

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Zacharko**

**pt. “Influence of Thermal Resistance on Heat Distribution of Selected Parts of Low-Pressure Turbine of Aircraft Engines”.**

### **I. Ocena wyboru tematyki, celu i zakresu badań**

Opiniowana praca jest studium obliczeniowym obejmującym symulacje numeryczne wymiany ciepła w obrębie styku dwóch metali, mającym na celu wyznaczenie termicznego oporu kontaktowego (*Thermal Contact Resistance*, TCR) lub jego odwrotności, tj. kontaktowej przewodności cieplnej (*Thermal Contact Conductance*, TCC). Celem pracy jest, cytuję za wstępem w wersji polskojęzycznej: „wypracowanie korelacji, która pozwoli na poprawne modelowanie wymiany ciepła w rejonie kontaktów pomiędzy wybranymi częściami turbinowego silnika lotniczego”. Autor wymienia takie obszary silnika jak: platforma zewnętrzna łopatek kierowniczych turbiny niskiego ciśnienia będąca w kontakcie z zewnętrzną obudową turbiny, połączenie śrubowe obudowy turbiny z jej kołnierzem wylotowym, czy styk łopatki wirującej z dyskiem.

W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci metody symulacji numerycznej zdobyły szerokie zastosowanie zarówno w badaniach podstawowych jak również w procedurach projektowania inżynierskiego, prototypowaniu, analizie bezpieczeństwa i żywotności konstrukcji technicznych. Czynnikiem stymulującym ten gwałtowny rozwój są ciągły rozwój metod obliczeniowych, metod automatycznej generacji siatek oraz opracowywanie coraz dokładniejszych modeli procesów transportu w oparciu o prace teoretyczne i doświadczalne, jak również wzrost możliwości sprzętu obliczeniowego, zastosowania obliczeń równoległych, wykorzystania kart graficznych itd. Pojawiły się pojęcia takie jak „wirtualne prototypy” czy „wirtualne testowanie”, uwzględniające symulacje nie tylko procesu produkcyjnego, ale również cyklu eksploatacji w zmiennych i niekorzystnych warunkach. Podejście to jest od lat stymulowane przez światowy przemysł lotniczy, samochodowy, odlewniczy, chemiczny, itd. Są to te gałęzie gospodarki, w których choćby częściowe zastąpienie kosztownych i długotrwałych testów laboratoryjnych i prototypowania, przez wykorzystanie relatywnie szybkiego i taniego modelowania wirtualnego, może znacznie przyspieszyć wprowadzenie nowego produktu na rynek, udoskonalić i zoptymalizować technologię a także znacząco obniżyć koszty. Dziedziny te są jednak wyjątkowo wrażliwe na błędy, pomyłki, które mogą pojawić się na różnych etapach toku projektowania i symulacji. Dlatego wskazane są wyjątkowa ostrożność i krytycyzm wobec zastosowanych

środków i metod, a także wielostopniowy proces weryfikacji i walidacji modeli na każdym etapie ich opracowywania.

W tematyce podjętej pracy Doktorant wpisuje się w światowy trend prac ukierunkowanych na zbudowanie coraz bardziej efektywnych i wiarygodnych modeli symulacji numerycznej wielkoskalowych procesów wymiany ciepła w obrębie połączeń występujących w wysoko obciążonych elementach maszyn i urządzeń. Jak podkreślił Doktorant we wstępie, podjęty temat ma istotny charakter aplikacyjny, wpisuje się również w prace prowadzone w firmie MTU Aero Engines.

## Układ pracy

Praca napisana w języku angielskim podzielona jest na 7 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, napisanym w języku polskim i angielskim, zawiera również dwa dodatki i liczy 170 stron. Bibliografia liczy 154 pozycje i jest uporządkowana zgodnie z kolejnością pojawiania się w pracy. W pracy znajdują się 62 rysunki i 11 tabel.

Na samym początku streszczenia, Doktorant przedstawił cel pracy. Wg polskojęzycznej wersji jest nim opracowanie korelacji, pozwalającej na poprawne modelowanie wymiany ciepła w rejonie kontaktów pomiędzy wybranymi częściami turbinowego silnika lotniczego. Wyodrębnione zostały trzy pary kontaktowe, współpracujących elementów silnika lotniczego w obszarze turbiny niskiego ciśnienia, dla których te korelacje zostaną opracowane. Jak zostało wykazane w dalszej części pracy (tabela 5.1), występują pary różnych materiałów, o odmiennych chropowatościach.

W celu osiągnięcia zamierzonego celu, Autor wyróżnił cztery etapy prac, rozpoznanie i identyfikacja (domyślnie: zagadnienia), przegląd dostępnych korelacji, LBM (domyślnie: *Lattice Boltzmann Method*), wdrożenie.

W pierwszym rozdziale („*Introduction*”) Autor skupia swoją uwagę na omówieniu pojęcia termicznego oporu kontaktowego (*Thermal Contact Resistance*, TCR) oraz jego odwrotności, tj. kontaktowej przewodności cieplnej (*Thermal Contact Conductance*, TCC). Doktorant napomknął również o ich znaczeniu w praktycznych zastosowaniach, w tym w konstrukcji silników lotniczych. Autor poświęcił również sporo miejsca metodzie Krat Boltzmana (LBM) i zapowiedział, że obliczenia będą przeprowadzone z wykorzystaniem wymienionej metody.

W rozdziale drugim („*Geometrical Solid Surface Characterization*”) Autor zamieszcza opis geometrycznej charakterystyki powierzchni ciała stałego. Omówione zostały deterministyczne i statystyczne charakterystyki pojedynczej powierzchni chropowatej, jak również dwóch powierzchni będących w kontakcie. Omówione zostały wyłącznie przypadki dwuwymiarowe, odpowiadające przekrojom rzeczywistych par kontaktowych. Przedstawione zostały również elementy opisu fraktalnego powierzchni chropowatych.

W rozdziale trzecim Doktorant omówił mechanizmy wymiany ciepła pomiędzy ciałami stałymi będącymi w kontakcie. Podane zostały definicje termicznego oporu kontaktowego oraz jego odwrotności. Omówione zostały pokrótce modele pojedynczego kontaktu (*single-contact model*) i wielokrotnego kontaktu (*multi-contact model*) a także modele związane z procesami na poziomie mikroskalowym, takie jak niezgodność akustyczna (*acoustic mismatch model*) i niezgodność dyfuzyjności cieplnych (*diffusive mismatch model*). Autor przedstawił zagadnienia związane w wymianą ciepła w płynie oddzielającym stykające się powierzchnie ciał stałych, związane ze średnią drogą swobodną (liczba Knudsen), współczynnikiem akomodacji itd. W dalszej części rozdziału zostały omówione zależności kryterialne opisujące bezwymiarowy opór cieplny w funkcji ciśnienia nacisku, mikrotwardości powierzchni i parametrów geometrii

powierzchni (chropowatości i średniego nachylenia). Omówione również zostały charakterystyki sił docisku blach połączonych śrubowo lub za pomocą nitów.

W rozdziale czwartym („*Lattice Boltzmann. Fundamentals of Method*”) Autor omówił podstawy metody Krat Boltzmann, przedstawił równanie Boltzmann i jego dyskretyzację czasowo-przestrzenną, siatki dyskretyzacji dla geometrii jedno-, dwu- i trójwymiarowych oraz przegląd rozmaitych typów warunków brzegowych ze szczególnym uwzględnieniem tzw. zanurzonych brzegów (*immersed boundary*) i ich dyskretyzację.

W kolejnym rozdziale („*Analysis setup*”) Autor przedstawił analizę przeprowadzonych symulacji. Omówione zostały pokrótce rodzaje materiałów i pary kontaktowych oraz sposób generacji powierzchni chropowatej. Zbadany został wpływ temperatury oraz radiacji i konwekcji na kontaktową przewodność cieplną. Autor przeprowadził tzw. analizę wrażliwości siatki oraz walidację modelu. Następnie, korzystając z dwóch komercyjnych modeli obliczeniowych, opartych na metodzie objętości kontrolnych i Krat Boltzmann, uwzględniając znaczną prędkość powietrza przepływającego między kontaktującymi się powierzchniami, Autor wyznaczył średnie współczynniki przejmowania ciepła na powierzchniach chropowatych. Na końcu rozdziału, Autor przeanalizował wpływ odległości między uśrednionymi powierzchniami oraz chropowatości na kontaktową przewodność cieplną i opracował na tej podstawie korelację.

W szóstym rozdziale („*Final summary*”) Doktorant przedstawił podsumowanie pracy. Ponownie streścił zawartość poszczególnych rozdziałów oraz w sposób syntetyczny przedstawił wyniki. Na końcu wymienił proponowane kierunki prac związanych z analizowaną tematyką, będących uzupełnieniem przeprowadzonych dotąd badań. Wśród nich znalazły się: eksperyment walidacyjny, uwzględnienie amplitudy i częstotliwości drgań w modelu teoretycznym oraz procesów zachodzących w mikroskali. Jako przyczynę zrezygnowania z badań eksperymentalnych, które pierwotnie miały być przeprowadzone w ramach doktoratu, Autor podał obciążenie budżetu projektu związanego z epidemią COVID.

## **Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej, ocena metod badawczych i uzyskanych wyników.**

### **Elementy nowości**

Omówione wyżej rozdziały drugi, trzeci i czwarty, zawierają monograficzny przegląd pojęć, korelacji związanych z termicznym oporem kontaktowym oraz podstawowych informacji dotyczących metody Krat Boltzmann. W rozdziale drugim można znaleźć obszernie parafrazy monografii [46]. Autor cytuje również w pracy szereg monografii poświęconych metodzie Krat Boltzmann, jak również artykułów, w których sformułowane są schematy dyskretyzacji w pobliżu brzegów. Rozprawa nie zawiera przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie realizowanej tematyki badań, czyli modelowania termicznego oporu kontaktowego ani krytycznej jej analizy. Pojawiają się natomiast dość egzotyczne w tym kontekście artykuły dotyczące modelowania zawieszin cząstek stałych czy konwekcji naturalnej w ośrodku porowatym (pozycje odpowiednio [153] i [154]).

Można więc stwierdzić, że przeprowadzona analiza literatury w zakresie planowanych badań jest niewystarczająca. Jest to istotny mankament recenzowanej pracy, gdyż poprawnie przeprowadzony krytyczny przegląd literatury, w powiązaniu z praktycznymi zagadnieniami związanymi z praktyką zawodową Doktoranta, pozwala znaleźć obszary wymagające pogłębionej analizy i na tej podstawie sformułować hipotezy badawcze oraz określić cel pracy i elementy nowości. Tych elementów w recenzowanej pracy doktorskiej nie znalazłem.

Jak wspominałem, cel i zakres badań zostały określone na początku streszczenia. Metodologia prac została przedstawiona przez Doktoranta na początku rozdziału piątego. Obejmuje ona, cytując:

1. „*Opracowanie skryptu w pythonie pozwalającego na generację geometrii powierzchni chropowatej w oparciu o podstawowe parametry w oparciu o algorytm losowe.*”
2. *Analizę wpływu wysokości nierówności powierzchni i ciśnienia dociskającego na kontaktową przewodność cieplną.*
3. *Analizę wpływu różnych mechanizmów wymiany ciepła na kontaktową przewodność cieplną.*
4. *Walidację modelu.*
5. *Wygenerowanie korelacji.*
6. *Implementacja korelacji w rzeczywistych zastosowaniach.*”

Tematyka zbliżona do podjętej przed Doktoranta jest przedmiotem wielu prac naukowych i artykułów. Również zakres prac, przedstawiony przez Doktoranta, jest w znacznej mierze zbliżony z analizami, których wyniki są powszechnie dostępne. Przykładowo, mezoskalowe analizy numeryczne kontaktowej przewodności cieplnej w oparciu o bezpośrednie symulacje wymiany ciepła na styku dwóch materiałów, dla wygenerowanych powierzchni materiałów chropowatych, zostały przedstawione w pracach, np.: (a) Jian-Jun Gou et al., *Study of thermal contact resistance of rough surfaces based on the practical topography*, Computers and Fluids 164 (2018) 2–11, (b) Mikhail V. Murashov, Sergey D. Panin, *Modeling of thermal contact conductance*, Proceedings of the International Heat Transfer Conference IHTC14, (art. nr IHTC14-22616) August 8-13, 2010, Washington, DC, USA, (c) Mary Kathryn Thompson, *A Multi-Scale Iterative Approach for Finite Element Modeling of Thermal Contact Resistance*, PhD thesis, 2007, MIT, (d) Navni Verma, *Development and Demonstration of Thermal Contact Conductance (TCC) Models for Contact Between Metallic Surfaces*, PhD thesis, 2019, Ohio. Szczególnie ta ostatnia praca zasługuje na uwagę. Z niemałym zdumieniem znalazłem podobieństwa pomiędzy recenzowaną pracą a wymienionym wyżej doktoratem Navni Verma. Idee przedstawione w wymienionym doktoracie pojawiły się w dwóch artykułach opublikowanych już w latach 2016 i 2017. Metodologia prac, przedstawiona przez Navni Verma, obejmowała następujące punkty, cytując:

1. *“To develop a parameter-based algorithm for stochastic reconstruction of the mesoscale geometry of interfaces formed between contacting rough surfaces.*”
2. *To formulate and calculate the TCC from the scale-resolved DNS of thermal transport across the reconstructed interface.*
3. *To perform a systematic study and establish the functional dependence of the TCC on the size and shape of surface asperities and the applied load (pressure).*
4. *To validate the prediction methodology by comparison with experimental data available in the literature.*
5. *To develop a generalized correlation for estimating the TCC of metal-metal interfaces using commonly available surface topography parameters and load.*
6. *To apply the computed TCC values in full-scale CFD/CHT simulations and elucidate the role of TCC in practical engineering computations.*”

Jest to więc metodologia bardzo zbliżona do zaprezentowanej przez Doktoranta.

Kluczowym elementem mezoskalowego modelu obliczeniowego transportu ciepła w obrębie stykających się materiałów, jest skrypt opracowany w pierwszym punkcie planu zadań przedstawionego przez Doktoranta. Pozwala on na generację zarysu kontaktujących się powierzchni chropowatych w oparciu o rozkład Gaussa, z uwzględnieniem chropowatości powierzchni.

Navni Verma również opracował analogiczny skrypt generujący zarys powierzchni chropowatych o losowo generowanym zarysie nierówności. Na tej podstawie, zestawiając współpracujące ze sobą powierzchnie w określonej odległości (tzw. odległości uśrednionych powierzchni), uwarunkowanej ciśnieniem nacisku i usuwając przecinające się fragmenty powierzchni, otrzymywany był obraz współpracujących powierzchni i w szczególności miejsc styku. Powstawały w ten sposób obszary współpracujących ciał stałych oraz płynu między nimi. Następnie obszary te były dyskretyzowane siatką objętości kontrolnych w geometriach 2D i 3D. Symulacje prowadzono dla zadanych temperatur na skrajnych powierzchniach, równoległych do uśrednionej powierzchni styku i na podstawie wyznaczonego strumienia ciepła określano kontaktową przewodność cieplną. W tym miejscu może nasuwać się pytanie, dlaczego szczegółowo opisuję metodologię badań przedstawioną w pracy Verma. Fragmenty skryptu napisanego w języku python, znajdującego się w dodatku A pracy Doktoranta, są bardzo podobne, miejscami identyczne, jak we wspomnianej rozprawie. W pracy doktorskiej Verma, niektóre zmienne, np.  $x4\_bottom$ ,  $y4\_bottom$ ,  $z4\_bottom$ ,  $ht1$ ,  $ht2$ , są identyczne ze zdefiniowanymi w recenzowanej pracy. Ponadto, szereg parametrów opisujących stałe i ich opisów jest takich samych. Skrypt w cytowanej pracy Verma jest znacznie bardziej rozbudowany i pozwala na określenie szeregu parametrów związanych z powierzchnią chropowatą (np. średnie nachylenie w przypadku 2D). Oczywiście, są różnice, na przykład Verma korzysta z komercyjnych bibliotek numerycznych, z których nie korzysta Doktorant.

Dodatkowo, można znaleźć szereg podobieństw w zakresie idei przedstawionych w recenzowanej pracy i w doktoracie Verma oraz szczegółowych rozważań, na przykład:

1) Tabela 3.1 w recenzowanej pracy i tabela 2.1 w pracy Verma, na których porównane są zależności kryterialne opisujące kontaktowe przewodności cieplne są praktycznie takie same. Różnica między wymienionymi tabelami jest w jednej literówce oraz w numerach odniesień do bibliografii, które siłą rzeczy muszą być różne. Zależności kryterialne w wymienionej tabeli wyrażone są w funkcji wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów odległości nierówności od płaszczyzny średniej (*equivalent root mean square roughness*) oraz wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów pochylenia nierówności powierzchni (*equivalent mean absolute slope*). Oba wymienione parametry były wprowadzone w pracy Doktoranta jedynie dla dwuwymiarowych modeli powierzchni chropowatych. W tabeli 3.1 występują natomiast parametry odnoszące się do geometrii trójwymiarowych. Autor nie podał źródła pochodzenia tej tabeli.

2) Analizy dotyczące wpływu konwekcji swobodnej i radiacji (rozdziały 5.3.1 i 5.3.2) są bardzo podobne. Przykładowo, w odniesieniu do modelu radiacji, w pracy Verma możemy przeczytać:

*„Since the operating conditions involve high temperatures, radiative heat transfer was included. Since the media under consideration are air (assumed to be 100% transparent) and metallic solids (assumed to be 100% opaque), the surface-to-surface (S2S) radiation transport model was used. The S2S model deterministically computes the radiative energy exchange between gray diffuse surfaces using view factors. In addition to being adequate for the application at hand, the S2S model was chosen since it is the most computationally efficient model.”*

Analogiczny fragment w recenzowanej pracy:

*“A high temperature of 1000[K] was considered hence the radiative heat flux was enhanced. Because the media under consideration were air (assumed to be 100 percent transparent) and metallic solids (assumed to be 100 percent opaque), the radiation transfer model for surface-to-surface (S2S) was used. Deterministically the S2S model measures the sharing of radiative energy between grey diffuse surfaces using view factors. As well as being ideal for the task at hand, the S2S model was selected because it is the most computationally effective model.”*

Widać więc wyraźnie, że Doktorant intensywnie używa parafrazy, co negatywnie wpływa na sens wypowiedzi, np. użycie frazy „*measures the sharing*” (model S2S nic nie mierzy) lub zamiana „*adequate*” na „*ideal*” osłabia zasadniczy sens wypowiedzi.

Analogiczne podobieństwa można znaleźć dla przypadku konwekcji swobodnej.

3) Tok rozumowania przedstawiony w rozdziale 5.5 recenzowanej pracy („*Probability of contact*”) i w rozdziale 2.3 pracy Verma jest bardzo zbliżony. Można tam znaleźć podobne rozważania dotyczące związku ilości kontaktów dwóch powierzchni ze średnią odległością między powierzchniami oraz chropowatością. Analogie można znaleźć również pomiędzy tabelami 5.5 i 5.7 w recenzowanej pracy oraz 2.2 w pracy Verma, dotyczącymi relacji pomiędzy ciśnieniem nacisku i odległością między powierzchniami średnimi a prawdopodobieństwem wystąpienia kontaktu i ilością kontaktów dla 1000 i 10 000 próbek. Podobne rozważania towarzyszące równaniom 5.3 i 5.4 w recenzowanej pracy oraz równania 2.8 w pracy Verma. Są też te same oznaczenia  $z_1$ ,  $z_2$  oznaczające lokalne wysokości nierówności, oznaczone przez zmienną  $z$ , choć odnoszą się do kierunku  $y$  w przyjętym układzie współrzędnych. Odnoszę wrażenie, że rozdział 5.5 recenzowanej pracy był mocno inspirowany wymienionym rozdziałem pracy Verma, ale jednocześnie bardzo ograniczonym pod względem objętości i treści.

4) W pracy Verma została określona korelacja pomiędzy wartością średniego nachylenia oraz bezwymiarową ilością kontaktów, będącą z kolei funkcją średniej odległości powierzchni oraz chropowatości powierzchni. W recenzowanej pracy została wyznaczona korelacja pomiędzy chropowatością powierzchni i średnią odległością a kontaktową przewodnością cieplną.

5) Poprosiłem Doktoranta o doprecyzowanie opisu algorytmu generacji powierzchni chropowatych. Ku mojemu wielkiemu zdziwieniu uzyskałem odpowiedź, która w znacznej części była tłumaczeniem doktoratu Verma. Poniżej przytaczam fragmenty odpowiedzi Doktoranta i analogiczne fragmenty doktoratu Verma:

(a) W odpowiedzi Doktoranta: „*Wysokości chropowatości ‘pobierano’ ze zdefiniowanego odchylenia standardowego Gaussa w przedziale  $(-6\sigma, +6\sigma)$ , gdzie  $\sigma$  to odchylenie standardowe. Rozkład wysokości został zdyskretyzowany na 10000 przedziałów (paramter  $N\_intervals$ ). Dla każdego przedziału, obliczono tzw. dystrybucję skumulowaną (cumulative distribution function, CDF) używając dystrybucji Gaussa.”*

W rozprawie doktorskiej Verma jest: „*The asperity heights were sampled from a Gaussian deviate. The height distribution ranging from -6 sigma to 6 sigma was discretized into 10,000 intervals. The cumulative distribution function,  $f$ , for each interval  $i$ , was computed using a Gaussian distribution as ...*”

(b) W odpowiedzi Doktoranta: „*Skumulowana funkcja rozkładu, reprezentuje wysokości powierzchni leżących na lub poniżej określonej wartości wysokości jako funkcji tej wysokości. Dlatego dla każdej chropowatości przypisano losową liczbę  $R$  (od zera do jeden) i sprawdzono następujące kryterium na dyskretyzowanym rozkładzie wysokości:  $f_i < R < f_{(i+1)}$ ”*

W rozprawie doktorskiej Verma jest: „*The cumulative distribution function,  $f$  represents the fraction of surface heights lying at or below a specific height as a function of that height. Therefore, for each asperity, a random number,  $R$ ,* between zero and unity was drawn, and the

*following criterion was checked over the discretized height distribution  $f_i < R_y < f_{i+1}$*

(c) W odpowiedzi Doktoranta: *“Jeśli powyższy warunek był spełniony, punkt na wysokości odpowiadającej wysokości  $i$ -tego przedziału, został stworzony w odniesieniu do wysokości średniej płaszczyzny arytmetycznej (mean arithmetic plane).”*

W rozprawie doktorskiej Verma jest: *“If the condition given by Eq. (2.10) is satisfied, a point at a height corresponding to the height of the  $i$ -th interval,  $y_i$ , is created with reference to the mean line”*.

Warto dodać, że w recenzowanej pracy nie ma żadnego odniesienia do doktoratu Verma ani do żadnego z jego artykułów.

Można więc zadać pytanie, w jakim stopniu praca doktorska Verma zainspirowała Doktoranta i w jakim stopniu z niej skorzystał? Moim zdaniem Doktorant obficie czerpał inspiracje z pracy doktorskiej Verma, zarówno na poziomie ogólnym, w zakresie metodologii prowadzenia badań, jak również na poziomie szczegółów, opracowania skryptu pozwalającego na generację kształtów stykających się powierzchni chropowatych, analizy zagadnień dodatkowych (konwekcja naturalna, radiacja) oraz prezentacji wyników. W konsekwencji muszę stwierdzić, że recenzowana praca nie zawiera oryginalnego rozwiązania problemu naukowego ani nie potwierdza umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

### **Ocena metod badawczych.**

Zastosowana metoda badań oparta jest na bezpośredniej symulacji numerycznej procesu wymiany ciepła w obrębie stykających się materiałów oraz warstwie płynu pomiędzy nimi. Przyjęta skala przestrzenna odpowiadająca rozmiarowi nierówności powierzchni chropowatej pozwala na uchwycenie wygenerowanego losowo kształtu nierówności obu powierzchni i określenie powierzchni styku. Metoda ta wymaga jednak fizykalnie wiarygodnego określenia kształtu powierzchni. W ramach pracy cel ten jest osiągnięty poprzez opracowanie generatora powierzchni, w postaci skryptu. Autor wygenerował 5 par powierzchni, dla każdej z badanych chropowatości. Powierzchnie te były zestawiane ze sobą, w odległościach odpowiadających założonym rozstawom uśrednionych powierzchni, w sposób jednoznaczny powiązanych z ciśnieniem nacisku. Jednak wbrew deklaracjom zamieszczonym w krótkim opisie skryptu (str. 105) oraz we wnioskach końcowych (str. 146), nie zostało uwzględnione średnie nachylenie powierzchni ani nie zostało one określone a-posteriori.

Dla tak określonych geometrii obejmujących oba obszary będące w kontakcie oraz warstwę płynu je rozdzielającego, Autor przeprowadził ich dyskretyzację przestrzenną. Wbrew zapowiedziom zawartym w streszczeniu oraz tematyce rozdziału czwartego, w całości poświęconego metodzie Krat Boltzmanna, Autor skorzystał przede wszystkim z oprogramowania komercyjnego opartego na metodzie objętości kontrolnych. W celu wykonania symulacji ustalonej wymiany ciepła obejmującej dyfuzyjny, konwekcyjny i radiacyjny mechanizm transportu ciepła, wykorzystany został komercyjny program HyperWorks AcuSolver opracowany przez firmę Altair Engineering. Obliczenia z wykorzystaniem metody Krat Boltzmanna zostały przeprowadzone jedynie dla pojedynczego przypadku, analizy przypadków nieustalonych konwekcji wymuszonej powietrza, przepływającego ze znaczną prędkością przez szczelinę między powierzchniami, w rozdziale 5.3.3.2. Wykorzystano w tym celu komercyjne oprogramowanie X-Flow 2020 będące częścią pakietu Dessault Systemes SIMULIA.

Jednym z celów pracy było sprawdzenie wpływu wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcji naturalnej na kontaktową przewodność cieplną. W przypadku konwekcji naturalnej odpowiedź jest oczywista, nie wymaga dogłębnych analiz. Analiza wpływu promieniowania była

przeprowadzona bardzo pobieżnie, jedynie dla jednej temperatury gorętszej powierzchni (1000 K) oraz dwóch różnic temperatury między powierzchniami próbek, 10 i 100 K. Autor podał jedynie udział procentowy promieniowania w całkowitym strumieniu ciepła, nie podając wartości kontaktowej przewodności cieplnej. Opis zagadnienia i jego analiza zajęła jedynie niecałą stronę maszynopisu. Autor nie odniósł również swoich wyników do danych literaturowych ani nie przeprowadził weryfikacji tego modelu.

W dalszej części Autor przeprowadził walidację modelu z wynikami eksperymentu Tariq'a [123] pomijając wpływ radiacji, dla przypadku kontaktu dwóch próbek miedzianych o chropowatościach w przedziale od 1,07 do 2,82  $\mu\text{m}$  i w zakresie ciśnienia kontaktowego od 0,6 do 15 MPa, odpowiadającego odległościom między uśrednionymi płaszczyznami od 33,81 (dla 0,6 MPa) do 21,43  $\mu\text{m}$  (dla 15 MPa) (tabela 5.5). W całym analizowanym zakresie Doktorant uzyskał bardzo dobrą zgodność obliczonej kontaktowej przewodności cieplnej z wynikami referencyjnymi. W oparciu o opracowany model przeprowadził symulacje dla pary kontaktowej stali MAR-M-247 w zakresie chropowatości powierzchni od 2 do 5  $\mu\text{m}$  oraz odległości między uśrednionymi płaszczyznami od 5 do 20  $\mu\text{m}$ , odpowiadającym ciśnieniom nacisku, odpowiednio 1 GPa i 0,6 MPa. Autor nie uzasadnił jednak, na jakiej podstawie określił odległości między płaszczyznami dla podanych granicznych ciśnień kontaktu. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant opracował, stosując aproksymację metodą najmniejszych kwadratów, zależność wartości kontaktowej przewodności cieplnej w funkcji odległości między płaszczyznami i chropowatości. W tym celu Autor wykorzystał gotowe biblioteki CurveFitting programu MATLAB.

Deklarowana metodologia badań przedstawiona w cytowanych wcześniej sześciu punktach jest zasadniczo poprawna i jednocześnie bardzo prosta. Jednak realizacja tych punktów budzi wiele wątpliwości. Również chaotyczna organizacja opisu badań zawartego w rozdziale 5 nie pomaga czytelnikowi zrozumieć intencji Autora. Przedstawione są błędne lub niepełne informacje na temat: geometrii, właściwości materiałowych i zastosowanych modeli. O zasadniczych założeniach, ilości próbek, itp., czytelnik dowiaduje się w dalszej części pracy, przy okazji omawiania innego przypadku. Analiza ilości spodziewanych punktów przecięć powierzchni w zależności od ilości wygenerowanych punktów oraz odległości uśrednionych płaszczyzn powinna być wykonana przed zasadniczymi obliczeniami. Weryfikacja i walidacja modelu powinny być przeprowadzone przed analizą parametryczną. Zasadnicze obliczenia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania opartego na metodzie objętości kontrolnych a nie Krat Boltzmanna. Jest więc widoczna zasadnicza niezgodność deklaracji zawartych we wstępie i w treści rozdziału czwartego, z rzeczywistym przebiegiem badań. Autor zamiast wyznaczyć kontaktową przewodność cieplną, zgodnie z deklaracją przedstawioną na początku rozdziału 5.3, określa współczynnik przejmowania ciepła w punkcie 5.3.3. Analiza wpływu transportu radiacyjnego jest bardzo powierzchowna i niepełna. Doktorant nie podał informacji dotyczących jakości siatki dyskretyzacji (skośność, ortogonalność, itp.) i modelu numerycznego (schematy całkowania w czasie, upwind, sprzężenia równań bilansu masy i pędu, itp.). Doktorant nie określił w rozdziale 5.6, na jakiej podstawie przyjął analizowany zakres odległości między powierzchniami średnimi oraz jaki był ich związek z ciśnieniami nacisku, dlatego uzyskany wielomian aproksymacyjny jest oparty na wątplych założeniach, niepopartych dowodem.

Reasumując, przedstawiony warsztat badawczy jest bardzo ubogi. Autor popełnia wiele błędów, przyjęte założenia są często nieuzasadnione lub przemilczane. Brakuje głębszej analizy badanych procesów oraz krytycyzmu wobec otrzymanych wyników. Na tej podstawie mogą



stwierdzić, że warsztat badawczy Doktoranta nie spełnia wymagań stawianych w pracach doktorskich.

### III. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wnikliwa lektura recenzowanej rozprawy budzi szereg uwag krytycznych. Przedstawię je w odniesieniu do poszczególnych rozdziałów, ze szczególnym uwzględnieniem części badawczej, czyli rozdziału 5. W pierwszej części przedstawię uwagi o większym znaczeniu merytorycznym.

#### Zasadnicze uwagi krytyczne

W części dotyczącej przeglądu literatury i stanu badań:

1. Cel pracy doktorskiej został sformułowany na początku wstępu. Istnieje zasadnicza rozbieżność pomiędzy wersjami polską i angielską, cytuję: *“Podstawowym celem doktoratu wdrożeniowego jest wypracowanie korelacji, która pozwoli na poprawne modelowanie wymiany ciepła w rejonie kontaktów pomiędzy wybranymi częściami turbinowego silnika lotniczego”* oraz *„The main goal of this implementation PhD is to develop calculation procedure that will allow correct modelling of heat exchange in the areas of contact between selected parts of turbine aircraft engines”*. Korelacja nie jest procedurą obliczeniową. Słowo „wypracowanie” nie określa sposobu osiągnięcia celu, który może być oparty na badaniach eksperymentalnych, numerycznych, teoretycznych.

2. We wstępie, w punkcie II, Doktorant zadeklarował, że w ramach pracy zostanie przeprowadzona identyfikacja *„wszystkich czynników wpływających na termiczny opór kontaktowy komponentów turbiny niskiego ciśnienia silnika lotniczego”* w celu identyfikacji *„mechanizmów wymiany ciepła, które powinny być uwzględnione w korelacji”*. Autor przeanalizował jedynie, w sposób bardzo pobieżny, wpływ radiacyjnej wymiany ciepła, dla dwóch przypadków, po czym zignorował ten wpływ w dalszej części analizy. Nie zostały uwzględnione żadne inne czynniki wpływające na TCC, dlatego opracowana na podstawie symulacji numerycznych korelacja w punkcie 5.6, nie wkracza poza standardowe opracowania.

3. We wstępie, w punkcie III, Doktorant deklaruje opracowanie, cytuję *„...nowatorskiego modelu numerycznego Lattice-Boltzmann (LBM) stworzonego w ramach omawianej pracy doktorskiej”*. Autor do obliczeń wykorzystał komercyjny program X-Flow 2020, nie opracował więc własnego kodu numerycznego. Trudno więc stwierdzić, że *„stworzono nowatorski model numeryczny”*. Ponadto, analizowane za pomocą metody Krat Boltzmann zagadnienie było marginalne, wyznaczony był współczynnik przejmowania ciepła na powierzchniach kontaktujących się materiałów a nie TCC. Ponadto, model ten nie był wykorzystany do określenia korelacji w punkcie 5.6.

4. W recenzowanej pracy brakuje rzetelnego, krytycznego przeglądu literatury odnoszącej się do aktualnych badań naukowych związanych z modelowaniem numerycznym termicznego oporu kontaktowego w mezoskali (tzn. w skali nierówności powierzchni), uwzględniających w szczególności analizę wpływu nacisku, chropowatości, parametrów geometrycznych chropowatości czy podwyższonej temperatury. Szczątkowego przeglądu można doszukać się w krótkim podrozdziale 3.3.2, w którym są odniesienia do 3 artykułów ([39]-[41]), ale to stanowczo za mało. Zadałem Doktorantowi pytanie, dlaczego w pracy nie zawarł przeglądu aktualnej literatury związanej z problematyką modelowania numerycznego. Otrzymałem odpowiedź, cytuję *„Przyjęty koncept pracy doktorskiej nie zakładał odniesienia metod FV czy LB do stanu wiedzy w świecie, ponieważ punktem referencyjnym miał być sposób modelowania*

wymiany ciepła w kontakcie, stosowany obecnie przez firmę MTU Aero Engines”. Dowiedziałem się też, że praca miała być pierwotnie utajniona, lecz cytuję „została finalnie pozbawiona rozdziału dotyczącego aktualnie stosowanych metod modelowania wymiany ciepła w kontakcie przez firmę MTU Aero Engines, ze względu na międzynarodowe restrykcje prawne”. W efekcie, praca nie zawiera ani przeglądu aktualnej literatury, ani odniesienia do metod modelowania oporu kontaktowego stosowanych w firmie MTU Aero Engines.

5. Element nowości pracy doktorskiej nie został określony. Uwaga ta związana jest z poprzednią, tzn. brakiem krytycznego przeglądu literatury. Na tej podstawie można wykazać obszary, które wymagają dodatkowych badań i w ten sposób określić zakres pracy.

6. We wstępie Doktorant wymienił trzy pary połączeń występujących w silniku lotniczym, będących jego przedmiotem zainteresowania w prezentowanej pracy doktorskiej, są to połączenie łopatki turbiny z gniazdem na dysku, obudowy niskiego ciśnienia i obudowy wydechu turbiny oraz połączenia zewnętrznej platformy łopatki kierowniczej z zewnętrzną obudową turbiny niskiego ciśnienia. W rozdziale 5 (tabela 5.1) wymienione zostały trzy pary połączeń obejmujących różne stopy (PW1484 / PW1113, WASPALOY / H46 oraz INCO718 / MAR-M-247). W dalszej części rozdziału 5 Autor przedstawił wyniki obliczeń wyłącznie dla kontaktu nadstopu niklu MAR-M-247 z prawdopodobnie tym samym materiałem. Analizowany przypadek nie odpowiada więc żadnemu z podanych w tabeli 5.1. Podane zostały tylko jego właściwości (błędne!) w tabeli 5.2. Na rys. 5.6 zamieszczony został lakoniczny opis, że rozkład temperatury dotyczy kontaktu powierzchni chropowatych stalowej ze stalową, rozdzielonych warstwą powietrza („*steel-air-steel interface model*”). Reasumując, w pracy nie pojawiła się analiza współpracy żadnej z deklarowanych trzech par połączeń. Nie zostały również podane właściwości materiałowe pozostałych stopów.

W dalszej części przedstawię uwagi krytyczne dotyczące części badawczej, tj. rozdziału 5.

7. W podrozdziale 5.1 zatytuowanym „*Stochastic surface reconstruction*” Autor w bardzo lakoniczny sposób przedstawia algorytm generacji powierzchni chropowatych, który jest istotnym elementem pracy doktorskiej. Kod programu zamieszczony w dodatku, powinien być tylko uzupełnieniem obszernego opisu. Taka sytuacja ma miejsce w cytowanej pracy doktorskiej Verma. Czytelnik nie może dowiedzieć się na podstawie tekstu dysertacji, jak generowane są punkty, jaka jest ich ilość, które współrzędne są zaburzane (czy tylko w kierunku prostopadłym do płaszczyzny podstawowej czy też w kierunkach równoległych), czy wyznaczane są lub narzucane inne parametry opisujące powierzchnię chropowatą (np. średnie nachylenie), itp. Zadałem to pytanie Doktorantowi i uzyskałem zdawkowy opis. O innych uwagach dotyczących tego skryptu i podobieństwach z skrypcem w pracy Verma, wspominałem już wcześniej.

W podrozdziale 5.2 zatytuowanym „*Thermal Analysis*” przedstawiona jest analiza wpływu temperatury powierzchni będących w kontakcie na kontaktową przewodność cieplną. Przedstawiona jest również analiza wrażliwości siatki. Przedstawione poniżej uwagi dotyczą tego podrozdziału.

8. Na początku rozdziału 5.2 Autor przedstawia metodologię wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła na powierzchniach kontaktu. Wyznaczany jest on na podstawie szerokości warstwy przyściennej, dla przepływu turbulენტnego. Biorąc pod uwagę, że odległość pomiędzy uśrednionymi powierzchniami jest rzędu 5 – 15  $\mu\text{m}$ , nasuwa się pytanie, jaki jest cel wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła na powierzchniach styku? Warto podkreślić, że w rozdziale 5.2 wyznaczana była kontaktowa przewodność cieplna. Na zadane przeze mnie pytanie, na jakiej

podstawie przepływ został zidentyfikowany jako turbulentny, Uzyskałem odpowiedź, cytuję „Przepływ turbulentny przez kanał definiuje się na podstawie liczby Reynoldsa, której wartość nie została pokazana.” Ponowiłem pytanie, i otrzymałem odpowiedź, z której wynikało, że prędkość w szczelinie została zadana na poziomie 240 m/s (niefizycznym), natomiast wymiar charakterystyczny jaki został podany miał wartość około 2,7 mm, czyli o 2 rzędy większą niż nominalna szerokość szczeliny. Nawet największy z wymiarów mikro-kanału (0.1 x 0.05 x 0.05 mm) jest znacznie mniejszy od przyjętej wartości. Przyjęta wartość jest więc błędna. W dalszej części rozdziału 5.2 nie ma mowy o niezerowej prędkości powietrza przepływającego pomiędzy stykającymi się materiałami. Przypadek ten jest analizowany dopiero w rozdziale 5.3.

9. Właściwości materiałowe stali MAR-M-247 przedstawione w tabeli 5.2 są błędne. W zakresie temperatur 600 - 1000 K współczynnik przewodzenia ciepła zmienia się, wg Doktoranta, w zakresie od 300 do 550 W/(mK) a ciepło właściwe zmienia się w zakresie od 20 do 32 J/(kgK). W odpowiedzi na zadane pytanie Doktorant przesłał poprawne wartości obu parametrów. Zastanawiające jest źródło tych pomyłek. Nie wynikają one z przesunięcia przecinka lub pomyłki w systemie jednostek. Czy te błędne właściwości materiałowe zostały wykorzystane w symulacjach, których wyniki są zamieszczone w pracy?

10. Autor nie podał, jakie są wymiary wygenerowanych próbek oraz czy są takie same w przypadku każdej losowo wygenerowanej geometrii powierzchni współpracujących. Co prawda na rys. 5.4 przedstawione są współrzędne, ale na ich podstawie trudno odczytać rzeczywiste wymiary badanego obszaru. Ponadto, nie zostały podane jednostki skali długości na osiach.

11. Odległości powierzchni ograniczających obszar, równoległych do płaszczyzny x-z od skrajnych nierówności wydają się być zbyt małe, wynoszą one 1  $\mu\text{m}$ . Powoduje to znaczące niejednorodności rozkładu gęstości strumienia ciepła, widoczne np. na rys. 5.7, na powierzchniach na których zadane są izotermiczne warunki brzegowe. Autor nie przedstawił analizy wpływu grubości warstw litego materiału na wartość kontaktowej przewodności cieplnej. Z drugiej strony zależność 5.1 zupełnie ignoruje występowanie tych obszarów. Nie został określony błąd wynikający z tego założenia.

12. Nie jest również jasna procedura wyznaczania uskoku temperatury  $\Delta T$  (zależność 5.1). Autor twierdzi, cytując: „Next, temperature drop  $\Delta T$  across the interface was measured by reading nodal values in close proximity of the contact region”. Jest to bardzo ogólnikowa informacja. Jak jest zdefiniowana „bliska odległość od strefy kontaktu”? Nie wiadomo w jakiej odległości od obu powierzchni te temperatury zostały wyznaczone.

W podrozdziale 5.3 „Heat transfer modes intensity” analizowany jest wpływ radiacji, konwekcji naturalnej i konwekcji wymuszonej na kontaktową przewodność cieplną (TCC). Kolejne uwagi dotyczą tego punktu.

13. W bardzo krótkim podrozdziale 5.3.1 analizowany jest wpływ radiacji. Autor nie podał dla jakich materiałów prowadzi symulacje, jakie są odległości uśrednionych powierzchni, itd. Zastosowany model transportu radiacyjnego Surface-to-Surface jest uzasadniony. Autor powinien jednak uwzględnić rzeczywistą emisyjność powierzchni. Analizowane były tylko 2 przypadki, odpowiadające temperaturze gorętszej powierzchni 1000 K i różnicy temperatur pomiędzy powierzchniami 10 i 100 K. Autor w jednym krótkim akapicie podał tylko procentowy udział radiacyjnego strumienia radiacyjnego dla tych dwóch przypadków, natomiast nie przedstawił, wbrew zapowiedziom z początku rozdziału 5.3, wpływu transportu radiacyjnego na kontaktową przewodność cieplną.

14. W kolejnym, bardzo krótkim podrozdziale 5.3.2 pod tytułem „Free Convection” Doktorant krótko przeanalizował wpływ konwekcji naturalnej w obszarach o średnicy 10  $\mu\text{m}$ . Autor oszacował wartość liczby Grashoffa na poziomie  $10^{-5}$  i słusznie stwierdził, że w tym przypadku efekt konwekcji naturalnej można zaniedbać.

15. Wbrew zapowiedziom na początku rozdziału 5.3, które brzmią, cytując: „*One of the main aims of the work was to check the influence of heat modes other than conduction such as radiation, natural and forced convection on thermal contact resistance (conductance)*”, Autor nie wyznaczył w żadnym przypadku analizowanym w podrozdziale 5.3 kontaktowej przewodności cieplnej. Obliczone natomiast były współczynniki przejmowania ciepła („*heat transfer coefficient*”) na powierzchniach kontaktujących się materiałów (rys. 5.11, 5.15). Nasuwa się też pytanie, jaki jest sens wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła w kontekście kontaktowej przewodności cieplnej (TCC)?

16. Wzięte są pod uwagę dwa modele obliczeniowe, oparte na metodzie objętości kontrolnych (punkt 5.3.3.1) oraz na metodzie krat Boltzmanna (punkt 5.3.3.2). W tym celu wykorzystane są dwa pakiety komercyjne, odpowiednio AcuSolver i X-Flow 2020. W punkcie 5.3.3.2 Autor stwierdza: „*The identical flow case with exactly same boundary conditions like in Chapter 5.3.3.1 were used to run the simulations using particle-based kinetic solver XFlow*”. Również dobór modelu turbulencji w programie AcuSolve (punkt 5.3.3.1) argumentowany był tym, że jest on dostępny również w programie XFlow. Można więc wnioskować, że w obu punktach analizowany jest ten sam przypadek za pomocą różnych metod obliczeniowych. Wątpliwości dotyczące obszaru rzeczywistego, zgodności obszarów w obu przypadkach pojawiają się nieco dalej, przy lekturze punktu 5.3.3.2. O ile w punkcie 5.3.3.1, poświęconym standardowej analizie CFD w oparciu o metodę objętości kontrolnych, przedstawiony jest na rys. 5.10 obszar obejmujący wyłącznie dwa materiały stykające się ze sobą oraz obszar pomiędzy nimi, wypełniony powietrzem. Zamieszczony w punkcie 5.3.3.2 obraz obszaru, w postaci zarysu powierzchni stykających się (rys. 5.14) sugeruje, że jest on wycinkiem większej objętości. W punkcie 5.3.3.2 Autor pisze, cytując: „*A precisely identical geometry to that used in the classic CFD approach was introduced into the virtual wind tunnel used by XFlow environment. This virtual wind tunnel consisted of a rectangular domain with dimensions of (0.1 x 0.05 x 0.05) [mm]. A far-field velocity boundary condition was used at the inlet, upper and lower boundaries, and zero gage pressure was applied at the outlet. Periodic boundary condition was set on the side walls.*”. Oznacza to, że analizowana kostka z punktu 5.3.3.1, o nieznanym wymiarach, wstawiona jest w mikro-tunel aerodynamiczny o wymiarach 0,1 x 0,05 x 0,05 mm i obszar obliczeniowy obejmuje również to otoczenie. Trudno zgodzić się z określeniem „*far-field velocity*”, odległość jest mniejsza niż 0,1 mm. Nie jest znane również położenie kostki w mikro-tunelu. Na tej podstawie można wnioskować, że w wymienionych punktach (rys. 5.10 i 5.14) analizowane są odmienne obszary lub co najmniej jeden z nich został przedstawiony nieprawidłowo.

17. Wątpliwości budzą narzucone warunki brzegowe. Rysunek 5.10 w punkcie 5.3.3.1 sugeruje, że powietrze napływa z prędkością 240 m/s do szczeliny o średniej szerokości 5  $\mu\text{m}$ . Lakoniczny opis geometrii i warunków brzegowych w punkcie 5.3.3.2 sugeruje, że taka prędkość zadana jest również na wlocie do mikro-kanalu, tj. w odległości nie większej niż 0,1 mm, zakładając, że kierunek przepływu jest zgodny z najdłuższą krawędzią obszaru obliczeniowego. Wg dodatkowych informacji udzielonych przez Doktoranta, w ramach odpowiedzi na moje pytania, wartość tej prędkości odpowiada, cytując „*standardom przyjętym w firmie MTU*”. Być może w kanale aerodynamicznym o średnicy rzędu 1,0 m powietrze może płynąć z taką prędkością. Jednak nie można jej przenosić na bezpośrednie sąsiedztwo szczeliny o wymiarach

5  $\mu\text{m}$ . Przepływ jest lepki, istnieje hydrodynamiczna warstwa przyścienna. Doktorant zdaje się nie zdawać sobie z tego sprawy. Przyjmując, że badany obszar ma długość 0,1 mm, również zadawanie takiej wartości prędkości jest błędne. Reasumując, analiza przeprowadzona w punktach 5.3.3 jest błędna.

18. Abstrahując od sensowności wyznaczania współczynników przyjmowania ciepła w kontekście powierzchni chropowatych materiałów będących w kontakcie. W przypadku zastosowanego modelu opartego na metodzie objętości kontrolnych (punkt 5.3.3.1) rozkłady współczynnika przyjmowania ciepła na powierzchniach materiałów w kontakcie, przedstawione na rys. 5.11 wydają się być rozsądne, największe wartości są w miejscach, gdzie spodziewane są największe wartości prędkości. Podana jest też skala, największe wartości sięgają 575  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Wartość średnia współczynnika została określona na poziomie 90,4  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ . W kolejnym punkcie (5.3.3.2) podany jest analogiczny rozkład tego współczynnika wyznaczony na podstawie metody Krat Boltzmann (rys. 5.15). W tym przypadku rozkład ten jest zupełnie inny, bardzo nieregularny, wręcz losowy. Wartości maksymalne można znaleźć w najgłębszych „dolinach” nierówności, czyli tam, gdzie powinny być najmniejsze. Autor nie dołączył do rysunku paska skali współczynnika przyjmowania ciepła. Mimo tego deklaruje, że jego wartość średnia jest równa 92,7  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ , co daje około 2,5% rozbieżność wyników pomiędzy dwiema metodami. Zaskakująco dobra zgodność przy tak różnych rozkładach. Wytlumaczenie dziwnego rozkładu współczynnika przyjmowania ciepła na rys. 5.15 jest kuriozalne, cytując: *„The differences in the distribution of the heat transfer coefficient on the surface between the classical CFD and those obtained with the LBM are directly derived from the nature of each of the methods, i.e. the static tetrahedral mesh in which the energy equation is solved, and the more "chaotic" propagation and mutual collisions of air molecules. The increase in local values is directly linked to the impingement on given surfaces of these particles.”*. Oznaczałoby to, że wszystkie rozwiązania uzyskane z wykorzystaniem metody Krat Boltzmann będą chaotyczne, nieprzystające do rozwiązań uzyskanych za pomocą innych metod CFD ani do rzeczywistości. Redukowałoby to metodę Krat Boltzmann do roli generatora kolorowych obrazków.

19. Nawiązując jeszcze do geometrii układu z punktu 5.3.3, Autor nie uzasadnił, dlaczego analizował obszar styku materiałów, o przekroju poprzecznym mniejszym niż 0,05 x 0,05 mm, umieszczony w strumieniu powietrza poruszającego się z prędkością 240 m/s. Jak się ma geometria takiego układu do rzeczywistych, wymienionych na początku rozdziału 5? Szerokość kanału jest zbliżona do grubości ludzkiego włosa.

20. W rozdziale 5.4 Autor przedstawia wyniki walidacji modelu obliczeniowego w wynikami eksperymentu Tariq [123]. Doktorant uzyskuje bardzo dobrą zgodność wyników symulacji ze zmierzonymi wartościami. W zakresie analizowanych chropowatości błąd nie przekracza 8,1%, jest to wartość znacznie mniejsza niż całkowity błąd pomiarowy oszacowany przez Tariq’a, równy 24,3%. Z kolei odchylenie standardowe wyznaczone przez doktoranta, na podstawie analizy numerycznej przeprowadzonej dla 5 próbek (tabela 5.3) wynosiło 13%. Jak można uzasadnić tak dobrą zgodność wyników? Dla ilu próbek (geometrii) zostały wykonane obliczenia? Jakie było odchylenie standardowe wyników dla tego przypadku?

Dla porównania, w artykule (P.G. Siddappa, A. Tariq, Metal and dielectric contact heat transfer and enhancement study using finite element approach, Heat and Mass Transfer (2020) 56:2893–2908) przeprowadzono obliczenia dla przypadku kontaktu stali, odzwierciedlające jeden z eksperymentów Tariq’a [123]. Uzyskany średni błąd wynosił 27%, przy odchyleniu standardowym wyników 9%.

21. Wyniki walidacji (rozdział 5.4) wykazały między innymi, że dla ustalonej wartości ciśnienia kontaktu wyraźnie maleje wartość kontaktowej przewodności cieplnej (TCC) ze wzrostem chropowatości (rys. 5.20), co znajduje uzasadnienie w wynikach innych autorów (Tariq) i znakomitej zgodności, o której wspominałem w poprzednim punkcie. W rozdziale 5.6 przeprowadzono szereg symulacji dla przypadku kontaktu powierzchni próbek wykonanych stali MAR-M-247, w celu uzyskania korelacji określającej kontaktową przewodność cieplną w funkcji chropowatości i średniej odległości powierzchni. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.22, gdzie na osi poziomej przedstawiono odległość między powierzchniami, natomiast parametrem była chropowatość. W tym przypadku dla ustalonej odległości między powierzchniami, czyli przy ustalonym ciśnieniu, wraz ze wzrostem chropowatości rosła kontaktowa przewodność cieplna. Jest to sprzeczne z wynikami przedstawionymi w rozdziale 5.4 (walidacja). Konieczne jest wyjaśnienie tego faktu. Zadałem Doktorantowi pytanie związane z tym faktem, ale nie uzyskałem satysfakcjonującej odpowiedzi.

22. Na podstawie kwestionowanych przeze mnie wyników przedstawionych na wykresie 5.22, Doktorant opracował korelację wyrażającą kontaktową przewodność cieplną w funkcji odległości między uśrednionymi powierzchniami (*separation distance*) i chropowatości. Wyniki zostały przedstawione w postaci powierzchni 3D (rys. 5.23), wykresu konturowego (rys. 5.24) i zależności funkcyjnej (wzór 5.6 i tabela 5.8). Wg mnie, jakość aproksymacji nie jest zadowalająca z uwagi na występujące нефизyczne lokalne maksimum w zakresie niskich chropowatości i odległości w zakresie 15 – 20, prawdopodobnie mikrometrów, jednostki nie podano, widoczne na rys. 5.23. Jest to artefakt, który umknął uwadze Doktoranta, wynikający z niewłaściwie dobranego rzędu wielomianu.

23. W rozdziałach 5.2 i 5.6 analizowany jest przypadek kontaktu dwóch powierzchni próbek wykonanych ze stali MAR-M-247. W przypadku analizy z punktu 5.2, dla temperatury 600K, odległości 15  $\mu\text{m}$  i chropowatości 5  $\mu\text{m}$  średnia wartość wyznaczonej kontaktowej przewodności cieplnej jest równa 185,27  $\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ , przy odchyleniu standardowym 13,75% (tabela 5.3) oraz zakresie wyznaczonych wartości zawierającym się w przedziale od 156,77 do 217,69  $\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$  (na podstawie dodatkowych wyjaśnień Doktoranta). Wyznaczona dla tych samych parametrów wartość, w punkcie 5.6, odczytana z wykresu 5.22, jest równa około 270  $\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ . Skąd taka rozbieżność?

24. W rozdziale 5.4 model jest walidowany dla przypadku kontaktu powierzchni próbek wykonanych z miedzi, dla zakresu ciśnień kontaktowych od 0,6 do 15 MPa, co odpowiada zakresowi odległości między uśrednionymi powierzchniami od 33,81 do 21,43  $\mu\text{m}$ . Autor określił wartość tych odległości korzystając z modelu Singhala [124], wyniki zamieścił w tabeli 5.5, natomiast nie przedstawił tego modelu. W tym miejscu Doktorant zaznaczył, że jest świadomy, że wykracza poza zakres ciśnień uwzględniony przez Singhala, czyli 6 MPa oraz że aproksymacja ta jest ryzykowana i może być źródłem znacznych błędów (cyt. „... *the extrapolation of data to measurement points from the Tariq et. al. it is very risky and burdened with a high value of uncertainty ...*”). W rozdziale 5.6 analizowany jest zakres odległości średnich powierzchni od 5 do 20  $\mu\text{m}$ , co odpowiada, zdaniem Autora, zakresowi ciśnień od 0,6 do 1 GPa. Autor nie wyjaśnił na jakiej podstawie powiązał odległości z ciśnieniami kontaktowymi. Autor nie uzasadnił również, dlaczego przyjął taki a nie inny zakres odległości uśrednionych powierzchni.

Dodatkowe uwagi merytoryczne, mniejszej wagi:

1. Zależność opisująca strumień ciepła (wzór 3.3) jest błędna. Ma miejsce równoległe połączenie oporów cieplnych a nie szeregowe. Po zwróceniu Doktorantowi uwagi, pierwsza odpowiedź była zdawkowa, po ponowieniu prosby otrzymałem właściwą zależność.

2. W odniesieniu do wzoru umieszczonego na rys. 5.7. Po wstawieniu do tej zależności średnich gęstości strumieni ciepła wyznaczonych dla górnej i dolnej powierzchni, wynik będzie praktycznie równy 0.0. Strumień ciepła dochodzący do górnej powierzchni jest dodatni, natomiast dochodzący do dolnej powierzchni jest ujemny, oba bilansują się.

3. Stwierdzenie Autora, że symulacje wykonał na komputerze (stacji roboczej) wyposażonej w 8GB pamięci RAM („*All analyses were carried out on a workstation with the Intel® Core™ i7-6700HQ 2.60GHz processor and 8GB RAM*”) jest nierealne, biorąc pod uwagę, że największa z nieregularnych siatek dyskretyzacji zawierała ponad 9 milionów czworobocznych objętości kontrolnych.

4. Autor stwierdza (str. 111), cytując: „*AcuSolve is characterised by high accuracy resulting from the use of equal order interpolation for all variables. For all governing equations, this results in second-order spatial precision*”. Stwierdzenie to jest błędne. Dokładność obliczeń nie wynika z zastosowania równych rzędów interpolacji.

5. Autor stwierdza (str. 111), cytując: „*The emphasis on precision further improves the solver's speed by allowing the use of much less mesh to achieve higher levels of accuracy than is needed to obtain comparable results using other market available CFD solvers*”. Na jakiej podstawie?

#### IV. Uwagi dotyczące redakcji pracy

W treści pracy zauważyłem ogromną liczbę błędów gramatycznych, stylistycznych, błędnych kolokacji, mieszanie formy osobowej i bezosobowej w jednym zdaniu, itd. - są widoczne na każdej stronie. Jest ich tak dużo, że czynią pracę w niektórych miejscach niezrozumiałą. Nie jestem w stanie wypisać ich wszystkich. W pracy pojawia się podwojona numeracja rysunków i wzorów. Niektóre rysunki są niejasne, brakuje opisów osi, dołączonych skal do wykresów, nie wnoszą też istotnej informacji do treści pracy.

1. W recenzowanej pracy doktorskiej występują zapożyczenia z innych prac, artykułów i monografii.

- a. Zauważyłem istotne zapożyczenia idei i niektórych fragmentów tekstu z pracy Verma. Omówiłem je wcześniej, więc w tym miejscu nie będę ich powtarzał.
- b. Rozdziały od 2.1 do 2.3 włącznie (str. 24-36) odzwierciedlają zakres monografii [46] od strony 22 do str. 32. Wg mnie parafrazowanie monografii nie jest najlepszym sposobem na budowanie objętości pracy.
- c. Drugi akapit na stronie 111 jest zapożyczony ze strony internetowej: <https://www.indielec.com/acusolve-cms-4-51-413/>  
Opis źródłowy, zamieszczony na stronie internetowej, zawiera wiele niewłaściwych sformułowań („*less mesh*”), sformułowań bez pokrycia i błędów merytorycznych. Fragment ten ma charakter ulotki reklamującej wspomniany program CFD. Błędy te powielił Autor rozprawy i dorzucił nowe, wprowadzając parafrazy, np. zastosowanie dopełniacza saksońskiego w odniesieniu do oprogramowania.

2. Szeroki opis podstaw teoretycznych metody Krat Boltzmana ma charakter podręcznikowy. Praca doktorska nie jest miejscem na tego typu przeglądy, które nic nie wnoszą do dalszej analizy, tym bardziej, gdy Autor nie opracowuje własnego programu symulacyjnego, ale wykorzystuje oprogramowanie komercyjne. Autor powinien skupić się raczej na zastosowaniach metody Krat Boltzmana lub innych metod symulacji numerycznej, do rozwiązania zagadnień będących przedmiotem pracy doktorskiej. Ponadto, tematyka rozważana w rozdziale 4, rozmija się z wykorzystaną w dalszej części metodą objętości kontrolnych.
3. Sposób prezentacji modelu, w szczególności geometrii, warunków brzegowych, siatki dyskretyzacji, procesów transportowych, zależności domykających, wyników i ich dyskusji. Wiele informacji (wymiary geometrii, warunki brzegowe) nie zostało podanych. Inne informacje należy wywnioskować z rysunków, podane są też wiele stron dalej, przy innej okazji.
4. Chaotyczna jest również organizacja rozdziału 5. Po krótkim wprowadzeniu, przedstawieniu par kontaktowych i bardzo krótkim opisie procedury generacji powierzchni chropowatych, omówiona jest dyskretyzacja przestrzenna metodą objętości kontrolnych. Na tej podstawie Autor przeprowadza szereg analiz w następującej kolejności:
  - a. określenie wpływu temperatury pracy kontaktu na kontaktową przewodność cieplną;
  - b. analiza wrażliwości siatki dla wybranego przypadku;
  - c. wpływ konwekcji swobodnej i radiacji na TCC;
  - d. analiza wpływu konwekcji wymuszonej na TCC – symulacje z zastosowaniem metody objętości kontrolnych oraz Krat Boltzmana dla nominalnie tych samych przypadków. Autor wyznacza jednak średni współczynnik przejmowania ciepła zamiast deklarowanego TCC;
  - e. walidacja dla przypadku kontaktu dwóch próbek miedzianych, odpowiadającą eksperymentowi Tariq'a [123].
  - f. analiza wpływu ilości kontaktów dwóch losowo wygenerowanych powierzchni w zależności od ilości wygenerowanych punktów i odległości między powierzchniami. Na tej podstawie Autor określa wytyczne dotyczące wymaganej ilości punktów potrzebnych do generacji powierzchni chropowatych, zapewniających odpowiednią ilość punktów kontaktu, w funkcji odległości powierzchni uśrednionych.
  - g. seria obliczeń mająca na celu wyznaczenie wielomianu aproksymującego TCC w funkcji chropowatości i odległości powierzchni uśrednionych.

Oczywistym jest, że analiza przeprowadzona w punkcie f powinna poprzedzać weryfikację i walidację modelu (pkt. b i e), po czym powinny nastąpić pozostałe badania.

Pozostałe uwagi dotyczą błędów edycyjnych. Z uwagi na wielość tego typu błędów, nie wszystkie zostały wymienione.

5. Jak jest źródło rysunku 2.1?
6. Niektóre tabele przedstawiane są jako rysunki, np. Rys. 4.2, 4.5, 4.8,
7. Dwa rysunki są oznaczone jako 4.15.
8. Pomiędzy wzorami 4.35 a 4.38 są wzory o numerach 4.7 i 4.8. Podobnie, pomiędzy 4.45 and 4.48 są wzory 4.9 i 4.10.



9. W rozdziale 5.2 (str. 112) Autor wyjaśnia, dlaczego jego wybór padł na oprogramowanie X-Flow, wykorzystujące metodę Krat Boltzmanna. Stwierdzenie, że rzeczony oprogramowanie posiada „przyjazny interfejs graficzny” oraz nie wymaga większego wysiłku od użytkownika, w przeciwieństwie do np. OpenLB, nie jest najrzeczniejszym argumentem w kontekście prac na rozprawę doktorską.
10. W rozdziale 5, podana jest informacja, że różnica temperatur zadanych na górnej i dolnej powierzchni obszaru obliczeniowego jest równa 10K oraz że temperatura powierzchni jest równa jednej z wartości od 600K do 1000K co 100K. Autor nie podał jednak informacji czy wymienione temperatury zadane są na górnej (cieplejszej) czy dolnej powierzchni. Co prawda, tę informację można wywnioskować z rys. 5.6, ale powinna być podana w sposób jawny.
11. W rozdziale 5.1 Doktorant przedstawił trzy pary połączeń występujących w silniku lotniczym (rys. 5.1 – 5.3), a w tabeli 5.1 zestawienia współpracujących materiałów i chropowatości powierzchni. Nie zostały określone znaczenia parametrów takich jak grubość (thickness) i długość (length) w tabeli 5.1, w odniesieniu do geometrii na rys. 5.1 – 5.3.
12. Na rysunkach 5.4 i 5.5, nie zostały przedstawione opisy osi ani jednostki.
13. Autor nie podał informacji jakie są wymiary obszaru obliczeniowego (rozdział 5.2, str. 112).
14. Na rys. 5.7 nie zostały podane osie, ich opisy ani skala wartości gęstości strumieni ciepła.
15. Kilka stron dalej (str. 115), Autor pisze, cytując: „The derived thermal contact conductance from steady-state computations for all five ensembles were collected and presented in Figure 5.8”. Można domyślać się, że zostało wygenerowanych 5 losowych geometrii o zadanych chropowatości oraz odległości średnich powierzchni profili chropowatości. Wcześniej Doktorant zdążył przedstawić wyznaczone numerycznie rozkłady temperatury. Również w tym miejscu nie zostały podane informacje dotyczące rozmiarów badanego obszaru. Można spodziewać się, że wymiary próbek będą różniły się z względu na losowy charakter generowanych powierzchni, i uwarunkowanie położenia powierzchni granicznych, na których zadane są warunki brzegowe. Na zadane pytanie dotyczące wymienionych geometrii i uzyskanych wyników, Doktorant przesłał tabelkę zawierającą wyznaczone numerycznie kontaktowe przewodności cieplne uzyskane dla poszczególnych geometrii i temperatur próbek. Ta informacja powinna być zawarta w pracy.
16. Na rysunku 5.13 została przedstawiona, w bardzo uproszczony sposób, siatka dyskretyzacji opisana jako: „*Computing domain divided into five octree levels*”, nie został jednak pokazany obszar obliczeniowy ani zarys kontaktujących się ze sobą materiałów.
17. Jakie jest miano TCC na rys. 5.23 i 5.24?
18. Na rysunku 5.25 na osi pionowej nie ma TCC.
19. Autor nie odwołuje się do pozycji w bibliografii o numerach od 128 do 154.
20. Bibliografia została przygotowana niestarannie. Autor stosuje różne style bibliograficzne, np. por. [144] i [150].

W pracy występuje wiele niezrozumiałych lub błędnych stwierdzeń i sformułowań, jedynie niewielka ich część jest przedstawiona poniżej:

(str. 4) “...ich różne spektra wariacji...”

(str. 4) “...rozpoznanie najistotniejszych czynników mających wpływ na wymianę ciepła w obszarze kontaktu oraz redukcję tych marginalnych.”

- (str. 5) „...zjawiska związane z transportem temperatury, takie jak tarcie czy dyfuzja.”  
(str. 9) „What is more, the molecular model is able to ...”  
(str. 26) “The height information are added ...”  
(str. 44) “This lends itself to the heat flow distribution ...”  
(str. 64) “but it should be borne in mind”  
(str. 111) „in second-order spatial precision”  
(str. 112) „to check the general result scatter”  
(str. 112) “to keep the mesh possible to comprehend within the calculations” – niezrozumiałe  
(str. 115) “heat travelled from the top to bottom only”  
(str. 119) “The highly loaded situation was considered to decide whether radiation through ...”  
(str. 126) “Montecarlo”  
(str. 129) „aero-thermal”

## V. Wniosek końcowy

Przedmiot rozprawy dotyczy ciekawego i aktualnego problemu naukowo-technicznego o istotnej wartości praktycznej, jednak ogólnikowo sformułowany cel, brak krytycznego przeglądu literatury, istotne zapożyczenia z pracy doktorskiej Narmi Verma poddające w wątpliwość oryginalność pracy, chaotyczny i zdawkowy opis badań, przemilczenia oraz założenia niepoparte krytyczną analizą, liczne błędy językowe i merytoryczne świadczą o braku umiejętności rozwiązania problemu naukowego oraz wykazują braki w podstawowej wiedzy Doktoranta w zakresie teorii i metod numerycznych mechaniki płynów i wymiany ciepła. W konsekwencji powyższych ocen, **ogólna ocena rozprawy doktorskiej jest negatywna.**

W świetle powyższych wniosków, zgodnie z właściwymi przepisami, określonymi w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz.U. 2017 poz. 1789) oraz ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1669 z późn. zm.), stwierdzam, że recenzowana rozprawa **nie spełnia** kryteriów stawianych pracom doktorskim i wnoszę do Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej o **niedopuszczenie** mgr. inż. Bartosza Zacharko do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Dr hab. inż. Mirosław Seredyński, prof. PW