

Kraków 2017-04-07

dr hab. inż. Tomasz MACHNIEWICZ

Katedra Wytrzymałości, Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji

Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny STREK

pt.: „Ocena właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych materiałów komórkowych”.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki z dnia 07.02.2017 r.

### 1. Tematyka rozprawy

Oceniana praca koncentruje się na metalicznych materiałach komórkowych. Należą one do stosunkowo nowej grupy materiałów i z uwagi na specyficzne cechy fizyczne – jak mała gęstość pozorną, zdolność pochłaniania energii uderzenia, zdolność tłumienia dźwięków, właściwości termoizolacyjne i in. – są przedmiotem zainteresowania przedstawicieli wielu dziedzin przemysłu, m.in. lotniczego, kosmicznego, motoryzacyjnego, medycznego, budowlanego i in. **Uzasadnia to celowość i potwierdza praktyczny aspekt podjętego w pracy tematu.**

**W związku z tematyką i założonymi celami, praca ma także aspekt nowatorski;** dotyczy materiałów o słabo jak dotąd poznanych własnościach, co do których brak jest nawet ugruntowanej terminologii i bezspornie akceptowanych metod badawczych, i których skomplikowana technologia produkcji, chroniona tajemnicą nielicznych producentów, trudna jest do odtworzenia.

Tymczasem, celem pracy jest między innymi wytworzenie, a następnie dopiero zbadanie materiału otwartokomórkowego z metalu o strukturze regularnej wypukło- i wklęsłokomórkowej.

**Wskazuje to na interdyscyplinarny charakter pracy i uznać to należy za dość śmiałe przedsięwzięcie.** Doktorantka nie dysponowała bowiem gotowym materiałem do badań a na początkowym etapie pracy nie można było przyjąć jako pewnik, że opanowanie technologii produkcji komórkowego materiału metalicznego – co dotąd udało się nielicznym producentom na świecie, o odpowiednio dużym zapleczu badawczym i technologicznym – zakończy się powodzeniem.

## **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Praca składa się z 6 rozdziałów rozmieszczonych na 109 stronach formatu A4. Całość uzupełniają zajmujące 36 stron załączniki (A i B) i zamyka spis literatury (10 stron), obejmujący 161 pozycji. Brak jest – co uważam za pewien mankament (por. p. 4 recenzji) – wyraźnej linii podziału na część dotyczącą przeglądu istniejącego stanu wiedzy i część opisującą własny wkład pracy Doktorantki w rozwój wiedzy na podjęty temat. Do tej drugiej grupy można zaliczyć wybrane punkty rozdziału 3 (3.2 – 3.4, 3.6), oraz rozdziały 5 i 6 – łącznie 53 strony, co odpowiada bez mała 50% objętości zasadniczej części pracy. Te zgrubne proporcje struktury pracy można zaakceptować, szczególnie, że ocena objętościowa nie jest tu miarodajna. Duża liczba przywoływanych pozycji literaturowych, już na etapie pobieżnej oceny pracy wskazuje na dobre rozeznanie Doktorantki w tematyce podejmowanej w rozprawie. Baza bibliograficzna jest aktualna; ponad połowa przywoływanych pozycji (85) pochodzi z ostatnich 10 lat.

Praca, poza załącznikami, zawiera łącznie 83 tabel i rysunków; 23 spośród nich dotyczy analizy danych literaturowych, zaś 60 składa się na opis osiągnięć Doktorantki, co uzupełniają dodatkowo 32 tabele i ilustracje ujęte w załącznikach. W takim zestawieniu aspekt wzbogacenia stanu wiedzy przeważa nad analizą stanu aktualnego, co jest relacją właściwą. **Przedstawione ilustracje i tabele cechuje wysoki poziom graficznego dopracowania; są przejrzyste i łatwe w interpretacji.** Zastanawia jedynie nietypowy – bo wspólny – sposób numerowania tabel i rysunków.

We Wprowadzeniu (Rozdział 1) Doktorantka przedstawia motywację podjęcia tematyki pracy (p. 1.2), dalej „Cel i zakres pracy” (p. 1.2) oraz układ treści prezentowanych w poszczególnych rozdziałach (p. 1.3). **Geneza pracy została przedstawiona w sposób dość pobieżny, poparto ją właściwie tylko zainteresowaniami Doktorantki, bez odniesienia do aktualnego stanu wiedzy na podjęty temat. Jako główny cel pracy przyjęto wytworzenie i zbadanie materiału otwartokomórkowego z metalu o strukturze regularnej (wypukłokomórkowej), a także o strukturze analogicznej do struktury polimerów komórkowych o ujemnym współczynniku rozszerzalności poprzecznej (wkłęsłokomórkowej).** Cel ten został rozbity na kilka celów pośrednich i na tej podstawie określono zakres planowanych działań.

Można uznać, że cel i zakres pracy zostały – z drobnymi zastrzeżeniami – właściwie postawione; uzasadnia je aktualny stan wiedzy na rozważany temat, choć nie zostało to na wstępie dowiedzione, a co najwyżej pośrednio potwierdzone w rozważaniach prowadzonych w kolejnych rozdziałach. Pod względem logicznej spójności prowadzonych wywodów, korzystniejszy w moim przekonaniu byłby taki układ pracy, w którym wyznaczony cel i jej zakres przedstawione byłyby jako konsekwencja opisanego wcześniej aktualnego stanu wiedzy na rozważany temat, ze wskazaniem jakie braki w obecnej wiedzy uzupełniać będzie praca. Inicjatywa polegająca na „podjęciu współpracy z ośrodkami zewnętrznymi i skoordynowaniu prac w celu wytworzenia próbek”, choć należy ją docenić (por. p. 3 recenzji), nie może być uznana – wbrew temu jak została przedstawiona – za cel pracy (choćby pośredni), gdyż w istocie stanowi jedynie sposób osiągnięcia celu, tj. wytworzenia próbek.

Z wyłączeniem podsumowania (tj. Rozdziału 6), każdy z kolejnych rozdziałów (a więc 2-5) poprzedza krótka, przedstawiona w punktach, charakterystyka prezentowanych w nim informacji, co pozytywnie wpływa na przejrzystość pracy.

W rozdziale 2 przedstawione zostały systematyka i nazewnictwo materiałów porowatych, ze szczególnym uwzględnieniem tych, które objęte zostały programem badań eksperymentalnych, jak otwartokomórkowe aluminium, otwartokomórkowa miedź, czy też – wykorzystywany pomocniczo - otwartokomórkowy poliuretan. Dodatkowo, jako szczególną klasę przedstawiono materiały auksytyczne. **Doktorantka w sposób bardzo wnikliwy porządkuje kwestie terminologiczne dotyczące rozpatrywanych materiałów. Pewnym mankamentem tych rozważań jest nieuporządkowany układ treści.** Od początku rozdziału (punkt 2.1) pojawiają się pojęcia: materiały otwartokomórkowe, włóknomórkowe, materiały aksytyczne, podczas gdy nazwy te wyjaśnione są dopiero w kolejnym punkcie (2.2.2. Materiały porowate). Podobnie Tabela – Rysunek 2.2 – odwołuje się do pojęć, które na tym etapie nie zostały jeszcze wyjaśnione; jak indeks PPI (omówiony dopiero w p. 4.3.2.2.2), gęstość pozorna (p. 4.3.2.2.1), współczynnik kompresji objętościowej (p. A.2.3.1.2.). Niektóre fragmenty prezentowanych w rozdziale 2 rozważań potraktowane zostały w sposób nazbyt szczegółowy, jak chociażby: wyjaśnienia pojęcia „struktury sieciowe” (str. 17 – 18), a przy tym niuansów lingwistycznych i etymologicznych dotyczących angielskiego odpowiednika tego terminu (*lattices*), czy też refleksje nad językiem naukowym (p. 2.2.6) – trafne, lecz mało wnoszące do tematu pracy. Mimo tych uwag, **należy podkreślić, że Doktorantka wykazała się ekspercką wiedzą na temat systematyki i nazewnictwa materiałów porowatych, a przedstawione opracowanie jest rzetelną wykładnią na ten temat.**

Rozdział 3 opisuje technologie wytwarzania metalicznych materiałów porowatych, począwszy od metod stosowanych w przemyśle i opisanych na podstawie literatury, a skończywszy na opisie prowadzonych przy współpracy z kilkoma ośrodkami naukowymi, własnych prób wytworzenia

otwartokomórkowego materiałów metalicznego z miedzi, a następnie z aluminium. **Ta część rozprawy (p. 3.3 i 3.4) ma formę naukowego dziennika – chronologicznego opisu działań.** Szczegółowo przedstawiona została analiza przyczyn wyboru takich a nie innych materiałów, ze wszystkimi tego wadami i zaletami, a następnie kolejne próby wykonania materiału, także te zakończone fiaskiem (po 3 dla każdego materiału). **Jakkolwiek rozumiem chęć wykazania, że droga do opracowania skutecznej technologii produkcji materiału metalicznego była długa i okupiona wieloma porażkami, to jednak uważam, że takiej formy dokumentowania tych porażek należy w pracy doktorskiej unikać.** Mimo znów bardzo szczegółowego opisu kolejnych etapów postępowania zabrakło istotnej informacji nt. składu zawiesiny użytej do pogrubiania pręcików proformy. Rozumiem jednak, że ma to związek z procedurą uzyskania patentu, co wyjaśniono we wnioskach. Mimo powyższych zastrzeżeń, rozdział 3 (w punktach 3.3. i 3.4), dokumentuje w sposób skuteczny zrealizowanie trzech z założonych w pracy celów pośrednich, tj.: (i) przyjęcie założeń metody wytworzenia docelowych materiałów (p. 3.1), (ii) dokonanie wyboru parametrów struktury oraz metalu szkieletu materiału komórkowego (p. 3.2), (iii) wytworzenie próbek we współpracy z ośrodkami zewnętrznymi (p. 3.3 i 3.4). W kolejnym punkcie (3.5) Doktorantka opisuje sposób wytwarzania auksetycznych materiałów porowatych o strukturze włóknokomórkowej i na tej podstawie proponuje (p. 3.6.1), a następnie stosuje (p. 3.6.2 oraz załącznik A) własną prototypową metodę wykonania auksetyków o szkielecie metalicznym, polegającą na ich odlaniu (w tym przypadku z aluminium), z użyciem preformy polimerowej, której cechą włóknokomórkowości uzyskano dzięki specjalnie opracowanej obróbce termicznej, opisanej szczegółowo w załączniku A.

Rozdział 4 poświęcony jest metodologii prowadzenia badań – głównie wytrzymałościowych – materiałów komórkowych. Po krótkim omówieniu podstaw podejścia eksperymentalnego (punkt 4.1), w punkcie 4.2 zostały wymienione, bądź co najwyżej bardzo krótko scharakteryzowane, kolejno: normy (p. 4.2.1), książki (p. 4.2.2), artykuły (p. 4.2.3), dysertacje (p. 4.2.4) i e-źródła (p. 4.2.5) traktujące o technikach eksperymentalnych stosowanych w badaniach komórkowych materiałów metalicznych, w sposób literalny, pozycja – po – pozycji, bez przegrupowania treści według zagadnień. Niekiedy przedstawiony w ten sposób wykaz źródeł literaturowych niemal nie różni się od spisu bibliograficznego (jednostronicowy punkt 4.2.1 mógłby zostać zastąpiony powołaniem [58-73]). Znów odnaleźć można fragmenty gdzie podejmowane kwestie rozważano są zbyt szczegółowo, jak na potrzeby pracy (np. p. 4.3.2.2.2 – Indeks PPI). Wątpliwość może także budzić celowość schematycznego podawania streszczeń kolejnych źródeł bibliograficznych (p. 4.2.2 – 4.2.4). **Za właściwą i wyczerpującą formę przeglądu tej literatury uznać można następny punkt (p. 4.3), w którym na jej podstawie dokonano syntetycznego opisu metodyki wybranych badań eksperymentalnych, z uzupełnieniem o własne oryginalne propozycje i komentarze. W punktach**

**4.3.3 i 4.3.4 została przedstawiona analiza wszystkich aspektów statycznych badań metalicznych gąbek przy jednoosiowych testach rozciągania i ściskania (p. 4.3.3) oraz przy wyznaczaniu ich współczynnika rozszerzalności poprzecznej (p. 4.3.4). Można to uznać za element realizacji kolejnego pośredniego celu pracy (p. 1.2), tj. zaprojektowania procedur badawczych dla wytworzonych materiałów.**

Zastosowanie tych procedur oraz uzyskane dzięki nim wyniki przedstawiono w rozdziale 5, dokumentującym ostatni z założonych celów pośrednich pracy, tj. przeprowadzenie doświadczeń służących ocenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych otrzymanych materiałów wraz z analizą uzyskanych wyników. Doświadczenia te przeprowadzone zostały dla kilku grup materiałów:

- dostępnego komercyjnie otwartokomórkowego materiału z miedzi,
- wytworzonego w ramach pracy otwartokomórkowego materiału z miedzi,
- wytworzonego otwarto – wypukłokomórkowego materiału z aluminium,
- wytworzonego otwarto – wkłęsłokomórkowego materiału z aluminium.

Doświadczenia obejmowały oznaczenie cech strukturalnych oraz osiowe ściskanie i rozciąganie próbek materiałowych. Według przyjętych definicji oznaczone zostały wytrzymałość na rozciąganie oraz wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski dotyczące własności porowatych materiałów metalicznych przy obciążeniu quasi-statycznym, proponując przy tym różne miary do oceny cech sprężystych tych materiałów, jak: chwilowy sieczny gradient pętli, średni chwilowy sieczny gradient pętli, średni liniowy gradient pętli. Uzyskane wyniki pozwoliły na jakościowe określenie niektórych związków między parametrami strukturalnymi wypukło- i wkłęsłokomórkowego aluminium (jak np. gęstość pozorną, współczynnik VCR), a jego własnościami mechanicznymi. Przedstawione w rozdziale 5 wyniki badań eksperymentalnych uzupełnione są o bardzo szczegółowe dane pomiarowe przedstawione w formie 23 tabel w załączniku B. Dowodzą one, że Doktorantka posiada nawyk rzetelnego prowadzenia badań i skrupulatnego dokumentowania wyników. Trudno jednak oprzeć się wrażeniu, że niekiedy ta skrupulatność i szczegółowość praktykowana jest na wyrost, bez efektywnego przełożenia na wzrost praktycznych wartości uzyskanych wyników, wobec niejednokrotnie dużego, z samej natury rzeczy, rozrzutu mierzonych wielkości i niepowtarzalności obserwowanych zjawisk. Przesadnie szczegółowo potraktowany został także ujęty w punkcie 5.1.2 opis aparatury badawczej.

Całość pracy podsumowana jest w rozdziale 6, opisującym osiągnięte w pracy cele (p. 6.1), ogólne wnioski (p. 6.2.1), oryginalne osiągnięcia (p. 6.2.2) i perspektywy dalszych badań (p. 6.2.3).

Ogólnie praca napisana jest bardzo starannym, wysmakowanym językiem. Nieliczne uchybienia stylistyczne czy interpunkcyjne jakich można by się doszukać mają co najwyżej dyskusyjny charakter.

### **3. Najważniejsze osiągnięcia Doktorantki**

Do najważniejszych związanych z pracą osiągnięć Doktorantki zaliczyć można:

- a) Szczegółowe opracowanie na temat systematyki i nazewnictwa materiałów porowatych, porządkujące licznie, pojawiające się dotąd w naukowych publikacjach, nieścisłości terminologiczne.
- b) Opracowanie – we współpracy z kilkoma ośrodkami naukowymi – technologii wytwarzania metalicznych materiałów porowatych z miedzi i z aluminium, co obecnie jest przedmiotem zabiegów zmierzających do uzyskania ochrony patentowej. Warto podkreślić, że w celu opracowania tej technologii Doktorantka zorganizowała, a następnie koordynowała współpracę kilku ośrodków naukowych – m.in. Instytutu Odlewnictwa w Krakowie i Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddziału Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach – co, chociaż nie jest w pracy doktorskiej osiągnięciem naukowym sensu stricto, to jednak stanowi niewątpliwie istotny, niewymierny wkład w dziedzinie rozwoju produkcji materiałów komórkowych w Polsce.
- c) Zaproponowanie własnej, oryginalnej metody wytwarzania materiałów włóknomórkowych o szkielecie metalicznym, dzięki twórczemu wykorzystaniu właściwości otwartokomórkowych polimerów w połączeniu z opracowaną technologią odlewania metalicznych materiałów porowatych.
- d) Opracowanie metodyki quasi – statycznych badań mechanicznych materiałów porowatych, w licznych szczegółach nowatorskiej, z uwagi na brak dla rozważanych materiałów ugruntowanych metod badawczych.
- e) Zrealizowanie dość obszernego programu badań eksperymentalnych, obejmującego statyczne próby rozciągania i ściskania kilku grup metalicznych materiałów komórkowych; zaproponowano przy tym nowe miary do oceny cech sprężystych tych materiałów; wskazano na niektóre jakościowe związki pomiędzy parametrami strukturalnymi i własnościami mechanicznymi badanych materiałów.

### **4. Uwagi krytyczne**

Analiza tekstu rozprawy nasuwa pewne uwagi, zarówno o ogólnym jak i szczegółowym charakterze, zapewne w części dyskusyjne. Część z nich została już przedstawiona we wcześniejszych fragmentach recenzji. Ogólne ich podsumowanie można ująć w podanych niżej punktach.


- a) Zastrzeżenia, bądź przynajmniej wątpliwości, budzić mogą pewne szczegóły dotyczące formy i układu treści pracy, przykładowo:
- rozmyty podział na „część teoretyczną” i część prezentującą dokonania Doktorantki,
  - wspólna numeracja tabel i rysunków,
  - sformułowanie celu i zakresu pracy, bez nawiązania do aktualnego stanu wiedzy,
  - niekonsekwentne opisy rysunków, tj. częsty brak nadrzędnego tytułu rysunku obejmującego kilka rysunków składowych (np. rys. 2.3 - str. 15, rys. 3.6 - str. 31, rys. 3.12 - str. 35 i inne)
  - używanie pojęć nim zostały one zdefiniowane, np. indeks PPI (używany w p. 2.1 – wyjaśniony w p. 4.3.2.2.2), współczynnik kompresji objętościowej VCR (używany w p. 2.1 – wyjaśniony w p. A.2.3.1.2), gęstość pozorną (używana w p. 2.1 – wyjaśniona w p. 4.3.2.2.1), wartość Visiocell (używana w p. A.2.1 – wyjaśniona w p. A.2.1.2), i in.
  - fragmenty mające formę naukowego dziennika (p. 3.3 i 3.4) lub naukowych notatek (4.2),
  - zbyt częste podawanie w tekście rozprawy tytułów cytowanych prac, gdy ujęte są one w spisie bibliograficznym.
- b) Jak to wynika z licznych wcześniejszych fragmentów recenzji, Doktorantka częstokroć wykazuje tendencję do nieuzasadnionego brnięcia w szczegóły.
- c) Wielopoziomowa numeracja podpunktów kontynuowana aż do 5 poziomu – formalnie nie jest to błąd, ale cecha utrudniająca percepcję pracy, szczególnie gdy enigmatyczny niekiedy tytuł zrozumiany być może jedynie w kontekście czterech poziomów tytułów nadrzędnych (np. 4.3.2.1.3. Porowatość, albo 4.3.3.1.1. Próbkę).
- d) Doktorantka przyjęła zasadę, aby wprowadzając jakiś termin, podawać także jego nazwę angielską. Ma to uzasadnienie, gdy chodzi o termin ściśle związany z tematyką pracy, szczególnie gdy polskojęzyczna nazwa nie jest ugruntowana. W przypadku pojęć, które w pracy pojawiają się okazjonalnie (jak np. „katalizatory w silnikach Diesla”, „zastosowania wojskowe i obronne”, „zderzaki samochodowe”, „dziób rakiety kosmicznej Ariane” – str. 13) nie ma potrzeby stosowania tej zasady.
- e) Wśród zalet zaproponowanej metody wytwarzania metalicznego auksetyku (p. 3.6.1 – str. 43) Doktorantka wymienia odtworzenie stochastycznego rozkładu komórek polimerowych, w odróżnieniu od powtarzalnych geometrii struktur LBM. Czy w tym zestawieniu nie należy raczej uznać za zaletę powtarzalność struktury LBM, a co za tym idzie, powtarzalność jej własności mechanicznych?
- f) W badaniach eksperymentalnych zabrakło ostatecznej weryfikacji, czy wytworzony dzięki jej pomysłowi materiał włóknomórkowy o szkielecie aluminiowym jest auksetykiem.

Ponadto w pracy odnaleźć można także drobne potknięcia edycyjne o mniejszym znaczeniu, które nie będą tu szczegółowo przytaczane.

## 5. Wniosek końcowy

Z przedstawionej recenzji rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty został w niej nowatorski temat, o dużym znaczeniu praktycznym. Postawione na wstępie cele pracy zostały zrealizowane. Rozprawa prezentuje oryginalne osiągnięcie Doktorantki, które obejmowało: (i) opracowanie we współpracy z kilkoma ośrodkami naukowymi technologii wytworzenia komórkowych materiałów o szkielecie miedzianym i aluminiowych, (ii) zaproponowanie własnej oryginalnej metody wytwarzania materiału włóknotkomórkowego o szkielecie metalicznym, (iii) ocenę własności wytrzymałościowych i funkcjonalnych materiałów komórkowych wykonanych według opracowanych metod.

**Przedstawiona wyżej ocena, pomimo pewnych uwag krytycznych, pozwala stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Anny Stręk spełnia wymogi określone ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i w związku z tym wnioskuję o jej dopuszczenia do publicznej obrony w dyscyplinie mechanika.**



dr hab. inż. Tomasz Machniewicz