nie są możliwe do osiągnięcia innymi dotychczas stosowanymi metodami. Wykorzystywana jest w tym celu fala uderzeniowa wytwarzana w wyniku oddziaływania impulsu laserowego o dużej energii z badanym materiałem. Laser zastępuje dotychczas stosowane urządzenia mechaniczne, takie jak dzielony pręt Hopkinsona lub instalacje do zderzania płyt [1]. Proces ten jest również powszechnie wykorzystywany do powierzchniowej obróbki umacniającej metali i stopów (tzw. *Laser Shot Peening* – LSP). Badania optymalizacyjne związane z tą obróbką są prowadzone w wielu ośrodkach krajowych [2÷4] i zagranicznych [5÷7].

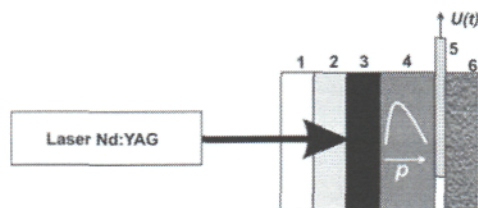
W roku 2014 w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk i Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej zostały rozpoczęte prace nad laserową metodą diagnostyki właściwości mechanicznych materiałów. Celem tych prac jest nie tylko analiza materiałów jednorodnych, lecz również badanie cienkich, nanometrycznych warstw i małych objętości materiałów. Wymaga to jednak podjęcia badań dotyczących efektywności zamiany energii impulsu laserowego na falę naprężeń propagującą się w materiale. Niezbędne są badania podstawowe pozwalające na poznanie i opis zjawisk fizycznych zachodzących przy oddziaływaniu promieniowania laserowego z warstwą absorpcyjną, procesu parowania, tworzenia i ekspansji obłoku plazmy w cieczy. Przebieg tych procesów ma decydujący wpływ na amplitudę uzyskanej fali naprężeń, a celem jest uzyskanie odkształceń badanych próbek bez ich nadtapiania i ablacji materiału.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki wstępnych badań eksperymentalnych wielkości amplitud fal uderzeniowych dla różnych materiałów i grubości odpowiednio ukształtowanych warstw absorpcyjnych i inercyjnych na powierzchni próbek jednorodnych metali. Opisano układ eksperymentalny wykorzystujący miniaturowe, polimerowe przetworniki piezoelektryczne, które odtwarzają przebiegi czasowe i amplitudy dynamicznych zmian ciśnienia w badanym materiale.

UKŁAD EKSPERYMENTALNY

Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska do badań właściwości mechanicznych materiałów z zastosowaniem krótkoimpulsowego promieniowania laserowego. Impuls laserowy, przez szkło (1) i warstwę cieczy (2), pada na warstwę absorpcyjną (3), powodując jej gwałtowne parowanie oraz tworzenie się plazmy. Szkło (1) i warstwa cieczy (2) łącznie pełnią rolę warstwy inercyjnej. Warstwa inercyjna ogranicza ekspansję plazmy, zwiększa amplitudę ciśnienia powstającej plazmy i wydłuża czas jego trwania. Ciśnienie obłoku plazmy generuje falę uderzeniową (falę naprężeń) w stykających się z nią ośrodkach, w tym również w badanym materiale (4). Warstwa absorpcyjna pełni potrójną rolę: zwiększa absorpcję promieniowania, dostarcza materiału dla procesów ablacji i izoluje obrabiany materiał od wysokiej temperatury plazmy. Przy bardzo krótkich, nanosekundowych impulsach laserowych i odpowiednio dobranym rodzaju i grubości warstwy absorpcyjnej, efekty cieplne w obrabianym materiale mogą być pomijalnie małe. Dzięki temu można rozpatrywać taki przypadek jako czyste oddziaływanie mechaniczne fali ciśnieniowej z badanym materiałem – obróbka plastyczna na zimno.

Do badanego materiału przylega polimerowy przetwornik piezoelektryczny (5) rejestrujący przebiegi czasowe i amplitudę powstającej fali naprężeń. Przetwornik, pochodzący z firmy Piezotech, Francja [8], jest wykonany z polimeru PVDF



Rys. 1. Układ eksperymentalny do badań przebiegów czasowych i amplitud laserowo indukowanych fal uderzeniowych: (1) płytka szklana, (2) warstwa cieczy, (3) warstwa absorpcyjna, (4) próbka, (5) przetwornik piezoelektryczny, (6) podłoże

Fig. 1. Experimental arrangement for investigations of time evolution and amplitude of laser induced shock waves: (1) glass plate, (2) liquid layer, (3) absorption layer, (4) sample, (5) piezoelectric transducer, (6) substrate

Dr inż. Joanna Radziejewska, dr inż. Jacek Hoffman – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, – IPPT PAN, dr hab. inż. Jan Marczak (jmarczak@wat.edu.pl), dr inż. Antoni Sarzyński, dr inż. Marek Strzelec – Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna (IOE WAT)

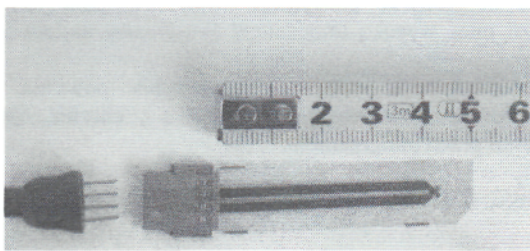
(CH₂-CF₂) (rys. 2). Czujniki te mają wiele zalet: są bardzo cienkie (łącznie z warstwami izolacyjnymi około 75 μm), giętkie, odporne na duże obciążenia, mają szeroki zakres pomiarowy (od 10 MPa do 45 GPa) i dobrą odporność chemiczną, wytrzymują wysokie napięcia. Obwód obciążenia ma prostą budowę (rys. 3), elementy nie wymagają zasilania i po obciążeniu wytwarzają sygnał elektryczny o dużej amplitudzie. Obszar aktywny może mieć bardzo małe wymiary np. 1×1 mm².

Podłoże z teflonu (6) ma impedancję akustyczną zbliżoną do impedancji materiału czujnika PVDF, dzięki czemu na styku warstw czujnik-podłoże nie pojawiają się dodatkowe odbite fale naprężeń, które mogłyby znacznie utrudnić interpretację zarejestrowanych sygnałów.

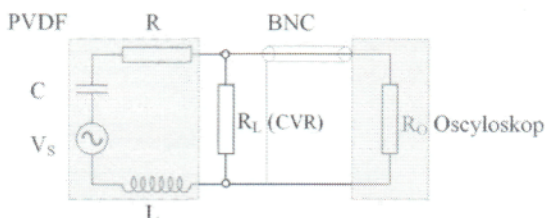
W badaniach wykorzystano dwa źródła laserowe: laser Renova Nd:YAG z modulacją dobroci o maksymalnej energii impulsu 700 mJ (1064 nm), generujący impulsy o czasie trwania 5 ns (IOE WAT) oraz podobny laser Nd:YAG pracujący na drugiej harmonicznej (532 nm), o energii 600 mJ, generujący impulsy o czasie trwania 8 ns (IPPT PAN). Na rysunku 4 zamieszczono wyniki pomiarów energii i czasu trwania impulsów lasera Renova.

WYNIKI EKSPERYMENTALNE

W przeprowadzonych eksperymentach rolę warstwy inercyjnej pełniła płytka ze szkła BK7 o grubości około 3 mm, a absorberem był mokry czarny lakier. Na rysunku 5 zamieszczono przykład sygnałów rejestrowanych przy pomiarze ciśnienia za pomocą czujnika PVDF. Fotodioda rejestrująca impuls laserowy wzbudzający badaną falę uderzeniową wyznaczała początek procesu (zero skali czasu). Impuls laserowy wzbudzał w płytce aluminiowej (lub stalowej) o grubości 1 mm falę naprężeń, która wielokrotnie odbijała się od obydwu powierzchni. W momencie odbicia fali naprężeń od powierzchni stykającej się z czujnikiem PVDF, materiał piezoelektryczny ulega ścisnieniu, powstaje w nim ładunek elektryczny. Wielkość indukowanego ładunku ma ścisły związek z chwilową amplitudą fali naprężeń. Przepływ wytworzonego ładunku przez monitorujący rezystor R_L (CVR – Current Viewing Resistor) wytwarza impuls napięciowy rejestrowany przez oscyloskop, reprezentowany na rysunku 3 przez rezystancję R_0 . Na rysunku 5 są widoczne kolejne impulsy napięcia powstające w chwili odbijania fali naprężeń od stykającej



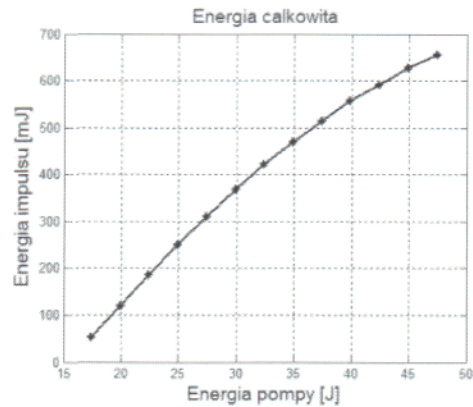
Rys. 2. Fotografia przetwornika piezoelektrycznego w izolacji teflonowej
Fig. 2. Photograph of piezoelectric transducer in Teflon isolation



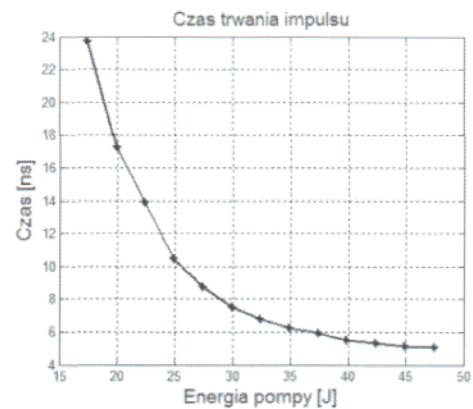
Rys. 3. Schemat prądowego układu pomiarowego przetwornika PVDF. V_s , R , L , C – napięcie, oporność, indukcyjność i pojemność czujnika. R_L – opornik monitorujący sygnał prądowy czujnika
Fig. 3. Scheme of current mode loading of a PVDF gauge. V_s , R , L , C – voltage, resistance, inductivity and capacity of the gauge respectively, R_L – current viewing resistor

się z nim powierzchni płytki aluminiowej. Całkowanie natężenia prądu pozwala wyznaczyć zależność ładunku od czasu. Zastosowanie odpowiedniej krzywej kalibracyjnej dla czujnika pozwala wyznaczyć zależność ciśnienia od czasu [2].

Falę naprężeń wzbudzano w płytce aluminiowej lub stalowej (0H18N9) o grubości 1 mm. Na rysunku 5 zamieszczono wyniki pomiarów fal naprężeń wzbudzanych w różnych konfiguracjach. Na rysunku 6 pokazano profil fali naprężeń wzbudzanych w konfiguracji szkło-absorber-Al-PVDF-teflon, a na rysunku 7 w konfiguracji szkło-absorber-stal 1mm-PVDF-stal 0,5mm-teflon.

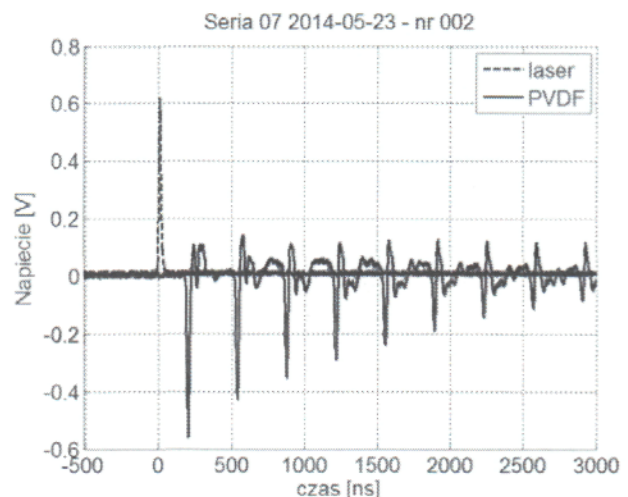


b)



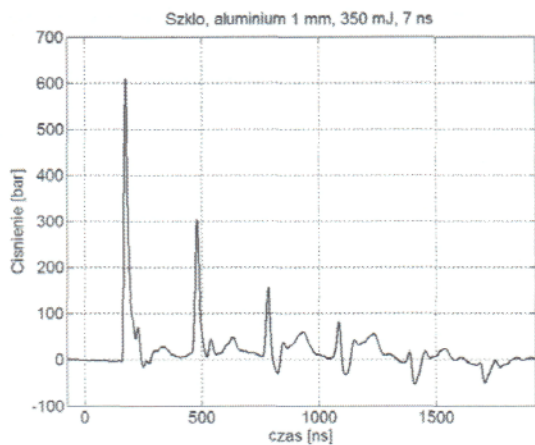
Rys. 4. Wpływ energii pompy na energię (a) i czas trwania (b) impulsu lasera Renova

Fig. 4. Influence of pump energy on energy (a) and duration (b) of Renova laser pulse

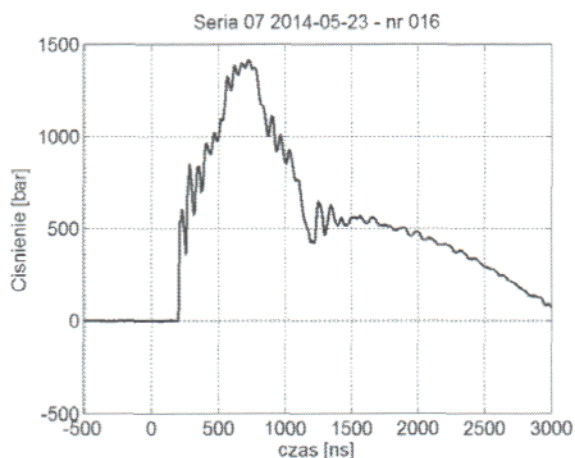


Rys. 5. Impulsy elektryczne rejestrowane podczas pomiaru amplitudy fali naprężeń. Linia przerywana – laserowy impuls wyzwalający, linia ciągła – sygnał napięciowy czujnika PVDF

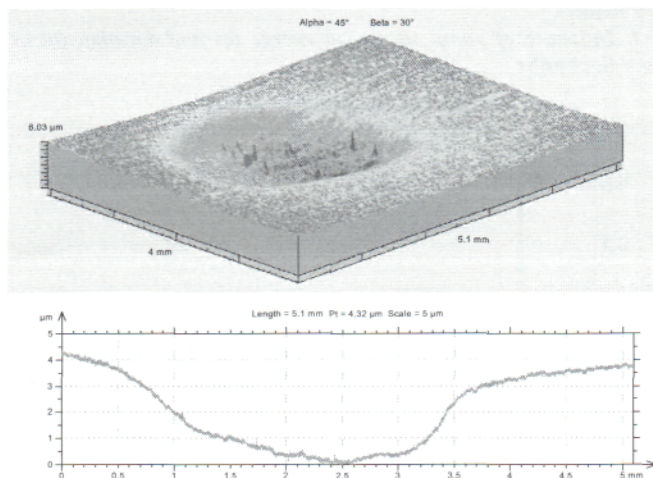
Fig. 4. Electrical pulses recorded during the measurement of stress wave amplitude. The dotted line – laser trigger pulse, the solid line – PVDF sensor voltage signal



Rys. 6. Cyrkulacja fali naprężeń w płytce aluminiowej.– szkło-absorber-Allmm-PVDF-teflon, laser Renova, 350 mJ, 7 ns
 Fig. 6. Reverberation of stress wave in an aluminum plate. - glass-absorber- Allmm-PVDF-teflon, Renova laser, 350 mJ, 7 ns



Rys. 7. Cyrkulacja fali naprężeń w płytce stalowej – szkło-absorber stal 1 mm-PVDF-stal 0,5 mm-teflon, laser Renova 700 mJ, 5 ns
 Fig. 7. Reverberation of stress wave in a steel plate – glass-absorber steel 1 mm-PVDF-steel 0.5 mm-teflon, Renova laser 700 mJ, 5 ns



Rys. 8. Odształcenie powierzchni polerowanej płytki ze stali 0H18N9
 Fig. 8. Deformation of the flat polished surface of the steel plate 0H18N9

Z rysunków 6 i 7 wynika, że dzięki zmianie konfiguracji układu eksperymentalnego można podnieść amplitudę i wydłużyć czas trwania impulsu naprężeń. Na rysunkach 6 i 7 zamieszczono wyniki pierwszych pomiarów fal naprężeń. Nie przeprowadzono jeszcze optymalizacji układu eksperymentalnego. Uzyskano małe amplitudy fal.

Niezależnie od pomiarów fal naprężeń w IPPT PAN wykonano eksperymenty odształcenia płytek z polerowanej stali 0H18N9 o grubości 1 mm za pomocą fali uderzeniowej wzbudzonej przez impuls lasera Nd:YAG, długość fali 532 nm, energia 600 mJ, czas trwania 8 ns. Rolę warstwy inercyjnej pełniła płytka ze szkła sodowego. Na rysunku 8 zamieszczono wyniki pomiarów odształcenia powierzchni płytki przez falę uderzeniową. Głębokość krateru wynosi około 4 μm.

MODELOWANIE NUMERYCZNE

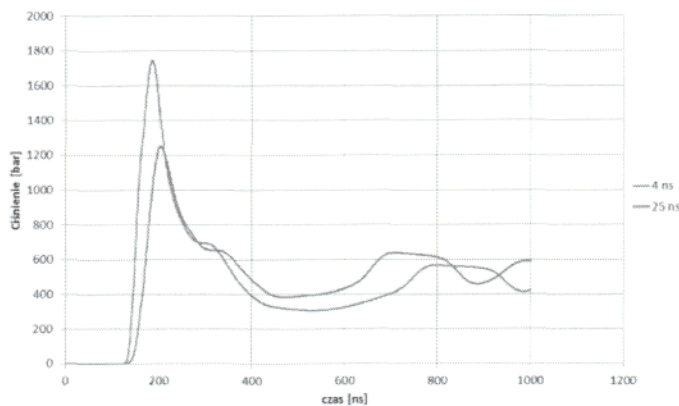
W eksperymentach uzyskano fale uderzeniowe o małej amplitudzie, które nie powodowały delaminacji warstw farby. W związku z tym przeprowadzono jakościowe modelowanie numeryczne, które miało udzielić odpowiedzi na pytanie, czy mała amplituda wzbudzanych fal uderzeniowych jest skutkiem krótkiego czasu trwania impulsu laserowego. Wynik modelowania zamieszczono na rysunku 9. W obliczeniach zadano gęstość energii impulsu laserowego wynoszącą 10 J/cm², przyjmując 100% absorpcję promieniowania. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów różniących się tylko czasem trwania impulsu laserowego.

Z rysunku 9 wynika, że skracanie impulsu laserowego będące skutkiem zwiększania mocy pompy (rys. 4) nie jest czynnikiem decydującym o małej amplitudzie laserowo wzbudzanych fal uderzeniowych. Przyczyną małej amplitudy wzbudzanych fal należy szukać w układzie eksperymentalnym. Należy zwrócić uwagę przede wszystkim na materiał, z którego jest wykonana warstwa inercyjna oraz zbadać skuteczność zastosowanego absorbera.

PODSUMOWANIE

Wykonano pierwsze pomiary fal naprężeń wzbudzanych w płytkach stalowych i aluminiowych przez impuls laserowy dużej mocy. Uzyskano amplitudę maksymalną około 1600 barów we wnętrzu czujnika, czyli około 10 000 (1 GPa) we wnętrzu badanych materiałów. Z przeprowadzonych prób wynika, że optymalizacja konfiguracji układu eksperymentalnego musi dotyczyć następujących elementów:

- dobór materiału warstwy inercyjnej; warstwa inercyjna nie może absorbować padającego promieniowania laserowego i musi mieć wysoką impedancję akustyczną, najlepszy byłby kwarc,
- dobór absorbera; warstwa absorpcyjna powinna dobrze absorbować promieniowanie laserowe i chronić obrabiany materiał przed podgrzaniem.



Rys. 9. Oszacowanie wpływu czasu trwania impulsu laserowego na amplitudę laserowo wzbudzonej fali uderzeniowej
 Fig. 9. Estimation of influence of the laser pulse duration on the amplitude of the laser induced shock wave

PODZIEKOWANIE

Wyniki prezentowane w pracy uzyskano w ramach projektu „Opracowanie nowej metody badania dynamicznej twardości oraz wybranych właściwości mechanicznych materiałów jednorodnych cienkich warstw w warunkach bardzo szybkich odkształceń” nr 2013/09/B/ST8/03468 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Krakowie.

LITERATURA

- [1] Field J. E., Walley S. M., Proud W. G., Goldrein H.T., Siviour C.R.: Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *Int. J. Impact Eng.* 30 (2004) 725÷775.
- [2] Sarzyński A., Marczak J., Strzelec M.: Pomiar ciśnienia fal uderzeniowych w eksperymentach laserowego umacniania laserowego. *Inż. Mat.* 3 (2011) 228÷232.
- [3] Radziejewska J.: Influence of laser-mechanical treatment on surface topography, erosive wear and contact stiffness. *Mater. Design* 32 (2011) 5073÷5081.
- [4] Kusiński J., Kac S., Kopia A., Radziszewska A., Rozmus-Górnikowska M., Major B., Major L., Marczak J., Lisiecki A.: Laser modification of the materials surface layer – a review paper. *Bull. Pol. Acad. Sci-Te.* 60 (2012) 711÷728.
- [5] Montross Ch. S., Wei T., Ye T., Clark G., Mai Y-W.: Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys – a review. *Int. J. of Fatigue* 24 (2002) 1021÷1036.
- [6] Manikanta E., Venkateshwarlu P., Sai Shiva S., Rakesh Kumar V., Lcela Ch., Surya P. Tewari, Manoj Kumar G., Prem Kiran P.: Dynamic response of metals and alloys to laser induced shock waves. *Proc. SPIE* 8433 (2012) 84331Z.
- [7] Zhakhovsky V. V., Demaske B. J., Inogamov N. A., Khokhlov V. A., Ashitkov S. I., Agranat M. B., Olcynik I. I.: Super-elastic response of metals to laser-induced shock waves. *AIP Conf. Proc.* 1464 (2012) 102. <http://www.piezotech.fr/fr/2-products-piezoelectric-polymers/>.
- [8] <http://www.piezotech.fr/fr/2-products-piezoelectric-polymers/>.