



Wojciech Z. Misiolek  
 Dept. of Materials Science & Engineering  
 Loewy Chair, Materials Forming & Processing  
 Director, Loewy Institute

Whitaker Laboratory  
 5 East Packer Avenue  
 Bethlehem PA 18015-3195 USA



lehigh.edu/loewy  
 wzm2@lehigh.edu  
 1-610-758-4252

LOEWY  
 INSTITUTE

28 września, 2024

## RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr inż. Pauliny Smolarczyk pt.: **„Struktura i właściwości zmodyfikowanej Ti lub Ag warstwy wierzchniej miedzi w procesie stopowania laserowego”**

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej

### Zakres rozprawy doktorskiej

Szerokie zastosowanie stopów miedzi w przemyśle energetycznym, elektronicznym i transporcie oraz perspektywa ich dodatkowych aplikacji w związku z potencjalnym rozwojem samochodów elektrycznych wiąże się z zapotrzebowaniem na poprawę własności fizycznych technologicznie modyfikowanych różnych gatunków metali i stopów. W przypadku miedzi i jej stopów poprawy wymagają zarówno własności mechaniczne jak i tribologiczne.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska stanowi ważną i interesującą analizę inżynierskiej metody modyfikacji powierzchni miedzi M1E. Praca zawiera bardzo wnikliwy przegląd literaturowy dotyczący zarówno procesów technologicznych stosowanych w przetwórstwie stopów miedzi, metaloznawstwa w zakresie mechanizmów umocnienia jak i technik laserowych zastosowanych do laserowego stopowania metali. Ilość pozycji literaturowych jest duża i wynosi 195 pozycji, wśród, których obok krajowych i międzynarodowych prac naukowych i informacji ze stron internetowych są też normy przemysłowe z różnych stron świata. Przeprowadzony przegląd literatury w naturalny sposób ukierunkowany jest na zaproponowaną tezę, że modyfikacja powierzchni miedzi

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 30.09.2024  
 RDJMa 1901541 2024  
 nr ..... zaf. ....

gatunku M1E przy użyciu laserowego stopowania z zastosowaniem proszków tytanu i srebra prowadzi do podwyższonych powierzchniowych własności użytkowych.

### Ocena rozprawy doktorskiej

Technologia obróbki powierzchniowej pozwala na poprawę własności mechanicznych i tribologicznych powierzchni podczas zachowania bardziej plastycznych własności rdzenia, co rzutuje na końcowe własności i zastosowanie części produkowanych z miedzi i jej stopów. Próbki miedzi gatunku M1E zostały poddane laserowemu powierzchniowemu wtapianiu proszków tytanu i srebra przy kontrolowaniu parametrów procesu modyfikacji powierzchni przez laserowe stopowanie. Dla obu proszków przeprowadzono analizę optymalnych parametrów procesu stopowania laserowego i te wybrane parametry, moc lasera i prędkość podawania proszku, zostały użyte do dalszej realizacji badań. Parametry te zostały wyselekcjonowane na podstawie porównania twardości warstwy powierzchniowej i jej odporności na ścieranie jak i stężenia masowego pierwiastków w strefie powierzchniowej. Zachowano stałe parametry procesu laserowego stopowania dla całego eksperymentu stosując gaz osłonowy argon o stałym przepływie, stałą prędkość skanowania wiązki lasera oraz jej stałą średnicę. Morfologia oraz składy chemiczne otrzymanej warstwy powierzchniowej została przeanalizowana przy użyciu współczesnych metod metalograficznych używając techniki mikroskopii optycznej i elektronowej (SEM i TEM). Dodatkowo przeprowadzono pomiary mikrotwardości, prób odporności na ścieranie dla próbek otrzymanych w wyniku eksperymentu oraz próbek referencyjnych dla miedzi M1E. Dokładne dane nt. użytych instrumentów badawczych i szczegółowy opis przeprowadzonych badań są przedstawione w pracy doktorskiej. Na szczególną uwagę wg mnie zasługują rysunki 31 i 32 na stronie 64 w ciekawy sposób podsumowujące efekty prędkości podawania proszków i mocy lasera na własności wytworzonych próbek.

W przypadku obu proszków stopujących laserowo w wytworzonych próbkach przeprowadzone następujące pomiary: równomierności ściegów, różnice w geometrii próbki, oceną porowatości, oceną jakości powierzchni wyznaczając profil falistości, ocenę geometrii stref RZ, HAZ, DZ i wielkości ziaren tych stref. Dodatkowo skład chemiczny warstwy powierzchniowej został określony za pomocą analizy punktowej w formie linii pomiarowych w kierunku szerokości i głębokości strefy przetopienia. Techniki mikroskopii elektronowej (EDS, STEM) oraz metoda XRD zostały zastosowane do wykazania obecności tlenków i faz międzymetalicznych.

W przypadku stopowania laserowego proszkiem Ti przeprowadzone badania nie wykazały porowatości oraz wykazały obecność tlenu i  $TiO_2$  w całym badanym obszarze.

Badania wykazały równomierność i ciągłość ściegów w strefie powierzchniowej. Głębokość strefy przetopienia została ustalona na 426  $\mu\text{m}$  przy pomiarze falistości wynoszącej 200  $\mu\text{m}$  dla najniższego punktu od płaszczyzny 0. Pomiar liniowy zawartości tytanu w strefie RZ (w poprzek i w głąb) wykazały poziom 21 $\pm$ 3% atomowo. Ustalono też charakterystyczną mikrostrukturę strefy powierzchni z obecnością faz  $\text{Cu}_3\text{Ti}_2$  i  $\text{Cu}_4\text{Ti}$  w osnowie Cu.

Wyniki dla laserowego stopowania proszkiem Ag również wykazały regularność i ciągłość ściegów jak również brak porowatości. Głębokość przetopienia wynosiła 189  $\mu\text{m}$  a najniższy punkt w badaniu falistości wynosił 100  $\mu\text{m}$  od płaszczyzny 0. Pomiar liniowy zawartości srebra w strefie RZ (w poprzek i w głąb) wykazały poziom 35,7 $\pm$ 11,8% atomowo. Typowa mikrostruktura w strefie RZ to  $\alpha(\text{Cu}) + \text{E}_{(\text{Cu} + \text{Ag})}$ .

Próbki stopowane laserowo proszkami tytanu i srebra miały znacznie podwyższoną twardość na powierzchni próbek, wzrost twardości wynosił 234% dla materiału stopowanego tytanem i 155% dla materiału stopowanego srebrem. Powstanie faz  $\text{Cu}_3\text{Ti}_2$  i  $\text{Cu}_4\text{Ti}$  w osnowie Cu jest odpowiedzialne za zmianę własności mechanicznych. W przypadku próbek stopowanych laserowo srebrem wzrost własności mechanicznych jest wynikiem krystalizacji mikrostruktury  $\alpha(\text{Cu}) + \text{E}_{(\text{Cu} + \text{Ag})}$ . Chropowatość powierzchni  $R_a$  wynosiła 0,131  $\mu\text{m}$  i 0,206  $\mu\text{m}$  dla próbek stopowanych odpowiednio tytanem i srebrem. Rozpoznano mechanizmy powodujące zużycie ściernie dla obu systemów stopowych.

### Szczegółowe pytania i uwagi

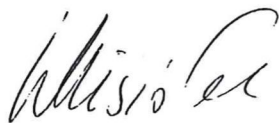
Celem poniższych pytań i uwag jest lepsze przygotowanie Autorki do publikacji naukowych i prezentacji na konferencjach opartych na bazie przedstawionej pracy doktorskiej oraz ewentualnych przyszłych badań w tym zakresie. Proszę o ustne ustosunkowanie się do poniższych uwag podczas obrony doktorskiej.

- Strona 7; Proszę o wyjaśnienie różnicy pomiędzy pojęciami 'ciągliwość' i 'plastyczność'
- Strona 10; Jak procesy kucia mogą być użyte do oddzielenia zanieczyszczeń od metali szlachetnych?
- Strona 85; trzecia linijka od dołu; zdanie powinno być przeredagowane
- Proszę o komentarz nt., roli prędkości chłodzenia po procesie laserowego stopowania i jego wpływu na własności mechaniczne przetwarzanego materiału

- Byłoby wskazane zamieścić więcej informacji nt., użytych proszków Ti i Ag (dystrybucja wielkości cząstek, metoda produkcji proszków) w celu lepszego zrozumienia płynięcia proszków w procesie stopowania. Zamieszczone zdjęcia na stronie 62 wskazują na bardzo różny kształt i wielkość proszków Ti i Ag co ma wpływ na ich płynięcie. Proszę o skomentowanie tego zjawiska.
- Proszę wyjaśnić niezgodność pomiędzy informacją dotyczącą twardości niestopowanej miedzi podaną w tekście (strona 95) i na rysunku 64,
- Proszę o podanie więcej informacji na temat jak był wyprodukowany materiał wyjściowy, płaskownik z miedzi M1E. Informacja o utwardzeniu 'z4' (stan półtwardy) jest niewystarczający w obliczu wniosku III (strona 109) dotyczącego zjawisk rekrytalizacji. Proszę o skomentowanie tej zależności.

### **Wniosek końcowy**

Pracę pani mgr inż. Pauliny Smolarczyk zatytułowaną: **“Struktura i właściwości zmodyfikowanej Ti lub Ag warstwy wierzchniej miedzi w procesie stopowania laserowego”** oceniam jako pracę doktorską spełniającą międzynarodowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz przez obowiązujące przepisy w Polsce. Praca ta jest jakościowo podobna do doktoratów recenzowanych przeze mnie w krajach Ameryki Północnej, Europy, Azji i Oceanii. Uwzględniając przedstawione przeze mnie powyższe uwagi stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony w Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Uwzględniając przedstawione w pracy wyniki o wysokich wartościach naukowych, ich potencjalne możliwości do wdrożeń przemysłowych, zachęcam Autorkę do publikacji wyników prezentowanych w jej pracy w czołowych międzynarodowych czasopismach naukowych.



Dr Wojciech Z. Misiolek, FASM  
Loewy Professor of Materials Forming and Processing  
Department of Materials Science and Engineering  
Department of Mechanical Engineering and Mechanics  
Director, Loewy Institute