

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Brygidy Zimowskiej** zatytułowanej:

**„Zastosowanie metody druku 3D do wytworzenia elementu  
silnika tłokowego z Inconelu 738LC”**

### 1. Uwagi o wyborze tematyki i celu rozprawy

Światowy sektor elektroenergetyczny znajduje się w fazie ciągłego rozwoju. Jest to spowodowane wysokim zapotrzebowaniem na energię elektryczną, ograniczeniem dostępności paliw kopalnianych, a także ograniczeniami związanymi z coraz większym stopniem zanieczyszczenia środowiska. Głównymi kierunkami rozwoju przemysłu energetycznego jest wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii, poprawa efektywności energetycznej, a także rozwój energetyki jądrowej i odnawialnych źródeł energii wraz ze zmniejszeniem oddziaływania przemysłu energetycznego na środowisko.

W 2011 roku Międzynarodowa Agencja Energetyczna (ang. International Energy Agency, IEA) opublikowała raport pt. „2011 World Energy Outlook”. W raporcie zawarto ocenę perspektyw rozwoju energetyki do 2035 roku. Jednym z kierunków rozwoju energetyki oprócz wykorzystania OZE jest zwiększenie sprawności energetyki zawodowej ale także wykorzystanie kogeneracji w układach niezawodowych. Kogeneracja to skojarzona produkcja energii, w jednym procesie technologicznym łączącym wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Do wytworzenia tych samych ilości prądu i ciepła zużywa się mniej paliwa niż podczas produkcji rozdzielonej. Do najczęściej stosowanych układów kogeneracyjnych w energetyce niezawodowej zalicza się silniki spalinowe tłokowe lub Stirlinga.

Silniki gazowe tłokowe mogą elastycznie pracować na gazie ziemnym lub innych gazach. Spalanie gazów w silniku można sterować np. poprzez zmiany konstrukcji komory lub zastosowanie komory wstępnego spalania. W takiej komorze następuje rozpoczęcie spalania i następnie reakcja spalania zubożonej mieszanki zachodzi w komorze głównej. Komory wstępnego spalania pracują w złożonych warunkach eksploatacyjnych związanych z wysoką

temperaturą oraz agresywnym środowiskiem spalin. Tego typu elementy muszą być wykonane w technologii zapewniającej dużą niezawodność pracy a tym samym długi czas eksploatacji silnika bez awarii.

Jedną z zaawansowanych technologii wytwarzania złożonych części silników jest proces drukowania 3D z wykorzystaniem wiązki laserowej lub łuku elektrycznego (tzw. szybkie prototypowanie). Istnieje kilka typowych technologii szybkiego prototypowania. Wszystkie one umożliwiają stworzenie elementu o skomplikowanym kształcie z różnych materiałów (nawet trudnych technologicznie), bez konieczności uruchamiania skomplikowanego i kosztownego procesu np. odlewania.

Mgr. inż. Brygida Zimowska po analizie stanu zagadnienia podjęła badania mające na celu opracowanie wytycznych technologicznych wytwarzania komory spalania wstępnego w spalinowym silniku tłokowym metodą przyrostową ze stopu Inconel 738LC. Założyła, że wykorzystanie technologii druku 3D obniży koszty wytworzenia komory wstępnej spalania tłokowego silnika przy zapewnieniu, a nawet poprawie właściwości mechanicznych i żaroodporności w porównaniu do procesu odlewania. To założenie można przyjąć jako tezę pracy, która została uzasadniona w przeglądzie aktualnego stanu wiedzy. Należy zatem stwierdzić, że podjęta przez mgr inż. Brygidę Zimowską tematyka jest ciekawa i wynika z przeglądu stanu wiedzy głównie w obszarze technologii wytwarzania elementów tłokowych silników stosowanych w energetyce. Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o możliwości stosowania komponentów wytworzonych nowoczesną technologią druku 3D są właściwości użytkowe, w tym żarowytrzymałość i żaroodporność, co zapewnia bezpieczną eksploatację. O dużym doświadczeniu praktycznym doktoranta świadczą przyjęte cele pracy, które obejmują te zagadnienia.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska została podzielona na 10 numerowanych rozdziałów, obejmujących analizę literatury zakończoną podsumowaniem, cel i zakres pracy, opis metodyki badań oraz wyniki badań, które po podsumowaniu stanowiły podstawę sformułowanych wniosków. Praca zajmuje 111 stron tekstu, zamieszczono w niej 73 rysunki w postaci zdjęć, schematów, wykresów i mikrostruktur oraz 29 tabel.

Przedstawiony przez Doktorantkę przegląd literatury i ocena aktualnego stanu wiedzy obejmuje opis podstawowych tłokowych silników wytwarzanych przez firmę GE, analizę warunków pracy komory wstępnej spalania oraz stosowane materiały. Uzupełnieniem tej części był przegląd metod drukowania 3D elementów metalowych z uwzględnieniem procesów obróbki cieplnej i technologii izostatycznego prasowania na gorąco. Analiza stanu

wiedzy została przeprowadzona na podstawie 128 pozycji literaturowych, głównie z ostatnich 20 lat. Wyniki tej analizy zostały zebrane w podsumowaniu oraz rozdziale zatytułowanym: „Wymagania i potrzeby rynku”, na podstawie którego mgr inż. Brygida Zimowska sformułowała cel i zakres pracy.

Cel badań zakładający „opracowanie wytycznych technologicznych wykonania elementu solnika tłokowego (komora spalania wstępnego) metodą wydruku 3D z nadstopu Inconel 738LC” jest zgodny z kierunkiem rozwoju jednego z największych producentów silników dla energetyki tj. firmy GE. Założono, że wytworzona komora wstępnego spalania będzie spełniać wymagania użytkowe w wysokich temperaturach pracy silnika. Potwierdza to zasadność i prawidłowość sformułowania celu badań. Również zaproponowany zakres pracy obejmujący ustalenie parametrów procesu drukowania 3D dla stopu Inconel 738LC, wytworzenie części do silnika tłokowego metodą druku 3D, opracowanie warunków po-procesowej obróbki cieplnej oraz wykonanie procesu izostatycznego ściskania a także wytworzenie żaroodpornej warstwy ochronnej na bazie faz międzymetalicznych z układu Ni-Al należy uznać za prawidłowy.

W celu realizacji zakresu badań Doktorantka zrealizowała szeroki program badań, który obejmował m.in.: badania strukturalne, w tym pomiary gęstości materiału po wydruku, badanie tekstury oraz mikroanalizę składu chemicznego i analizę składu fazowego a także badania naprężeń resztkowych, właściwości mechanicznych i odporności na korozję wysokotemperaturową. Wyniki swoich badań Doktorantka komentowała w poszczególnych rozdziałach, co pozwoliło jej sformułować dziewięć wniosków głównych oraz cztery zalecenia technologiczne. Należy zatem stwierdzić, że cel i zakres rozprawy spełniają wymagania stawiane badaniom realizowanym w ramach pracy doktorskiej.

### **3. Uwagi formalne**

Czytając tekst rozprawy można jednak odnieść wrażenie, że była finalizowana w dużym pośpiechu. Dowodzą tego liczne błędy literowe i stylistyczne a także zdania i wyrażenia, których styl odbiega od norm obowiązujących w języku technicznym. Dotyczy to również rysunków w wersji angielskiej (rys. 7, str. 12, rys. 14, str. 23, rys.17, str. 28, rys. 20, str. 33, itd.). Należy jednak stwierdzić, że nieścisłości te nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej pracy. Informacje w tym zakresie przekazałem Doktorantce w nadziei, że w dalszej działalności zawodowej i naukowej uwzględni moje uwagi.

Wydaje mi się, że w części analizy stanu wiedzy, w szczególności w podsumowaniu (rozdz. 3.6. Podsumowanie - Analiza stanu wiedzy, str. 40), dla lepszego zrozumienia podstaw sformułowania celów i zakresu pracy można by wymienić w formie zestawienia



główne czynniki, które zdecydowały o podjęciu tej tematyki rozprawy. Również, z powodu rozbudowanego zakresu pracy oraz zastosowanych metod badawczych bardzo pomocny byłby schemat badań. Taki schemat pomaga czytającemu zorientować się w zakresie i kolejności poszczególnych etapów badań. Niestety schemat zaplanowanych do wykonania prac, pokazany na rysunku 26, str. 43, jest bardzo uproszczony.

Opisane wyniki badań w poszczególnych rozdziałach zostały skomentowane bez podania konkretnych wartości oraz bez podania kryteriów akceptacji, co utrudnia odniesienie się do uzyskanych wyników. W takim przypadku celowym uzupełnieniem rozprawy byłaby całościowa analiza wyników. Klasyczna forma pisania rozpraw doktorskich bardzo ułatwia sformułowanie prawidłowych wniosków potwierdzających cele rozprawy, a czytającemu umożliwia odniesienie się do wyników badań, ich weryfikację i wykorzystanie w dalszych pracach badawczych.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

W części teoretycznej Doktorantka dość ogólnie przedstawiła aktualne konstrukcje silników tłokowych produkowanych przez firmę GE, ze szczególnym uwzględnieniem silnika Jenbacher serii 6, dla którego Autorka opracowała technologie druku 3D komory wstępnego spalania. Po opisanie w kolejnych rozdziałach budowy komory wstępnego spalania i typowych warunków pracy oraz mechanizmów zużycia mgr inż. Brygida Zimowska krótko scharakteryzowała obecnie stosowane materiały m.in. Nimonic 81 i Inconel 738. Na tej podstawie wskazała, że do wykonania komory wstępnego spalania silnika tłokowego zostanie wykorzystany stop Inconel 738LC o obniżonej zawartości węgla. Niestety struktura stopu Inconel 738LC została opisana ogólnie i nie wiadomo co znaczy np. „cienka warstwa fazy  $\gamma$ ’ wzdłuż granic ziaren w stopach kutych lub odlewanych zostaje wytworzona w trakcie obróbki cieplnej lub podczas eksploatacji” lub „fazę  $\gamma$ ’ wzdłużone w ziarnach, które mogą postawać podczas wstępnej obróbki cieplnej lub w trakcie rozszerzonej eksploatacji” (str. 16).

Następnie w sposób logiczny ale ogólny, zostały opisane technologie druku 3D. Pewne wątpliwości budzi rozdział pt: „3.3.6. Metody badania drukowanych części” (str. 33) i jego część dotycząca prac jednostek normalizacyjnych. Nie ma uzasadnienia dla tak szczegółowego opisu stanu postępowania przy tworzeniu norm do badań elementów wydrukowanych 3D.

Swoje rozważania nt. stanu wiedzy w obszarze drukowania 3D elementów dla tłokowych silników Doktoranta kończy posumowaniem, w którym wskazuje na brak pełnych informacji w zakresie drukowania 3D elementów ze stopu Inconel 738LC.

Przeprowadzone rozpoznanie stanu wiedzy jest wykonane poprawnie i wskazuje na duże doświadczenie przemysłowe autorki, co jest szczególnie ważne podczas realizacji prac, których wyniki mają być wdrożone do praktyki przemysłowej.

Badania własne rozpoczyna rozdział, w którym Doktorantka sformułowała cel naukowy oraz zakres rozprawy. Do realizacji celu został zaproponowany w tym rozdziale uproszczony plan badawczy (rys. 26, str. 43). Analiza zaproponowanego zakresu badań wskazuje, na dużą dojrzałość badawczą autorki i znajomość różnorodnych metodyk badawczych oraz wymagań przemysłu. Zakres badań jest logiczny i ukierunkowany na realizację celu. Na podkreślenie zasługuje szeroka gama wykorzystanych technik badawczych, zarówno do charakterystyki materiałów podstawowych, jak i opisu procesów technologicznych drukowania 3D, obróbki cieplnej i wytwarzania powłok CVD oraz oceny ich właściwości eksploatacyjnych, w tym żaroodporności.

Badania technologiczne, badania strukturalne oraz badania właściwości użytkowych zostały wykonane w kilku uznanych ośrodkach badawczych w Polsce, co świadczy o wiedzy Doktorantki o możliwościach badawczych ośrodków naukowych w Polsce.

Próby technologiczne oraz wyniki badań przedstawione w poszczególnych rozdziałach wymagają jednak doprecyzowania. W rozdziale nr 5, w części opisu procesu drukowania nie podano jasno parametrów technologicznych a jedynie przedstawiono szeroki zakres tych parametrów, np. „spiekanie właściwe z różnymi parametrami mocy 20-150W, prędkości 100-1100 mm/s oraz odległości między kolejnymi warstwami 20-60  $\mu\text{m}$ ” (str. 45). Nie jest jasne, co Doktorantka rozumie pod pojęciem „objętościowej gęstości energii”. Podobne uwagi można sformułować do rozdziału 6, opisującego obróbkę po-procesową. Parametry obróbki cieplnej są podane bardzo ogólnie, np. „wygrzewanie 0,5-2h”, „wygrzewanie 1-2h” lub „chłodzenie w atmosferze argonu do 800°C z krokiem 20-70 °C/min” (str. 48).

Na podstawie prób technologicznych wykonanych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej oraz wyników oceny struktury określono podstawowe parametry drukowania 3D. Wyniki te zostały wykorzystane do dalszych prób technologicznych wytwarzania komory wstępnego spalania silnika tłokowego. Po opracowaniu modelu komory, z wykorzystaniem najlepszych parametrów procesu druku wytworzono komorę przedwstępnego spalania dla silnika Jenbacher Serii 6. Wykonano obróbkę cieplną po-procesową oraz określono strukturę przed i po obróbce cieplnej. Badania uzupełniono o badania tekstury. Są to ciekawe wyniki, które jednak zostały opisane zbyt ogólnie, podobnie jak wyniki badań naprężeń resztkowych (rozdział 8.3 i 8.4). W celu poprawienia żaroodporności wydruku 3D wykonano warstwę ochroną z układu Ni-Al metodą CVD. Badania tej warstwy wykonano na elektronowym mikroskopie skaningowym



z wykorzystaniem metody EDS oraz przeprowadzono analizy fazowe XRD (rozdział 8.5). Tak przygotowane elementy zostały wykorzystane do oceny odporności na korozję tzw. metodą niemiecką. W tym miejscu konieczne jest wyjaśnienie dlaczego dla różnych próbek zmiana masy jest dodatnia a dla innych ujemna. Czy na ten wynik ma wpływ np. oderwanie się produktów korozji? Brak jest również opisu kinetyki procesu korozji wysokotemperaturowej. Uzupełnieniem badań strukturalnych i badań właściwości użytkowych były badania mechaniczne i pomiary twardości.

Zrealizowany program badań oraz uzyskane wyniki, które zostały podsumowane w poszczególnych rozdziałach w pełni uzasadniają sformułowane wnioski. Należy jednak uszczegółowić przedstawione wnioski, ponieważ są zbyt ogólne. Szczególnie istotne jest uszczegółowienie wniosków w zakresie opracowanej technologii.

## 5. Uwagi końcowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Brigidy Zimowskiej jest oryginalnym rozwiązaniem problemu technologicznego jakim było opracowanie technologii wytwarzania metodą druku 3D komory wstępnego spalania tłokowego silnika ze stopu Inconel 738LC. Przedstawione w pracy wyniki badań materiałowych, zarówno charakterystyki materiałów podstawowych, jak i wytworzonych wydruków oraz ocena ich właściwości użytkowych wskazują na ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz w obszarze zaawansowanych technologii materiałowych. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością oraz umiejętnością praktycznego zastosowania różnorodnych narzędzi badawczych. Zakres rozprawy został zrealizowany, a cele zarówno o charakterze poznawczym, jak i użytkowym zostały osiągnięte.

Stwierdzam zatem, że praca spełnia wymagania obowiązującego Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Brigidy Zimowskiej do publicznej obrony rozprawy przed Radą Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Wydziału Politechniki Warszawskiej w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

