

RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Bogdana
pt. „Degradacja właściwości cieplnych, mechanicznych i elektrycznych izolacji kabli i
cewek nadprzewodnikowych magnesów stosowanych w akceleratorach”**

1. Informacje ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem promotora prof. hab. inż. Macieja Chorowskiego. Pracę opublikowano jako raport serii PREPRINT nr 4/2016 na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

Recenzję opracowano w oparciu o decyzję Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego PWr z dnia 28.09.2016 r.

Praca doktorska została przedstawiona na 116 stronach i zawiera dziewięć rozdziałów, które poprzedza spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie. Dysertacja zawiera 139 pozycji rysunków i 24 pozycje tabel oraz wykaz literatury (90 pozycji).

2. Omówienie treści pracy

Pracę rozpoczyna spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń. Zawarto także jednostronicowe streszczenie, które w zwięzłej formie przedstawia motywację do pracy, przebadane materiały oraz konkluzje wynikające z badań realizowanych w ramach dysertacji.

W rozdziale pierwszym (6 stron), zatytułowanym *Wprowadzenie i Motywacja*, w podrozdziale 1.1 *Budowa akceleratorów kołowych na przykładzie LHC* Autor wyjaśnia zasadę działania Wielkiego Zderzacza Hadronów zainstalowanego w Genewie, Szwajcaria. Następnie w podrozdziale 1.2 *Magnesy kwadropolowe w LHC* opisuje parametry magnesu kwadropolowego (MQ), będącego podstawowym magnesem zainstalowanym w tunelu LHC. Wspomina także, że w najbliższym czasie planowane

jest zwiększenie ogniskowej wiązki poprzez powiększenie przede wszystkim wartości indukcji magnetycznej do 13.3 T. Wymaga to zmiany zastosowanego nadprzewodnika używanego w kablach nadprzewodzących z nadprzewodnika typu NbTi na Nb₃Sn.

W podrozdziale 1.3 pt. *Magnesy z nadprzewodnikiem Nb₃Sn* Doktorant omawia technologię produkowanych nadprzewodników i związane z tym problemy. Opisuje, w jaki sposób w magnesach uzyskiwana jest temperatura pracy wynosząca 1.9 K. W podrozdziale 1.4 *Promieniowanie jonizujące w LHC* definiuje wartości napromieniowania izolacji zastosowanych w kablu na 50 MGy w ciągu 10 lat.

W rozdziale drugim (1 strona) Doktorant formułuje cele, tezy oraz zakres dysertacji. Píše, że celem rozprawy jest „*analiza mechanizmów degradacji radiacyjnej materiałów GFRP stosowanych w akceleratorach*”. Definiuje także cel użytkowy: „*określenie przydatności wybranych materiałów GFRP do zastosowań w izolacji elektrycznej magnesów wysokopolowych wykonanych metodą „wind and react”*.” Teza, jaką postawił Autor, została sformułowana następująco: Wśród obecnie dostępnych żywic o niskiej lepkości istnieją takie, które wzmocnione włóknem szklanym mogą zostać zastosowane jako izolacja elektryczna nadprzewodników magnesów akceleratorowych produkowanych metodą „wind and react”. Po pochłonięciu dawki 50 MGy, wybrane materiały GFRP będą spełniać określone minimalne wartości wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej i przewodnictwa cieplnego w zakresie temperatur 1.5 – 2 K. Zakres pracy doktorskiej został opisany w dziewięciu punktach, które pokrywają się z rozdziałami zawartymi w dysertacji.

W rozdziale trzecim (5 stron), pt. *Charakterystyka badanych materiałów*, Autor omawia w podrozdziale 3.1 strukturę *materiału wstęgu*, czyli matrycy izolacji, którym jest splot włókien szklanych (SiO₂). Następnie w podrozdziale 3.2 pt. *Materiał osnowy* opisuje kilka wybranych żywic, „cechujących się wysokimi parametrami i odpornością radiacyjną w połączeniu z włóknem typu S”. Są to następujące materiały: RAL Mix 71, RAL Mix 237, LONZA CE, LARP. Wszystkie wspomniane materiały w późniejszym czasie zostaną poddane badaniom radiacyjnym, mechanicznym oraz cieplnym.

Rozdział czwarty (30 stron) został zatytułowany *Wybrane zagadnienia związane z napromieniowaniem związków organicznych*. W pierwszej jego części pt. *Analiza spektrum promieniowania w kwadrupolach LHC* przeanalizowano spektrum intensywności promieniowania w kwadrupolach. Stwierdzono, że największa dawka pochłoniętego promieniowania na przestrzeni dziesięciu lat wynosi 50 MGy i wystąpi w tryplecie oznaczonym Q2a w odległości około 3250 cm od punktu kolizji wiązki.

Właśnie z tego powodu wartość wspomnianej wyżej dawki została użyta do dalszych analiz. W podrozdziale 4.2 Autor przedstawia *Mechanizm zmian radiacyjnych w związkach organicznych*. Wyróżnia trzy główne kategorie promieniowania, tzn. cząstki o neutralnym ładunku, naładowane cząstki i promieniowanie elektromagnetyczne o niewielkiej długości fali, które wywołują zmiany w materiałach izolacyjnych kabli nadprzewodzących. Opisuje poszczególne zjawiska jak: jonizacja, wzbudzenie, dysocjacja, sieciowanie, desaturacja, degradacja, odgazowanie, reakcja z otoczeniem – utlenienie, efekty popromienne i wpływ temperatury na własności materiałów.

W podrozdziale 4.3 pt. *Fizyczny przykład degradacji radiacyjnej wytrzymałości* Doktorant opisuje przykład zmian radiacyjnych materiału zastosowanego w nieistniejącym już akceleratorze LEP. W akceleratorze tym użyto podobnych do analizowanych w dysertacji materiałów izolacyjnych, charakter promieniowania był porównywalny do spodziewanych w kwadrupolowych magnesach LHC. Zauważono, że przy dawce pochłaniania 30 MGy następuje spadek wytrzymałości i wydłużenia, przy zniszczeniu żywicy do 30% wartości początkowej. Stwierdzono także, że cząstki naładowane mają większy wpływ na własności cieplno-mechaniczne niż cząstki nienaładowane.

Podrozdział 4.4 pt. *Zmiany radiacyjne w włóknie szklanym* analizuje zmiany radiacyjne zachodzące pod wpływem promieniowania α i β na włókna szklane typu E i S. Z przeglądu literaturowego wynika, że w przypadku promieniowania rzędu 100 MGy właściwości mechaniczne włókna pogorszyły się od 5% do 10%. Z tego powodu w dalszej części pracy nie analizowano mechanizmu degradacji radiacyjnej włókien szklanych.

Analiza zastosowanego źródła promieniowania jest tematem podrozdziału 4.5. Autor opisuje w tej części użyty do badań akcelerator liniowy, przyspieszający cząstki do 15 kGy/min przy energii elektronów na poziomie 6 MeV i częstotliwości 300 Hz. Źródło poddano empirycznej analizie intensywności promieniowania w odległości 20 mm od wyjścia ze struktury akceleratora. Został przedstawiony rozkład normalny, z wyróżnionymi strefami 6 mm i 18 mm, które odpowiadały odpowiednio 90 – 100% i 65 – 100 % intensywności maksymalnej. W końcowej części podrozdziału, zostały zdefiniowane wymagania projektowe stawiane stanowisku do badań napromieniowania:

- a. Warunki radiacyjne podczas napromieniowania – na podstawie szeregu testów.

Doktorant stwierdził, że intensywność promieniowania nie może przekroczyć 13 kGy/min, ze względu na problem odprowadzania ciepła z próbek. Dla

większych wartości napromieniowania zauważono zniszczenie próbek. Autor zdecydował, że w dalszej części badań zastosuje intensywność promieniowania do wartości 10 kGy/min, co odpowiada mocy cieplnej rzędu 4.2 mW przy 77 K dla średnicy 6 mm. Zaproponowano, aby czas napromieniowania jednego pakietu wynosił 3 dni, 11 godzin i 20 minut. Kolejne partie promieniowania były emitowane w cyklach od 6 do 12 godzin, z krótkimi przerwami na studzenie akceleratora.

- b. Warunki chemiczne i termiczne podczas napromieniowania – Doktorant definiuje warunki, w jakich powinno się umieszczać próbki. Ze względu na warunki termiczne, konieczność braku tlenu w czasie badań, ograniczenie gazowania, prostą obsługę i skuteczne odbieranie ciepła podczas napromieniowania zdecydowano się zastosować kąpiel w ciekłym azocie podczas całego cyklu napromieniowania, transportu i przechowywania próbek.

Kriostat do napromieniowania próbek w ciekłym azocie został przedstawiony w podrozdziale 4.6. Omówionym w tym podrozdziale stanowisko badawcze składające się z kriostatu do napromieniowania, linii transferowej, zbiornika z ciekłym azotem, działa elektronowego oraz systemu kontroli poziomu ciekłego azotu.

Autor zauważył i przebadał proces radiacyjnego puchnięcia polimerów. Stwierdził, że największe zwiększenie grubości próbek wynikłe z napromieniowania odnotowano dla materiału Mix 71 i wynosiło ono 32.9 %, natomiast najmniejsze dla Lonza CE 2.8%.

Obszernie została zreferowana w podrozdziale 4.8 *ocena mikrostruktury kompozytów*, wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu Phenom G2. Doktorant zaprezentował zdjęcia próbek referencyjnych przed i po napromieniowaniu w powiększeniu od 340 do 100 razy dla badanych materiałów, tzn. Mix 71, LARP, LONZA CE oraz Mix 237. Duże zniszczenia zaobserwowano dla materiału Mix 71 oraz Mix 237, natomiast nie odnotowano znaczących zmian w materiałach LARP i LONZA CE.

W rozdziale piątym (17 stron) pt. *Degradacja własności mechanicznych* Autor dysertacji opisuje badania poświęcone analizie wpływu radiacji na właściwości mechaniczne próbki. Stwierdza, że oddziaływania mechaniczne w izolacji elektrycznej magnesów można podzielić na dwie grupy: pierwszą, wynikającą ze skurczenia materiałów podczas schładzania do temperatury pracy, oraz drugą, będącą konsekwencją wzrostu pola magnetycznego generowanego przez cewki i powstaniem ściskających sił Lorentza. Wartości sił ściskających wynoszą maksymalnie 150 MPa i 40 MPa na zrywanie.

W dalszej części dysertacji w podrozdziale 5.1 Autor dokonał przeglądu norm stosowanych przy ocenie wytrzymałości. Z trzech norm – EN ISO 14130, ISO EN 15024 oraz ISO 37:2005 wybrano tę ostatnią do prób zrywania. Jak wskazuje Doktorant, *pozwała ona na wykorzystanie próbek, które są łatwe do napromieniowania elektronami w krótkim czasie, jednocześnie umożliwiając uzyskanie rzetelnej oceny degradacji radiacyjnej.*

W podrozdziale 5.2 pt. *Przygotowanie próbek do badań mechanicznych* mgr inż. Piotr Bogdan opisuje procedury dotyczące przygotowania próbek, transportu, układ ułożenia włókien tkaniny oraz wymiary samej próbki. Kształt każdej próbki wycinano za pomocą techniki *waterjet*.

Przygotowaną napromieniowaną i nienapromieniowaną próbkę badano na *Kriogenicznym stanowisku do badań wytrzymałości na zrywanie* opisanym w podrozdziale 5.3. Głównymi elementami składowymi stanowiska była: maszyna zrywająca wraz z dolną i górną szczęką maszyny zrywającej, czujnik naprężenia, zbiornik na ciekły azot oraz system akwizycji danych.

Wyniki pomiaru degradacji własności mechanicznych, zostały przedstawione w podrozdziale 5.4. W sumie, jak pokazano w tabeli 5.4.1, badaniom poddano 18 próbek nienapromieniowanych (5 dla LARP, 5 dla Mix 71, 4 dla Mix 237 oraz 4 dla LONZA CE) oraz 19 próbek napromieniowanych (5 dla LARP, 5 dla Mix 71, 5 dla Mix 237 oraz 4 dla LONZA CE). Wyniki badań zostały zaprezentowane w formie wykresów zależności naprężenia, MPa, od odkształcenia, mm oraz w postaci zdjęć zerwanych próbek. Wykresy oraz zdjęcia (od 5.4.2 do 5.4.17) zostały przedstawione osobno dla próbek nienapromieniowanych oraz napromieniowanych.

Opisane badania zreasumowano w podrozdziale 5.5 pt. *Podsumowanie oceny degradacji wytrzymałości mechanicznej*. Autor stwierdził, że *wszystkie zbadane laminaty wykazały pogorszenie wytrzymałości mechanicznej po napromieniowaniu dawką 50 MGy, przy czym stopień degradacji znacznie się różnił.* Jak pokazały badania, materiały Mix 71 oraz Mix 237 nie spełniały warunku na rozciąganie o wartości 40 MPa. Jedynie materiały izolacyjne LARP i LONZA CE spełniały po napromieniowaniu warunki wytrzymałościowe.

Kolejny etap badań związany z *degradacją własności elektrycznych* został opisany w rozdziale szóstym (21 stron). W podrozdziale 6.1 Autor przedstawił zastosowane procedury pomiarów przeznaczone do oceny wytrzymałości dielektrycznej. Badania były prowadzone zgodnie z normą EN (IEC) 60243-1 dla następujących parametrów:

- badania przeprowadzono w ciekłym azocie (77 K);
- badania przeprowadzono z zastosowaniem napięcia DC;
- zastosowano procedurę *Short Time Test* opisaną w normie, polegającą na liniowym przyroście napięcia zaczynając od zera;
- prędkość przyrostu napięcia wnosila 5 kV/min od 0 do 25 kV i 1 kV/min od 25 do 60 kV;
- wykorzystano elektrody miedziane o średnicy 5 mm z płaskim czołem, dociskające próbkę masą 50 g;
- wykorzystano próbki o grubości około 0.5 mm i wymiarach 100 mm x 100 mm.

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano specjalne kriogeniczne stanowisko do badań opisane w podrozdziale 6.2 pt. *Kriogeniczne stanowisko do badań wytrzymałości dielektrycznej*. Stanowisko składało się z kriostatu, w którym utrzymywany był ciekły azot, z wkładu kriostatu zbudowanego z pokrywy kriostatu, docisku elektrody, górnego oraz dolnego talerza, elektrody dolnej i górnej, zasilacza SL600 Spellman DC oraz z systemu akwizycji danych.

Ocenę powtarzalności pomiarów i certyfikację stanowiska omówiono w podrozdziale 6.3. Autor przeprowadził badania na referencyjnych materiałach, jak poliamid (Kapton) o grubości 50 μm i 150 μm . Stwierdził, że wartość średnia dla Kaptonu o grubości 50 μm ze wszystkich pomiarów jest tylko o 3% niższa od podanej w literaturze. Natomiast dla Kaptonu o grubości 125 μm wartość średnia z przeprowadzonych pomiarów jest niższa od literaturowej o 17.5 %. Różnice te Doktorant wyjaśnił zawartością wilgoci w materiale.

Drugim materiałem referencyjnym był laminat szklano-epoksydowy G10 o grubości odpowiednio 190 μm i 550 μm . Dla mniejszej wartości grubości wartość średnia z przeprowadzonych pomiarów była wyższa od podanej przez literaturę o około 30%, natomiast dla większej wartości grubości wartość średnia była niższa o 3% w porównaniu z danymi literaturowymi. Doktorant stwierdził, że *na potrzeby określania stopnia degradacji radiacyjnej laminatów o grubości zbliżonej do 0.5 mm, dokładność i powtarzalność pomiarów przeprowadzonych na zaprojektowanym stanowisku jest bardzo dobra*.

W podrozdziale 6.4 pt. *Przygotowanie próbek do badań elektrycznych* Autor skrótowo opisał procedury związane z przygotowaniem próbek do badań elektrycznych.

Wyniki badań pomiaru degradacji własności elektrycznych przedstawiono w podrozdziale 6.5. Badania wytrzymałości dielektrycznej przeprowadzono dla czterech badanych materiałów przed i po napromieniowaniu. Wyniki zestawiono w tabelach 6.5.1 – 6.5.8 oraz na wykresach 6.5.1 – 6.5.11. W podrozdziale 6.5 pt. *Podsumowanie oceny degradacji wytrzymałości dielektrycznej*, Doktorant stwierdził, że wszystkie próbki wykazujące się ponadprzeciętnym puchnięciem charakteryzowały się wytrzymałością dielektryczną znacznie poniżej średniej. Z rys. 6.6.1 wynika, że wszystkie materiały spełniają kryterium dopuszczające do użycia w magnesach nadprzewodzących wynoszące 5 kV/min.

Rozdział siódmy (16 stron) pt. *Wpływ promieniowania na własności cieplne* dotyczy badań doświadczalnych własności cieplnych, jak opory Kapicy oraz przewodności cieplnej w temperaturach 1.5 do 2.0 K w helu nadciekłym.

W pierwszym podrozdziale pt. *Opór Kapicy* Autor opisał zjawisko oporu Kapicy, bazując na teorii niedopasowania akustycznego. Następnie w podrozdziale 7.2 omówił *przepływ ciepła przez materiały porowate*.

W podrozdziale 7.3 pt. *Kriostat do badań cieplnych* opisano zaprojektowany i zbudowany kriostat Claude'a. Do badań oporów Kapicy oraz współczynnika przewodzenia ciepła posłużono się tzw. metodą membranową w helu nadciekłym. Metoda ta została przedstawiona w podrozdziale 7.4 pt. *Metoda pomiaru przewodności cieplnej i oporów Kapicy*. Aby wyznaczyć wspomniane właściwości cieplne próbki, Doktorant przeprowadził badania na materiałach o grubości 0.1, 0.2, 0.3 i 0.4 mm dla każdego materiału. Przeprowadził *analizę niepewności pomiarowych stanowiska do badań cieplnych* w podrozdziale 7.5, stwierdzając, że pomiar wartości prądu, jak i spadek napięcia na rezystorze grzewczym nie przekracza 1% wartości mierzonej. Natomiast określił, że najwyższa strata ciepła wynosząca 4.5% występuje dla temperatury 1.8 K helu i dla najgrubszej próbki. Podrozdział 7.6 analizuje wyniki pomiarów cieplnych nienapromieniowanych próbek dla czterech badanych materiałów. Podsumowanie pomiarów własności cieplnych zostało zawarte w podrozdziale 7.7. Autor zauważył, że *przewodność cieplna materiału Mix 237 jest najwyższa i zarazem około 1.6 razy wyższa od wartości najniższej, reprezentowanej przez LARP*.

Ósmy rozdział (6 stron) pracy stanowią *Podsumowanie i wnioski*.

W rozdziale dziewiątym podano wykaz literatury, głównie w języku angielskim. Większość to publikacje wydane zaledwie kilka lat temu.

3. Ocena pracy

3.1. Wybór tematu rozprawy

Budowa w instalacji LHC nowych magnesów nadprzewodzących zwiększających wartość świetlności wiązki poprzez zwiększenie indukcji, wymaga przy obecnej technologii zmiany zastosowanego nadprzewodnika w cewce magnesu z NbTi na Nb₃Sn. Materiał Nb₃Sn wymaga użycia nowego typu izolacji elektrycznej wykonanej z włókna szklanego impregnowanego żywicą. Proces produkcji izolacji będzie przebiegał metodą „wind and react” w temperaturze przereagowania procesu na poziomie 650°C tzn. w zależności od użytego materiału żywicy. Analiza wyboru materiału, z którego zostanie wykonana izolacja, jest kluczowym elementem w projektowaniu i w późniejszym czasie w długotrwałej eksploatacji magnesu. Materiał izolacyjny, który będzie zastosowany w nowych typach nadprzewodników musi charakteryzować się następującymi własnościami:

1. Posiadać w miarę stabilne własności mechaniczne, elektryczne oraz cieplne w warunkach charakteryzujących się silnym promieniowaniem jonizującym (dawka około 50 MGy w ciągu 10 lat pracy).
2. Być odporny na oddziaływania mechaniczne (ściskanie do 150 MPa, rozciąganie do 40 MP) będące konsekwencją działania sił Lorentza w magnecie podczas długotrwałej pracy.
3. Być stabilnym izolatorem elektrycznym w czasie całego okresu pracy, tzn. spełniać kryterium wynoszące 5 kV/mm.
4. Posiadać stosunkowo niewielkie opory cieplne zapewniające stabilną pracę urządzenia.

Wszystkie wymienione własności są tematem analizowanej dysertacji. O międzynarodowym znaczeniu przeprowadzonych badań świadczy fakt, że rozprawa doktorska została wykonana w ramach międzynarodowego programu EuCARD (European Coordination for Accelerator Research & Development), w ramach Siódmego Programu Ramowego, w którym uczestniczyły wiodące europejskie ośrodki naukowe, takie jak CERN, Genewa, Szwajcaria czy CEA, Saclay, Francja.

Procesy zachodzące w materiałach napromieniowanych są ciągle mało poznane, dlatego wybór tematu pracy doktorskiej uważam za trafny i ważny z naukowego oraz aplikacyjnego punktu widzenia. Temat stworzył również możliwość wykazania się umiejętnościami technicznymi i badawczymi.

3.2. Metodologia prowadzonych badań

Warsztat badawczy Doktoranta składał się głównie z badań doświadczalnych. Należy podkreślić, że w trakcie realizacji pracy Autor zaprojektował, wykonał oraz przeprowadził badania na trzech bardzo specyficznych i kosztownych stanowiskach badawczych.

Obszar badań, jako bardzo szeroki wymagał poznania i wnikliwych analiz zachodzących procesów. Sam proces napromieniowania próbek w warunkach kriogenicznych jest bardzo nowatorski. Zbudowanie i przetestowanie stanowisk w warunkach kriogenicznych, opracowanie procedur przechowywania, a następnie badań degradacji własności cieplnych, mechanicznych i elektrycznych uważam za interesujące.

Podsumowując należy zauważyć, że wkład Doktoranta w rozwój metodologii badań w wybranym obszarze jest wielokierunkowy i znaczny.

3.3. Ocena wyników badań

Praca wyróżnia się kompleksowym podejściem do problemu. Za najważniejsze jej osiągnięcia uważam:

- Opracowanie kriostatu do napromieniowania w ciekłym azocie oraz opracowanie metody napromieniowania materiałów;
- Adaptację istniejącego stanowiska pomiarowego (maszyny zrywającej) do badań mechanicznych w ciekłym azocie;
- Opracowanie procedur do badań zrywania materiałów w temperaturze ciekłego azotu zgodnie z normą ISO 37:2005;
- Opracowanie kriogenicznego stanowiska do badań wytrzymałości dielektrycznej i przeprowadzenie badań zgodnie z normą EN (IEC) 60243-1;
- Analizę mikrostruktury zmian wywołanych promieniowaniem za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego;
- Przeprowadzenie badań i analizę wyników własności cieplnych izolacji: współczynnika przewodzenia ciepła oraz oporu Kapicy w helu nadciekłym w zakresie temperatur 1.5 K do 2.0 K.

3.4. Uwagi krytyczne

1. Praca ogranicza się do badań doświadczalnych, brak w niej analiz teoretycznych. Możemy dowiedzieć się, jak zmieniają się poszczególne własności badanych próbek w zależności od napromieniowania, ale nie wiemy dlaczego. Uważam, że w dysertacji powinny się znaleźć co najmniej próby analitycznego wyjaśnienia zachodzących zjawisk i generalizacji,
2. W dysertacji brak dokładnych informacji, jaki jest wkład własny Doktoranta, np. w czasie konstruowania i wykonania stanowisk badawczych? Gdzie były przeprowadzone badania?
3. Nie zostało wyjaśnione, dlaczego zdecydowano się na przebadanie materiałów Mix 71, Mix 237, LONZA CE, LARP. Nie opisano procedur produkcji materiałów. Brakuje też odniesienia do innych materiałów analizowanych w projekcie EuCARD, jak Cyanate Ester Epoxy Mix oraz TGPAP – DETDA, które były także rozpatrywane jako potencjalny materiał izolacyjny w magnesach.
4. Rozdział siódmy dotyczy wpływu promieniowania na własności cieplne materiałów, ale takie badania nie zostały przeprowadzone. Uważam, że analizy oporów Kapicy materiałów przed i po napromieniowaniu byłyby bardzo ciekawym wkładem Doktoranta w zrozumienie tego zjawiska.
5. We wzorze 8.12 oraz 8.13 Autor podaje zależność na opory Kapicy, które są proporcjonalne do T^3 . Jak twierdzi, wynika to z teorii niedopasowania akustycznego. W dalszej części pokazane są wyniki pomiarów, z których wynika, że wielkość potęgi przy temperaturze jest mniejsza od 1.9. Z czego wynikają te rozbieżności? Moim zdaniem, warto o tym wspomnieć w dysertacji.
6. Jaka jest sensowność zamieszczenia w pracy podrozdziału 7.2 pt. *Przepływ ciepła przez materiały porowate*? Przecież w żadnym przypadku nie badano takiego zjawiska ani nie analizowano go numerycznie.
7. W pracy analizowano rozciąganie próbki przed i po napromieniowaniu. Jak zostało opisane na stronie 50 dysertacji we wstępie do rozdziału piątego, materiał izolacyjny może zostać także poddany ścisłaniu o wartości dochodzącej do 150 MPa. Czy były wykonane takie analizy i badania?

3.5. Uwagi redakcyjne

W pracy występują błędy składniowe oraz redakcyjne, na które zwrócono bezpośrednio uwagę Autorowi. Przed dalszym rozpowszechnianiem pracy błędy te powinny zostać wyeliminowane, a pewne fragmenty przeredagowane.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej opinie uwzględniające wybór tematu rozprawy, sposób jego analizowania, osiągnięte wyniki i zastosowane metody badawcze, stwierdzam, że Pan mgr inż. Piotr Bogdan wykazał, że jest naukowcem dojrzałym, o dużym doświadczeniu badawczym. Stwierdzam także, że posiadana wiedza oraz umiejętności pozwalają Mu na prowadzenie badań w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, dlatego też spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14. 03. 2003 r., o dopuszczenie Go do obrony pracy i nadanie stopnia doktora nauk technicznych.



Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ, prof. nadzw. PWr