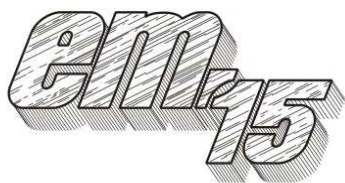


## XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji  
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7  
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,  
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

## Zastosowanie odkształcenia plastycznego wywołanego nanosekundowym impulsem laserowym do oceny twardości dynamicznej

Application of plastic deformation induced by nanosecond laser pulse to evaluate dynamic hardness

Joanna Radziejewska

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych odkształceń plastycznych metali wywołanych impulsem laserowym. Badania przeprowadzono na laserze Nd:YAG o długości fali promieniowania 1064 nm i czasie impulsu laserowego 10 ns. Indukowaną impulsem laserowym falę uderzeniową wykorzystano do wywołania lokalnego odkształcenia plastycznego powierzchni materiałów. Przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania badanego procesu do opracowania nowej metody pomiaru twardości dynamicznej materiałów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** impuls laserowy, odkształcenia plastyczne, twardość dynamiczna, fala uderzeniowa.

*The paper presents experimental data of surface plastic deformation of 304 steel and two aluminum alloys caused by nanosecond laser pulse. The experiments were conducted on Nd:YAG laser on 1064 nm wavelength and 10 ns. The pressure wave was used to induce local surface plastic deformation of materials. The analysis of the possibilities of using the process to develop a new method for measuring dynamic hardness of materials under very high strain rate is shown.*

**KEYWORDS:** laser pulse, plastic deformations, dynamic hardness, shock wave.

### Wstęp

Wiedza o zachowaniu się materiałów w warunkach dynamicznych odkształceń jest niezbędna do właściwego projektowania elementów maszyn i urządzeń narażonych na bardzo duże prędkości odkształcenia, które mogą występować w technice kosmicznej, militarnej, a także w procesach tarcia, obróbce mechanicznej, oraz eksploatacji podzespołów wykorzystywanych w wielu dziedzinach techniki. Właściwości materiałów w warunkach odkształceń dynamicznych w znaczący sposób różnią się od ich właściwości w warunkach statycznych. Zależą one między innymi od są od prędkości odkształcenia, mikrostruktury materiału i temperatury. Wrażliwość na prędkość odkształcenia większości metali i ich stopów znacznie wzrasta przy prędkości odkształcenia wyższych od  $10 \text{ s}^{-1}$  w związku z tym potrzebne są badania doświadczalne nad wyznaczeniem związków właściwości mechanicznych tych materiałów z prędkością odkształcenia w możliwie szerokim zakresie. Badania właściwości plastycznych materiałów i ich warstw wierzchnich deformowanych z dużymi prędkościami stanowi poważny problem eksperymentalny [1].

Badania procesów zachodzących w materiałach przy bardzo dużych prędkości odkształcenia możliwe jest między innymi przy wykorzystaniu nanosekundowych impulsów energii laserowej [2-4]. W tym celu wytwarzana jest fala uderzeniowa. W wyniku oddziaływania promieniowania laserowego na materiał tworzy się plazma i fala ciśnienia. Przy nanosekundowych impulsach dużej mocy i odpowiednio dobranych warstwach absorpcyjnych i inercyjnych możliwe jest osiągnięcie ciśnień fali rzędu kilku GPa. Warstwa absorpcyjna powinna zapewnić właściwy przebieg procesu tworzenia i ekspansji obłoku plazmy bez wpływu efektów termicznych na badany materiał. Właściwą propagację fali ciśnienia do materiału zapewnia zastosowanie warstwy inercyjnej, która pozwala na wyeliminowanie rozpraszania fali ciśnieniowej. W obecności cieczy występuje wzrost amplitudy impulsu ciśnienia, poprawa jego kształtu, krótszy czas jego narastania i opadania oraz lepsza powtarzalność tych cech. Zwiększa ona również prędkość procesu chłodzenia na granicy faz, co redukuje dyfuzję termiczną do badanego materiału [5]. Opisany proces jest w wielu zastosowaniach między innymi do powierzchniowej obróbki umacniającej metali i stopów (tzw. laser shot peening – LSP); badania związane z tą obróbką prowadzone są w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych [6, 7, 9]. Próby wykorzystania fali ciśnieniowej wytwarzanej impulsem laserowym do badania adhezji warstw PVD, CVD podjęto w latach dziewięćdziesiątych, badano naprężenia rozciągające na granicy faz materiał - warstwa, które powodowały odseparowanie warstwy od podłoża [2]. Właściwości mechaniczne WW w tych metodach określane są na podstawie znajomości ciśnienia, z jaką fala uderzeniowa działa na badany materiał i prędkości jej propagacji w materiale. Ich dokładność zależy od precyzji pomiarów ciśnienia i prędkości propagacji fali uderzeniowej. Ze względu na bardzo krótkie czasy procesu, od kilku do kilkudziesięciu nanosekund, wymagane są zaawansowane techniki pomiarowe [11, 12].

Brak jest danych na temat wyników badań dotyczących oceny twardości dynamicznej za pomocą impulsu laserowego. Twardość dynamiczna wyznaczana jest za pomocą twardościomierzy dynamicznych. Prędkości odkształcenia w tego rodzaju przyrządach wynosi około  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Dynamiczne pomiary twardości polegają na udarowym działaniu wgłębnika na powierzchnię badanego przedmiotu. Metody te nie są znormalizowane a wyników pomiarów wyznaczonych różnymi metodami nie można porównywać. Najczęściej stosowane są próby dynamiczne – plastyczne: wciskanie wgłębnika młotkiem Poldi'ego i dynamiczno-sprężyste (metoda Shore'a) w której mierzony jest odskok wgłębnika lub sprężyny [13]. Badania te wykazują, że dla dynamicznych pomiarów twardości obowiązują analogiczne zależności pomiędzy twardością a innymi właściwościami mechanicznymi, np. granicą wytrzymałości, jak dla odpowiednich cech statycznych [13].

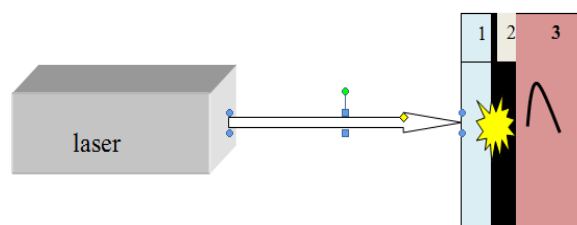
W pracy przedstawiono wyniki badań odkształceń plastycznych materiału wywołanych nanosekundowym impulsem laserowym i próby wykorzystania wyników do oceny twardości materiałów w warunkach dynamicznych.

### Opis eksperymentu

Badania odkształceń plastycznych generowanych nanosekundowym impulsem laserowym przeprowadzono dla trzech standardowych materiałów: stali kwasoodpornej 0H18N9/304 oraz dwóch stopów aluminium PA38/6060 i AK12. Przed obróbką powierzchnie materiałów zostały poddane polerowaniu.

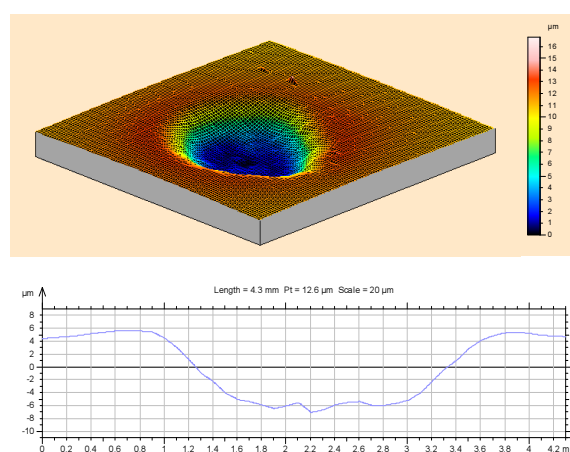
Do badań wykorzystano laser Nd:YAG Quantel YG 981E o długości fali promieniowania  $1,064 \mu\text{m}$  i czasie impulsu 10 ns. Zastosowano cztery wartości energii impulsu: 0,35; 0,7; 1; 1,22 J. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Impuls laserowy poprzez warstwę cieczy - 1 pada na warstwę absorpcyjną - 2 wywołując gwałtowne jej parowanie oraz tworzenie plazmy. Na skutek gwałtownej ekspansji obłoku plazmy powstaje fala ciśnienia, która rozchodzi się w badanym materiale - 3.

Jako warstwy absorpcyjnej użyto grafitu o grubości  $5 \mu\text{m}$  a warstwę inercyjną stanowiła woda destylowana o grubości 1mm. Przy bardzo krótkich impulsach laserowych, rzędu ns, i odpowiednio dobranym rodzaju i grubości warstwy absorpcyjnej efekty cieplne związane z oddziaływaniem impulsów laserowych z materiałem są pomijalnie małe. Dzięki temu można rozpatrywać taki przypadek, jako czyste oddziaływanie fali ciśnieniowej z badanym materiałem. W celu oceny wpływu oddziaływania impulsu laserowego na powierzchnie materiału odkształconego przeprowadzono badania mikrostruktury materiału.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań materiałów impulsem laserowym. 1-ciecz, 2-warstwa absorpcyjna, 3-materiał

Odształcenia powierzchni badanych materiałów mierzone były na mikroskopie konfokalnym Keyence Vx-x100. Wyznaczono średnicę odcisku -  $d$ , jego głębokość -  $h$  oraz objętość -  $V$ . Dla wszystkich badanych materiałów i energii impulsów stwierdzono występowanie osiowosymetrycznych odkształceń plastycznych. Przykładowy ślad oddziaływania impulsu laserowego na badaną powierzchnię przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widok oraz profil powierzchni śladu oddziaływania fali uderzeniowej wywołanej impulsem laserowym o energii 1 J (stop PA38 o twardości 92 HB)

### Wyniki badań

Warunkiem koniecznym wykorzystania odkształcenia materiału nanosekundowym impulsem laserowym do oceny twardości materiału jest powtarzalność uzyskanych od-

kształceń plastycznych przy ustalonych warunkach. Na dyspersję wyników pomiarów twardości proponowaną metodą mają wpływ: fluktuacja mocy wiązki laserowej i jej cech geometrycznych, zmiany właściwości warstwy absorpcyjnej i inercyjnej. Czynniki te decydują o ciśnieniu fali uderzeniowej. Ponadto wpływ na rozrzut wyników ma niejednorodność właściwości badanego materiału, ale nie należy zaliczać jej do błędów pomiaru. W celu oceny niepewności wyników pomiarów przeprowadzono badania odkształceń plastycznych próbek ze standardowej stali 304. Próby powtarzane były 6-krotnie dla każdego poziomu energii impulsu laserowego tj.: 0,35; 0,7; 1; 1,22 J. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów średnic  $d$ , maksymalnych głębokości  $h$  oraz objętości utworzonych wgłębień  $V$  wraz z rozrzutami wyników pomiarów i względną procentową niepewnością pomiarową. Stwierdzono stosunkowo duży rozrzut wyników pomiarów średnicy odcisku, który spowodowany jest trudnością określenia położenia krawędzi wgłębienia będącego śladem odkształcenia plastycznego. Jest to typowy problem, który pojawia się we wszystkich pomiarach twardości materiałów wykazujących umocnienie i związane z tym charakterystyczne „zapadnięcie” brzegów odcisków. W przypadku materiałów o niskiej skłonności do umocnienia jak w przypadku stopów aluminium pojawia się „wypływka” widoczna na rysunku 2. Wówczas średnica odcisku może być wyznaczona bardziej precyzyjnie.

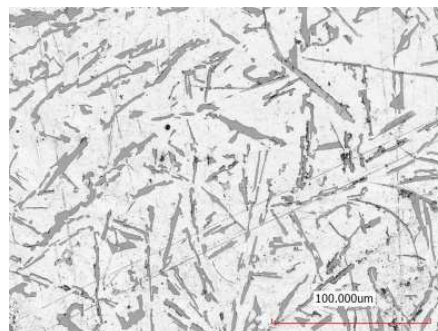
Tabela 1. Eksperymentalnie wyznaczone wartości cech geometrycznych strefy odkształceń plastycznych wraz z rozrzutami pomiarowymi dla stali 304 (niepewność dla  $1\sigma$ ).

E [J]	Cecha mierzona	Wartość średnia	$\Delta=W_{\max} - W_{\min}$	$\sigma$	Średnia niepewność [%]
0,35	d [mm]	1,686	0,24	0,0883	5
	h [ $\mu\text{m}$ ]	0,843	0,08	0,0262	5,6
	V [ $\text{mm}^3$ ]	0,002	0,0005	0,0002	10
0,7	d [mm]	1,895	0,28	0,0865	4,5
	h [ $\mu\text{m}$ ]	1,776	0,167	0,0511	2,8
	V [ $\text{mm}^3$ ]	0,0051	0,0005	0,0002	4
1	d [mm]	2,086	0,243	0,086	4
	h [ $\mu\text{m}$ ]	2,23	0,25	0,10	4,5
	V [ $\text{mm}^3$ ]	0,008	0,0005	0,0002	2,5
1,22	d [mm]	2,20	0,17	0,05	2,2
	h [ $\mu\text{m}$ ]	3,16	0,29	0,09	2,8
	V [ $\text{mm}^3$ ]	0,0128	0,0006	0,00025	2

Otrzymane wartości średnicy, głębokości oraz objętości strefy odkształceń plastycznych zawarte są w wąskich przedziałach a ich rozrzut ( $1\sigma$ ) wynosi kilka procent ich wartości średniej. Niepewność wyników pomiarów  $d$ ,  $h$ ,  $V$  wyraźnie maleje wraz ze wzrostem energii impulsu laserowego. Niepewności pomiarów twardości dynamicznej mierzonej przy zastosowaniu impulsu energii promieniowania laserowego są porównywalne do wyników w klasycznych metodach pomiarów twardości opartych na wciskaniu kulki w warunkach statycznych [13]. Rozrzut wyników jest spowodowany zarówno błędami pomiarowymi wynikającymi z wpływu fluktuacji mocy wiązki laserowej i jej cech geometrycznych oraz zmiany właściwości warstw cieczy i absorpcyjnej, które decydują o zmianach ciśnienia fali uderzeniowej. Na wynik pomiaru wpływa ponadto niejednorodność badanego materiału, która powoduje zawyżenie niepewności wyników po-

miarów. W celu określenia niepewności pomiarów proponowanej metody należy przeprowadzić dodatkowe badania na materiałach o bardzo wysokiej jednorodności (wzorcach).

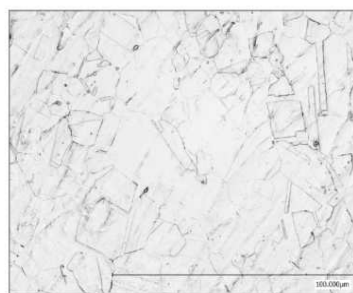
Analiza mikrostruktury materiałów w obszarze odkształceń plastycznych nie wykazała zmian mikrostruktury WW badanych materiałów nawet przy największych stosowanych energiach impulsu tj. 1 i 1,22 J. Nie stwierdzono efektów oddziaływania termicznego na mikrostrukturę WW eutektycznego stopu AK12, który charakteryzuje się niską temperaturą topnienia ( $577\text{ }^\circ\text{C}$ ) [14]. Na rysunku 3 przedstawiono mikrostrukturę tego stopu w obszarze największych odkształceń plastycznych wywołanych impulsem laserowym o energii 1 J.



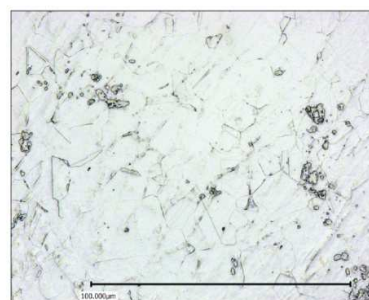
Rys. 3. Mikrostruktura stopu AK12 odkształconego plastycznie impulsem laserowym o energii 1 J

Rysunek 4a przedstawia mikrostrukturę stali 304 przed a rysunek 4b po oddziaływaniu impulsu laserowego o energii 1 J. Nie występują ślady nadtopień lub zmian wielkości ziaren. Widoczne na rysunku 4b ciemne obszary to nieusunięte cząstki warstwy grafitu.

a)

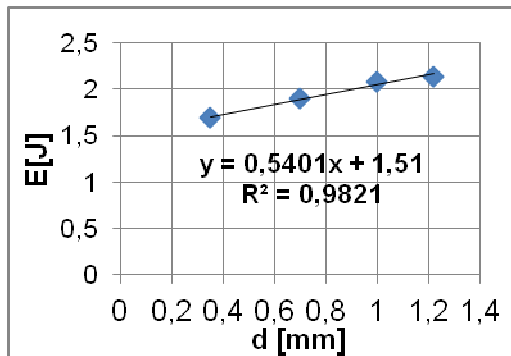


b)



Rys. 4. Mikrostruktura stali 304: a - przed, b - po oddziaływaniu impulsu laserowego o energii 1 J

W badanym zakresie stosowanych energii impulsów laserowych, stwierdzono liniową zależność pomiędzy energią impulsu a średnicą obszaru odkształcenia plastycznego (rys. 5).



Rys. 5. Zależność średnicy wgłębienia od energii impulsu laserowego

Do wyznaczenia twardości dynamicznej materiału niezbędna jest znajomość siły działającej na odkształcany materiał. W pracy wykorzystano zależność pomiędzy gęstością mocy impulsu laserowego  $I_0$  a ciśnieniem fali uderzeniowej  $P$  podaną przez Oros [5].

$$P = 1,02 \sqrt{I_0} \quad (1)$$

gdzie

$P$  - ciśnienie fali uderzeniowej [GPa]

$I_0$  - gęstość mocy promieniowania [ $\text{GW}/\text{cm}^2$ ]

Na podstawie tej zależności obliczono siłę działającą na powierzchnię badanych materiałów. Wartość twardości dynamicznej można uzależnić od wartości pracy odkształcenia pochłanianej przez materiał przy uderzeniu prostopadłym do badanej powierzchni. Za wartość twardości dynamicznej przyjmuje się pracę właściwą odkształcenia plastycznego [13]:

$$L = \int_0^h F \, dh \quad (2)$$

gdzie

$F$  - siła wgniatania

$h$  - głębokość wciskania

$$HD = L_{\text{wt}} = L/V \quad (3)$$

gdzie

$V$  - objętość materiału wyciśniętego [ $\text{mm}^3$ ]

W tabeli 2 przedstawiono obliczone wartości ciśnienia i siły w zależności od energii impulsu dla badanych materiałów. Tabela 3 zawiera wyznaczone metodą laserową wartości twardości dynamicznej (HDL) na podstawie zależności 3.

Uzyskane wartości twardości dynamicznej HDL zależą od zastosowanej w trakcie badania siły. Dla stali 304 oraz stopu AK12 występuje wzrost wartości twardości HDL wraz ze wzrostem wartości ciśnienia fali uderzeniowej. Przy założeniu, że głębokość odkształcenia nie jest duża, teoretycznie, twardość HD wyznaczana w oparciu o pomiar śladów odcisku kulki powinna być stała dla danego materiału, niezależna od energii uderzenia oraz średnicy wciskanej kulki [13]. Zależy ona od kąta wciskania, dlatego za prawidłową twardość przyjmuje się wartość maksymalną. Wartości twardości mogą być porównywane, gdy spełniony jest wa-

runek geometrycznego podobieństwa odcisków (prawo Kicka) a więc gdy odciski będą geometrycznie do siebie podobne, czyli muszą być proporcjonalne do trzeciej potęgi liniowego wymiaru odcisku. Warunek ten jest w przypadku pomiarów impulsem laserowym spełniony, zatem uzyskane wartości HDL dla badanych materiałów zawarte w tabeli 3 mogą być porównywane między sobą.

Tabela 2. Wartości ciśnienia i siły w zależności od energii impulsu dla badanych materiałów.

Materiał	E [J]	d [mm]	h [mm]	P [GPa]	F [N]
304	1,22	2,218	0,00317	5,733	2214
	1	2,085	0,0023	5,521	1884
	0,7	1,895	0,00177	5,083	1433
	0,35	1,686	0,00086	4,040	901
AK12	1	2,667	0,0129	4,605	2259
	0,7	2,177	0,00688	4,281	1701
	0,35	0,456	0,00184	3,428	1062
Pa 38	1	2,347	0,00461	4,605	2259
	0,7	2,150	0,00336	4,281	1701
	0,35	1,635	0,00157	3,428	1062

Zależność wartości twardości od siły występuje również w statycznych próbach pomiaru twardości metodą Brinella. Wartość twardości HB przy wciskaniu kulki w materiał rośnie wraz z siłą. Przyjmuje się, że prawidłowa wartość twardości Brinella jest równa twardości maksymalnej.

Tabela 3. Wartości pracy  $L$  i twardości dynamicznej HDL w zależności od energii impulsu oraz twardości Brinella dla badanych materiałów.

Materiał	[J]	L [Nmm]	HD=L/V [N/mm <sup>2</sup> ]	HB [kG/mm <sup>2</sup> ]
304	1,22	7,018	5483	220
	1	4,334	5446	
	0,7	2,536	4952	
	0,35	0,775	3838	
AK12	1	29,145	934	87
	0,7	13,916	813	
	0,35	4,488	791	
PA 38	1	10,408	1318	92
		5,711	1303	
		1,673	1354	

Przy założeniu, że dla pomiarów dynamicznych impulsem laserowym, występuje analogiczna zależność jak dla pomiarów statycznych, właściwa wartość twardości dynamicznej niezależna od siły powinna być wartością maksymalną. W przypadku stali 304 maksymalną wartość twardości HDL można wyznaczyć analizując funkcję opisującą zależność twardości od obciążenia  $HDL=f(F)$ . W tym celu niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych badań przy wyższych energiach impulsu laserowego.

W przypadku pomiarów stopu aluminium AK12 otrzymane wartości twardości wykazują niewielkie zmiany wraz ze wzrostem działającej siły, a dla stopu PA38 dla wszystkich

stosowanych energii impulsu wartości twardości są zbliżone. Zatem w przypadku dynamicznych pomiarów twardości stopów aluminium o niższej twardości zastosowane energie są wystarczająco duże, aby osiągnąć twardość zbliżoną do maksymalnej. Natomiast w przypadku pomiarów HDL stali wskazane jest rozszerzenie zakresu badań dla energiach impulsów większych niż 1,22 J.

Uzyskane wgłębienia będące efektem odkształceń plastycznych impulsami laserowymi nie są geometrycznie podobne do odcisków przy klasycznej próbie Brinella; kąty wciskania w próbie statycznej i dynamicznej znacznie się różnią. Przy odkształceniach dynamicznych zagłębienia są znacznie płytsze w stosunku do średnicy niż dla próby Brinella. Również na wynik pomiaru twardości zasadniczy wpływ ma prędkość odkształcenia, która w przypadku oddziaływania impulsu laserowego jest rzędu  $10^6 \text{ s}^{-1}$ . Zatem nie można bezpośrednio porównywać wartości twardości wyznaczonych obiema metodami.

Wartości HDL są wyższe niż HB uzyskane w pomiarach statycznych, można stwierdzić, że występują zbliżone proporcje w różnicach twardości mierzonych stopów jak w przypadku pomiarów statycznych, zatem proponowana metoda pomiaru twardości jest wystarczająco czuła na zmianę właściwości plastycznych materiałów w warunkach obciążeń dynamicznych. Konieczne są dalsze badania doświadczalne pozwalające na pomiar sił wywołujących trwałe odkształcenia materiału przy różnych energiach impulsów laserowych. Pozwoli to weryfikację poprawności zastosowanej w obliczeniach twardości dynamicznej HDL zależności ciśnienia od energii impulsu laserowego dla proponowanej metody.

## Wnioski

1. Nanosekundowe impulsy laserowe o energiach 0,35 – 1,22 J i czasach 10 ns generują powtarzalne odkształcenia plastyczne powierzchni stali i stopów aluminium.
2. Zaproponowany układ pomiarowy pozwala na uzyskanie odpowiedniego poziomu ciśnień oraz powtarzalnych warunków odkształceń plastycznych badanych materiałów.
3. Przeprowadzone badania nie wykazały termicznego oddziaływania impulsów laserowych na badane materiały.
4. Impulsy laserowe mogą być zastosowane do oceny dynamicznej twardości materiałów w warunkach bardzo dużych prędkości odkształcenia.
5. Badania twardości dynamicznej HDL należy wykonywać w standardowych warunkach (energia, czas impulsu)

## LITERATURA

1. Malinowski J.Z., Klepaczek J.R., Kowalewski Z.L., Miniaturized compression test at very high strain rate by direct impact. *Experimental Mechanics* 47, 451–463, 2007.
2. Gupta V., Aragon A.S., Parks D.M., Cornie J.A., Measurement of interface strength by laser-puls induced spallation. *J. Mech. Phys.Solids* 40, 141-180, 1992.
3. Ikeda R., Cho H., Sawabe A., Takemoto M., Laser spallation method to measure strength against I-mode decohesion CVD diamond films. *Diamond & Related Materials* 14, 631–636, 2005.
4. Kohlhofer W., Penny R.K., Glass-modified stress waves for adhesion measurement of ultra thin films for device applications. *Int. J. Pres. Ves&Pinning* 61, 65-75, 1995.

5. Oros C., Investigations involving of shock wave generations and shock pressure measurement in direct ablation regime and confined ablation regime. *Shock waves*, 11, 393-397, 2002.
6. Ocana J.L., Morales M., Molpeceres C., Torres J., Laser Shock Processing as a Method for the Improvement of Metallic Materials Surface Properties: A Discussion on the Influence of Combined Mechanical and Thermal Effects. *Appl. Surface Science*, 238, 242-248, 2004.
7. Napadtek W., Sarzyński A., Umacnianie warstwy wierzchniej stopu tytanu WT1-3 falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym - zjawiska fizyczne i wybrane właściwości. *Inżynieria Materiałowa* 3, 228-232, 2007.
8. Youssef G., Crum R., Prikhodko S. V., Seif D., Po G., Ghoniem N., Kodambaka S., Gupta V. The influence of laser-induced nanosecond rise-time stress waves on the microstructure and surface chemical activity of single crystal Cu nanopillars. *Appl Phys.* 28; 113, 2013.
9. Montross Ch.S., Wei T., Ye T., Clark G., Mai Y-W., Laser shock processing and its effect on microstructure and properties of metal alloys; a review, *Int. J. of Fatigue* 24, 1021-1036, 2002.
10. Ocaña Moreno, Jose Luis, et al. Laser shock processing: an emerging technique for the improvement of fatigue life and surface properties of high reliability metallic components. 4th International Conference on Materials Science and Technologies (ROMAT 2012), 17/10/2012 -19/10/2012, Bucharest, Romania, 2012
11. Sarzyński A., Marczak J., Strzelec M., Pomiar ciśnienia fal uderzeniowych w eksperymentach laserowego umacniania udarowego, *Inżynieria materiałowa* 3, 228-232, 2011.
12. Morales M., Porro J.A., Blasco M., Molpeceres C., Ocana J.L., Numerical simulation of plasma dynamics in laser shock processing experiments. *Appl. Surface Science*, 255, 5181–5185, 2009.
13. Błażewski S., Mikoszewski J. Pomiary twardości metali WNT 1981
14. Wesolowski K. Metaloznawstwo i obróbka cieplna WNT 1981.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/09/B/ST8/03468