

Wrocław, 05. czerwca 2019 r.

prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta
Kierownik
Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
ul. Smoluchowskiego 25
50-370 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Mgr. inż. LESZKA FRĄSIA pod tytułem
"Określenie dynamicznych właściwości materiałów magnetoreologicznych:
Badania doświadczalne i opis konstytutywny lepkoplastycznej deformacji",
wykonanej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. RYSZARDA PEŁCHERSKIEGO
(promotor) oraz Dr. inż. DARIUSZA JARZĄBKA (promotor pomocniczy)
z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

Opis identyfikacyjny: maszynopis sygnowany przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie (2019).

Podstawa formalno-prawna:

- pismo (z 1. kwietnia 2019 r.; wpłynęło do recenzenta 4. kwietnia br.) Prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie,
- Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym, zgodnie z art. 179 ust.1 ustawy z dnia 3. lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669).

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

A. Wprowadzenie

Głównym zamierzeniem Autora było wyznaczenie właściwości dynamicznych cieczy magnetoreologicznej dla szerokiego zakresu prędkości odkształcenia (w tym w przedziale 10^2 s^{-1} - 10^4 s^{-1}) z uwzględnieniem wpływu natężenia pola magnetycznego. Chodziło też o stworzenie modelu konstytutywnego lepkoplastycznej deformacji dla tej klasy materiałów z wykorzystaniem zmodyfikowanego prawa Perzyny.

Na wstępie należy podkreślić, iż ciecz magnetoreologiczna (MRF), reprezentująca dużą grupę materiałów magnetycznych Smart, jest obiektem znanym już od kilkudziesięciu lat (Jacob Rabinow, 1948). Nadal jednak opis właściwości i nowe obszary jej wykorzystania są aktualnym zagadnieniem poznawczym w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Należy podkreślić, iż właściwości mechaniczne tej klasy materiałów są dobrze znane jedynie w zakresie procesów quasi-statycznych, ale niedostatecznie - w obszarze dużych prędkości odkształcenia.

Wiadomo, iż istota działania i „atrakcyjność” cieczy magnetoreologicznych polega na zmianie właściwości MRF pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, stanowiącego sygnał wejściowy. Opisane zjawisko następuje w niezwykle krótkim czasie (kilku milisekund) i jest odwracalne w przypadku użycia cząstek aktywnych wykonanych z materiałów miękkich magnetycznie. Wspomniany efekt jest wynikiem złożonego składu cieczy, za sprawą którego można nazwać ją materiałem kompozytowym. W najprostszej postaci

jej elementami składowymi jest ciecz nośna, cząsteczki magnetyczne polaryzujące i dodatki, np. przeciwdziałające agregacji. Specyficzne zachowanie się cieczy magnetoreologicznych jest wynikiem „szeregowania się” cząsteczek magnetycznych, znajdujących się we wnętrzu cieczy. Cząstki aktywne magnetycznie układają się w mieszaninie, a następnie łączą się w grupy – łańcuchy. Ich kierunek jest identyczny (równoległy) z kierunkiem rozchodzenia się pola magnetycznego w MRF. Im wyższa wartość zadanego pola magnetycznego, tym większa wartość siły potrzebnej do przerwania łańcuchów strukturalnych (granica plastyczności). Jednakże ograniczeniem jest tu poziom nasycenia magnetycznego cząstek.

Należy stwierdzić, iż tematyka podjętego zagadnienia lokuje się głównie w ramach Inżynierii Materiałowej, ale ze względu na interdyscyplinarny charakter zawiera również wartościowe rezultaty z zakresu Mechaniki. Projektując pracę na stopień Autor przedstawił zwięźle aktualny stan wiedzy z zakresu budowy cieczy magnetoreologicznych oraz modeli stosowanych do opisu ich zachowania (w tym i ich znaczących ograniczeń). Równolegle przytoczono znane sposoby opisu (modele) lepkoplastyczności dla materiałów wrażliwych na prędkość odkształcenia. Na tej podstawie Doktorant sformułował tezę, cele i główne zadania do podjęcia w rozprawie. Następnie opisał metodykę badań własnych (eksperymentalnych oraz w zakresie modelowania) a także uzyskane rezultaty. Rozprawę zakończono podsumowaniem oraz wnioskami z przeprowadzonych badań.

Podsumowując na wstępie zamierzenia Autora pracy i mając na uwadze stan wiedzy należy przyjąć, iż zagadnienie wyznaczenie właściwości dynamicznych cieczy magnetoreologicznych dla szerokiego zakresu prędkości odkształcenia (w tym szczególnie dla dużych wartości z przedziału 10^2 s^{-1} - 10^4 s^{-1}) i stymulacji polem magnetycznym, jak również stworzenie modelu konstytutywnego lepkoplastycznej deformacji jest ambitnym, aktualnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Wynika to z interdyscyplinarnego charakteru zjawiska, w którym występują zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, mechaniki teoretycznej i eksperymentalnej oraz fizyki. Pozwala to łącznie stwierdzić, że wybór tematyki badawczej zawartej w przedłożonej rozprawie jest w pełni aktualny naukowo i aplikacyjnie.

B. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa podzielona została na pięć rozdziałów i 29 podrozdziałów. Dodatkowo zawarto podsumowanie oraz dyskusję z wnioskami końcowymi, a także zestawiono literaturę przedmiotu. Praca zawiera ponadto załączniki prezentujące programy do przeprowadzonych obliczeń. Monografia obejmuje 88 stron, zilustrowana została 44 rysunkami oraz 10 tabelami. Zestawienie cytowanej literatury zawiera 68 pozycji, w tym w pięciu przypadkach współautorstwa Doktoranta. Jedna z prac, związana ściśle z rozprawą, została opublikowana w czasopiśmie z listy JCR (Review of Scientific Instruments, IF=1.428; 2017).

W *pierwszym rozdziale (Wstęp)* zaznaczono, iż zachowanie materiałów magnetoreologicznych (MR) pod wpływem obciążeń dynamicznych nie jest dokładnie zbadane eksperymentalnie i brak jest w tym zakresie efektywnych modeli konstytutywnych. Dlatego za cel pracy przyjęto analizę oraz opis zachowania materiału MR pod wpływem obciążeń dynamicznych w obszarze głównie dużych prędkości odkształcenia (w tym w zakresie 10^2 s^{-1} - 10^4 s^{-1}). Sformułowano też tezę, iż powszechnie stosowany liniowy model Bingham nie jest w tym przypadku adekwatny i należy zastąpić go nowym modelem nieliniowym (w tym celu zaproponowano dalej model lepkoplastyczności Perzyny). Należało ponadto rozwiązać kluczowe zagadnienia, czyli zaproponować metodę pomiaru w warunkach dużych prędkości odkształcenia (pręt Hopkinsona) z równoczesnym zapewnieniem oddziaływania pola magnetycznego. Ważnym problemem, który pojawia się przy formułowaniu nowego opisu konstytutywnego deformacji materiału jest identyfikacja mechanizmów

fizycznych odpowiedzialnych za przegrupowanie ferroelementów i tworzenie łańcuchów cząstek.

W rozdziale drugim (*Przegląd literatury dotyczącej tematu rozprawy*) scharakteryzowano obiekt badań, za który przyjęto komercyjnie dostępną ciecz magnetoreologiczną firmy LORD (MRF - 140CG) zawierająca 85,44% masowego udziału cząstek ferromagnetycznych. Przedstawiono też trzy typowe idee wykorzystania MR, czyli kolejno: z użyciem swobodnego ściskania bądź rozciągania, z zastosowaniem tzw. modelu zaworowego oraz modelu sprzęgłowego. Następnie zwięźle omówiono literaturę przedmiotu z zakresu opisu zachowania się cieczy magnetoreologicznych, w tym oddziaływania między elementami struktury MR, której deformacja przebiega w polu magnetycznym oraz literatury dotyczącej badań wpływu anizotropii materiału magnetoreologicznego. Wykazano przy tym, że w zakresie wartości natężenia pola, które są rozważane w pracy, wpływ anizotropii jest niewielki, co uzasadnia przyjęcie założenia, że materiał MR może być opisywany przy pomocy zmodyfikowanego modelu lepkoplastyczności Perzyny w sformułowaniu dla materiału izotropowego. Pokrótce scharakteryzowano również typowe zastosowania cieczy magnetoreologicznych (tłumiki, absorbery udaru, kompozyty funkcjonalne), w tym w transporcie, medycynie oraz w technologiach obróbczych. Omówiono także prace z zakresu badania MR z użyciem pręta Hopkinsona, w tym dzielonego i generalnie dużych prędkości odkształcenia. Następnie dokonano przeglądu modeli stosowanych do opisu lepkoplastycznej deformacji. Oprócz omawianego obszernie dalej w pracy modelu Perzyny, skrótowo przedstawione inne modele lepkoplastyczności, a w tym kolejno: Johnsona – Cooka, Rusinka – Klepaczko oraz Zerilliego – Armstronga.

W rozdziale trzecim (*Deformacja mikrostruktury*) opisano pierwszą część badań własnych. W pierwszym kroku, używając mikroskopu optycznego, zaprezentowano strukturę szkieletową elementów ferrytycznych przed i po przyłożeniu pola magnetycznego, w tym charakterystyczne łańcuchy cząstek. W kolejnym etapie zbadano zachowanie materiału magnetoreologicznego in-situ w czasie deformacji w warunkach prostego ścinania obszaru zawierającego cząstki połączone polem magnetycznym i obserwacji z użyciem mikroskopu optycznego. Jest to ważny i oryginalny fragment rozprawy, który wymagał wykonania uchwytu z cienkiej warstwy miedzi naniesionej na elementy szklane. Deformację materiału zrealizowano z kolei przy użyciu przyrządu z napędem piezoelektrycznym. W rezultacie, w następstwie ścinania, możliwe było oddzielenie pojedynczego łańcucha elementów ferromagnetycznych i obserwacja mechanizmu deformacji struktury cząstek ferromagnetycznych w kolejnych odstępach czasu. Rozwiązanie zostało opatentowane. Następnie rozważono problem odkształcenia łańcuchów ferromagnetycznych pod wpływem obciążeń dynamicznych. Wykorzystano w tym celu analog cieczy magnetoreologicznej w postaci stalowych kulek umieszczonych w żelu na bazie wody. Całość zamknięto w pojemniku ze szkła akrylowego i podano działaniu pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy neodymowe. Rozerwanie łańcucha następowało w wyniku udaru wywołanego pociskiem stalowym. Do obserwacji deformacji wykorzystano szybką kamerę, która umożliwia obserwację z prędkością 106 klatek na sekundę. W kolejnej fazie zbadano wpływ tłumienia drgań w materiale magnetoreologicznym w zależności od kierunku wektora pola magnetycznego. Wykorzystano w tym celu kolejny oryginalny układ pomiarowy, którego głównym elementem jest drgająca belka z okładzinami piezoelektrycznymi i prętem zanurzonym w cieczy. Układ umożliwiał przykładanie pola magnetycznego w poprzek, wzdłuż i pod kątem 45 stopni do kierunku ruchu pręta w cieczy. Wykorzystując model Heinscha wyznaczono współczynniki lepkości dla wartości pól magnetycznych z przedziału od 2 do 40 kA/m oraz trzech konfiguracji kierunku pola magnetycznego względem kierunku wychylenia zanurzonego pręta: prostopadle, równoległe i pod kątem 45 stopni. Wyniki wykazały niewielki wpływ anizotropii na zachowanie materiału MR w polu magnetycznym dla różnych kierunków wektora natężenia. Umożliwiło to założenie izotropowości i przeprowadzanie dalszych badań związanych z deformacją tylko dla jed-

nej orientacji wektora natężenia pola magnetycznego. W części końcowej zaprezentowano zachowanie łańcucha elementów ferromagnetycznych w trakcie reorganizacji i rozerwania struktury w następstwie ścinania. Wykazano, iż matematyczny opis oddziaływania można wyrazić za pomocą równania (15). Za ważne uznano spostrzeżenie, iż materiał deformuje się warstwami, by następnie w sposób uporządkowany, poprzez następujące po sobie kolejno fragmentacje, zmienić swoją strukturę i spowodować przyrost odkształcenia.

Obszerny rozdział czwarty (*Stanowisko badawcze do badań quasi-statycznych oraz dynamicznych, realizacja i wyniki doświadczalne*) opisuje kluczowy etap prac eksperymentalnych rozprawy. Do wykonania testów quasi – statycznego ściskania wykorzystano maszynę hydrauliczną firmy MTS sterowaną sygnałem siły oraz cewkę generującą pole magnetyczne. Ciecz MR umieszczono w oryginalnym przezroczystym pojemniku żelatynowym, który nie ograniczał deformacji badanego materiału i nie osłabiał pola magnetycznego. Przenoszenie obciążenia następowało przez aluminiowe popychacze zamocowane w szczękach maszyny MTS. Wykazano doświadczalnie, iż wpływ pojemnika żelatynowego na deformowany materiał MR można pominąć. Przeprowadzono następnie testy prostego ścinania z prędkościami odkształcenia wynoszącymi od $1 \cdot 10^{-3}$ do $1 \cdot 10^{-1}$ s⁻¹ i dla natężeń pól magnetycznych równych odpowiednio: 30, 60, 90 i 120 kA/m. Wykazano, iż granica plastyczności zwiększa się wraz ze wzrostem wartości natężenia pola magnetycznego i również prędkości odkształcenia. Do badań dynamicznego ściskania MR zastosowano z kolei oryginalne stanowisko własnej konstrukcji, w skład którego wszedł zaadaptowany dzielony pręt Hopkinsona i cewka elektromagnetyczna oraz towarzysząca aparatura pomiarowa. Seria prób pozwoliła na uzyskanie dynamicznej granicy plastyczności w funkcji prędkości odkształcenia. Stopniowanie prędkości pocisku spowodowało uzyskanie prędkości odkształcenia w zakresie $10^3 - 10^4$ s⁻¹. W wyniku serii prób dynamicznych, ze zmienianą prędkością pocisku oraz dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego uzyskano wartości granicy plastyczności dla MR. Mierząc z kolei prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej w materiale MR wyznaczono sprężysty moduł ścinania Kirchhoffa G dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego. W tym celu wykorzystano znane zależności pomiędzy modułami K, E oraz G. Generalnie badania eksperymentalne pozwoliły na zebranie danych przydatnych do modelowania dynamicznej deformacji z wykorzystaniem modelu Perzyny.

Rozdział piąty (*Adaptacja modelu lepkoplastycznego Perzyny do opisu dynamicznej deformacji*) zawiera oryginalną propozycję modelowania właściwości cieczy magnetoreologicznych. Na wstępie przytoczono w wersji klasycznej model Perzyny, opisujący zachowanie materiału czułego na prędkość odkształcenia. Następnie zaproponowano rozszerzenie tego modelu dla przypadku materiałów zmieniających swoje właściwości sprężysto-lepkoplastyczne w funkcji pola magnetycznego. W tym celu uzmienniono od pola magnetycznego kolejno: moduł Kirchhoffa, współczynnik lepkoplastyczności oraz quasistatyczną granicę plastyczności. Uzyskano w ten sposób uogólnienie modelu Perzyny dla materiałów magnetoreologicznych, czyli równanie konstytutywne. Następnie, dla stanu jednoosiowego, równanie przedstawiono dla trzech różnych form funkcji nadwyżki, czyli kolejno: potęgowej, eksponentalnej i liniowej. W kolejnym kroku przeprowadzono sukcesywnie identyfikację parametrów modelu Perzyny z każdą funkcją nadwyżki. W tym celu dla każdego przypadku opracowano metodykę i przeprowadzono identyfikację z wykorzystaniem wyników eksperymentu. W rezultacie wyznaczono współczynniki dopasowania dla każdej z trzech postaci zmodyfikowanej postaci prawa Perzyny. Za najbardziej adekwatną do opisu lepkoplastycznej deformacji cieczy magnetoreologicznej przyjęto funkcję potęgową.

Rozdział szósty (*Podsumowanie pracy*) posłużył Autorowi do wyeksponowania głównych działań, które posłużyły do udowodnienia tezy i osiągnięcia celu pracy. Za szczególnie

wartościowe Doktorant uznał mikroskopowe obserwacje deformacji cieczy MR, wyznaczenie granicy plastyczności w quasi-statycznym i dynamicznym procesie odkształcenia oraz zastosowanie zmodyfikowanego, lepkoplastycznego modelu Perzyny do opisu materiału MR dla dużych prędkości odkształcenia i równoczesnego występowania pola magnetycznego.

Rozdział siódmy (Dyskusja i wnioski końcowe) zawarto główne rezultaty prac, by wykazać, iż teza rozprawy została udowodniona, a cel osiągnięty. Wykazano mianowicie, iż powszechnie stosowany model Binghama nie jest odpowiedni do opisu zachowania cieczy MR dla zakresu prędkości odkształcenia większych od 10^2s^{-1} . Zasadniczą przewagę wykazuje w tym przypadku zmodyfikowany model Perzyny, którego identyfikację przeprowadzono wykorzystując nieliniową funkcję nadwyżki i własne wyniki eksperymentalne. Znaczącymi osiągnięciami pracy było też zidentyfikowanie mechanizmu przyrostu odkształceń mikrostruktury cieczy MR jako rozwijających się hierarchicznie pasm ścinania, co wymagało oryginalnego osprzętu do mikroskopu optycznego. Równie oryginalne było wykorzystanie zmodyfikowanej wersji dzielonego pręta Hopkinsona z jednoczesnym oddziaływaniem na ciecz MR polem magnetycznym. W dyskusji odniesiono się również do współczesnych prac innych autorów oraz sformułowano sugestie odnośnie planowanych prac własnych w zakresie większych prędkości odkształcenia.

C. Uwagi krytyczne i sugestie

1. Na stronie 44¹⁻⁵ Autor stwierdza, cyt.: „Seria prób dynamicznych dla czterech wartości natężenia pola magnetycznego pozwoliła uzyskać krzywe przedstawiające relację naprężenie - odkształcenie. Na ich podstawie wyznaczono granicę plastyczności, **w analogiczny sposób jak dla testów quasi- statycznych**, jako przecięcie wykresu z prostą równoległą do zakresu sprężystego i odsuniętą od niego o 0,2%.” Ale gdzie są te krzywe i wynikające z nich wartości granicy plastyczności? Dlaczego nie pokazano chociaż kilku z nich, jak to miało miejsce w przypadku rysunku 21. W przytoczonej przez Autora pracy [39] (poprawne cytowanie, to: Liao, G., Gong, X., & Xuan, S. (2013). Magnetic field-induced compressive property of magnetorheological elastomer under high strain rate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(25), 8445-8453.) wykresy takie zaprezentowano.
2. Na stronie 55 napisano, cyt.: „Dla serii prób quasi-statycznych, wykonano próbę testu ściskania z prędkością odkształcenia $0,001 \text{ s}^{-1}$ ”. A gdzie jest ilustracja takiego eksperymentu, nawet dla jednej tylko wartości natężenia pola magnetycznego? Wcześniej pokazano próbę ściskania dla prędkości odkształcenia $0,1 \text{ s}^{-1}$ (Rys. 21, str. 34).
3. W pracy zabrakło szerszego praktycznego (poza poznawczym) uzasadnienia badania materiałów MR w warunkach dużych prędkości odkształcenia. Literatura przedmiotu podaje wiele cywilnych i militarnych przykładów aplikacji w tym zakresie.

Dalej niektóre tylko uwagi szczegółowe odnoszące się do strony redakcyjnej pracy, która miejscami jest niezbyt staranna:

4. Str. 9⁴. Problematykę **ta** omawiał [Harpavat 1974]. Powinno być: ...tę...
5. Str. 18⁶. ...kroków czasow**ś**wych. Powinno być: ...czasowych.
6. Str. 20³. Obudowa miała za **zadnie** wypełnić. Powinno być: ...za zadanie...
7. Str. 33⁴. 1 , 10 s^{-1} . Powinno być: $1 \text{ } 10 \text{ s}^{-1}$.
8. Str 34³. do zakresu **statycznego**. Powinno być: do zakresu sprężystego.
9. Str. 44³. Wyniki są przedstawione **w osobno**... Powinno być: ...osobno.
10. Str 46. W opisie rysunku 31 nie przyporządkowano poszczególnych zdjęć (trzech) do tekstu.
11. Str. 55. Tabela 5. W tabeli: jest A, powinno być a, jest B, powinno być b. Ponadto w podpisie jest: **ê**, powinno być: **ë**.

12. Str.56. Tabela 6. (podobnie jak wyżej: A, a oraz B, b.
13. Str.57. Tabela 7. (podobnie jak wyżej: A, a, B, b oraz C, c.
14. Str.58. W tekście nie odwołano się wprost do rysunków 39 i 40.
15. Str. 61₁**ta** zależność. Powinno być: tę zależność.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną pracę o tytule " Określenie dynamicznych właściwości materiałów magnetoreologicznych: Badania doświadczalne i opis konstytutywny lepkoplastycznej deformacji", niezależnie od zgłoszonych uprzednio uwag, oceniam całościowo jednoznacznie i zdecydowanie pozytywnie. Zagadnienie wyznaczenie właściwości dynamicznych cieczy magnetoreologicznych dla szerokiego zakresu prędkości odkształcenia (w tym szczególnie dla dużych wartości z przedziału $10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$) i stymulacji polem magnetycznym, jak również stworzenie modelu konstytutywnego lepkoplastycznej deformacji, jest ambitnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Tematyka jest bardzo aktualna i lokuje się na froncie badań (cutting-edge) z zakresu inżynierii materiałowej. Ze względu z kolei na interdyscyplinarny charakter, zawiera również wartościowe naukowo wyniki z zakresu mechaniki. Praca ma charakter głównie eksperymentalny ale obejmuje też spektrum zagadnień z zakresu modelowania właściwości materiałów w krzyżowym polu magnetomechanicznym. Walory rozprawy w obu tych obszarach mają kluczowe znaczenie dla wysokiej oceny wysiłków Doktoranta.

Wyraźnie sformułowano tezę, cel i konsekwentnie rozwiązano zadania szczegółowe. Szczególną wartość pracy należy upatrywać w stronie eksperymentalnej przedsięwzięcia. Pozwala to łącznie stwierdzić, iż teza pracy została dowiedziona, a cel rozprawy osiągnięty. Ponadto z bazy danych Biblioteki Instytutu Podstawowych Problemów PAN wynika, że Doktorant jest współautorem 5 publikacji, 9 streszczeń konferencyjnych 2 patentów i jednego prawa ochronnego.

*Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytułach naukowych, zgodnie z art. 179 ust.1 ustawy z dnia 3. lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie **Inżynieria Materiałowa**. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.*

/prof. dr hab. inż. Jerzy KALETA/

- 000001614 -
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
KATEDRA MECHANIKI
I INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ
Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
NIP 8960005851 (1)

KIEROWNIK KATEDRY

Prof. dr hab. inż. JERZY KALETA, prof. zw.