

Tadeusz BURAKOWSKI
Wojciech NAPADŁEK

LASEROWE UMACNIANIE UDAROWE MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH – STAN AKTUALNY ORAZ PERSPEKTYWY TECHNOLOGICZNE

STRESZCZENIE *Na podstawie literatury i badań własnych omówiono właściwości promieniowania laserowego, impulsowe oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem, laserowe wytwarzanie fali uderzeniowej impulsem laserowym (metodą LSP) (gęstość mocy w impulsie, czas trwania impulsu, promieniowanie emitowane i pochłaniane). Przedstawiono również wyniki badań laboratoryjnych rejestracji zjawisk fizycznych występujących w czasie laserowego umacniania udarowego stopu aluminium.*

Słowa kluczowe: *promieniowanie laserowe, obróbka laserowa, laserowe umacnianie udarowe*

prof. dr hab. inż. Tadeusz Burakowski
e-mail: wach@imp.edu.pl

Instytut Mechaniki Precyzyjnej

dr inż. Wojciech Napadłek
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechaniczny

1. PROMIENIOWANIE LASEROWE

Promieniowanie laserowe jest czystą formą energii, dlatego jest idealnym narzędziem do obróbki materiałów, gdyż nie zawiera żadnych domieszek, które mogłyby zmienić skład chemiczny obrabianego materiału.

Promieniowanie świetlne (fotonowe, optyczne) jest multichromatycznym promieniowaniem elektromagnetycznym zakresu widzialnego i niewidzialnego (nadfioletu i podczerwieni), emitowanym przez ciała nagrzane do temperatury niższej lub wyższej niż temperatura topnienia (tzw. promieniowanie temperaturowe) lub – znacznie rzadziej – nie nagrzane, ale emitowane w wyniku reakcji chemicznych (tzw. promieniowanie luminescencyjne). Promieniowanie świetlne rozchodzi się w różnych kierunkach, ale można je za pomocą zwierciadeł kierować w określoną stronę lub za pomocą zwierciadeł i soczewek skupiać w określonym miejscu. W skrajnych przypadkach skupione w ognisku promieniowanie może nagrzać materiał nawet do kilku tysięcy kelwinów (np. w piecach słonecznych); przemysłowo wykorzystuje się temperatury znacznie niższe [2].

Promieniowanie laserowe jest specjalnym promieniowaniem świetlnym wyróżniającym się:

- emisją kierunkową w postaci wiązki o bardzo małej rozbieżności rzędu nawet dziesiątych części mikroradiana;
- ścisłą monochromatycznością dochodzącą do 10^{-6} μm ;
- koherencją, czyli spójnością – zgodnością fazową w przestrzeni i w czasie.

Dzięki tym właściwościom, których nie posiada promieniowanie świetlne nielaserowe, promieniowanie laserowe w kontakcie z ośrodkiem (materiałem) wyróżnia się szeregiem właściwości niemożliwych do uzyskania przy wykorzystaniu innego promieniowania, z których najważniejsza jest gigantyczna gęstość mocy doprowadzonej do obrabianego materiału dochodząca do 10^6 W/cm^2 dla promieniowania ciągłego i – wyjątkowo – do 10^{11} W/cm^2 (a nawet więcej) dla promieniowania impulsowego. Ta gęstość mocy może być doprowadzona do obszaru o małej i bardzo małej powierzchni (średnica plamki laserowej może wynosić od kilku μm do kilkunastu mm) w ściśle wybrane miejsce, w wybranym czasie i w wybranej ilości. Inne metody nie dają takich możliwości [6, 8].

Lasery służą do generowania głównie promieniowania świetlnego, a także rentgenowskiego i gamma. W areologii^{*)} znajdują zastosowanie lasery o pracy ciągłej i impulsowej. Do umacniania udarowego stosowane są wyłącznie lasery o pracy impulsowej.

^{*)} Areologia – dział nauki zajmujący się badaniem procesów i zjawisk zachodzących w warstwach wierzchnich i powłokach wyrobów, ich projektowaniem, wytwarzaniem i użytkowaniem; odpowiada dotychczasowemu pojęciu „inżynieria powierzchni”.

2. IMPULSOWE ODDZIAŁYWANIE WIĄZKI LASEROWEJ Z MATERIAŁEM

Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem zależy od wzajemnych relacji właściwości promieniowania laserowego i właściwości materiału obrabianego.

Promieniowanie laserowe charakteryzują głównie: długość fali λ , gęstość mocy q i wielkość oraz kształt plamki laserowej d . Promieniowanie impulsowe charakteryzuje ponadto wartość energii lub gęstość energii w impulsie g_e , czas trwania impulsu τ („tau”), częstotliwość repetycji impulsów f i liczba impulsów. Ważny jest również rozkład gęstości mocy w plamce laserowej.

Do laserowego umacniania udarowego stosowane są wyłącznie lasery o pracy impulsowej, zwykle laser Nd:YAG (generujący wiązkę o długości fali $\lambda = 1,0641 \mu\text{m}$ w zakresie podczerwieni oraz harmoniczne $0,532$; $0,355$ i $0,266 \mu\text{m}$ o długości impulsu $\tau = 0,1 \div 100 \text{ ns}$ i częstotliwości impulsów $f = 50 \text{ kHz}$ lub ekscymerowy zakres nadfioletu). Energia w impulsie dochodzi do 200 J i więcej [1].

Dla właściwości określonego materiału najważniejsze to: temperatura przemian fazowych, temperatura topnienia i parowania, współczynnik absorpcji promieniowania (chropowatość powierzchni, utlenianie, powłoka absorpcyjna), współczynnik przewodzenia ciepła.

Ścisłe wzajemne relacje całościowe między właściwościami promieniowania a właściwościami materiału nie są znane. Znane są natomiast jakościowe zależności między niektórymi właściwościami. Na przykład wiadomo, że [6]:

- ze wzrostem współczynnika absorpcji promieniowania przez warstwę wierzchnią materiału rośnie stopień nagrzania materiału, ale absorpcja promieniowania zależy od długości fali λ i temperatury materiału;
- ze wzrostem gęstości mocy q i czasu jej oddziaływania rośnie stopień nagrzania materiału (aż do parowania włącznie);
- gaussowski rozkład gęstości mocy w przekroju poprzecznym wiązki laserowej, zwłaszcza w plamce laserowej jest korzystny dla laserowego cięcia, spawania, drążenia otworów, ale mniej korzystny dla zastosowań areologicznych, gdzie wymagany jest rozkład bardziej równomierny.

Nie bardzo jeszcze dokładnie wiadomo, jak wpływać na tworzenie się obłoku plazmy impulsowej i jak go wykorzystać do umacniania różnych materiałów. Ogólnie wiadomo natomiast, że warunkiem zaistnienia udarowego umacniania laserowego jest ultraszybkie grzanie, które można uzyskać tylko przy grzaniu impulsowym [11]. Impuls laserowy trwa wielokrotnie krócej niż typowy impuls mechaniczny (zderzenie się ciał z dużymi prędkościami).

3. LASEROWE GENEROWANIE FALI UDERZENIOWEJ

Obróbka powierzchni metali za pomocą promieniowania laserowego przestała już być laboratoryjną ciekawostką i znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle. Promieniowanie laserowe może być wykorzystywane do oczyszczania powierzchni, hartowania, przetapiania, wtapiania powierzchniowego (stopowania), azotowania, nawęglania, borowania itd. Za pomocą promieniowania impulsowego o wysokim natężeniu (10^9 – 10^{10} W/cm²) można łatwo generować fale uderzeniowe w ciałach stałych [1, 3–16]. Pierwsze eksperymenty polegały na bezpośrednim naświetlaniu odkrytej powierzchni metalu przez impuls laserowy. Impuls naprężeń nie osiąga wówczas najwyższej możliwej wartości. Można znacznie zwiększyć amplitudę tego impulsu i wydłużyć czas jego trwania, jeśli przed obróbką powierzchnia metalu zostanie pokryta cienką (ułamki milimetra) warstwą absorbującą promieniowanie laserowe oraz grubszą (kilka milimetrów) warstwą inercyjną hamującą szybkość ekspansji plazmy [1,3–16]. Układ obróbki można skonfigurować w taki sposób, by na obrabiany materiał oddziaływała jedynie fala naprężeń wytworzona przez impuls laserowy.

Warstwa absorpcyjna (dokładniej zespół kilku warstw absorpcyjno-ochronnych, np. farba, o łącznej grubości kilku mikrometrów) ma za zadanie zwiększyć absorpcję promieniowania (przynajmniej w fazie początkowej), nie dopuścić do penetracji fali cieplnej w głąb metalu oraz ochronić obrabianą powierzchnię przed destrukcyjnym działaniem ablacji laserowej. Warstwa inercyjna (płytką szklaną, warstwą wodną lub inny dielektryk przezroczysty dla promieniowania) o grubości kilku milimetrów, umieszczona na warstwie absorpcyjnej, ogranicza szybkość ekspansji plazmy, dzięki czemu rośnie amplituda impulsu naprężeń i wydłuża się czas jego trwania. Taka trójwarstwowa konfiguracja *metal + warstwa absorpcyjna + warstwa inercyjna* jest powszechnie stosowana przy laserowej obróbce, mającej na celu wytworzenie na powierzchni metali trwałej warstwy z naprężeniami ściskającymi (tzw. laserowe umacnianie udarowe falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym, ang. *Laser Shot Peening – LSP*, potocznie nazywana również „kulowaniem laserowym”). Warstwa inercyjna może o rząd wielkości zwiększyć amplitudę impulsu ciśnienia oraz kilkakrotnie wydłużyć czas jego trwania.

Pojedynczy impuls laserowy, pochłonięty przez materiał obrabiany, w zależności od gęstości mocy lub energii i czasu trwania impulsu, może powodować [4, 6]:

- 1) nagrzanie materiału obrabianego z możliwością zachodzenia ewentualnych przemian fazowych; gęstość mocy – jak na lasery – jest niewielka

- $q \leq 10^3 \div 10^5 \text{ W/cm}^2$; w materiale nagrzewanym zachodzą klasyczne zjawiska pochłaniania promieniowania do głębokości zależnych od długości fali promieniowania lasera i przewodzenia ciepła w głąb materiału. Jest to typowy zakres zachodzenia obróbki cieplnej bezprzetopieniowej; występuje strefa wpływu ciepła;
- 2) nagrzanie materiału obrabianego do temperatury topnienia, a nawet parowania; gęstość mocy $q \approx 10^6 \div 10^7 \text{ W/cm}^2$ powodując parowanie (ablację materiału) nie powoduje istotnego wzrostu ciśnienia, nie występuje umacnianie udarowe, ale można już drażyć dość głębokie otwory i prowadzić obróbkę cieplną przetopieniową; występuje strefa wpływu ciepła;
 - 3) nagrzewanie materiału obrabianego do temperatury intensywnej ablacji, w wyniku której występuje obłok plazmy częściowo pochłaniający i częściowo odbijający padające promieniowanie; gęstość mocy $q \approx 10^8 \div 10^9 \text{ W/cm}^2$ powoduje, że ciśnienie obłoku plazmy generuje w niej i kieruje w stronę materiału fale uderzeniowe; brak strefy wpływu ciepła;
 - 4) nagrzewanie materiału obrabianego do temperatury jonizacji, zachodzące w warunkach wysokiej próżni i generujące plazmę niskotemperaturową; gęstość mocy $q \approx 10^9 \div 10^{10} \text{ W/cm}^2$, przy $q > 10^{11} \text{ W/cm}^2$ powstaje coraz gęstsza plazma, która w skrajnym przypadku może prowadzić do kontrolowanej syntezy termojądrowej.

Oddziaływanie według punktu 1 to oddziaływanie termiczne, według punktu 2÷4 – ablacyjne. Kilka lub więcej impulsów laserowych skierowanych w to samo miejsce przedmiotu obrabianego laserowo powoduje zintensyfikowanie efektu cieplnego i nie zawsze przewidywalne skutki.

W laserowym umacnianiu warstwy wierzchniej materiałów metalowych (hartowanie, stopowanie, nadtapianie) wykorzystuje się cieplne działanie wiązki laserowej na materiał obrabiany, natomiast w laserowym umacnianiu udarowym (LSP) – działanie ablacyjne, natapianie, działanie mechaniczne fali uderzeniowej, przy czym fala uderzeniowa powstaje również w wyniku oddziaływania cieplnego wiązki laserowej na materiał [1].

3.1. Czas trwania impulsu

Oddziaływanie impulsów laserowych na materiał zależy nie tylko od przenoszonej gęstości mocy (lub gęstości energii), ale również od czasu trwania impulsu – czasu oddziaływania promieniowania laserowego na materiał. Przy oddziaływaniu promieniowania laserowego o gęstości mocy do 10^8 W/cm^2 i czasie trwania znacznie przekraczającym czasy relaksacji wynoszące $10^{-9} \div 10^{-11} \text{ s}$,

energia cieplna wyzwalana przy zetknięciu się wiązki z materiałem jest odprowadzana w głąb materiału: jego nagrzewanie, topnienie i odparowanie – zależne od gęstości doprowadzonej energii (lub mocy) – przebiega zgodnie z tradycyjnymi prawami przekazywania energii [9].

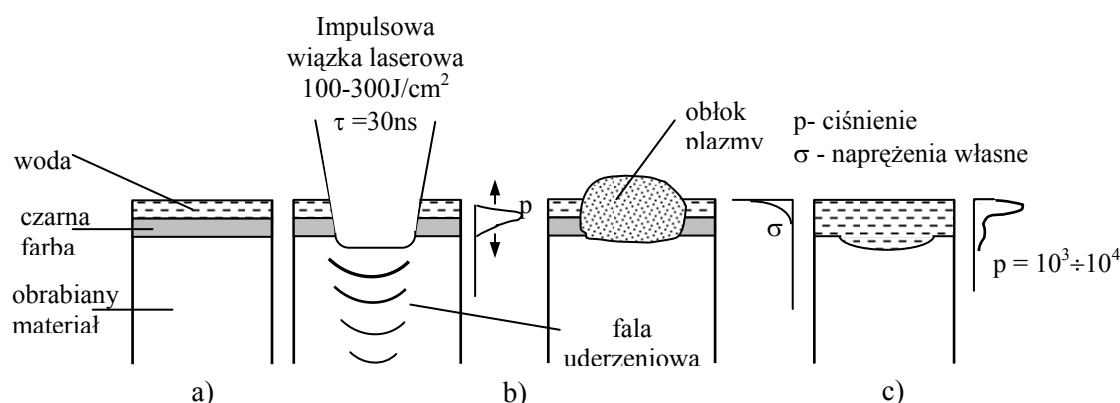
Natomiast przy czasie trwania impulsu laserowego 10^{-8} – 10^{-10} s i przy gęstościach mocy 10^{10} – 10^{12} W/cm² i większych, czas oddziaływania impulsu na materiał przybliża się do czasu relaksacji, w związku z czym nie udaje się odprowadzić energii w głąb materiału. Bardzo duża gęstość mocy w mikroobszarze warstwy wierzchniej powoduje przejście materiału w stan plazmy. Nagrzewana plazma rozszerza się, powstają bardzo duże – podobnie jak przy wybuchu – ciśnienia i może powstać fala uderzeniowa, czyli fala silnej nieciągłości parametrów przepływu gazu, rozchodząca się w materiale z prędkością większą od lokalnej prędkości dźwięku. Powstaje ona jednak tylko wtedy, gdy czas trwania impulsu jest krótszy od czasu rozchodzenia się fali uderzeniowej w mikroobszarze [2]. Wtedy ciśnienie w warstwie powierzchniowej materiału jest bardzo duże, a w głębi materiału szybko maleje. Nierównomierność rozchodzenia się ciśnień jest powodem powstawania fali uderzeniowej [9].

Dla większości ciał stałych czas rozchodzenia się fal uderzeniowych wynosi ok. 10^{-5} s (przy grubości ciała ok. 10 mm). W tym przypadku impulsy laserowe już o czasie trwania 10^{-6} – 10^{-7} s mogą powodować powstanie fali uderzeniowej. Przy gęstości mocy 10^9 W/cm² i czasie trwania impulsu 10^{-8} s przy współczynniku pochłaniania padającego promieniowania 0,1 – wartości ciśnień dla promieniowania lasera CO₂ wynoszą: $0,212 \cdot 10^5$ MPa dla miedzi; $0,121 \cdot 10^5$ MPa dla aluminium i $0,060 \cdot 10^5$ MPa dla berylu. Oddziaływanie promieniowania impulsowego lasera rubinowego jest dwukrotnie silniejsze [10]. Lasery Nd:YAG emitują promieniowanie o gęstości energii w impulsie 100–300 J/cm² i czasie trwania impulsu $3 \cdot 10^{-9}$ s i mogą wytwarzać ciśnienia udarowe do 10^4 MPa, a więc 4–20 razy wyższe niż naciski przy walcowaniu na zimno (600–7500 MPa) i 10–100 razy wyższe niż wynosi ciśnienie prasowania wyprasek proszkowych (100–1250 MPa). Tak wysokie ciśnienia powodują oddziaływanie na materiał udaru mechanicznego odkształcającego warstwę wierzchnią i utwardzającego materiał. Przy tym obok strefy umocnienia mechanicznego może jeszcze występować strefa wpływu ciepła (a więc strefa ewentualnego umocnienia cieplnego), ale tylko przy mniejszej gęstości mocy. Przy przejściu materiału w stan plazmy i odparowaniu w otaczającą mikroprzestrzeń zjonizowany obłok (plazma) powoduje ekranowanie obrabianego przedmiotu przed wiązką laserową. Powstała plazma wypływa ponad powierzchnię obrabianego materiału, w miejscu padania wiązki tworzy się krater o kształcie zależnym od rozkładu gęstości mocy w przekroju poprzecznym wiązki, po którego ściankach plazma wypływa na zewnątrz i których materiał jest umacniany ciśnieniem plazmy [15].

3.2. Promieniowanie emitowane i pochłaniane

Nie cała energia promieniowania emitowanego przez laser jest pochłaniana przez obrabiany materiał, lecz tylko jej część zależna od współczynnika pochłaniania. Dla metali, zwłaszcza o powierzchni gładkiej i nieutlenionej, absorpcja promieniowania jest mała. Aby ją zwiększyć, pokrywa się materiał powłoką absorpcyjną (np. farbą, gwaszem, sadzą), a ściślej absorpcyjno-ochronną, lub rzadziej – powierzchnię materiału się chropowaci. Powłoka absorpcyjna w tym przypadku powinna być dostatecznie gruba i odznaczać się ponadto małym współczynnikiem przewodzenia ciepła w głąb materiału, aby zmniejszyć nagrzewanie materiału, ale nie za gruba, aby nie wytlumiła impulsu ciśnienia przed dotarciem do powierzchni obrabianego materiału [6, 11, 12].

W wyniku nagrzania (wraz z powłoką) powierzchni metalu do temperatury parowania – materiał powłoki absorpcyjnej i powierzchni zewnętrznej warstwy wierzchniej gwałtownie odparowuje (grubość warstwy odparowanej wynosi $0,1 \div 10 \mu\text{m}$), tworzy się obłok plazmy i wzrasta ciśnienie w obłoku (rys. 1). Aby ograniczyć rozchodzenie się fali ciśnienia w kierunku prostopadłym, ale od powierzchni, przed powłoką absorpcyjną umieszcza się warstwę inercyjną, np. w postaci kilkumilimetrowej lub grubszej warstwy wody albo szkła, lub wody i szkła. Obydwa elementy funkcjonalne układu laserowego przepuszczają promieniowanie lasera Nd:YAG, również i odbite od powierzchni metalu, ale nie przepuszczają obłoku plazmy, który nie może swobodnie rozszerzać się. Wzrasta w nim ciśnienie i powstaje fala uderzeniowa rozprzestrzeniająca się we wszystkie strony, w tym w stronę materiału obrabianego [3, 5, 7, 12–14, 16].



Rys. 1. Schemat ideowy udarowego umacniania laserowego [1]:

a – przed impulsem laserowym, b – w trakcie impulsu laserowego, c – po impulsie laserowym

Fala ciśnienia uderzając w materiał odkształca go plastycznie i umacnia, przy czym przemieszcza się przez materiał obrabiany, dochodzi do tylnej ściany

materiału, odbija się od niej, powraca do obrabianej powierzchni materiału, odbija się od niej itd.; amplituda ciśnienia fali maleje aż do zaniku. Promieniowanie laserowe nie wnika już w głąb materiału, gdyż ekranuje je obłok plazmy. Przemieszczaniu się fali ciśnienia w materiale towarzyszy powstawanie naprężeń rozciągających i ściskających. Przy prawidłowo prowadzonym procesie w rdzeniu zalegają po obróbce laserowej naprężenia rozciągające, a w warstwie wierzchniej ściskające, których rozkład jest zbliżony do rozkładu naprężeń przy klasycznym kulowaniu mechanicznym [13].

Impuls nowoczesnego lasera Nd:YAG może wytworzyć plazmę w ośrodku gazowym lub stałym o temperaturze $10^4 \div 10^6$ K, ciśnieniu $1 \div 10$ GPa i czasie trwania $5 \div 100$ ms [11]. Zastosowanie warstw inercyjnych zwiększa wartość maksymalnego ciśnienia kilkakrotnie (tab. 1) [11].

TABELA 1

Ciśnienie [bary] po upływie 100 ns od początku impulsu lasera Nd:YAG ($\lambda = 1,064 \mu\text{m}$) w folii aluminiowej o grubości 0,6 mm [11]

Gęstość energii [J/cm^2]	Bez warstwy inercyjnej	Z warstwą inercyjną / krotność wzrostu	
		woda	sztywna przegroda
1	1000	3000 / 3	9000 / 9
10	4000	10000 / 2,5	17000 / 4,25

Pochłonięte impulsy laserowe o gęstości energii $100 \div 300 \text{ J}/\text{cm}^2$ i czasie trwania 300 ns mogą wytwarzać ciśnienia udarowe o wartości $10^3 \div 10^4$ MPa [11].

4. BADANIA ZJAWISK FIZYCZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH PRZY LASEROWYM UMACNIANIU UDAROWYM

Badania zjawisk fizycznych oraz diagnostykę fal uderzeniowych generowanych w ciałach stałych za pomocą zogniskowanych wiązek laserowych o dużej gęstości mocy prowadzono w WAT od 1973 r. [3]. W przedstawionym artykule pokazano wzrost naprężeń w folii aluminiowej za pomocą prostego zabiegu zmiany konfiguracji oświetlenia tarczy wiązką laserową [11].

Głównym celem prowadzonych badań było poznanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas umacniania powierzchniowego metodą LSP materiałów konstrukcyjnych (m. in. stopów aluminium), materiałów konstrukcyjnych powszechnie stosowanych w produkcji elementów środków transportu, takich jak: stale stopowe, stopy aluminium oraz mające duże perspektywy technologiczne stopy

tytanu, a także określenie wpływu tej technologii na wybrane ich właściwości użytkowe.

Cel ten został osiągnięty dzięki przeprowadzeniu szeregu symulacji numerycznych oraz badań laboratoryjnych wybranych materiałów i elementów środków transportu, poprzez: opracowanie modelu numerycznego, wykonanie opisu matematycznego zjawisk, opracowanie programu komputerowego (metodą różnic skończonych – MRS), służącego do modelowania tych zjawisk [3, 11–13]. W warunkach laboratoryjnych dokonano analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas LSP. Do udarowego umacniania stopów aluminium zastosowano impulsowy laser Nd:YAG z Q – modulacją, emitujący promieniowanie laserowe od UV do IR. Stosowano podstawową długość fali – 1,064 μm , czas trwania impulsu – 10÷25 ns, częstość repetycji – 1–10 Hz, energia impulsu ok. 500 mJ. Do rejestracji efektu ablacji w strefie oddziaływania wiązki laserowej zastosowano szybką kamerę cyfrową CCD o minimalnym czasie ekspozycji 1 μs . Analiza topografii powierzchni przeprowadzona została na profilografometrze Taylor-Hobson (badania w układzie 2D i 3D). Obserwacje topografii powierzchni po obróbce laserowej przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego stereoskopowego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Poza tymi eksperymentami przeprowadzono również badania metalograficzne, pomiar stanu naprężeń własnych, badania mechaniczne, zmęczeniowe oraz tribologiczne^{*)}. Eksperymenty te były pomocne w wyborze najlepszych wariantów technologicznych laserowego umacniania LSP.

W pracy zostały przedstawione wybrane wyniki wstępnych badań laboratoryjnych, związanych m. in. z rejestracją zjawisk fizycznych występujących w czasie laserowego umacniania udarowego (LSP).

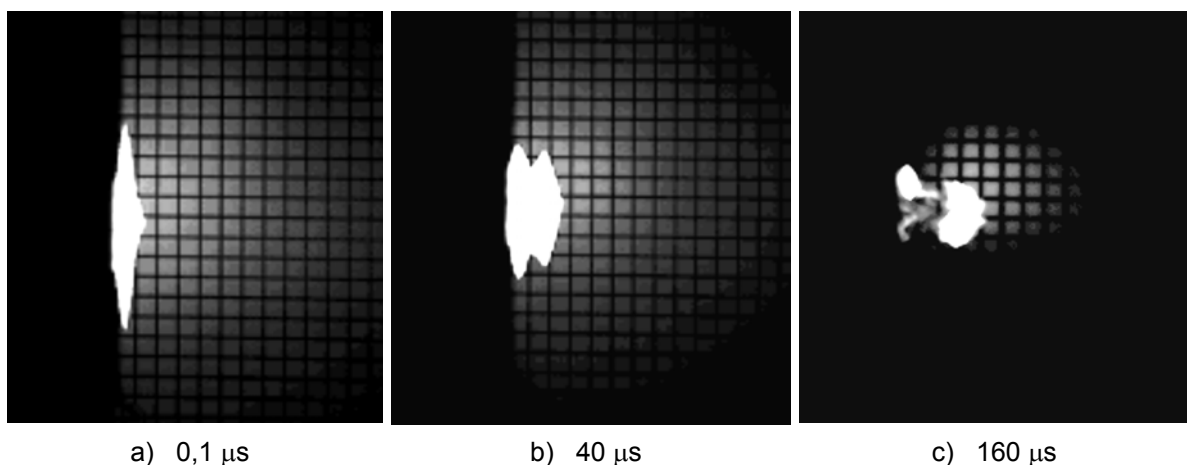
4.1. Wyniki badań

Stanowisko laboratoryjne zbudowane w WAT składa się z dwóch kamer CCD z optyką, asynchronicznego układu sterującego, karty elektronicznej typu FrameGrabber, multipleksera i przenośnego komputera PC. Minimalny czas ekspozycji wynosił 0,1 μs . Synchronizację zapewniał generator cyfrowy. Uruchamiał on proces akwizycji po otrzymaniu zewnętrznego impulsu elektrycznego. Sygnał ten wyzwał też migawkę sensora oraz układ podświetlający, zgodnie z zadanymi czasami opóźnienia.

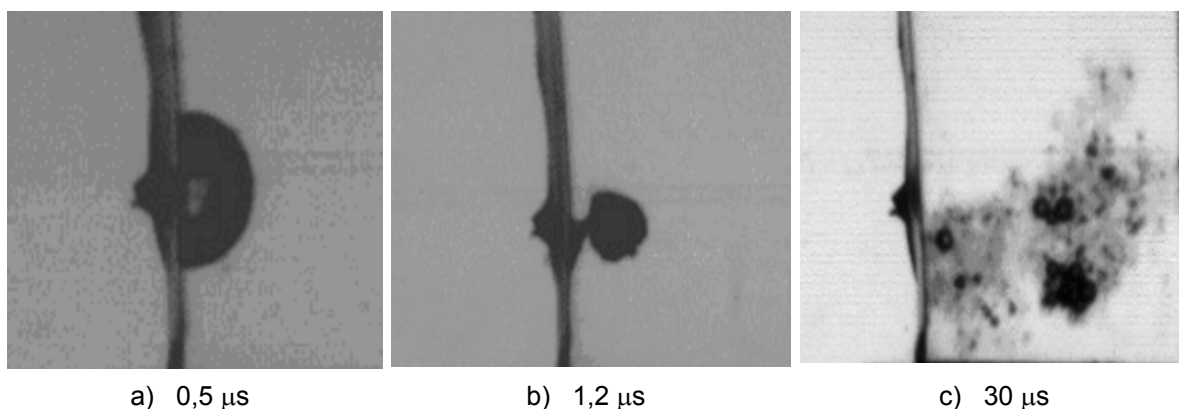
Na rysunkach 2 i 3 zaprezentowano fotografie cieniowe obłoku plazmowego powstającego przy obróbce powierzchni metali: w powietrzu (rys. 2) i w wodzie (rys. 3). Obłoki te różnią się istotnie między sobą, co świadczy także o róż-

^{*)} Procesy tribologiczne – procesy zachodzące w ruchomym styku ciał stałych.

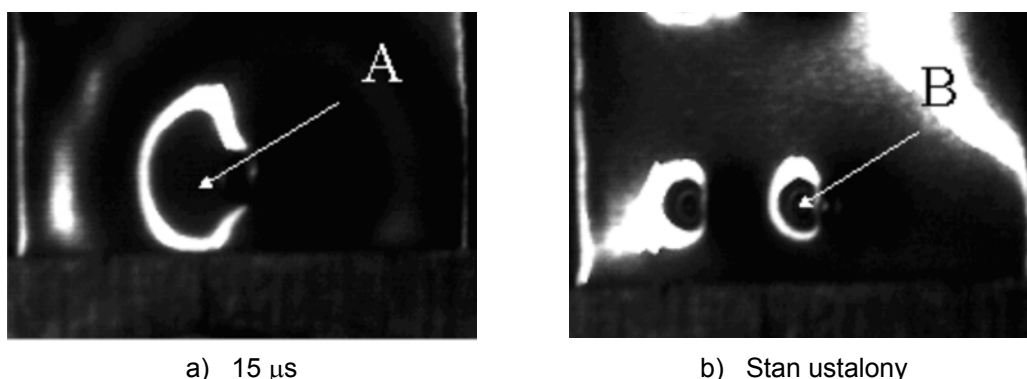
nicowaniu fali uderzeniowej. Fala ta generowana była w wyniku procesu ablacji laserowej warstwy absorpcyjnej oraz folii aluminiowej. Jej front w odpowiednich chwilach rejestracji posiadał zróżnicowane kształty. Stosując wodę jako medium inercyjne uzyskano wyraźny kształt fali kulistej (rys. 3a). Potwierdza to korzystny i istotny wpływ warstwy inercyjnej na zwiększenie i ujednorodnienie naprężeń własnych ściskających w warstwie wierzchniej modyfikowanych materiałów – w tym przypadku folii aluminiowej. Na rysunku 4 pokazano zmiany stanu deformacji folii wykonanej ze stopu aluminium ($g = 0,11$ mm) zachodzące w trakcie obróbki metodą LSP. W tym przypadku obserwowano tylną powierzchnię folii. Ciśnienie wytworzone przez impuls laserowy zdeformowało folię, która w pierwszej fazie uległa dużemu odkształceniu sprężystemu (rys. 4a). Procesy relaksacyjne spowodowały zmniejszenie jej stanu deformacji (rys. 4b). Stwierdzono również, że odkształcenia plastyczne w wariancie z warstwą inercyjną (wodą) są prawie pięciokrotnie większe, niż wywołane falą ciśnienia generowaną w powietrzu.



Rys. 2. Fotografie obłoku plazmowego wytworzonego w powietrzu w trzech chwilach czasu od momentu generacji impulsu laserowego



Rys. 3. Fotografie obłoku plazmowego wytworzonego w wodzie w trzech chwilach czasu od momentu generacji impulsu laserowego



Rys. 4. Wizualizacja stanu deformacji folii aluminiowej: a) po 15 μs (A) od generacji impulsu laserowego, b) stan ustalony (B)

5. PERSPEKTYWY TECHNOLOGICZNE ORAZ KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Jak wspomniano we wstępie, literatura dotycząca omawianego zagadnienia jest ogromna, dlatego w dalszej części przedstawione zostaną tylko wybrane z prac, charakterystyczne cechy laserowego umacniania udarowego LSP. Opis ten posłuży do wyznaczenia kierunków przyszłych badań wykonywanych w WAT we współpracy z innymi ośrodkami naukowo-badawczymi.

Szczytowe ciśnienie fali uderzeniowej, generowanej podczas obróbki laserową falą uderzeniową, jest bardzo ważnym parametrem, którego wartość powinna być dokładnie kontrolowana. Wartość tego ciśnienia zależy od natężenia promieniowania, współczynnika absorpcji (warstwy absorpcyjno-ochronnej), ale i od mechanicznych właściwości obrabianego ośrodka. W najprostszej konfiguracji, kiedy próbka Al była pokryta kilkumilimetrową warstwą wody, przy zastosowaniu lasera Nd:YAG 1064 nm z impulsem o czasie trwania 25 ns, przy gęstości mocy 10 GW/cm², otrzymano ciśnienie maksymalne około 5,5 GPa. Przy wyższych gęstościach mocy plazma powstawała nie w metalu, a w wodzie, a to ograniczało ciśnienie maksymalne.

W typowej konfiguracji z warstwą inercyjną i absorpcyjną stwierdzono brak zależności ciśnienia maksymalnego od rodzaju materiału podkładu. Zauważono natomiast wyraźną zależność ciśnienia od własności mechanicznych warstwy absorpcyjnej.

Zastosowanie wody jako materiału inercyjnego pozwala obniżyć koszty obróbki, ale i wyklucza użycie promieniowania krótkofalowego. W tym przypadku najwyższe ciśnienia uzyskuje się dla promieniowania 1064 nm i 532 nm

(druga harmoniczna). Promieniowanie z zakresu krótkofalowego (nadfiolet) jest silnie absorbowane w wodzie, co obniża próg przebicia. Niemożliwe jest także stosowanie lasera o zbyt wysokiej częstotliwości repetycji. Między kolejnymi impulsami musi nastąpić odtworzenie jednorodnej warstwy wodnej.

Zauważono, że niekorzystne jest stosowanie wiązek laserowych o kołowym przekroju, gdyż prowadzi to do spiętrzenia odkształceń w centrum plamki. Lepsze wyniki daje zastosowanie wiązek eliptycznych lub prostokątnych.

Proces technologiczny laserowego umacniania udarowego LSP stopów aluminium może łączyć się z jednoczesnym usuwaniem z warstwy powierzchniowej zanieczyszczeń organicznych, nieorganicznych oraz tlenków. Ma on wiele zalet w porównaniu z kulowaniem udarowym, m. in. większą grubość warstwy umocnionej, wyższą wartość naprężeń własnych, mniejszą chropowatość powierzchni, łatwość kontrolowania procesu, wysoką powtarzalność, możliwość obróbki stref niedostępnych dla metod tradycyjnych, możliwość wyboru położenia i wielkości umacnianej strefy. Wykorzystanie wymienionych zalet wymaga jednak dużego doświadczenia i znajomości parametrów wiązki laserowej oraz właściwości (termodynamicznych, optycznych, mechanicznych itp.) stosowanych materiałów.

Zależnie od przyjętych warunków (zwłaszcza gęstości energii i czasu trwania impulsu) obróbka może być prowadzona przy małych gęstościach energii bez uszkodzania podłoża, ale i bez uzyskania oczekiwanych efektów. Po użyciu powłoki absorpcyjnej oraz warstwy inercyjnej uzyskuje się znacznie większe umocnienie bez przemian fazowych zachodzących w wysokich temperaturach. Efekt ten można także zwiększyć przez wielokrotne powtórzenie procesu umacniania. Przy znacznie większych gęstościach energii, bez zastosowania powłok ochronnych, występuje topnienie metalu i rozwinięcie powierzchni. Przy wielokrotnych naświetlaniach (kilka impulsów) w sposób powtarzalny i kontrolowany można wprowadzić w strefę warstwy powierzchniowej wysokie naprężenia własne ściskające oraz uzyskać stop o wysokiej czystości (odparowują zanieczyszczenia oraz ulegają degradacji tlenki aluminium). Dzięki oczyszczeniu połączonemu z rozwinięciem i umocnieniem warstwy powierzchniowej, możliwe jest uzyskanie dużej przyczepności nanoszonych powłok o charakterze adhezyjnym, nieosiąganym tradycyjnymi metodami.

Jak do tej pory laserowe umacnianie udarowe LSP nie zostało wprowadzone na stałe do przemysłu. Spowodowane jest to głównie brakiem odpowiednio szybkich laserów (repetytywnych) o dużej energii w impulsie laserowym. Pomimo iż laboratoryjne i komercyjnie dostępne lasery są w stanie generować gęstości mocy rzędu 1–10 GW/cm², to jednak szybkość procesu umacniania powierzchni wynosi około 0,05 do 0,5 cm²/s. Ponadto do tego typu zastosowań należy brać pod uwagę szereg czynników dotyczących wyboru odpowiedniego lasera do procesu technologicznego LSP:

- długość fali promieniowania lasera powinna być odpowiednia dla danego zastosowania, zwłaszcza gdy ośrodkiem inercyjnym jest woda. Dłuższe fale z obszaru IR są absorbowane w wodzie, fale krótsze z obszaru UV generują przebicie przy niższych gęstościach mocy i ograniczają osiągnięcie wysokich stanów naprężeń;
- system laserowy powinien być odpowiednio mały, mobilny i o dużej mocy w impulsie, aby móc pracować in-situ.

Kolejnym zastosowaniem może być separowanie warstwy powłoki od powierzchni podłoża. Zasada polega na wytworzeniu stanu naprężeń rozciągających w płaszczyźnie międzyfazowej (powłoka – podłoże) w wyniku oddziaływania pomiędzy padającą falą uderzeniową, a falą odbitą (odciążenia).

Do tej pory w przeprowadzonych eksperymentach laboratoryjnych w WAT nie wytworzono oczekiwanych wysokich naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej umacnianych materiałów konstrukcyjnych. W wyniku realizowanych prac teoretycznych i eksperymentalnych ustalono, że w dalszych badaniach konieczne jest stosowanie zespołu warstw absorpcyjnych i inercyjnych. Przybliżone charakterystyki mechaniczne, optyczne i termodynamiczne zostaną ustalone w wyniku modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych.

6. WNIOSKI

1. Podczas oddziaływania promieniowania laserowego z materią występują następujące zjawiska fizyczne: absorpcja promieniowania, nagrzewanie materii, przewodnictwo cieplne, generacja impulsu ciśnienia lub naprężeń sprężystych i ewentualnie fal uderzeniowych, topnienie ciał stałych, dyfuzja lub rozpuszczanie materii pochodzącej z ziaren krystalicznych o różnym składzie prowadzące do utworzenia ośrodka jednorodnego, parowanie cieczy lub sublimacja ciał stałych, emisja promieniowania elektromagnetycznego, jonizacja materii czyli generacja plazmy, ablacja materii.
2. Dzięki skonstruowaniu specjalistycznego stanowiska laboratoryjnego do obserwacji i rejestracji szybkozmiennych procesów fizycznych (m. in. plazmy laserowej, odkształceń sprężystych itp.), wykonano fotografie cieniowe obłoku plazmowego generowanego krótkim (ok. 10–25 ns) impulsem laserowym Nd:YAG, powstającym przy obróbce powierzchni np. stopów aluminium w różnych mediach – w powietrzu oraz w wodzie. Zbyt mała czułość kamery cyfrowej nie pozwoliła na rejestrację najistotniejszego etapu ablacji laserowej, występującej w pierwszych kilku nanosekundach procesu. Obecnie w WAT

trwają prace nad budową superszybkiego rejestratora laserowego, który pozwoli na zapis ultraszybkich zjawisk fizycznych zachodzących w czasie zbliżonym do rzeczywistego .

3. Rejestrowane obłoki plazmowe różnią się istotnie między sobą, co świadczy o zróżnicowaniu fali uderzeniowej. Fala ta generowana była w procesie ablacji laserowej warstwy absorpcyjnej oraz folii aluminiowej. Jej front w odpowiednich chwilach rejestracji posiadał zróżnicowane kształty. Stosując wodę jako medium inercyjne uzyskano wyraźny kształt fali kulistej. Potwierdza to korzystny i istotny wpływ warstwy inercyjnej na zwiększenie i ujednorodnienie naprężeń własnych ściskających w warstwie wierzchniej modyfikowanych materiałów – w tym przypadku folii aluminiowej. Ciśnienie wytworzone przez impuls laserowy w procesie LSP zdeformowało folię, która w pierwszej fazie uległa dużemu odkształceniu sprężystemu, a następnie w wyniku procesów relaksacyjnych nastąpiło zmniejszenie jej stanu deformacji. Odkształcenia plastyczne są prawie pięciokrotnie większe niż wywołane falą ciśnienia generowaną w powietrzu.
4. Wykonane obliczenia numeryczne MRS wykazały niezwykle interesujący przebieg amplitudy impulsu ciśnienia powstającego w obrabianych próbkach metalu, obciążanych krótkim impulsem laserowym. W pierwszej fazie na powierzchni obrabianego materiału powstaje impuls naprężeń ściskających, który po odbiciu od tylnej powierzchni folii zmienia znak. Powstają naprężenia rozciągające o wartości ok. 30% mniejsze od wytwarzanych naprężeń własnych ściskających. Przy zastosowaniu warstwy inercyjnej amplituda impulsu naprężeń rozciągających może przekroczyć wytrzymałość materiału i spowodować jego rozwarstwienie.

LITERATURA

1. Burakowski T.: Udarowe umacnianie laserowe. Referat wygłaszany na konferencji zorganizowanej przez Akademię Techniczno-Rolniczą w Bydgoszczy, „Nagniatanie”, Wenecja k/Żnina, 11–13 X.2000.
2. Burakowski T., Giziński J., Sala A.: Promienniki podczerwieni. WNT, Warszawa, 1970.
3. Burakowski T., Marczak J., Napadłek W., Sarzyński A.: Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej stopów metali falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym – stan aktualny oraz perspektywy. Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, t. 54, nr 3, str. 83–102, 2004.
4. Burakowski T., Napadłek W.: Wpływ ablacyjnej mikroobróbki laserowej na stan warstwy wierzchniej. Międzynarodowa Konferencja Naukowo–Techniczna pt.: Wpływ Technologii na Stan Warstwy Wierzchniej WW'07, Gorzów Wlkp.– Sulęcín 2007, str. 213–221.

5. Burakowski T., Napadł ek W., Marczak J.: Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii. Inżynieria Materiałowa, nr 5 (153), rok XXVII, wrzesień–październik, 2006, str. 882–889.
6. Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa, 1995.
7. Daly J.J., Harrison J.R., Hackel L.A.: New laser technology makes Lasershot-Peening commercially affordable. The 7th International Conference on Shot Peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, 1999, str. 379–386.
8. Dubik A.: Zastosowanie laserów. WNT, Warszawa, 1991.
9. Grigorjanc A.G., Safonow A.N.: Metody poverchnostnoj lazernoj obrabotki. Lazernaja technika i technologia, nr 3, Izd. Vysšaja Škola, Moskwa, 1987.
10. Mirkin L.I.: Fizičeskie osnovy obrabotki materialov luč em lazera. Izd. MGU, Moskwa, 1975.
11. Napadł ek W., Sarzyński A., Bogdanowicz Z.: Opracowanie podstaw technologii umacniania powierzchniowego wybranych materiałow konstrukcyjnych fał uderzeniową generowaną impulsem laserowym. Sprawozdanie z pracy MNiSW nr 3T 08C 039 26, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2007.
12. Napadł ek W., Sarzyński J., Marczak J.: Laserowe umacnianie warstwy wierzchniej stopu aluminium PA31. Inżynieria Materiałowa, rok XXVI, nr 5 (147), wrzesień–październik 2005, str. 619–621.
13. Napadł ek W., Marczak J., Sarzyński A., Burakowski T.: Teoretyczne i eksperymentalne badania umacniania stopu aluminium fał uderzeniową generowaną impulsem laserowym. [w:] Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, red. W. Przybył ski, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2005, str. 213–219.
14. Obata M., Sano Y., Mukai N., Yoda M., Shima S., Kanno M.: Effect of laser peening on residual stress corrosion cracking for typ 304 stainless steel. The 7th International Conference on Shot Peening Institute of Precision Mechanics, Warsaw, 1999, str. 384–394.
15. Rykalin N., Uglov A., Kakora A.: Laser machining and welding. Pergamon Press, Oxford, 1987.
16. Metal Improvement Company Inc.: Impact – sterowane młotkowanie śrutem, młotkowanie laserowe. Raport o stanie techniki.

Rękopis dostarczono dnia 04.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. Jacek Sosnowski

LASER IMPACT STRENGTHENING OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS – STAND OF ART AND TECHNOLOGICAL PERSPECTIVES

Tadeusz BURAKOWSKI, Wojciech NAPADŁEK

ABSTRACT *On the base of own research and literature date in this report are presented: the properties of laser radiation, pulse interaction of laser beam with materials, laser produce of shock weave (pulse power density, pulse duration, emitted and absorbed radiation) and some results of laser impact strengthening investigations (surface morphology, surface roughness).*



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burakowski

Zainteresowania naukowe prof. T. Burakowskiego chronologicznie dotyczą: techniki raketowej, podczerwieni, termometrii i termokine-tyki, urządzeń grzejnych, energochłonności obróbki cieplnej, inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni. Ostatnie 20 lat poświęcił Profesor inżynierii powierzchni, w której to dziedzinie najpełniej uwidoczniły się jego przemyślenia, badania i możliwości. Jest uznawany za ojca polskiej inżynierii powierzchni. Założyciel (w 1991 r.) i przewodniczący (do dziś) Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN. Łączny dorobek Profesora obejmuje ok. 600 pozycji (ok. 170 autorskich), w tym 6 monografii (w 6 językach, m. in. polskim, chińskim, rosyjskim, angielskim), 21 podręczników i książek, 148 artykułów naukowych

(42 za granicą), ok. 200 artykułów technicznych, 180 wygłoszonych referatów (63 za granicą) i 31 patentów. W ostatnich latach wiele uwagi poświęca nowoczesnym technologiom laserowym mającym zastosowanie w inżynierii powierzchni (m. in. mikroobróbce laserowej w zakresie czyszczenia oraz umacniania warstwy wierzchniej materiałów z wykorzystaniem fal uderzeniowych generowanych impulsem laserowym). Kilkadziesiąt prac jego współautorstwa znalazło zastosowanie przemysłowe, w tym kilka konstrukcji urządzeń i aparatury pomiarowej. W 1985 r. uzyskał zespołową nagrodę Mistrza Techniki NOT. Jest członkiem trzech Rad Programowych czasopism PAN. Jest redaktorem działowym w dwóch czasopismach naukowo-technicznych. Członek wielu sekcji naukowych w kraju i za granicą.

Dr inż. Wojciech Napadłek

Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji naukowych z dziedziny budowy maszyn, a w szczególności pojazdów mechanicznych. Specjalizuje się w inżynierii produkcji oraz technologii napraw pojazdów mechanicznych. Szczególne zainteresowania naukowe to inżynieria powierzchni wykorzystująca nowoczesne technologie wiązkowe (laserowe i plazmowe), zarówno w skali makro-, mikro- oraz nanotechnologii. Jest współtwórcą kilku wdrożeń przemysłowych z tej dziedziny. Bierze udział w wielu projektach badawczych i celowych. Obecnie zajmuje się oddziaływaniem promieniowania laserowego z materiałem w zakresie spawania, napawania, czyszczenia laserowego oraz umacniania warstwy wierzchniej materiałów z wykorzystaniem fal uderzeniowych generowanych impulsem laserowym.

