Warszawa, 22.05.2023

OPINIA PROMOTORA
pracy doktorskiej
Pana mgr inż. Tomasza CHROSTKA

nt. „Właściwości termofizyczne wielowarstwowej struktury powłok FeAl (DGS) z udziałem ceramiki tlenkowej i jej wpływ na zużywanie ścierne w warunkach tarcia suchego

Pan mgr inż. Tomasz CHROSTEK zatrudniony jest na Uniwersytecie Warmińskim na Wydziale Nauk Technicznych w Katedrze Technologii Materiałów i Maszyn na stanowisku asystenta w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, gdzie swoją pracę doktorską realizuje od 2018 r. Zasadniczym celem naukowym prezentowanej pracy jest analiza stopnia utleniania się cząstek proszku FeAl w zbilansowanym energetycznie strumieniu gazowych produktów spalania detonacyjnego (DGS) i wpływ formujących się faz tlenkowych (in situ w procesie DGS) – na kształtowanie struktury powłok intermetalicznych Fe-Al oraz ich właściwości termofizyczne (ciepło właściwe, przewodność cieplną i liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej), gdzie w aspekcie utylitarnego zastosowania tych powłok badano też ich odporność na zużywanie ścierne w warunkach tarcia suchego metodą pin-on-disc.

W wyniku przeprowadzonej analizy dostępnej literatury przedstawiono właściwości faz międzymetalicznych z układu równowagi Fe-Al oraz problemy związane z ich wytwarzaniem w formie litej, zwracając uwagę na cechy budowy strukturalnej warunkujące właściwości mechaniczne i stabilność struktury w wysokiej temperaturze. Przedstawiając przyczyny ograniczające podatność do odkształcenia plastycznego stopów typu Fe-Al na zimno (*m. in. udział nadmiarowych wakansów termicznych, złożoną symetrię struktury, uporządkowanie dalekiego zasięgu, warunki środowiskowe*), przyjęto założenie o możliwości zastosowania tych stopów w formie powłok ochronnych natryskiwanych cieplnie w warunkach detonacji gazowej – z naddźwiękowym przepływem strumienia metalizacyjnego. Scharakteryzowano najważniejsze metody natryskiwania cieplnego (*Arc, APS, HVOF, Cold Spraying i ich odmiany*), mające zastosowanie w wytwarzaniu powłok ochronnych typu Fe-Al – ze szczególnym uwzględnieniem procesu DGS. Analizując czynniki mające wpływ na

kształtowanie struktury (*długość lufy i miejsce położenia proszku w lufie działa w chwili detonacji – parametr PIP*), określono udział faz tlenkowych formowanych in situ w procesie DGS i ich wpływ na właściwości termofizyczne wytworzonych powłok Fe-Al (*ciepło właściwe, przewodność cieplną i liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej*) oraz stopień umocnienia struktury (*rozkład mikrotwardości na przekroju poprzecznym powłok*) – w aspekcie ich odporności na zużywanie ścierne. Analizowano też stopień utleniania się cząstek proszku natryskiwanych do wody i ich stan skupienia (*zdolność do przetapiania*) w warunkach procesu DGS – mających wpływ na udział tzw. „*unmelted particles*" w strukturze powłoki i faz tlenkowych formowanych in situ po granicach ziaren (nadając jej właściwości kompozytu).

W efekcie dokonanej analizy dostępnej literatury postawiono cztery zasadnicze tezy badawcze, które określiły obszar zaplanowanej i przeprowadzonej serii badań w ramach stażu naukowego na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej, gdzie badania realizowano też w Instytucie Techniki Wojsk Lotniczych w Warszawie z użyciem materiałów badawczych wytworzonych w Instytucie Patona Ukraińskiej Akademii Nauk w Kijowie.

W badaniach wykorzystano takie metodyki badawcze, jak:

- mikroskopia optyczna i skaningowa (SEM/EDS/EBSD);
- rentgenowska analiza fazowa (XRD);
- badania właściwości termofizycznych (DSC, LFA, DIL) i stabilności strukturalnej powłok w wysokiej temperaturze;
- badania mikrotwardości;
- badania struktury geometrycznej powierzchni;
- badania odporności na zużycie ścierne;

Rezultatem zaplanowanych i zrealizowanych eksperymentów badawczych było dokonanie oceny stopnia utleniania się powierzchni cząstek proszku natryskanych do wody i dziedziczenia faz tlenkowych w strukturze powłok natryskanych na stalowe podłoże oraz ich wpływ na właściwości termofizyczne pseudo kompozytowej powłoki Fe-Al natryskanej w zbilansowanym energetycznie strumieniu metalizacyjnym w warunkach detonacji gazowej, gdzie określono też wpływ parametrów natryskiwania DGS na porowatość struktury oraz udział nieodkształconych plastycznie cząstek proszku (w zależności od długości lufy i miejsca położenia proszku w lufie działa w momencie detonacji).

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że w stosunkowo prosty (z technicznego punktu widzenia) sposób natryskiwania DGS można uzyskać powłoki ochronne na bazie faz międzymetalicznych typu Fe-Al z udziałem ceramiki tlenkowej, które posiadają różne od spieków intermetalicznych FeAl właściwości termofizyczne. Udział faz tlenkowych wpływa na umocnienie struktury wytworzonej powłoki Fe-Al (DGS), jej stabilność cieplną i zwiększoną odporność na zużywanie ścierne w warunkach tarcia suchego, minimalizując jednocześnie problemy związane z kruchością intermetali na osnowie fazy FeAl w stanie litym. Analiza uzyskanych wyników badań własnych pozwala przypuszczać, że potencjalnie korzystne właściwości użytkowe faz międzymetalicznych FeAl w formie powłok ochronnych, będzie można wykorzystać w konkretnych zastosowaniach konstrukcyjnych, podnosząc jednocześnie wydatnie żywotność elementów konstrukcji (*szczególnie jeżeli chodzi o odporność na zużycie ścierne*). Jednocześnie przeprowadzone badania wykazały, że zauważalny wpływ na jakość metalurgiczną powłok: ich skład fazowy oraz udział faz tlenkowych formowanych in situ w określonych warunkach procesu DGS, jak też stopień rozwinięcia powierzchni – ma długość lufy działa detonacyjnego oraz miejsce położenia proszku w lufie działa w momencie detonacji (parametr PIP).

Ważnym osiągnięciem opiniowanej pracy doktorskiej jest też wykazanie, że wzrost ilości oddanych strzałów DGS (ze 100 do 400) zmniejsza stopień rozwinięcia powierzchni, co jest prawdopodobnie efektem dogęszczania struktury falą uderzeniową przed formowaniem kolejnej warstwy powłoki naddźwiękowym przepływem strumienia gazowych produktów detonacji transportujących cząstki proszku. Jednocześnie przeprowadzona analiza fraktalna wskazuje na brak kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni powłoki Fe-Al (DGS) uformowanej w określonych warunkach natryskiwania DGS.

Ważnym atrybutem opiniowanej pracy jest wskazanie tendencji w zakresie możliwości praktycznego wykorzystania powłok DGS w budowie maszyn i urządzeń, w szczególności dla rozwiązań konstrukcyjnych z silnie obciążonymi węzłami tribologicznymi.

Z przeprowadzonej analizy wynika też, że duże perspektywy zastosowania powłok ochronnych Fe-Al (DGS), są w warunkach działania ściernego w wysokiej temperaturze, przy korzystnym udziale faz tlenkowych Al_2O_3 formowanych in situ w strukturze powłoki w procesie DGS.

Doktorant dał się poznać, jako rzetelny, zdyscyplinowany i pracowity naukowiec o wysokiej kulturze osobistej, który w krótkim czasie opanował istotnie zaawansowane metodyki badawcze do przeprowadzenia oryginalnych badań własnych wraz z analizą

złożonych zagadnień materiałowo-technologicznych, które prezentował też w ramach prowadzonych zajęć dydaktycznych.

Uzyskane wyniki w pełni odzwierciedlają postawione tezy badawcze, gdzie osiągnięto założony cel pracy, a zgromadzony dotychczas dorobek naukowy Doktoranta (*co najmniej 6 publikacji – w tym 3 indeksowane w bazie JCR oraz prezentacja wyników badań na krajowych konferencjach naukowych*), w opinii Promotora pracy doktorskiej, daje pełną podstawę do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, zgodnie z wymaganiami ustawy o tytułach i stopniach naukowych.

Dr hab. inż. Cezary Senderowski, prof. uczelni