

Wojciech NAPADŁEK  
Krzysztof KOSIUCZENKO

## SYMULACJA NUMERYCZNA LASEROWEGO UMACNIANIA UDAROWEGO STOPU TYTANU Ti-6Al-2Cr-2Mo<sup>\*)</sup>

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono wybrane wyniki eksperymentów laboratoryjnych wykonanych na stopie tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo. Opisano model fizyczny, opracowano model numeryczny, wykonano opis matematyczny zjawisk fizycznych zachodzących przy umacnianiu laserowym LSP (metoda MRS). Wykonano siatki modeli MES stanu odkształceń i naprężeń własnych dla badanego materiału w wybranych wariantach technologicznych. Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdziły poprawność przyjętych założeń i modeli. Stan wytężenia materiału po wielokrotnym obciążeniu udarowym (LSP) nie zmienia się proporcjonalnie do ilości impulsów laserowych – ma charakter nieliniowy.*

**Słowa kluczowe:** *stop tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo, laserowe umacnianie udarowe, topografia powierzchni, mikrostruktura, symulacja numeryczna MES*

---

<sup>\*)</sup> Praca została wykonana w ramach projektu nr N508 054 32/3758 finansowanego w latach 2004–2007 przez MNiSW.

---

**dr inż. Wojciech Napadłek**

e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

**dr .inż. Krzysztof Kosiuczenko**

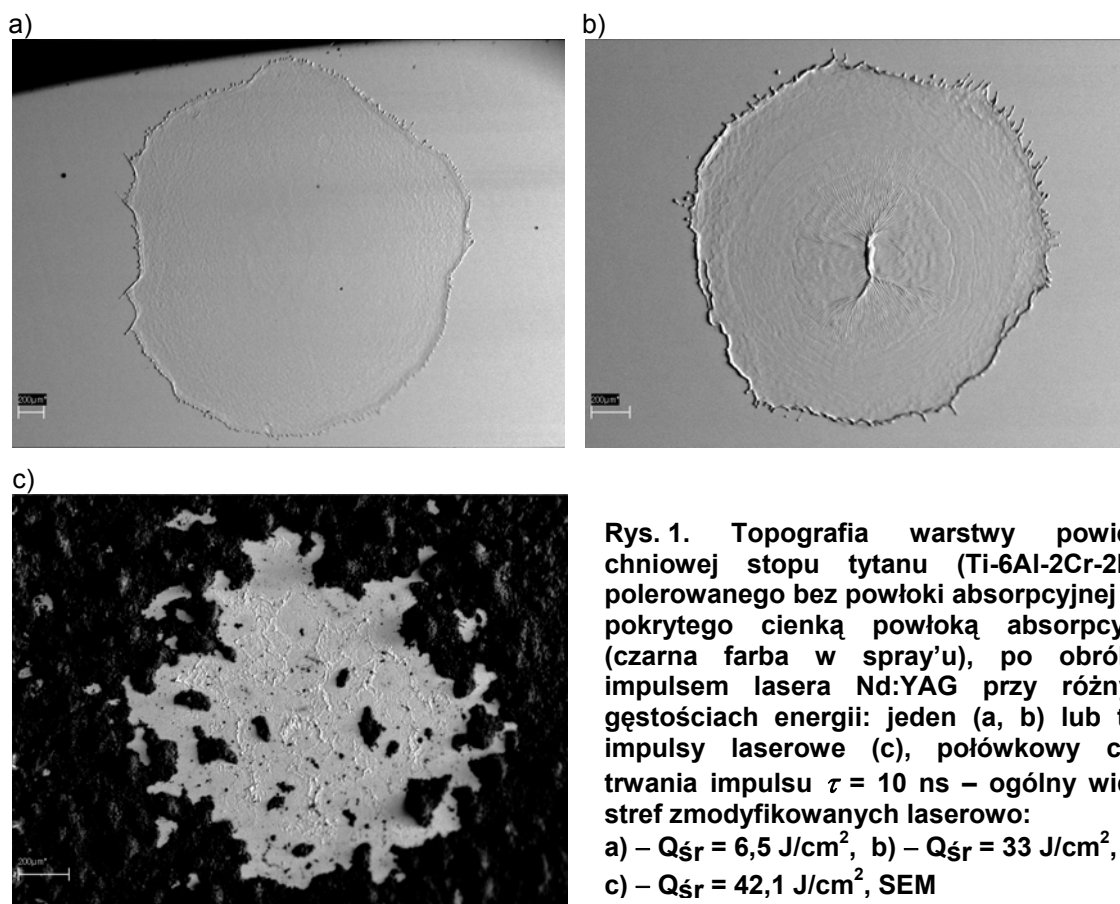
e-mail: k.kosiuczenko@wme.wat.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Mechaniczny

## 1. DOBÓR PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH LASEROWEGO UMACNIANIA UDAROWEGO LSP

W celu umocnienia warstwy powierzchniowej stopu tytanu (Ti-6Al-2Cr-2Mo) przeprowadzono laboratoryjne badania porównawcze przy wykorzystaniu specjalistycznego lasera impulsowego ReNOVALaser 5 – Nd:YAG z Q–modulacją. W badaniach stosowano długość fali  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$  o różnych gęstościach energii (od 4 – 50 J/cm<sup>2</sup>). Do badania efektów obróbki laserowej zastosowano zestaw mikroskopii stereoskopowej z możliwością cyfrowej rejestracji zapisu. Wykorzystano również skaningową mikroskopię elektronową (SEM) oraz profilografometr odwzorowujący topografię powierzchni w układzie 2D i 3D.

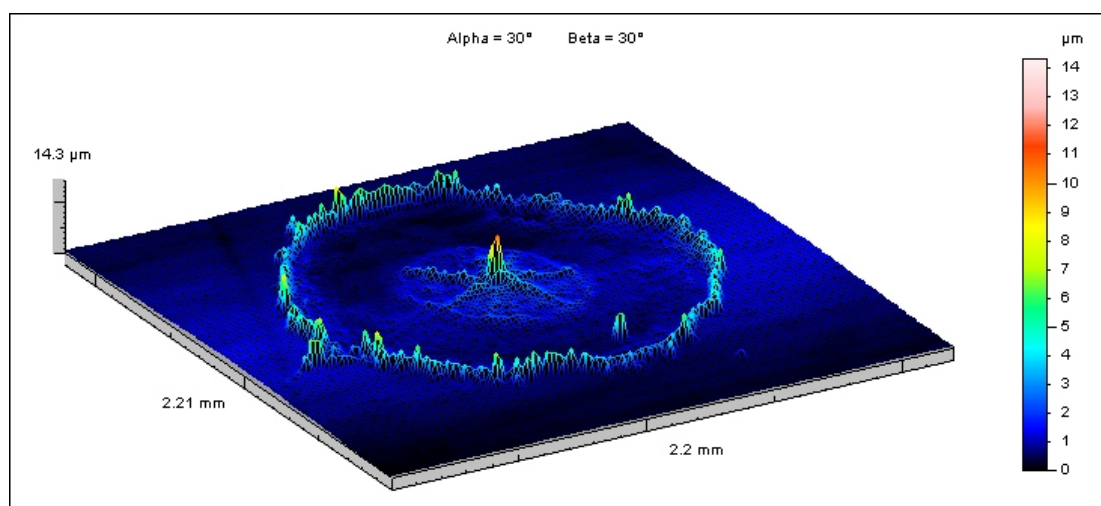
Zastosowanie powłoki absorpcyjno–ochronnej znacznie zwiększa sprawność procesu pochłaniania promieniowania laserowego (absorpcji), co istotnie wpływa na efekt umocnienia. Powłoki te również istotnie chronią warstwę powierzchniową przed ubocznymi efektami ablacji laserowej (topienie, usuwanie i rozwijanie warstwy powierzchniowej).



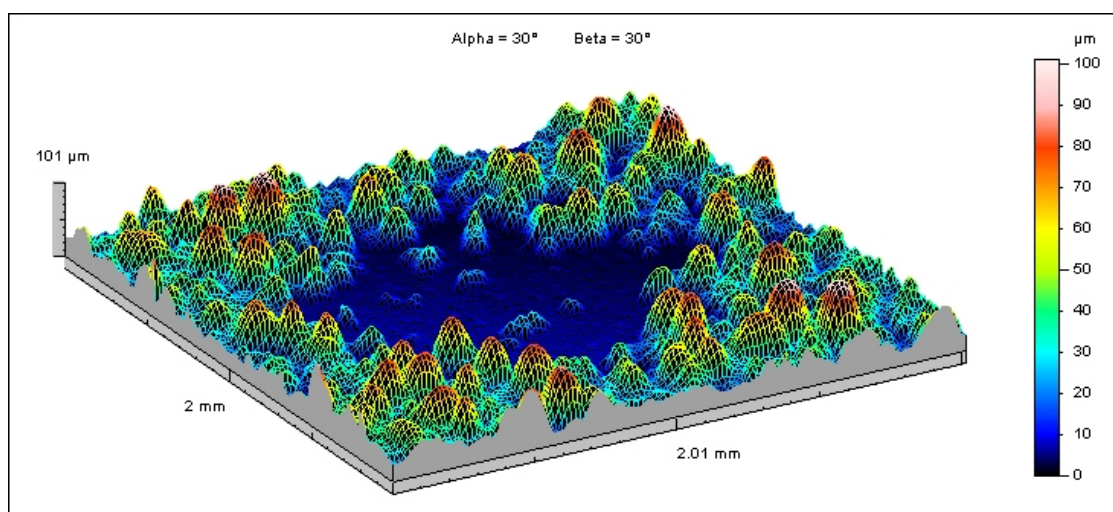
Rys. 1. Topografia warstwy powierzchniowej stopu tytanu (Ti-6Al-2Cr-2Mo) polerowanego bez powłoki absorpcyjnej lub pokrytego cienką powłoką absorpcyjną (czarna farba w spray'u), po obróbce impulsem lasera Nd:YAG przy różnych gęstościach energii: jeden (a, b) lub trzy impulsy laserowe (c), połowkowy czas trwania impulsu  $\tau = 10 \text{ ns}$  – ogólny widok stref zmodyfikowanych laserowo:  
a) –  $Q_{\text{śr}} = 6,5 \text{ J/cm}^2$ , b) –  $Q_{\text{śr}} = 33 \text{ J/cm}^2$ ,  
c) –  $Q_{\text{śr}} = 42,1 \text{ J/cm}^2$ , SEM

Zastosowanie powłoki absorpcyjnej z systemem warstw inercyjnych (woda lub woda + szkło) pozwala na uzyskanie ciśnień nawet do ok. 5 GPa i większych (symulacja MRS). Przy tak wysokich ciśnieniach możliwe jest uzyskanie w warstwie wierzchniej znacznych odkształceń plastycznych stopu tytanu, a tym samym naprężeń normalnych i stycznych o znaku ujemnym (ściskających).

a)



b)



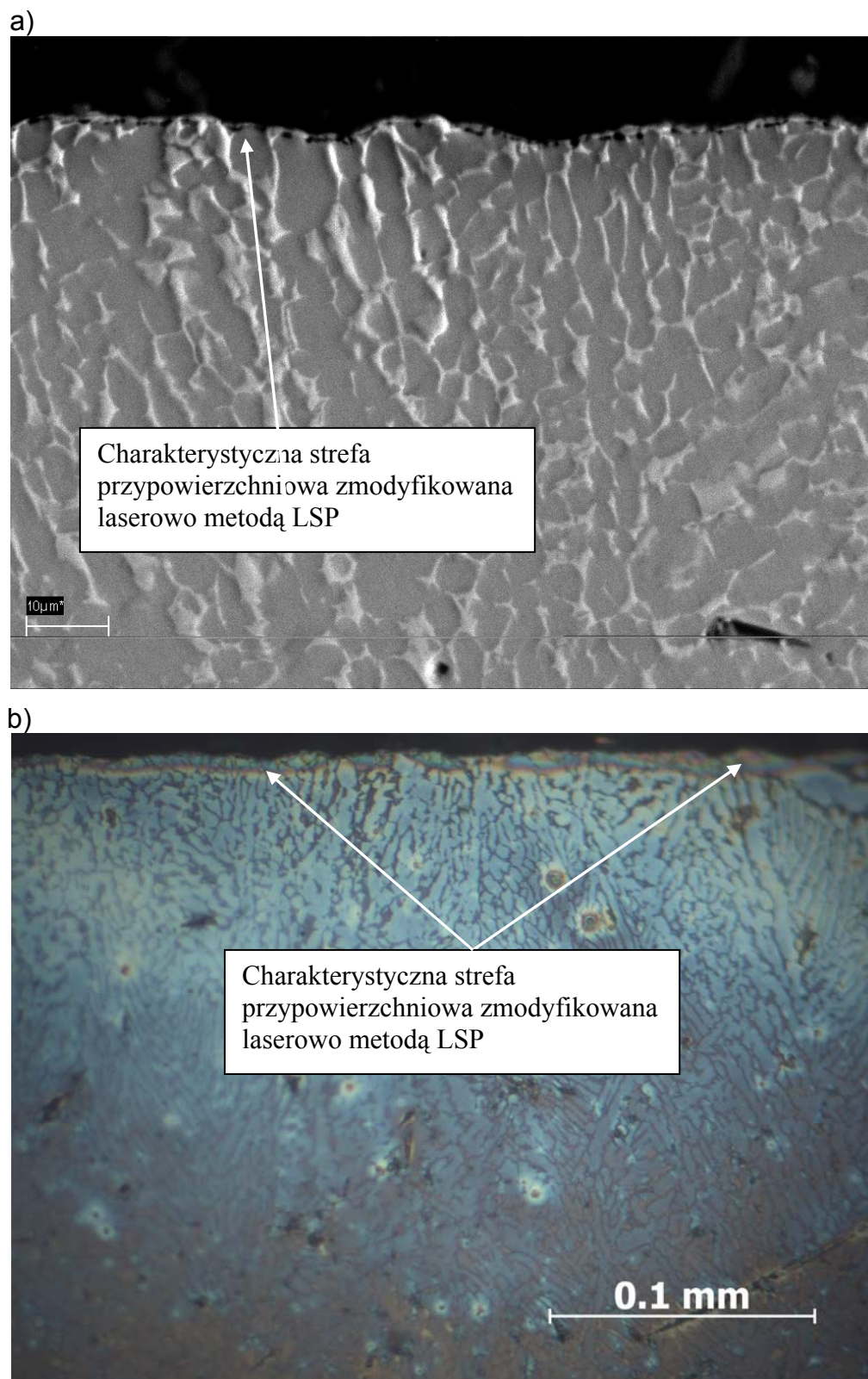
Rys. 2. Efekty umocnienia stopu tytanu (Ti-6Al-2Cr-2Mo) w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej generowanej jednym impulsem laserowym (laser Nd:YAG z Q-modulacją, gęstość energii  $Q_{sr} = 33 \text{ J/cm}^2$ ), – profilogramy stref umocnionych i odkształconych plastycznie: warstwa wierzchnia bez powłoki absorpcyjnej (a – profilogram 3D), warstwa wierzchnia z powłoką absorpcyjną – (czarna farba w sprayu, c – profilogram 3D)

## 1.2. Badania mikrostruktury

Reprezentatywne wyniki badań mikrostruktury w strefie przypowierzchniowej badanego stopu tytanu umocnionego metodą laserową LSP przedstawiono na rysunku 3. Jak wynika z przedstawionych rysunków, nie można stwierdzić jednoznacznie wyraźnych zmian wielkości i kształtu ziaren badanego stopu. Jedynie w warstwie przypowierzchniowej można zaobserwować charakterystyczne mikronadtopienia i nieznaczne rozdrobnienie struktury będące wynikiem wielokrotnego cyklicznego ultraszybkiego topnienia, ablacji i krystalizacji stopu tytanu. Jest to widoczne w przekroju poprzecznym próbek umacnianych LSP (rys. 3).

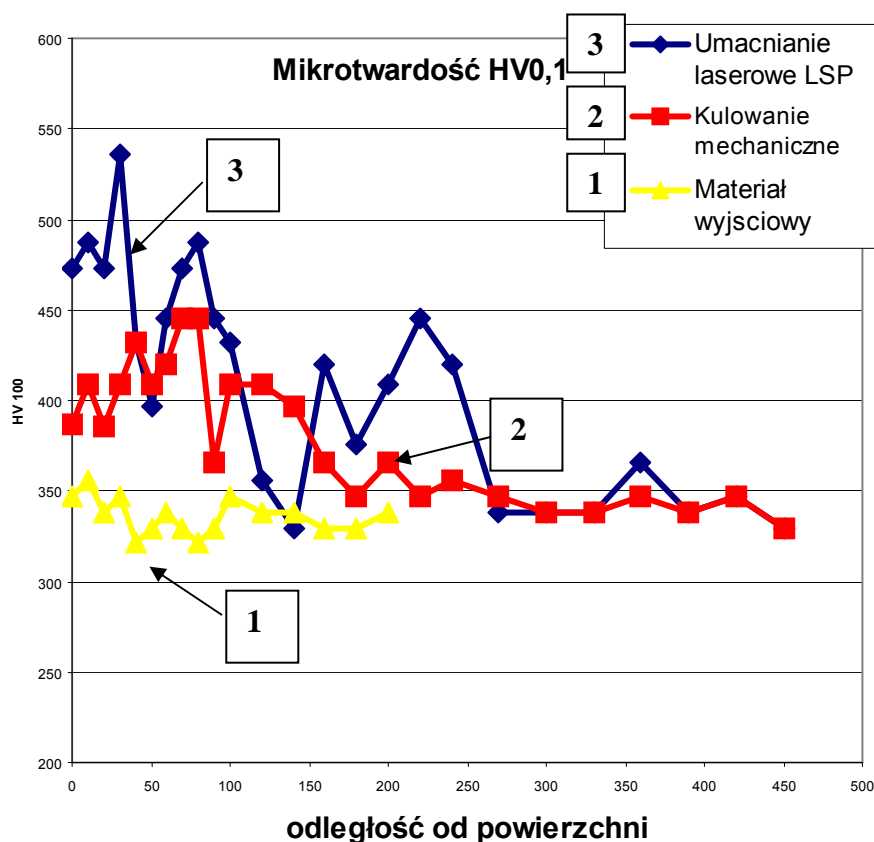
Przeprowadzone pomiary mikrotwardości w głąb warstwy wierzchniej wykazały, że stop tytanu w stanie wyjściowym posiadał nieco zróżnicowany rozkład mikrotwardości w głąb materiału (krzywa 1 na rys. 4). W strefie przypowierzchniowej i w głąbi materiału mikrotwardość wynosiła w przedziale ok. 320–350 HV<sub>0,1</sub>. Zastosowanie kulowania mechanicznego wpłynęło istotnie na umocnienie warstwy przypowierzchniowej do wartości ok. 385 HV<sub>0,1</sub> na powierzchni oraz do 450 HV<sub>0,1</sub> na głębokości ok. 0,07 mm (krzywa 2 na rys. 4). W dalszej strefie w głąb materiału następuje dość gwałtowny spadek do mikrotwardości materiału rodzimego na głębokości ok. 0,16 mm.

W wyniku udarowego umacniania laserowego LSP w obecności warstwy inercyjnej (5 mm słupa wody) przy gęstości energii 50 J/cm<sup>2</sup> nastąpiło dość wyraźne umocnienie, osiągając zróżnicowane wartości mikrotwardości w przedziale od 455 HV<sub>0,1</sub> na powierzchni do ok. 370–540 HV<sub>0,1</sub> na głębokości do ok. 0,2 mm (krzywa 34 na rys. 4). Ekstremum umocnienia znajduje się na głębokości ok. 0,02 do 0,07 mm. Zauważyć można dużą niejednorodność rozkładu mikrotwardości świadczącej prawdopodobnie o dość złożonym stanie naprężeń własnych po umacnianiu. Może to dowodzić również efektu oddziaływania wysokiej i cyklicznie zmiennej amplitudy ciśnienia wygenerowanego w procesie udarowego umacniania LSP.



**Rys. 3. Charakterystyczna mikrostruktura stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo w stanie po laserowym umocnieniu udarowym LSP:**

a) przekrój poprzeczny, skaningowa mikroskopia elektronowa SEM, b) mikroskopia optyczna



**Rys. 4.** Charakterystyczne rozkłady mikrotwardości od powierzchni w głąb próbki wykonanej ze stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo w stanie po różnych technologiach umocnienia: stanie wyjściowym (krzywa 1), po kulowaniu mechanicznym (krzywa 2) oraz po laserowym umacnianiu udarowym LSP (krzywa 3)

## 2. MODEL FIZYCZNY IMPULSU LASEROWEGO

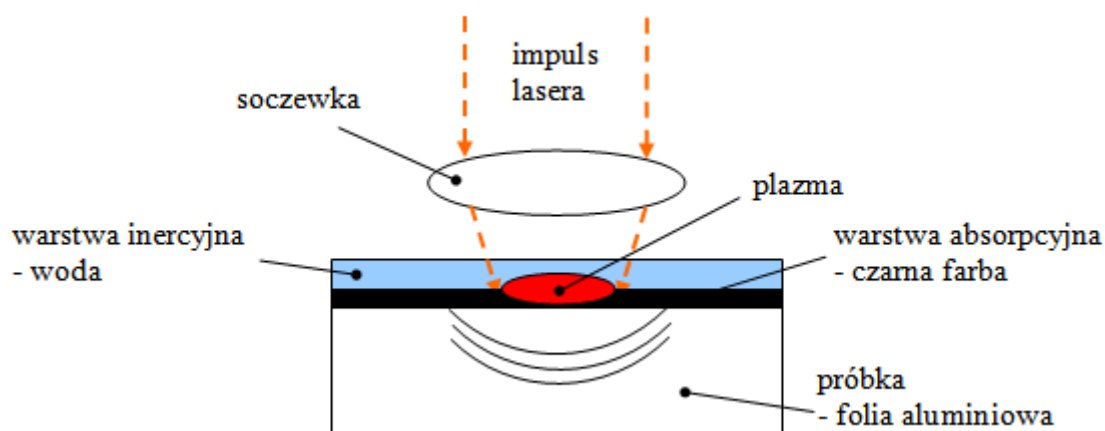
W pracy podjęto próbę identyfikacji numerycznej parametrów udarowego umacniania laserowego. Do realizacji procesu LSP niezbędna jest znajomość wielu parametrów technologicznych obróbki laserowej. Metody numeryczne, takie jak np. Metoda Elementów Skończonych (MES), wymagają dokładnego zdefiniowania m.in. obciążenia, którym jest w rozpatrywanym przypadku impuls lasera. W dużej mierze, temu właśnie zagadnieniu poświęcona jest przedstawiona praca.

W ramach wcześniej zrealizowanych badań podstawowym, w których stosując różną długość fali, różną gęstość energii i czas trwania impulsu promieniowania laserowego emitowanego przez laser Nd:YAG, dobrano najlepsze parametry udarowego umacniania stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo (rys. 1–4).

Po przeprowadzeniu analizy zjawisk fizycznych opracowano model numeryczny, wykorzystując wykonany przez autorów opis matematyczny zjawisk zachodzących przy umacnianiu LSP [7]. Brakujące dane uzyskano z programu komputerowego (autorzy: prof. Karol Jach i dr inż. A. Sarzyński z IOE WAT), opartego na metodzie różnic skończonych – MRS, służącego do modelowania ww. zjawisk. Określono w nim wartości szczytowe oraz przebiegi amplitudy ciśnienia generowanego w impulsie laserowym w funkcji czasu [4–9]. W ww. trójwarstwowej konfiguracji z powłoką absorpcyjną i inercyjną uzyskiwano z obliczeń numerycznych MRS wartości ciśnień ok. 5 GPa (a maksimum nawet do 10 GPa) [5–8].

W rezultacie nieliniowej analizy numerycznej otrzymano mapy stanu odkształceń i naprężeń własnych (resztkowych) dla badanych próbek w wybranych wariantach technologicznych.

W analizowanym modelu (rys. 5) próbkę stanowiła cienka folia aluminiowa o grubości  $g = 0,11$  mm, pokryta warstwą absorpcyjną (cienka powłoka czarnej farby 0,05 mm) i warstwą inercyjną – 5 mm słupem wody.



Rys. 5. Powstawanie impulsu ciśnienia (bez zachowania skali)

Mechanizm udarowego umacniania laserowego LSP ogólnie polega na tym, że promieniowanie, które dotarło do warstwy absorpcyjnej, nagrzewa ją, jonizuje i wytwarza plazmę. Powstaje przy tym fala uderzeniowa pochodząca od bardzo dużego ciśnienia. Ciśnienie wytwarzane przez impuls lasera opisać można wzorem (1) [6, 8]:

$$P_{zewn} = \rho_{zewn} \cdot v_a^2 \quad (1)$$

gdzie:  $P_{zewn}$  – ciśnienie na zewnętrznej powierzchni blachy  $\rho_{zewn}$  – gęstość warstwy inercyjnej ( $1\text{g/cm}^3$ ),  $v_a$  – prędkość zewnętrznej powierzchni warstwy absorpcyjnej.

Niestety wzór (1) nie pozwala na jednoznaczne obliczenie wartości ciśnienia oddziaływującego na próbkę. Znanych jest co najmniej kilka zjawisk wpływających na zmierzoną wartość ciśnienia. Z analizy literatury [2–10] wynika, że warstwa absorpcyjna zwiększa amplitudę ciśnienia od 3 do 10 razy. Natomiast wpływ zmiany  $\rho$  jest niewielki – zmiany gęstości nie przekraczają kilku procent.

W rozważaniach należało ponadto uwzględnić odbicie i rozproszenie promieniowania od powierzchni warstwy absorpcyjnej i inercyjnej (wody). Absorpcja promieniowania zależna jest nieliniowo m. in. od wartości gęstości energii. Ponadto zwiększenie grubości warstwy inercyjnej do 50 mm i więcej, powoduje nawet całkowite pochłanianie energii impulsu.

Dziesięciokrotny wzrost gęstości energii powoduje tylko trzykrotny wzrost impulsu ciśnienia.

Dlatego tylko w pewnym przybliżeniu założyć można, że (2):

$$P_{\max} = \frac{I_{\max}}{2} \text{ [GPa]} \quad (2)$$

gdzie:  $I_{\max}$  – gęstość energii wyrażona w  $\text{GW/cm}^2$ .

Ze względu na skomplikowany kształt przebiegu wartości ciśnienia na zewnętrznej powierzchni np. folii aluminiowej lub blachy  $P_{zewn}(t)$ , jest on często opisywany za pomocą funkcji:

$$P_{zewn} = P_{\max} \left\{ 2.65 \left( \frac{t}{t_0} \right) \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) + \left( \frac{t}{t_2} \right)^2 \exp\left(-\frac{t}{t_3}\right) \right\} \quad (3)$$

gdzie:  $t_0 = 10 \text{ ns}$ ;  $t_2 = 50 \text{ ns}$ ;  $t_3 = 30 \text{ ns}$ ;  $P_{\max} = 0,1 \div 5 \text{ GPa}$

Następnym problemem modelowania impulsu lasera jest uwzględnienie zależności wartości ciśnienia od odległości od środka wiązki  $P(r)$ :

$$P(r) = P_{zewn} \exp\left(-\left(\frac{r}{a}\right)^N\right) \quad (4)$$

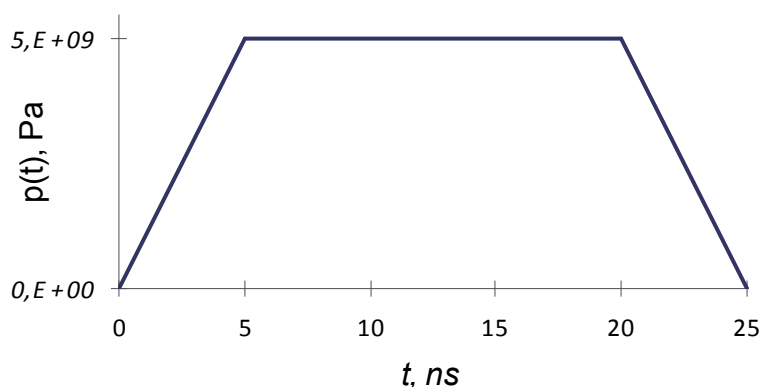
gdzie:  $a = 1 \div 10 \text{ mm}$ ;  $N = 2 \div 200$



Złożoność wyszczególnionej problematyki opisu oddziaływania impulsu lasera spowodowała, że autorzy przyjęli kilka założeń upraszczających:

- impuls świetlny zastąpiono impulsem ciśnienia przyłożonym do zewnętrznej powierzchni próbki;
- przebieg impulsu w czasie  $p(t)$  opisano łamaną w kształcie trapezu tzn. że moc impulsu laserowego narasta liniowo od zera do wartości maksymalnej, a po pewnym czasie maleje liniowo do zera (rys. 6);
- wartość ciśnienia  $p(r)$  jest stała w obszarze na który pada wiązka;
- maksimum  $p(r)$  obliczono ze wzoru (2) dla średniego natężenia wiązki lasera  $I_{max} = 10 \text{ GW/cm}^2$ ,
- czas oddziaływania impulsu  $t = 25 \text{ ns}$  (na podstawie literatury [2, 9, 10]).

Przyjęty do dalszych rozważań model obciążenia przedstawiono na kolejnym rysunku (rys. 6):



Rys. 6. Przyjęty do dalszych obliczeń wariant obciążenia  $p(t)$

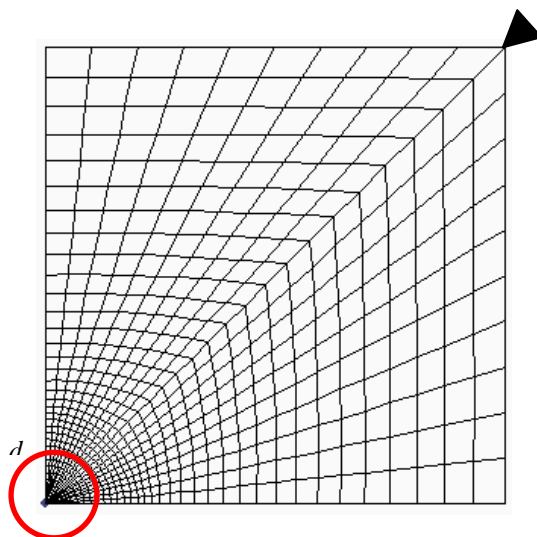
Zasadność przyjętych założeń zweryfikowano eksperymentalnie. Symulacja numeryczna pozwoliła zatem poprawnie zidentyfikować podstawowe parametry pracy lasera, tzn.  $I_{max}$  oraz  $P_{zewn}$ .

### 3. SYMULACJA NUMERYCZNA MES LASEROWEGO UMACNIANIA UDAROWEGO

---

Model numeryczny wykonano przy użyciu programu LS-Dyna [11–12]. Jest to program implementujący metodę MES, szczególnie przydatny w analizach szybkozmiennych zjawisk dynamicznych. Prostokątną próbkę opisano siatką 6- i 8-węzłowych elementów bryłowych. Próbkę umocowano odbierając

translacyjne stopnie swobody narożnym węzłom. Schemat modelu przedstawiono na rysunku 7.



**Rys. 7. Schemat  $\frac{1}{4}$  siatki modelu MES wraz z warunkami brzegowymi. Kolorem czerwonym zaznaczono obszar zawierający obciążane elementy**

Elementy zawarte w okręgu o promieniu  $d = 2$  mm i leżące na górnej płaszczyźnie próbki obciążono przykładając ciśnienie  $p(t)$ , zdefiniowane zgodnie z rysunkiem 6. Wszystkim elementom siatki MES przyporządkowano właściwości materiału, z którego wykonano próbkę. Wykorzystano przy tym model materiału sprężysto-plastycznego z umocnieniem.

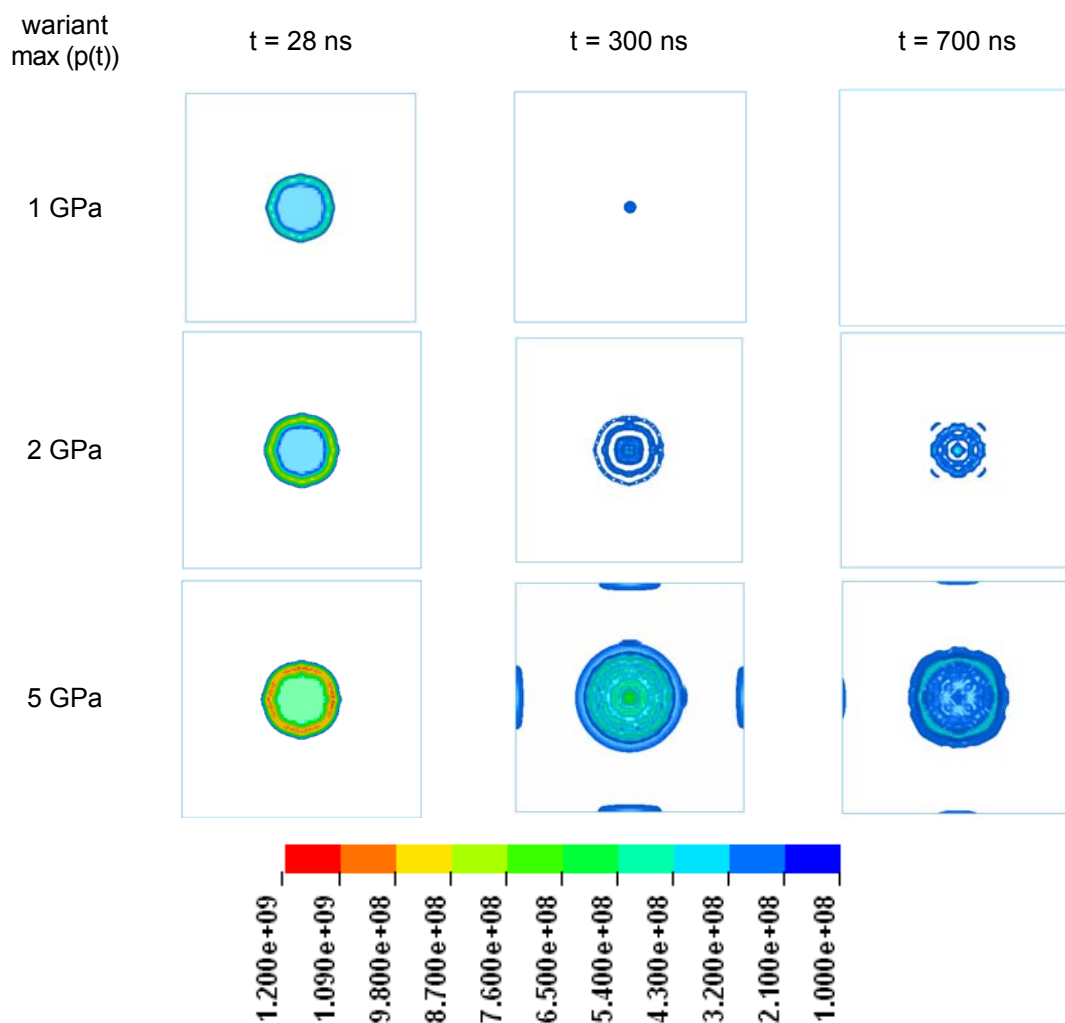
## 4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

---

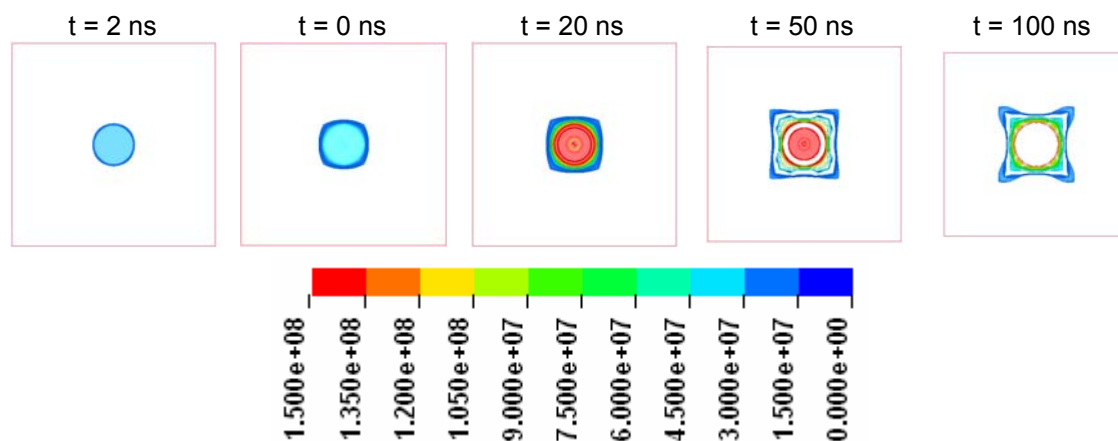
### 4.1. Symulacja numeryczna laserowego umacniania udarowego

---

W pierwszym etapie symulacji numerycznej MES określono wielkość minimalnego ciśnienia powodującego oczekiwane zmiany plastyczne w materiale. W tym celu przeprowadzono symulację numeryczną umacniania laserowego LSP w 3 wariantach obciążania: 1GPa, 2 GPa i 5GPa (rys. 8, 9).



Rys. 8. Naprężenia zredukowane w warstwie wierzchniej Ti-6Al-2Cr-2Mo dla różnych wariantów obciążenia



Rys. 9. Mapy naprężeń zredukowanych w kolejnych fazach symulacji (Pa)

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

---

Przedstawiona w pracy symulacja MES procesu laserowego umacniania udarowego LSP wyraźnie obrazuje możliwości wykorzystania nowoczesnych technik obliczeniowych, takich jak metody CAD/CAM/CAE. Z wielu dostępnych metod autorzy wybrali Metodę Elementów Skończonych (MES). Jest to metoda, która zawiera narzędzia *explicite*, przez co nadaje się świetnie do opisu szybkozmiennych zjawisk towarzyszących umacnianiu. Implementacją MES, która posiada takie możliwości, a która została wybrana przez autora, był program LS-Dyna.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników obliczeń numerycznych MRS i MES sformułować można następujące wnioski:

1. Prowadząc laserowe umacnianie technologią LSP na rzeczywistych próbkach ze stopu Ti-6Al-2Cr-2Mo przy różnych gęstościach energii w wiązce laserowej bez warstwy absorpcyjnej, uzyskiwano umocnienie oraz różne rozwinięcie powierzchni. Zastosowanie odpowiednio dobranej warstwy absorpcyjnej i inercyjnej pozwala na uzyskanie zamierzonych efektów bez nadtopień warstwy powierzchniowej.
2. Zbudowane modele numeryczne dobrze opisują rzeczywiste procesy odkształceń plastycznych stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo.
3. Zweryfikowano eksperymentalnie symulację skomplikowanego procesu laserowego umacniania udarowego LSP.
4. Zastosowane modele materiałowe (sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem) wystarczająco dobrze opisują właściwości materiałowe.
5. Otrzymane rezultaty obliczeń, w postaci np. map naprężeń i odkształceń, pozwalają dokładnie obserwować stan obrabianego materiału w dowolnej fazie procesu.
6. Wprowadzenia zmian do już opracowanego modelu MES daje swobodę w kształtowaniu oczekiwanych właściwości obrobionego materiału i doskonaleniu dotychczasowych technologii obróbki.
7. Doskonaląc opracowany model numeryczny należy rozwiązać problem opisu fal ciśnień generowanych w plazmie laserowej.

*Autorzy dziękują dr. inż. Antoniemu Sarzyńskiemu oraz mgr. inż. Antoniemu Rycykowi z IOE WAT za konsultacje w zakresie budowy modelu MES oraz udział w eksperymentach laboratoryjnych.*

## LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria Powierzchni Metali. WNT, Warszawa, 1995.
2. Montross C., Tao Wei, Lin Ye, Clark G., Yiu-Wing Mai: Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International Journal of Fatigue* 24, 2002.
3. Meijer J.: Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of Materials Processing Technology* 149, str. 2–17, 2004.
4. 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.
5. Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J.: Laserowe umacnianie udarowe warstwy wierzchniej stopu aluminium PA31. *Inżynieria Materiałowa*, Rok XXVI, 2005, Nr 5 (147), str. 619–621.
6. Sarzyński A., Jach K., Marczak J., Napadłek W.: Aluminum surface processing by pulsed Q-switched Nd:YAG laser, *International Congress on Optics and Optoelectronics*. 28 August – 2 September 2005, str. 165, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland.
7. Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J.: Analiza procesów zachodzących na stopach aluminium podczas ablacji laserowej. *Przegląd Spawalnictwa*, nr 5–6/2006, str. 64–67.
8. Marczak J. Sarzyński A. Napadłek W.: Numeryczne modelowanie fali uderzeniowej generowanej impulsem laserowym w metalach. IX Konferencja Naukowo-Techniczna, Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko 2005, str. 371–378.
9. Sokol D.: Laser Shock Processing. Technical Bulletin No.1, SP Technologies, Inc.
10. Ocanb J.L., Morales M., Molpecere C., Torres J.: Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments. ETSIIMLAS, Madryd, 2004.
11. Zbiorowe: Keyword Manual 970 Volume 1&2. Livermore Software Technology Corp, www.lstc.com
12. Zbiorowe: Theory Manual 2006. Livermore Software Technology Corp, www.lstc.com.
13. Kosiuczenko K., Niezgoda T., Napadłek W.: Identyfikacja parametrów udarowego umacniania laserowego LSP stopu aluminium metodą odwrotną X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Kazimierz Dolny, 2007.

*Rękopis dostarczono dnia 10.04.2008 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. Jacek Sosnowski**

## THE NUMERICAL SIMULATION OF LASER SHOT PEENING OF Ti-6Al-2Cr-2Mo TITANIUM ALLOY

Wojciech NAPADŁEK, Krzysztof KOSIUCZENKO

**ABSTRACT** *The selected results of laboratory experiments made on the Ti-6Al-2Cr-2Mo titanium alloy were presented in the paper. It was described the physical model, was elaborated of numerical model, was made mathematical description of physical phenomena, which occur at laser shot peening (LSP). It were made networks of FEM models of strain state and internal stresses for tested material in the selected technological variants. Conducted numerical simulations were confirmed correctness of established assumption and models. The effort state of material after multiple shot peening (LPS) does not change in proportion to amount of laser impulses – it has nonlinear character.*

**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.



**Dr inż. Krzysztof Kosiuczenko** dyplom ukończenia studiów wyższych uzyskał w roku 1988 na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej. W 1995 ukończył studia podyplomowe z informatyki na Uniwersytecie Opolskim. W roku 2005 uzyskał tytuł doktora w zakresie mechaniki, w specjalności wytrzymałość materiałów. Obecnie zajmuje się modelowaniem numerycznym przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych oraz analizami wytrzymałościowymi prowadzonymi w WAT. Jest autorem kilkudziesięciu artykułów zgłoszonych na konferencje krajowe i zagraniczne.