

Wojciech NAPADŁEK
Antoni SARZYŃSKI

UMACNIANIE WARSTWY WIERZCHNIEJ STOPU TYTANU WT3-1 FALĄ UDERZENIOWĄ GENEROWANĄ IMPULSEM LASEROWYM – – ZJAWISKA FIZYCZNE I WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI

STRESZCZENIE *W pracy opisano wyniki prac teoretycznych i eksperymentalnych, dotyczących umacniania warstwy wierzchniej stopu tytanu WT3-1 falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym dużej mocy. Opisano wyniki numerycznego modelowania impulsu ciśnienia generowanego przez impuls laserowy oraz propagacji fali uderzeniowej. Przedstawiono wyniki modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej wybranych stopów. Stosowano laser Nd:YAG o energii w impulsie około 0,5 J i czasie trwania 10 ns. Badania modyfikowanej powierzchni obejmowały obserwacje za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) oraz analizę topografii powierzchni przy użyciu profilografometru.*

Słowa kluczowe: stop tytanu, warstwa wierzchnia, udarowe umocnienie laserowe, generacja fali uderzeniowej, topografia powierzchni

dr inż. Wojciech NAPADŁEK

e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl
Wydział Mechaniczny

dr inż. Antoni SARZYŃSKI

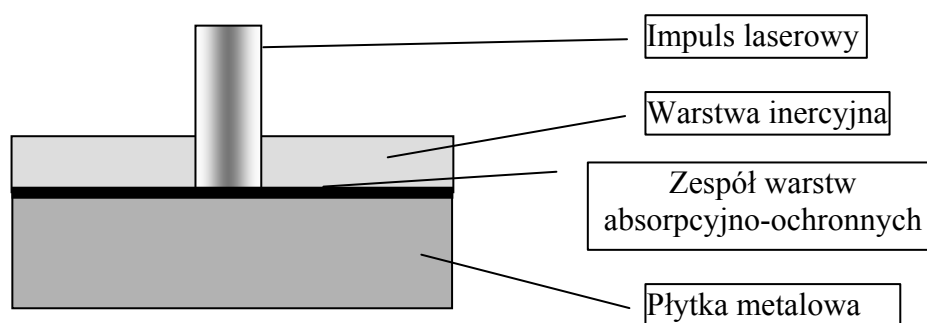
email: a.sarzyński@wat.edu.pl
Instytut Optoelektroniki

Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

1. WSTĘP

Tytan i jego stopy, dzięki niskiej gęstości, wysokiej wytrzymałości i odporności korozyjnej są chętnie stosowane w medycynie, aeronautyce, marynarce i przemyśle chemicznym. Tytan nie traci swojej wytrzymałości w wysokiej temperaturze. Jednak szersze zastosowanie stopów tytanu jest ograniczone przez ich słabe właściwości trybologiczne, wysoki współczynnik tarcia, małą odporność na ścieranie oraz niską twardość.

Z tego powodu modyfikacja warstwy wierzchniej elementów wytworzonych z tytanu jest wysoce pożądana w wielu gałęziach przemysłu. Do obróbki powierzchni stopów metali coraz częściej stosowane są lasery.



Rys. 1. Konfiguracja układu eksperymentalnego podczas obróbki powierzchni metali za pomocą impulsowego promieniowania laserowego

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, stopowania powierzchniowego, azotowania, nawęglania, naborowywania itd. Za pomocą promieniowania impulsowego o wysokim natężeniu ($10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$) można łatwo generować fale uderzeniowe w ciałach stałych [1 – 6]. Pierwsze eksperymenty polegały na bezpośrednim naświetlaniu odkrytej powierzchni metalu przez impuls laserowy [4]. 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, 8 - 11]. Układ obróbki można skonfigurować w taki sposób, by na obrabiany materiał oddziaływała jedynie fala naprężeń wytworzona przez impuls laserowy (rys. 1).

Warstwa absorpcyjna (dokładniej zespół kilku warstw absorpcyjno-ochronnych – np. farba, ołów o łącznej grubości kilku mikrometrów) ma 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, warstwa wodna 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* (rys. 1) jest powszechnie stosowana przy laserowej obróbce mającej na celu wytworzenie na powierzchni metali trwałej warstwy z naprężeniami ściskającymi (tzw. udarowe umacnianie laserowe falą uderzeniową generowana impulsem laserowym, ang. Laser Shot Peening – LSP, potocznie nazywana również „kulowaniem laserowym”) [1 - 3]. Warstwa inercyjna może o rząd wielkości zwiększyć amplitudę impulsu ciśnienia oraz kilkakrotnie wydłużyć czas jego trwania.

W niniejszym artykule opisano wyniki numerycznego modelowania wpływu warstwy inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia powstającego w próbkach aluminium, stali i tytanu. Przedstawiono także wyniki prac eksperymentalnych.

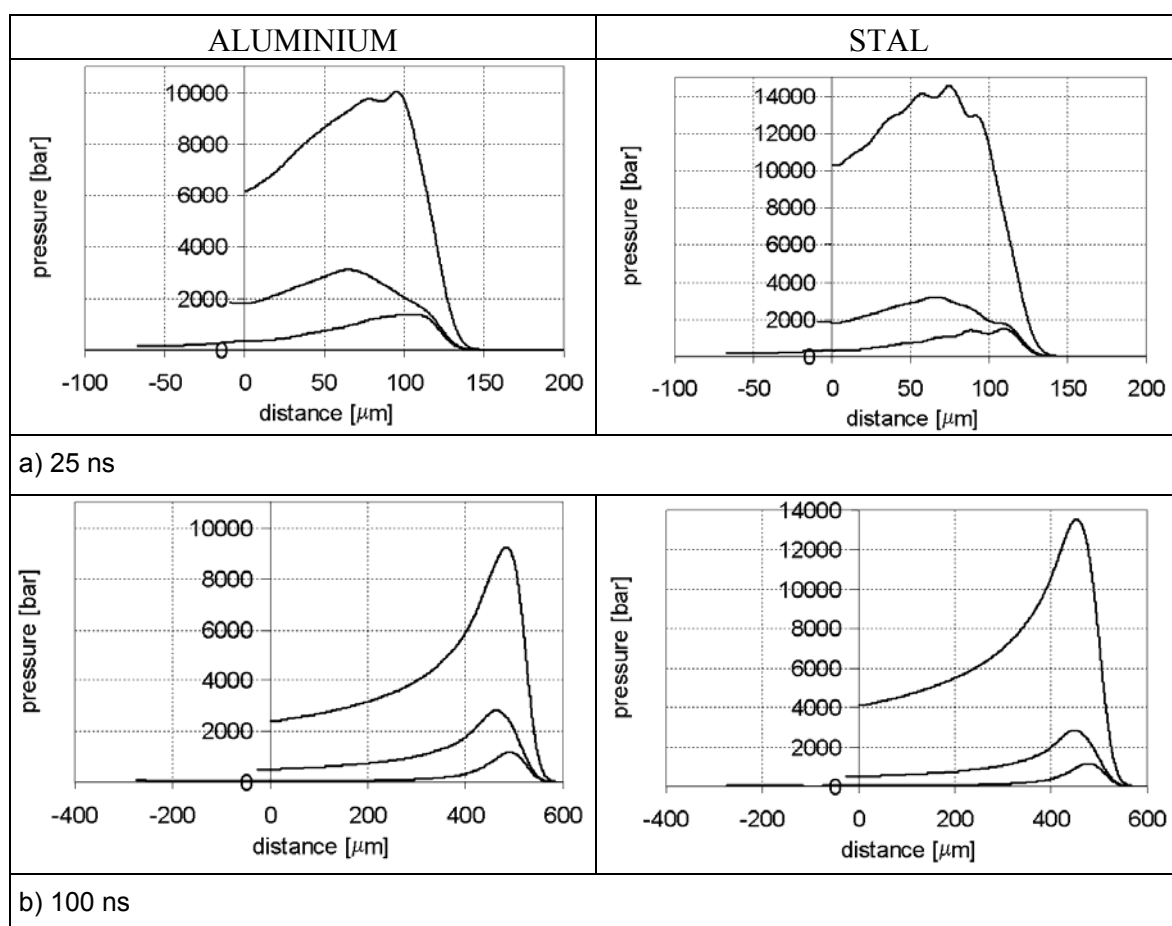
2. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wykonano obliczenia numeryczne, których celem było oszacowanie wpływu warstwy absorpcyjnej i inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia powstającego w obrabianych próbkach metalu. Model matematyczny procesu oraz metoda rozwiązania równań problemu zostały szczegółowo opisane w pracach [7, 8].

Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla impulsu laserowego o kształcie trójkąta i czasie trwania 10 ns. Przyjęto, że warstwę absorpcyjną stanowi grafit o grubości 5 μm , a obrabianym metalem jest blacha aluminiowa lub stalowa o grubości 0.6 mm (rys. 2) oraz blacha tytanowa o grubości 1 mm (rys. 3, 4).

Na rysunku 2, na przykładzie stali i aluminium, zademonstrowano wpływ warstwy absorpcyjnej i inercyjnej na amplitudę impulsu ciśnienia. Zależy ona

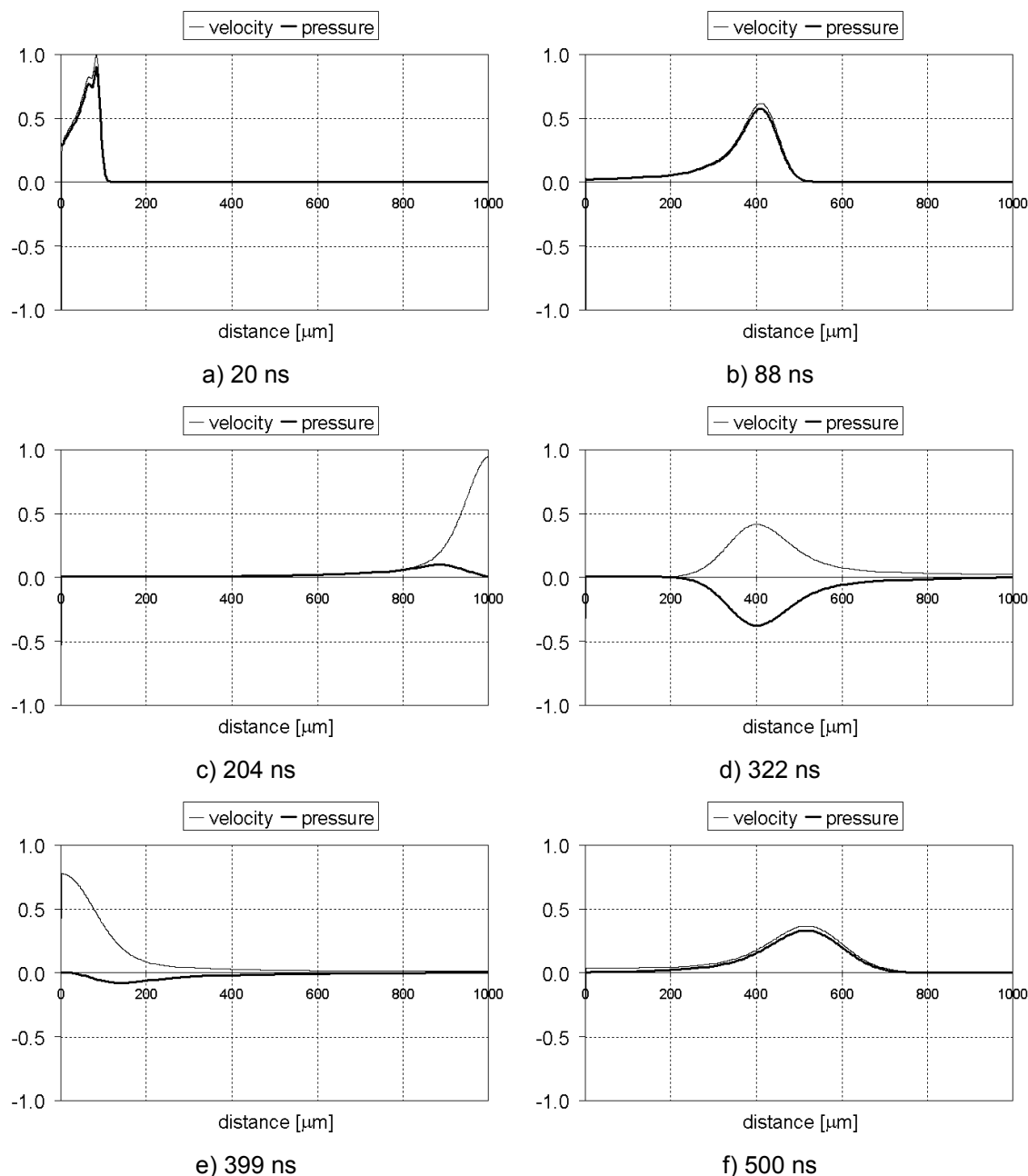
przede wszystkim od parametrów warstw absorpcyjnej i inercyjnej. Wpływ podłoża na kształt impulsu ciśnienia daje się zauważyć tylko przy krótkich czasach (rys. 2a). Amplituda impulsu ciśnienia w zasadzie nie zależy od rodzaju podłoża. Tylko przy najsilniejszym warunku brzegowym (sztywna ściana – bardzo ciężki ośrodek inercyjny w praktyce niespotykany) amplituda impulsu ciśnienia w stali wzrasta o około 40 % w porównaniu z aluminium. Zatem gdy warstwa inercyjna jest dostatecznie ciężka, to również właściwości obrabianego podłoża wpływają na charakterystyki impulsu ciśnienia. Podobnie przebiegała ewolucja impulsu ciśnienia w tytanie.



Rys. 2. Rozkłady ciśnienia w czterech chwilach czasu przy gęstości energii impulsu laserowego 1 J/cm^2 i czasie trwania 10 ns, dla trzech warstw inercyjnych i dwóch rodzajów podłoża. Dolne krzywe – powietrze (brak warstwy inercyjnej), środkowe krzywe – wodna warstwa inercyjna, górne krzywe – sztywna ściana

Warstwa absorpcyjna i inercyjna zwiększają amplitudę impulsu ciśnienia od trzech do dziesięciu razy. Prędkość propagacji impulsu w zasadzie nie

zależy od jego amplitudy, co wynika z faktu, że występujące tu fale uderzeniowe są falami słabymi, gdyż amplituda impulsu ciśnienia nie przekracza 5 GPa.

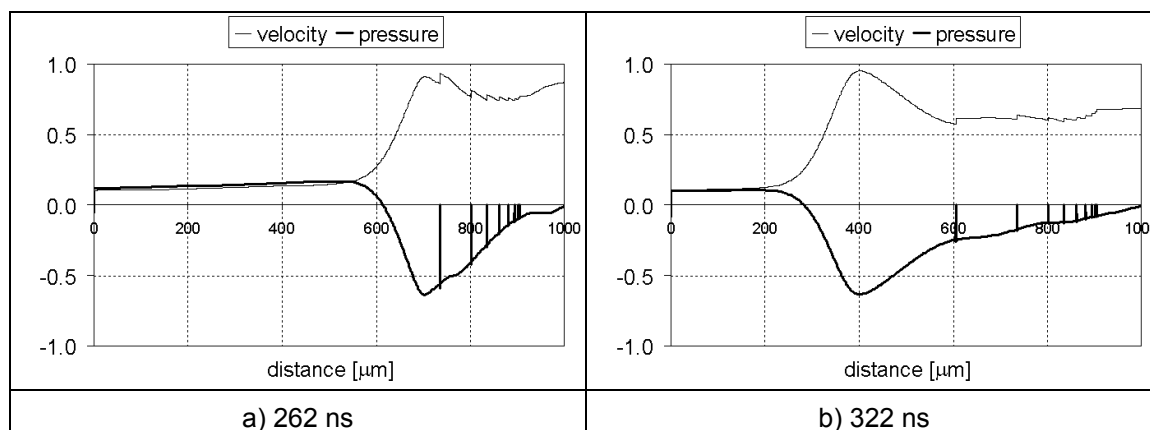


Rys. 3. Rozkłady unormowanego ciśnienia i unormowanej prędkości masy w próbce blachy tytanowej o grubości 1 mm. Impuls laserowy o gęstości energii 1 J/cm^2 , brak warstwy inercyjnej, grafitowa warstwa absorpcyjna: a) po zakończeniu impulsu laserowego, b) impuls naprężeń ściskających w środku próbki, c) moment odbicia impulsu naprężeń ściskających od powierzchni swobodnej, d) odbity impuls naprężeń rozciągających w połowie próbki, e) odbicie impulsu naprężeń rozciągających od powierzchni czołowej, f) impuls naprężeń powtórnie w połowie próbki (500 ns).

Stopy tytanu są bardzo atrakcyjne z inżynierskiego punktu widzenia, gdyż cechują się wysoką wytrzymałością oraz korzystnym stosunkiem wytrzymałości do gęstości. Tytan służy także do wytwarzania różnych protez i implantów, gdyż cechuje się wysoką biokompatybilnością [9 - 11]. Dlatego przeprowadzono także modelowanie laserowej obróbki tytanu (rys. 3 i 4). W tym przypadku oszacowano także możliwość rozwarstwiania próbki przez impuls naprężeń rozciągających.

Na rysunku 3 zademonstrowano ewolucję unormowanego impulsu naprężeń w warstwie tytanu o grubości 1 mm, przy braku warstwy inercyjnej, dlatego uzyskano stosunkowo niską amplitudę naprężeń. Po czasie około 50 ns w rozkładzie naprężeń zanikają drobnoskalowe szczegóły związane z kształtem impulsu laserowego. Do momentu odbicia od tylnej powierzchni próbki w impulsie występują wyłącznie naprężenia ściskające (rys. 3a i 3b). Impuls naprężeń odbija się od powierzchni blachy, zmieniając przy tym znak (rys. 3c).

Natomiast prędkość masowa cząstek nigdy nie zmienia znaku przy odbiciu. Po zastosowaniu wodnej warstwy inercyjnej amplituda impulsu znacznie rośnie. Po odbiciu od powierzchni tylnej powstaje impuls naprężeń rozciągających (rys. 3d), którego amplituda może przekroczyć wytrzymałość tytanu i spowodować rozwarstwienie (rys. 4).



Rys. 4. Obróbka próbki tytanu pod wodną warstwą inercyjną i grafitową warstwą absorpcyjną. Skoki wartości naprężeń występują w płaszczyznach rozwarstwienia tytanu, spowodowanych naprężeniami rozciągającymi, przekraczającymi próg wytrzymałości. Warstwy poza strefami pęknięcia nie uległy wyhamowaniu, lecz poruszają się ze stałą prędkością.

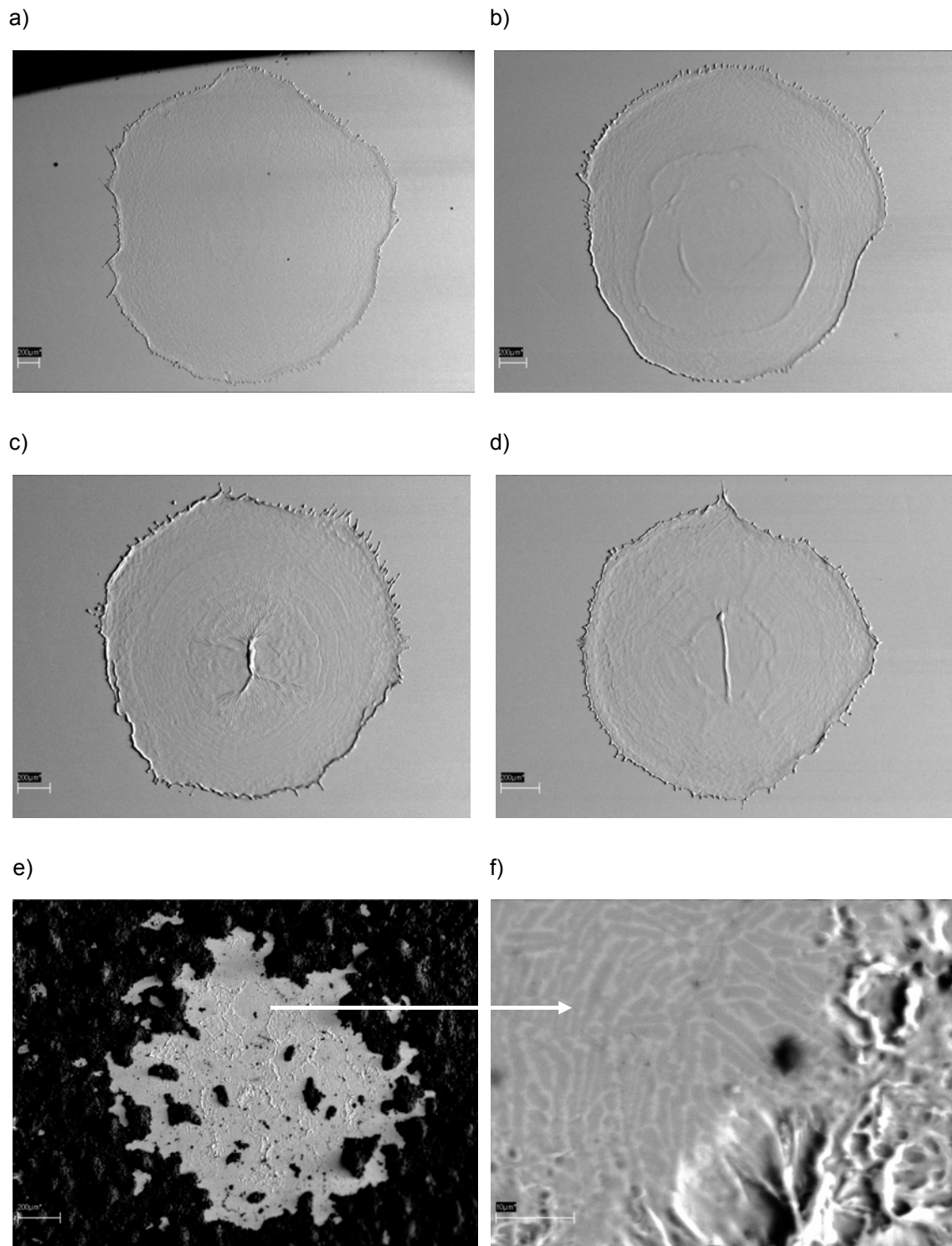
3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu umocnienia warstwy powierzchniowej stopu tytanu WT3-1 przeprowadzono laboratoryjne badania porównawcze przy wykorzystaniu specjalistycznego lasera impulsowego ReNOVALaser 5 - Nd:YAG z Q – modulacją. W badaniach stosowano długość fali $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$. 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.

Udarowe umacnianie (LSP) laserem Nd: YAG daje możliwość wykonywania kontrolowanego i powtarzalnego procesu, który zależnie od przyjętych warunków obróbki (zwłaszcza gęstości energii q i czasu trwania impulsu) może być prowadzony przy małych gęstościach energii przy niewielkim uszkodzaniu podłoża poprzez wielokrotne powtórzenie procesu w strefie umacnianej, lub przy znacznie większych wartościach q , powodujących rozwinięcie powierzchni. Stosując odpowiednio dobraną powłokę absorpcyjną można uchronić podłoże przed jej uszkodzeniem przy pozytywnym efekcie umocnienia powierzchniowego.

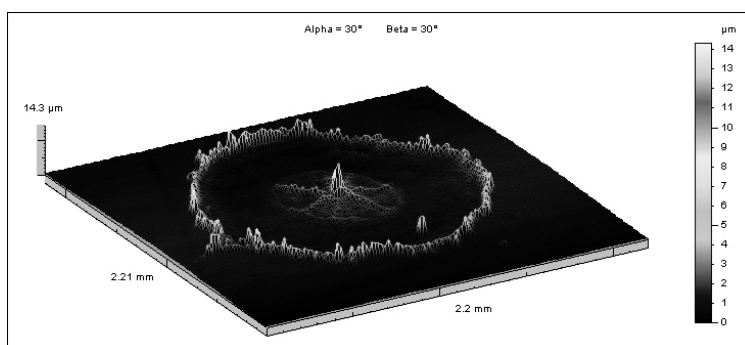
Na rysunku 5 przedstawiono widok warstwy powierzchniowej stopu tytanu umacnianego laserowo technologią LSP przy różnych gęstościach energii oraz różnych wariantach absorpcji promieniowania (powierzchnia polerowana bez absorbenta oraz z absorbentem, różna liczba impulsów laserowych). Stosując różne gęstości energii od $7 - 33 \text{ J/cm}^2$ uzyskano zróżnicowane kształty topografii powierzchni w strefie oddziaływania impulsów laserowych.

W wyniku szybkozmiennych procesów fizycznych (absorpcja, nagrzewanie, jonizacja, ablacja, fala uderzeniowa) na powierzchni wypolerowanego stopu tytanu następowało topienie cienkiej warstwy przypowierzchniowej oddziaływanie wygenerowanej fali uderzeniowej, a następnie superszybka krystalizacja (rys. 5). W wielu przypadkach widoczne są ślady bardzo szybkiego przepływu fazy gazowej nad powierzchnią jeziora roztopionego wrzącego metalu. Absorpcja energii promieniowania powoduje stopienie metalu, a następnie doprowadza go do burzliwego wrzenia. Powierzchnia wrzącego metalu staje się nierówna i niestabilna. Poruszające się gazy porywają cząstki roztopionego metalu i rozrzucają je po powierzchni próbki wokół wiązki laserowej. Jednocześnie z tym zachodzi bardzo szybkie chłodzenie roztopionego metalu. Chłodzenie zachodzi tak szybko, że praktycznie następuje zamrożenie chwilowego kształtu pofałdowanej powierzchni oraz strug i kropelek materiału unoszonego przez

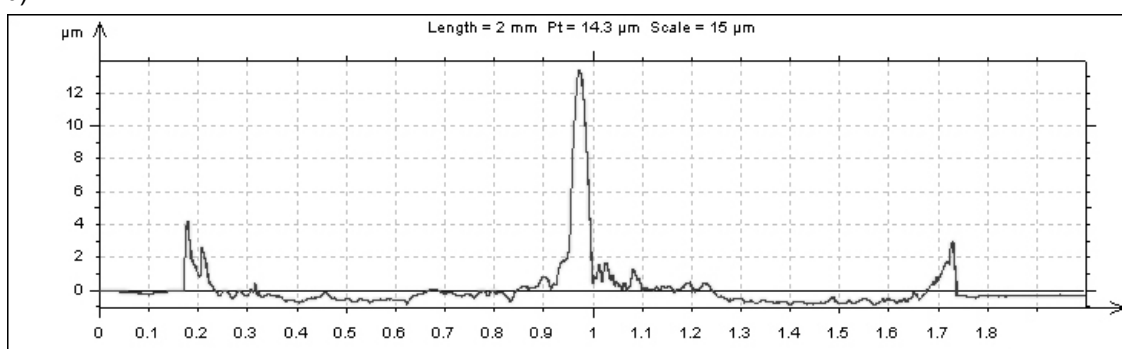


Rys. 5. Topografia powierzchni stopu tytanu WT3-1 polerowanego bez powłoki absorpcyjnej lub pokrytego cienką powłoką absorpcyjną (czarna farba w sprayu), po obróbce impulsem lasera Nd: YAG przy różnych gęstościach energii: jeden lub trzy impulsy laserowe, połówkowy czas trwania impulsu $\tau = 10$ ns – ogólny widok stref zmodyfikowanych laserowo: a, b, c, d) jeden impuls laserowy, e, f) trzy impulsy; a – 7 J/cm^2 , b – 10 J/cm^2 , c – 20 J/cm^2 , d, e – 33 J/cm^2 , mikroskopia elektronowa skaningowa (SEM)

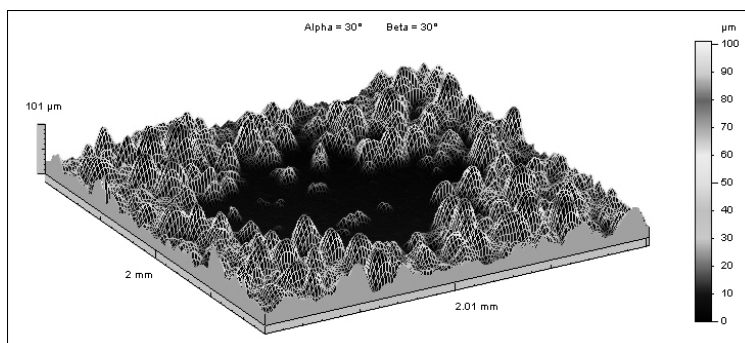
a)



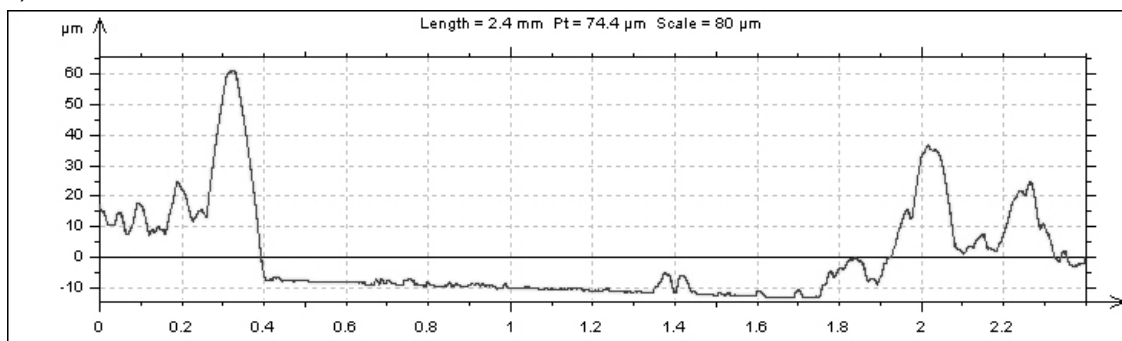
b)



c)



d)



Rys. 6. Efekty umocnienia stopu tytanu WT3-1 w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej generowanej jednym impulsem laserowym (laser Nd:YAG z Q – modulacją, gęstość energii 33 J/cm²), – profilogramy stref umocnionych i odkształconych plastycznie: warstwa wierzchnia bez powłoki absorpcyjnej (a – profilogram 3D, b – profilogram 2D), warstwa wierzchnia z powłoką absorpcyjną – (czarna farba w sprayu, c – profilogram 3D, d – profilogram 2D)

falę podmuchu (rys. 5a-d). Siły napięcia powierzchniowego nie zdążyły wygładzić powierzchni szybko krzepnącego metalu. Ciśnienie fali podmuchu spowodowało przepływ roztopionego metalu ze środka obszaru oddziaływania ku jego brzegom. W wyniku tego przepływu, zwłaszcza przy stosunkowo dużych gęstościach energii, tj. 20 – 33 J/cm² w środku obszaru oddziaływania może powstać charakterystyczne zagłębienie, otoczone „wałem” zakrzepniętego metalu o wysokości około 4 μm lub charakterystyczny obszar w kształcie słupa zakrzepłego metalu w epicentrum umacnianej strefy otoczony również z ww. „wałem” (rys. 5a-d, 6a).

Aby osiągnąć zamierzony efekt, tj. znaczne umocnienie warstwy wierzchniej stopu tytanu WT3-1 bez ubocznych efektów (nadtopień i rozwijania powierzchni), w drugim etapie badań przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne z różnymi absorbentami (grafit koloidalny, czarna farba, czarny tusz, utlenianie powierzchni) i warstwami inercyjnymi (np. różne grubości warstwy wody). Pozwoliło to osiągnąć obiecujące efekty laboratoryjne. Zastosowane powłoki absorpcyjne znacznie zwiększają 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 i rozwijanie powierzchni – rys. 5e,f, 6c,d).

Zastosowanie powłoki absorpcyjnej z systemem warstw inercyjnych (woda lub woda + szkło) pozwala na uzyskanie ciśnień nawet do ok. 5 GPa (rys. 1), czyli na uzyskanie znacznych odkształceń plastycznych stopu aluminium, a tym samym naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej.

4. PODSUMOWANIE

Literatura dotycząca omawianego zagadnienia jest ogromna, dlatego w dalszej części przedstawione zostaną tylko wybrane z prac [1-5], charakterystyczne cechy kulowania laserowego. 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 własności obrabianego ośrodka. W najprostszej konfiguracji, kiedy próbka była pokryta kilkumilimetrową warstwą wody, przy za-

stosowaniu lasera Nd:YAG 1064 nm z impulsem o czasie trwania 25 ns, przy gęstości mocy 10 GW/cm^2 , otrzymano ciśnienie maksymalne około 5.5 GPa [3]. Przy wyższych gęstościach mocy plazma powstawała nie w metalu, a w wodzie, a to ograniczało ciśnienie maksymalne [3].

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 i 532 nm (druga harmoniczna). Promieniowanie z zakresu krótkofalowego (ultrafiolet) jest silnie absorbowane w wodzie, co obniża próg przebicia. Niemożliwe jest także stosowanie lasera o zbyt wysokiej częstotliwości repetycji. Między kolejnymi strzałami musi nastąpić odtworzenie jednorodnej warstwy wodnej.

Proces technologiczny kulowania laserowego stopów aluminium może łączyć się z jednoczesnym usuwaniem z warstwy powierzchniowej zanieczyszczeń organicznych, nieorganicznych oraz tlenków [1, 7]. Ma on wiele zalet w porównaniu z kulowaniem udarowym, m.in. większa grubość warstwy umocnionej, wyższa wartość naprężeń własnych, mniejsza chropowatość powierzchni, łatwość kontrolowania procesu, wysoka 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 topienie metalu i rozwinięcie powierzchni (rys. 5b). 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, nie osiąganym tradycyjnymi metodami.

5. WNIOSKI

1. Wykonane obliczenia numeryczne umacniania stopu aluminium PA31, stali (żelazo Armco) oraz stopu tytanu WT3-1 w kształcie blachy o grubości 0,6 mm, pokrytej warstwą absorpcyjnej (grafit o grubości 5 μm) i inercyjną (warstwa wody), obciążanej falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym o kształcie trójkąta i czasie jego trwania 10 ns wykazały, że promieniowanie pochłonięte przez warstwą absorpcyjną nagrzewa ją, jonizuje i wytwarza plazmę. Promieniowanie propaguje się do tzw. koncentracji krytycznej, w którym to obszarze ulega odbiciu i propaguje się w kierunku odwrotnym (na zewnątrz materiału obrabianego). Powstaje impuls ciśnienia w postaci krótkotrwałej fali uderzeniowej.
2. Warstwa absorpcyjna i inercyjna zwiększają amplitudę impulsu ciśnienia od trzech do dziesięciu razy. Prędkość propagacji impulsu w zasadzie nie zależy od jego amplitudy, co wynika z faktu, że występujące tu fale uderzeniowe są falami słabymi. Zmiany gęstości wynoszą co najwyżej 10%. Silne fale uderzeniowe w ciałach stałych występują dopiero przy ciśnieniach powyżej $10^5 - 10^6$ barów (10 – 100 GPa), natomiast w analizowanych przypadkach amplituda impulsu ciśnienia nie przekracza 5 GPa.
3. Zwiększenie gęstości energii do 100 J/cm^2 (maksymalne natężenie wiązki miało więc średnią wartość 10 GW/cm^2) spowodowało wzrost amplitudy impulsu ciśnienia do wartości około 5 GPa, ale nawet przy tym ciśnieniu prędkość propagacji fali uderzeniowej w zasadzie niewiele odbiega od prędkości dźwięku, a kompresja za frontem fali nie przekracza 10 %.
4. Prowadząc laserowe umacnianie technologią LSP na rzeczywistych próbkach ze stopu aluminium tytanu WT3-1 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.

LITERATURA

1. Narendra B. Dahotre, T.S. Sudarshan, (eds): Lasers in Surface Engineering. ASM International, 1998.
2. Hammersley G., Hackel L.A., Harris F.: Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening. Optics and Lasers in Engineering 34, 327-337, (2000).

3. Montross C.S., Wei T., Ye L., Clark G., Mai Y-W.: Laser shock processing and its effect on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International Journal of Fatigue* 24, 1021-1036, (2002).
4. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В.: Действие излучения большой мощности на металлы. Наука, Москва, 1970.
5. Marczak J., Sarzyński A.: Fotony w oczyszczaniu powierzchni. *Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji*, t.54, nr 3, str.103-122, 2004.
6. 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.
7. Jach K., Morka A., Mroczkowski M., Panowicz R., Sarzyński A., Stępniewski W., Świerczyński R., Tyl, J.: Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, (2000).
8. Marczak J.: Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej, Wydawnictwo Bel Studio, Warszawa, 2004.
9. Yilbas B.S., Shuja S.Z., Hashmi M.S.J.: A numerical solution for laser heating of titanium and nitrogen diffusion in solid. *Journal of Materials Processing Technology*, 136 (2003) 12-23.
10. Tian Y.S., Chen C.Z., Li S.T., Huo Q.H.: Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science* 242 (2005) 177–184.
11. Juergen M. Lackner, Industrially-styled room-temperature pulsed laser deposition of titanium-based coatings. *Vacuum* 78 (2005) 73–82

Rękopis dostarczono, dnia 31.08.2006 r.

STRENGTHENING OF SURFACE TOP LAYER OF WT3-1
TITANIUM ALLOY WITH LASER INDUCED SHOCK
WAVE – PHYSICAL PHENOMENA
AND SELECTED PROPERTIES

W. NAPADŁEK, A. SARZYŃSKI

ABSTRACT *The paper describes strengthening of a top layer of WT3-1 titanium alloy with a shock wave induced by laser radiation. Some results of numerical modeling of pressure pulse generation are presented. The source of radiation was Nd:YAG laser with pulse energy of 0.5 J and pulse width of 10 ns. Investigations included observations with scanning microscope (SEM) as well as topographic surface analysis using profilometer.*