

## Streszczenie

### *Intensyfikacja wymiany ciepła i redukcja strat przepływu w kanale chłodzącym łopatkę turbinowej*

Chłodzenie stopni turbinowych w silnikach lotniczych jest niezwykle istotnym elementem pracy całego zespołu. Pierwszy stopień zlokalizowany tuż za wylotem z komory spalania jest narażony na działanie w skrajnie trudnych warunkach. Materiał, z którego wykonane są łopatkę turbinowe ma kontakt z gazami przekraczającymi o około 700-900 K temperaturę jego topnienia, zatem niezbędne jest stosowanie wysoko wydajnego układu chłodzenia łopatek kierowniczych i wirnikowych. Ponadto niejednorodny rozkład obciążenia termicznego łopatkę oraz jej geometria wymusza stosowanie zróżnicowanej technologii chłodzenia wewnętrznego. Chłodzenie krawędzi natarcia od jej wewnętrznej strony jest realizowane za pomocą strugi. Z kolei krawędź spływowa charakteryzuje się kanałami o niewielkiej wysokości, a znacznej szerokości. W pozostałych rejonach stosowane są promieniowe kanały o zróżnicowanym współczynniku przekroju (stosunku szerokości kanału do wysokości), w formie jednoprzęściowej bądź w układzie serpentynowym. Kanały chłodzące najczęściej wyposażone są w turbulizatory przepływu w formie żeber umieszczane na dwóch przeciwległych ścianach znajdujących się w pobliżu strony ssącej oraz ciśnieniowej łopatkę. Dzięki temu w kanale dochodzi do powstawania struktur wirowych intensyfikujących wymianę ciepła pomiędzy chłodniejszym powietrzem w kanale, a gorącą ścianą.

W niniejszej pracy analizie poddano ożebrowane kanały wyposażone w turbulizatory przepływu w postaci żeber umieszczone na dolnej oraz górnej ścianie i ustawione pod kątem  $45^{\circ}$  wobec głównego kierunku przepływu. Prezentowane wyniki zostały zrealizowane w badaniach eksperymentalnych oraz numerycznych. Analizowane były kanały o 3 różnych wysokościach, o tej samej szerokości ze współczynnikami przekroju  $AR=1:2$ ,  $AR=1:4$  i  $AR=1:6$ . Badania wykonano dla dwóch liczb Reynoldsa 63 000 oraz 120 000. W ramach badań eksperymentalnych wykonano szereg pomiarów aerodynamicznych oraz wymiany ciepła, tj.: pomiar parametrów spiętrzenia na wlocie do kanału; pomiary ciśnienia statycznego wzdłuż badanego kanału; pomiary ciśnienia statycznego, spiętrzenia, prędkości na wylocie oraz pomiary wymiany ciepła metodą TLC przy użyciu ciekłych kryształów. Unikalną cechą

wyróżniającą te badania są żebra oraz kanał z cechami geometrycznymi dokładnie odpowiadającymi tym, jakie stosowane są w układach chłodzenia rzeczywistych silników lotniczych. Ponadto w ramach przeprowadzonych badań analizowano kanał o współczynniku przekroju  $AR=1:6$ , który nie jest opisywany w dostępnej literaturze, a może być używany w wysoko obciążonych łopatkach turbinowych o zwiększonej grubości.

Charakterystyczną cechą przepływu przez badane kanały są wzdłużne wiry główne powstałe w wyniku interakcji powietrza przepływającego przez kanał z ożebrowaną ścianą dolną i górną oraz zasilające je lokalne struktury wirowe tworzące się w okolicach żeber i spływające w kierunku środka kanału wzdłuż ściany bocznej. W zależności od wzajemnego ustawienia żeber na dwóch przeciwległych ścianach uzyskuje się współbieżne lub przeciwbieżne wiry główne, które w pewnych warunkach mogą mieć wpływ na uzyskiwane straty w przepływie oraz wymianę ciepła.

W ramach przebadanych kanałów wykazano, że szerokość kanału jest czynnikiem determinującym wielkość wirów głównych. Zwiększanie wysokości kanału przy zachowaniu tej samej liczby Reynoldsa skutkuje natomiast zmniejszeniem prędkości przepływu głównego, co z kolei prowadzi do obniżenia wirowości głównych struktur wirowych. W kanale  $AR=1:4$  można zaobserwować stopniowy rozwój głównych struktur wirowych wzdłuż kanału, gdzie w płaszczyźnie wylotowej wiry wypełniają już niemalże cały przekrój poprzeczny kanału. Stosunkowo podobną strukturę można zaobserwować w kanale  $AR=1:6$ , natomiast ze względu na jego wysokość (przy takiej samej szerokości) główne struktury wirowe w płaszczyźnie wylotowej zajmują około  $2/3$  przekroju poprzecznego, a resztę stanowi niezaburzony przepływ wzdłużny. Jest to kanał, w którym notowane są najmniejsze straty w przepływie oraz wymiana ciepła. Najniższy przebadany kanał ( $AR=1:2$ ) charakteryzuje się względnie podobną strukturą przepływu do tej obserwowanej w wyższych kanałach lecz z pewnymi istotnymi różnicami. Przy ustawieniu równoległym żeber w dalszym ciągu obserwowane są dwie główne wzdłużne struktury wirowe, natomiast w mniej więcej w połowie długości kanału wiry główne są już na tyle rozwinięte, że wypełniają całą powierzchnię przekroju poprzecznego, co prowadzi do wymuszonej interakcji między nimi. W ustawieniu krzyżowym żeber, w połowie długości ożebrowanego kanału na skutek wymuszonej interakcji współbieżnych wirów głównych dochodzi do połączenia tych struktur w jeden wir, czego efektem jest obniżenie strat w przepływie, jak również niewielkie zmniejszenie wymiany ciepła względem ustawienia równoległego żeber.

Analiza dostępnej literatury przeprowadzona w ramach niniejszej pracy wykazała, że braku jest dostępnych badań opisujących w szczegółowy sposób strukturę przepływu i wymianę

ciepła w kanałach o  $AR < 1:4$ . Dodatkowo należy zaznaczyć, że dostępne publikacje nie obejmują systematycznych danych zawierających szczegółowe omówienie relacji strat w przepływie oraz jego struktury w zestawieniu z wymianą ciepła w kanałach o takich samych cechach geometrycznych jakie stosowane są w rzeczywistych kanałach chłodzących. Ponadto wiele badań opiera się na analizie uproszczonych geometrii.

Niniejsza praca skupia się na usprawnieniu fragmentu systemu chłodzenia poprzez wpływ na straty przepływu przy zachowaniu podobnego poziomu wymiany ciepła. Postawiony cel został osiągnięty w przypadku najniższego kanału o proporcjach 1:2, w którym dla zmniejszenia strat zastosowano modyfikację ustawienia żeber z równoległych na krzyżowe, aby zamiast dwóch głównych wirów powstał jeden dominujący wir główny. Jak pokazują prezentowane w pracy badania takie podejście w przypadku wyższych kanałów nie daje podobnych efektów. Zgodnie z zasadą zachowania energii, różnica entalpii strumienia pomiędzy wlotem, a wylotem powinna odpowiadać energii strumienia ciepła i procesów dyssypacyjnych (w tym tarcia). Stąd też przy braku wyraźnej zmiany struktury przepływu trudno osiągnąć zmniejszenie strat, a gdy uzyskujemy redukcję oporów, również towarzyszy temu spadek wymiany ciepła. Praca prezentuje nowe wyniki rozwijające wiedzę na temat szeroko pojętej wymiany ciepła oraz strat w przepływie w wewnętrznych kanałach chłodzących łopatki wirnikowej turbiny gazowej.