

Streszczenie

Dążenie do bardziej kompaktowych i wydajnych konstrukcji silników lotniczych wymaga dogłębnego zrozumienia złożonych zjawisk aerodynamicznych w komponentach sprężarek. W miarę wzrostu prędkości obrotowej silnika oraz podwyższania stopnia sprężu jego komponenty narażone są na większe obciążenia, które mogą prowadzić do spadku jego wydajności. Tego typu niekorzystne efekty, zwłaszcza zwiększone straty wynikające z interakcji fali uderzeniowej z warstwą przyścienną (SBLI), są szczególnie wyraźne w przypadku warstwy laminarnej. Takie warunki są typowe dla pracy silnika na znacznych wysokościach, gdzie liczba Reynoldsa osiąga niskie wartości. Oddziaływanie fali uderzeniowej z laminarną warstwą przyścienną w tego typu warunkach często prowadzi do jej oderwania, skutkującego zawężeniem pola przepływu, a także niestabilnościami, czego efektem może być obniżenie sprawności całego silnika. Aby ograniczyć wyżej wymienione efekty, korzystne jest wywołanie przejścia laminarno-turbulentnego jeszcze przed oddziaływaniem warstwy z falą uderzeniową. Tego typu rezultat można uzyskać między innymi poprzez kontrolowaną modyfikację powierzchni łopatki sprężarki.

Niniejsza praca skupia się na badaniach eksperymentalnych dotyczących wpływu chropowatości powierzchni na oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na powierzchni ssącej modelu łopatki sprężarki transonicznej. Badania zostały przeprowadzone na modelu liniowej palisady sprężarkowej w tunelu transonicznym, gdzie odzwierciedlono typowe warunki pracy w stopniu sprężarkowym obejmujące ujemny gradient ciśnienia, przy którym występują sprzyjające warunki do oderwania przepływu wywołanego SBLI. W ramach kampanii pomiarowej przygotowano 5 wersji modelu profilu łopatki sprężarkowej o zróżnicowanej chropowatości oraz przeprowadzono szczegółowe pomiary optyczne powierzchni. By uchwycić złożoną fizykę przepływu w badaniach wykorzystano szereg zaawansowanych, nieinwazyjnych technik pomiarowych, takich jak wizualizacja Schlierena przy użyciu kamery szybko klatkowej, śledzenie fali uderzeniowej przy wykorzystywaniu techniki Computer Vision, a także pomiary warstwy przyściennej za pomocą Laserowej Anemometrii Dopplerowskiej (LDA).

Istotną obserwacją było określenie relacji pomiędzy korzystnymi efektami aerodynamicznymi a stabilnością przepływu. Uśrednione dane z pomiarów ciśnienia wskazywały, iż interakcja fali uderzeniowej z warstwą przyścienną jest typu laminarnego ze względu na stabilne średnie położenie fali. Jednakże w przypadku wariantu z największą chropowatością zaobserwowano powstawanie silnie trójwymiarowych turbulentnych struktur wirowych zarówno w strefie interakcji warstwy z falą uderzeniową, jak i w strefie oderwania. Turbulentny charakter warstwy miał dwójaki efekt. Korzystnym zjawiskiem było wzmocnienie procesów mieszania, co prowadziło do zwiększenia jej energii kinetycznej. Pozwoliło to na redukcję strefy oderwania o 7,95% a także ograniczenie o 19,4% grubości straty pędu w obszarze krawędzi spływowej. Jako negatywny efekt można uznać istotny wzrost oscylacji fali uderzeniowej potwierdzony w ramach ilościowej analizy polegającej na śledzeniu jej chwilowego położenia. Profil łopatki z najwyższym poziomem chropowatości powierzchni wykazał wzrost amplitudy oscylacji fali uderzeniowej o 40,58% w odniesieniu do przypadku bazowego. Tego typu niestabilność można powiązać z mechanizmem akustycznego sprzężenia zwrotnego o wysokiej częstotliwości, co skutkowało oscylacjami, w dużej mierze zdominowanymi przez wielkoskalowy ruch o niskiej częstotliwości pochodzący ze strefy oderwania.

Niniejsze badania wzbogacają wiedzę na temat operacyjnych granic stosowania chropowatości powierzchni łopatek sprężarkowych w kontekście ich właściwości aerodynamicznych. Wnioski mogą przynieść istotne wskazówki przy opracowywaniu strategii projektowych ukierunkowanych na optymalizację przepływów transonicznych przez stopnie sprężarkowe.