

prof. dr hab. inż. Sławomir Kubacki
Politechnika Warszawska,
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa
tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01
e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 27 lipca 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Ahmeda H. Hanfy

pt. „Surface roughness effect on shock wave boundary layer interaction on transonic compressor profile”

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku, Pana dr hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN, z dn. 12 maja 2026 r.

II. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Ahmeda H. Hanfy poświęcona jest badaniom eksperymentalnym przepływu transonicznego wokół łopatki sprężarki silnika lotniczego z zastosowaniem powierzchni o zróżnicowanej chropowatości. Pomiary przeprowadzono w tunelu transonicznym Instytutu Maszyn Przepływowych PAN (IMP-PAN) w Gdańsku. Badania stanowią część prac realizowanych w ramach projektu TEAMaero, finansowanego w ramach programu Marii Skłodowskiej-Curie (EU Horizon 2020).

Realizacja badań miała charakter wieloetapowy. Przedmiotowe badania przepływu wykonano dla geometrii łopatki opracowanej przez firmę Rolls-Royce Deutschland (RRD) w ramach projektu EU FP7 TFAST, który poprzedzał realizację projektu TEAMAero. Powierzchnie o zróżnicowanych charakterystykach chropowatości, wykorzystane w kampanii pomiarowej Doktoranta, zostały dostarczone przez firmę RRD już w ramach realizacji projektu TEAMaero. W kolejnym etapie prac, realizowanych we współpracy IMP-PAN z Politechniką Gdańską, odtworzono kształt powierzchni chropowatych na bazie próbek dostarczonych przez RRD, z zastosowaniem metody wycinania elektroerozyjnego. Doktorant przeprowadził szczegółową analizę topografii otrzymanych powierzchni, obejmującą wyznaczenie parametrów charakteryzujących ich strukturę.

Badania eksperymentalne, stanowiące zasadniczą część rozprawy, zostały zrealizowane w tunelu transonicznym IMP-PAN z zastosowaniem szerokiego zakresu uzupełniających się technik pomiarowych. Obejmowały one pomiary rozkładu ciśnienia statycznego na powierzchni łopatki, wizualizację zmian gęstości powietrza metodą schlieren, wizualizację olejową oraz pomiary prędkości w warstwie przyściennej z wykorzystaniem laserowej anemometrii dopplerowskiej (LDA).

Doktorant wniósł istotny wkład w rozwój stosowanych metod badawczych, proponując szereg rozwiązań zwiększających wiarygodność uzyskiwanych wyników. Do najważniejszych osiągnięć metodycznych należy opracowanie procedury przetwarzania obrazów dla metody schlieren, umożliwiającej precyzyjną identyfikację chwilowego położenia fali uderzeniowej w badanym przepływie. Dalej, opracowanie metody służącej do określania rozmiarów struktury przepływu rozwijającej się na powierzchni łopatki na podstawie analizy obrazów rejestrowanych kamerą. Autor rozprawy rozwinął również procedury analizy statystycznej danych pomiarowych uzyskanych metodą LDA. Do analizy pól prędkości zastosowano metodę bazującą na analizie kilku rozkładów Gaussa (Gaussian Mixture Model, GMM). Umożliwiło to bardziej wiarygodną identyfikację pól prędkości średniej w warstwie przyściennnej.

Przedmiot rozprawy obejmuje analizę złożonych zjawisk zachodzących podczas oddziaływania fali uderzeniowej z oderwaną warstwą przyścienną rozwijającą się na powierzchniach łopaty o chropowatości odpowiadającej rzeczywistym warunkom eksploatacji silników lotniczych. Problematyka ta ma istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznych zastosowań w projektowaniu sprężarek silników lotniczych. Praca ta wnosi więc istotny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Kandydat opracował i zastosował udoskonalone techniki badań eksperymentalnych, umożliwiające analizę struktury fal uderzeniowych oraz interakcji fali uderzeniowej z oderwaną warstwą przyścienną dla różnych konfiguracji chropowatości powierzchni łopatki. Uzyskane rezultaty mają istotną wartość poznawczą i przyczyniają się do pogłębienia wiedzy na temat mechanizmów odpowiedzialnych za powstawanie strat przepływowych w obecności powierzchni o zmiennej chropowatości.

Rezultaty badań zostały upowszechnione w formie dwóch artykułów naukowych opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych. Ponadto wyniki badań zostały również przedstawione w rozdziale monografii oraz opublikowane w materiałach dwóch konferencji naukowych. Dorobek publikacyjny dodatkowo potwierdza wysoki poziom merytoryczny przeprowadzonych badań.

III. Struktura rozprawy i ocena jej wartości naukowej

Praca doktorska składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie, obejmujące motywację prowadzenia badań oraz przegląd literatury. Praca zawiera pokaźną bibliografię obejmującą 183 pozycje literaturowe. Przegląd literatury został przeprowadzony w sposób staranny, uwzględniając najważniejsze publikacje dotyczące tematyki niniejszej pracy.

Tezę rozprawy sformułowano w rozdziale 1.4. Zakłada ona, że zastosowanie chropowatych powierzchni łopatek wpływa na dynamikę oscylacji fali uderzeniowej (fali normalnej) oraz prowadzi do zmniejszenia obszaru oderwanej warstwy przyściennnej na powierzchni profilu. W mojej ocenie przedstawione w rozprawie wyniki i analizy potwierdzają postawioną tezę.

W rozdziale drugim zaprezentowano stanowisko badawcze oraz szczegółowo opisano zastosowane techniki pomiarowe, obejmujące pomiary ciśnienia statycznego na powierzchni łopaty, technikę schlieren, wizualizację olejową oraz laserową anemometrię dopplerowską (LDA), a także przedstawiono aparaturę pomiarową. Rozdział ten zawiera również analizę błędów pomiarowych związanych z wykorzystaniem wybranych technik.

W rozdziale trzecim przedstawiono proces przygotowania próbek materiału chropowatego do badań eksperymentalnych przepływu realizowanych w tunelu transonicznym. Na potrzeby realizacji badań wykonano pięć profili o zróżnicowanej chropowatości powierzchni, odpowiadających profilom dostarczonym przez firmę RRD. Do wytworzenia próbek zastosowano obróbkę elektroerozyjną (metoda WEDM). Próbki zostały wykonane we współpracy z Politechniką Gdańską. Oprócz wcześniej opisanych próbek przygotowano trzy dodatkowe próbki, wykonane na bazie próbek nr 1, 2 oraz 4. Ich powierzchnie poddano dodatkowym procesom obróbki mechanicznej w celu uzyskania zmodyfikowanych

charakterystyk chropowatości. W przypadku próbek nr 1 i 2 dążono do uzyskania gładszych powierzchni, natomiast dla próbki nr 4 celem było uzyskanie powierzchni o większej chropowatości oraz bardziej wyraźnej anizotropii struktury. Wybrane parametry charakteryzujące osiem badanych powierzchni chropowatych przedstawiono w tabelach 3.4 i 3.6 oraz w załączniku B. Należy podkreślić wysoką jakość zastosowanej metody obróbki elektroerozyjnej, która umożliwiła wierne odtworzenie drobnych cech geometrycznych rzeczywistych powierzchni dostarczonych przez RRD. Doktorant dokonał szczegółowej analizy struktury powierzchni chropowatych, przedstawiając charakterystyki badanych próbek zarówno na podstawie parametrów dwuwymiarowych (tabela 3.4 i 3.6), jak i trójwymiarowych (tabela 3.7).

W rozdziale czwartym przedstawiono opracowaną przez Doktoranta udoskonaloną metodę wyznaczania położenia fali uderzeniowej, bazującą na analizie obrazów schlieren, a także metodę określania parametrów geometrycznych oderwanej warstwy przyściennej (wizualizacja olejowa) na podstawie obrazów zarejestrowanych kamerą. W zakresie techniki schlieren, Kandydat opracował metodę umożliwiającą skuteczną detekcję położenia fali uderzeniowej również w przypadkach, gdy rozkład intensywności światła charakteryzuje się występowaniem dwóch lub większej liczby lokalnych ekstremów. Na podkreślenie zasługuje również zaproponowana metoda analizy obrazów uzyskanych kamerą, umożliwiającą wierniejsze odtworzenie rzeczywistych wymiarów geometrycznych struktur przepływowych uzyskiwanych z zastosowaniem wizualizacji olejowej (rozdział 4.3). W rozdziale 4.4 przedstawiono udoskonalone podejście do statystycznej analizy danych LDA, w którym wykorzystano możliwość reprezentowania histogramów prędkości za pomocą wielu rozkładów Gaussa (ang. *Gaussian Mixture Model*, GMM). Metoda ta uwzględnia wpływ dużej liczby Stokesa, rejestrowanych dla cząsteczek posiewu, na wyniki pomiarów, umożliwiając bardziej wiarygodną analizę statystyczną pól prędkości. Zastosowane przez Doktoranta rozwiązanie przyczyniło się do poprawy jakości opisu statystycznego badanych wielkości oraz zwiększenia dokładności pomiarów w przepływach transonicznych i naddźwiękowych.

Rozdział piąty poświęcono przygotowaniu stanowiska pomiarowego do badań eksperymentalnych. Głównym celem było dobranie parametrów przepływu w sposób umożliwiający uzyskanie pożądanego układu fal, ograniczenie wpływu warstw przyściennych rozwijających się na bocznych ścianach kanału oraz zapewnienie powtarzalności wyników pomiarów. Przeanalizowano trzy warianty odsysania powietrza: przez górną ścianę kanału, przez dolną ścianę kanału oraz przez ściany boczne. W rozdziale przedstawiono również analizy z zastosowaniem metody POD (ang. *Proper Orthogonal Decomposition*) dla układu fal składającego się z fali ukośnej, nazywanej falą na krawędzi natarcia, fali odbitej od górnej ściany kanału oraz fali normalnej rozwijającej się w kanale międzyłopatkowym (ang. *passage wave*), dla różnych stopni odsysania czynnika roboczego realizowanego w kanałach bocznych. Doktorant przeprowadził również szczegółową analizę oscylacji fal, wykorzystując analizę widmową gęstości mocy przemieszczeń fali uderzeniowej, wyznaczoną na podstawie obrazów uzyskanych techniką schlieren. Interesujące są wyniki przedstawione na rys. 5.8, ilustrujące wpływ stopnia odsysania czynnika na zmiany położenia fali odbitej. Doktorant wykazał istnienie wyraźnej zależności pomiędzy oscylacjami fali skośnej, fali odbitej oraz fali normalnej w przypadku ograniczenia odsysania. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w analizie dominującego modu nr 1. Z kolei analiza modu nr 3 wskazuje na dominujący wpływ oddziaływania fali normalnej z oderwaną warstwą przyścienną rozwijającą się na powierzchni profilu. Wyniki te potwierdzają złożony charakter układu fal oraz wskazują na silne oddziaływanie między poszczególnymi rodzajami fal. Na rys. 5.16 przedstawiono ponadto widma gęstości mocy (przemnożone przez częstotliwość) przemieszczeń fali normalnej, zarejestrowane w pobliżu górnej i dolnej części kanału międzyłopatkowego, dla różnych stopni odsysania czynnika. Wykazano, że zwiększenie intensywności odsysania prowadzi do

osłabienia oddziaływania na strukturę przepływu w otoczeniu fali normalnej pomiędzy obiema stronami kanału w zakresie częstotliwości 200–400 Hz (rys. 5.17). Interesujące byłoby poznanie mechanizmu odpowiedzialnego za obniżenie współczynnika koherencji między górną a dolną stroną kanału w tym paśmie częstotliwości. Wykonana analiza parametryczna pozwoliła wybrać optymalną konfigurację układu pomiarowego, która następnie została zastosowana do analiz przepływu z zastosowaniem chropowatych powierzchni łopatek (Tabela 5.9).

W rozdziale szóstym przedstawiono najważniejsze wyniki pracy, dotyczące analizy przepływu powietrza wokół łopatki sprężarki z zastosowaniem wybranych konfiguracji powierzchni chropowatych. Badania eksperymentalne przeprowadzono z wykorzystaniem czujników ciśnienia statycznego zainstalowanych na powierzchni łopaty oraz technik schlieren, wizualizacji olejowej i LDA. Technika LDA umożliwiła wyznaczenie średniej prędkości przepływu w warstwie przyściennej rozwijającej się na podciśnieniowej stronie łopaty, co pozwoliło określić jej kluczowe parametry całkowite. Wyniki pomiarów ciśnienia wykazały, że dla konfiguracji warstw chropowatych oznaczonych symbolami P2 i P5 uzyskano znaczne odchylenia rozkładów izotropowej liczby Macha od wyników referencyjnych. Ze względu na prawdopodobny wpływ różnic montażowych konfiguracje te wyłączono z dalszych szczegółowych analiz. Wyłączenie tych profili z analiz przepływowych jest w pełni uzasadnione. W przypadku profili P1, P2 i P4 analizę struktury przepływu średniego na powierzchni łopaty rozpoczęto od interpretacji wyników uzyskanych metodą wizualizacji olejowej (rys. 6.6 i 6.7). Kandydat uzyskał ciekawe wyniki analiz, które pokazały, że zastosowanie dużej chropowatości (profil P4) prowadzi do znaczącej modyfikacji struktury oderwanej warstwy na powierzchni łopaty w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla konfiguracji P1 i P3 (mniejsza chropowatość). Dla konfiguracji P4 zaobserwowano znacznie bardziej nieregularny charakter warstwy przyściennej, co było wynikiem występowania silniejszych efektów trójwymiarowych. Zjawiska te były związane m.in. z intensyfikacją struktury przepływu wtórnego w obszarze ścian bocznych. Analogicznie do analiz wstępnych przedstawionych w rozdziale piątym, wykonano tutaj również analizę widmową przemieszczeń fali normalnej z wykorzystaniem techniki schlieren (rys. 6.8). Otrzymane przez Doktoranta wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej wpływu chropowatości powierzchni na charakterystyki przepływu średniego oraz pozwalają lepiej poznać mechanizmy odpowiedzialne na powstanie niestacjonarności przepływu zarówno tych związanych z interakcją fali normalnej z oderwaną warstwą przyścienną, jak i zaburzeń niezwiązanych bezpośrednio z tym zjawiskiem. W szczególności wykazano, że zastosowanie powierzchni o dużej chropowatości (profil P4) prowadzi do występowania zjawisk niskoczęstotliwościowych, charakteryzujących się dominującą częstotliwością wynoszącą $f = 10$ Hz (rys. 6.8). Wykazano również, że dla powierzchni o niewielkiej chropowatości, reprezentowanej przez profil P1, widma gęstości mocy wskazują na występowanie wysokich amplitud przemieszczeń związanych z oddziaływaniem fali z oderwaną laminarną warstwą przyścienną w zakresie częstotliwości $f = 270\text{--}380$ Hz (rys. 6.8). Zjawiska te zostały zinterpretowane jako efekt sprzężenia akustycznego. W celu przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy zjawisk przepływowych wykonano dodatkowo badania z wykorzystaniem ciągłej transformaty falkowej (rys. 6.10 i 6.11). Uzyskane wyniki potwierdziły obecność dominującej częstotliwości wynoszącej ok. $f = 300$ Hz we wszystkich rozpatrywanych konfiguracjach. W przypadku P4 zaobserwowano ponadto występowanie oscylacji niskoczęstotliwościowych w zakresie $f = 70\text{--}300$ Hz. Przeprowadzone analizy z wykorzystaniem wizualizacji olejowej oraz techniki schlieren umożliwiły identyfikację najważniejszych procesów zachodzących w badanym układzie. Istotne znaczenie mają również wyniki pomiarów prędkości średniej w warstwie przyściennej (rys. 6.12–6.14), wykonane z wykorzystaniem techniki LDA. Uzyskane profile prędkości umożliwiły wyznaczenie parametrów całkowitych charakteryzujących warstwę

przyścienną, takich jak liniowe straty wydatku i pędu oraz parametr kształtu. Pozwoliły również na określenie wielkości istotnych w analizie przepływów wokół powierzchni chropowatych, w tym zastępczej wysokości chropowatości ziarna piasku (k_s^+), parametru dU^+ oraz liczby Reynoldsa opartej na charakterystycznej wysokości chropowatości. Doktorant wykazał, że dla profilu P4 liniowa strata pędu w lokalizacjach $x/c = 0.60$ oraz $x/c = 0.75$ przyjmuje wartości niższe od tych które uzyskano z zastosowaniem profili P1 i P3, charakteryzujących się mniejszą chropowatością. Uzyskane wyniki badań mają charakter nieintuicyjny, ponieważ wskazują, że w wybranych obszarach przepływu niższy poziom strat przepływowych można osiągnąć przy zastosowaniu elementów o większej chropowatości powierzchni (tabele 6.6 i 6.7). Ponadto, wyniki uzyskane przez Doktoranta wykazały, że dla profili P1, P3 i P4 warstwa przyścienna w położeniu $x/c = 0.75$ wykazuje cechy charakterystyczne dla przepływu turbulentnego (rys. 6.14). Rezultaty te potwierdzają zasadność przeprowadzenia analiz z wykorzystaniem techniki LDA. W mojej ocenie uzyskane wyniki mogą mieć również istotne znaczenie dla walidacji oraz dalszego rozwoju metod numerycznej mechaniki płynów (CFD), w szczególności tych opartych na podejściu URANS (ang. Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes).

Pracę zamykają dwa podrozdziały poświęcone podsumowaniu osiągnięć Doktoranta oraz omówieniu kluczowych wyników badań. Do pracy dołączono również pięć załączników, w których przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego, szczegółowe informacje dotyczące uzyskanych parametrów chropowatości powierzchni, zastosowane algorytmy przetwarzania danych, profile prędkości średniej i fluktuacyjnej oraz wyniki analiz przepływu dla niskiej liczby Reynoldsa.

IV. Mocne i słabe strony pracy

Do mocnych stron rozprawy należą opracowanie przez Doktoranta udoskonalonej metody identyfikacji położenia fali uderzeniowej na podstawie analizy obrazów uzyskanych techniką schlieren oraz przeprowadzenie kompleksowych analiz z wykorzystaniem tej metody. Zastosowanie tej metody umożliwiło uzyskanie wartościowych rezultatów, które pozwoliły na identyfikację zjawiska interakcji fali uderzeniowej z oderwaną warstwą przyścienną w obecności powierzchni o zróżnicowanej chropowatości. Na podkreślenie zasługuje również opracowanie metody rekonstrukcji rzeczywistych wymiarów geometrycznych struktur przepływu na podstawie obrazów rejestrowanych kamerą. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie analizy ilościowej oraz wyznaczenie rozmiarów oderwanej warstwy przyściennej dla badanych konfiguracji powierzchni chropowatych.

Do słabszych stron pracy należy zaliczyć pominięcie w kampanii pomiarowej w tunelu profili ze strukturą chropowatą uzyskaną z zastosowaniem dodatkowych obróbek mechanicznych (P1, P2 i P4), dla których charakterystyki znalazły się w części B12 załącznika B. Być może wspomniane w artykule warianty chropowate dla profili P1, P2 i P4 zostały omówione, ale doszło do konfliktu oznaczeń. Moim zdaniem należało tym dodatkowo wygenerowanym strukturom chropowatym nadać inne nazwy i przeprowadzić analizy przepływowe oraz przedstawić wstępne wyniki z zastosowaniem tych próbek (o ile nie zostały one wykonane).

V. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

Poniżej przedstawiono szczegółowe pytania skierowane do Kandydata:

1. W rozdziale 3.4 przedstawiono struktury chropowate poddane dodatkowej obróbce mechanicznej. Oznaczono je symbolami P1 i P2 (zrobotyzowany proces polerowania) oraz P4 (obróbka z wykorzystaniem wiertarki ręcznej). Ich szczegółową charakterystykę zamieszczono w załączniku B. Nie odnalazłem jednak w rozprawie

wyników analiz przepływowych dotyczących tych konfiguracji powierzchni. Jednocześnie w tabelach B11 i B12 występują profile oznaczone tymi samymi symbolami (P1, P2 i P4), co może sugerować konflikt oznaczeń. Proszę o wyjaśnienie, czy brak wyników analiz dla profili poddanych dodatkowej obróbce mechanicznej wynika z celowego pominięcia tych konfiguracji w pracy, czy też jest konsekwencją niejednoznacznego systemu oznaczeń zastosowanego w rozprawie?

2. W końcowej części rozdziału 5.3 przedstawiono informację dotyczącą zmiany położenia łopat w palisadzie w celu uzyskania zadowalającej powtarzalności rozkładów izentropowej liczby Macha (rys. 5.6b). Nie wyjaśniono jednak znaczenia zastosowanych oznaczeń ($x_{LP}=0$, $x_{UP}=0$, $y=UP=0$) ani sposobu, w jaki dokonano regulacji położenia wybranych punktów w badanej palisadzie. Proszę o doprecyzowanie interpretacji tych symboli oraz przedstawienie szczegółów dotyczących przyjętej metodyki kalibracji układu.
3. Analiza widm mocy (przemnożonych przez częstotliwość) przedstawionych na rys. 5.16 sugeruje, tak jak to zostało w pracy pokazane, istnienie korelacji pomiędzy oscylacjami fali normalnej występującymi na górnej (pass-up) i dolnej (pass-mid) stronie kanału. W przypadku konfiguracji full suction oraz 66.7% suction widoczne są wartości szczytowe odpowiadające częstotliwościom około 120–150 Hz dla pass-up oraz 270–300 Hz dla pass-mid. Czy różnica tych częstotliwości może wskazywać, że oscylacje po stronie pass-mid stanowią wyższą harmoniczną zjawiska obserwowanego po stronie pass-up? Czy wraz z ograniczeniem lub zanikiem odsysania dochodzi do przejścia dominującego mechanizmu oscylacji w kierunku drugiej harmonicznej ($f_2=2f_1$)?
4. Na rys. 6.10 przedstawiono wyniki analizy falkowej, ilustrujące oscylacje fali normalnej dla różnych wartości chropowatości powierzchni. Proszę o doprecyzowanie, w którym miejscu pola przepływu przeprowadzono tę analizę, tj. w którym punkcie/obszarze pomiarowym zarejestrowano analizowany sygnał?
5. Rys. 6.13 przedstawia profile prędkości średniej wyznaczone w trzech położeniach wzdłuż cięciwy łopaty: $x/c = 0.25$, 0.60 oraz 0.75 . W przypadku profili uzyskanych dla przekroju $x/c = 0.25$ zauważalny jest brak punktów pomiarowych w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni łopaty. W tabeli 6.5 przedstawiono parametry charakteryzujące warstwę przyścienną, w tym wartości naprężeń ścinających τ_w wyznaczone dla przekroju $x/c = 0.25$. Proszę o wyjaśnienie metodyki wyznaczania naprężeń stycznych w tym przypadku, szczególnie z uwagi na bardzo małą grubość warstwy przyściennej w analizowanym przekroju, wynoszącą zaledwie 0.25 mm oraz brak bezpośrednich punktów pomiarowych w pobliżu powierzchni łopaty.
6. Rys. 6.13 ($x/c=0.6$) przedstawia profile prędkości za falą uderzeniową. Czy obserwowane „zakrzywienie” profili prędkości w pobliżu ściany może wynikać z odbić światła lasera od powierzchni łopaty, czy jest to efekt fizyczny wynikający z bliskości obszaru, w którym oderwana warstwa zaczyna przylegać do ściany? Proszę o komentarz.
7. W tabelach 6.6 i 6.7 przedstawiono wartości grubości warstwy przyściennej oraz parametrów całkowitych wyznaczonych w odległościach $x/c=0.6$ oraz 0.75 . Profile prędkości zaprezentowane na rys. 6.13 nie wskazują na wyraźne osiągnięcie wartości asymptotycznej prędkości średniej w obszarze oddalonym od ściany, co może utrudniać jednoznaczne określenie granicy warstwy przyściennej. Proszę o wyjaśnienie, jakie kryterium zostało zastosowane do wyznaczenia grubości warstwy przyściennej?
8. Na rysunku 6.14 przedstawiono profile prędkości w układzie współrzędnych wykorzystującym zmienne skalowane względem ściany (wall coordinates). Cel

zastosowania takiej prezentacji wyników jest zrozumiały. Umożliwia on analizę wpływu wysokości chropowatości na kształt profili prędkości oraz identyfikację różnic między poszczególnymi przypadkami. Doktorant wskazuje, że obserwowane rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów dla powierzchni chropowatych a zależnościami teoretycznymi są typowe dla tego rodzaju przepływów. Pojawia się pytanie, w jakim stopniu zaobserwowane różnice wynikają bezpośrednio z wpływu chropowatości powierzchni, a w jakim mogą być związane z faktem, że analizowana turbulentna warstwa przyścienna nie osiągnęła jeszcze w pełni rozwiniętego stanu? Związki teoretyczne, do których porównywane są wyniki, obowiązują dla w pełni rozwiniętej warstwy turbulentnej, która niekoniecznie występuje w tej odległości od krawędzi natarcia na idealnie gładkiej powierzchni łopaty. Proszę o komentarz.

9. Czy możliwe jest uzyskanie informacji o poziomie turbulencji na wlocie do przestrzeni pomiarowej? Czy oscylacje pola prędkości na wlocie do palisady mogły wpłynąć na wyniki analiz na powierzchni łopaty?

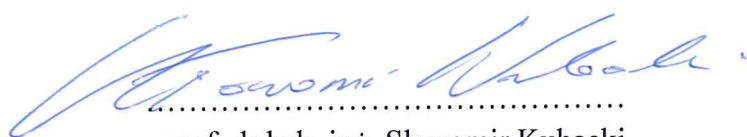
VI. Podsumowanie

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Ahmeda H. Hanfy przedstawia wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w tunelu transonicznym IMP PAN w Gdańsku w ramach realizacji projektu TEAMaero. Przedmiotem rozprawy jest analiza wpływu chropowatości powierzchni łopaty sprężarki na zjawisko interakcji fali uderzeniowej z oderwaną warstwą przyścienną.

Doktorant w pełni zrealizował założony program badawczy oraz osiągnął wyznaczone cele pracy. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazał, że odpowiednio duża wysokość chropowatości powierzchni wywiera istotny wpływ zarówno na charakter przepływu średniego, jak i na dynamikę przepływu niestacjonarnego w analizowanym układzie. Uzyskane wyniki wnoszą wartościowy wkład w zrozumienie mechanizmów odpowiedzialnych za wpływ chropowatości powierzchni na zjawiska przepływowe zachodzące w przepływach transonicznych i naddźwiękowych.

Wyniki badań stanowiące podstawę rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Ahmeda H. Hanfy zostały opublikowane w dwóch renomowanych czasopismach naukowych, a także przedstawione w rozdziale monografii oraz w dwóch publikacjach konferencyjnych. Dorobek publikacyjny towarzyszący rozprawie świadczy o wysokiej wartości naukowej uzyskanych wyników. Rezultaty przeprowadzonych badań wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna, poszerzając aktualny stan wiedzy w zakresie oddziaływania chropowatości powierzchni na interakcję fali uderzeniowej z oderwaną warstwą przyścienną.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. pt.: Ahmeda H. Hanfy „Surface roughness effect on shock wave boundary layer interaction on transonic compressor profile” spełnia wymagania określone w ustawie z dn. 20 lipca 2018 r – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, jakie stawia się pracom doktorskim, i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.


prof. dr hab. inż. Sławomir Kubacki

