

# Projektowanie i analiza MES kształtowych dysz chłodziwa do szlifowania zamka łopatki silnika lotniczego, wykonywanych techniką przyrostową

Designing and FEM analysis of profile coolant nozzles for aircraft blade root grinding, made by using additive technologies

ŁUKASZ ŻYŁKA  
KAMIL GRENDYSA\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.604

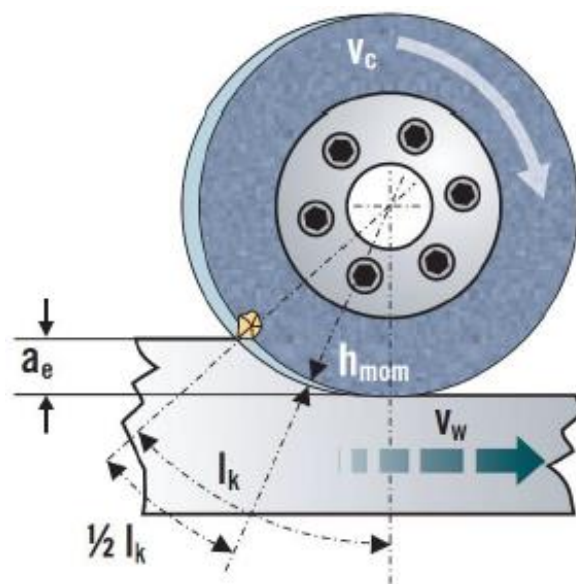
Zamki łopatek silników lotniczych obrabiane są w większości przypadków poprzez szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym CFG. Podczas jego wytwarzania kluczowym jest zachowanie dokładności obróbki, jak również jakości powierzchni szlifowanej. W tym celu stosuje się kształtowe dysze chłodziwa, które zapewniają optymalne warunki chłodzenia na całej długości profilu zamka. Przeanalizowano i zoptymalizowano konstrukcję dysz kształtowych oraz przeprowadzono obliczenia MES. SŁOWA KLUCZOWE: MES, szlifowanie CFG, zamek łopatki,

*Aircraft blade dovetails are, in most cases, machined by Creep Feed Grinding (CFG). During its production, it is essential to cover machining precision and also quality of the grinding surface. For this purpose, profile coolant nozzles are used, to provide optimum conditions of cooling over the entire length of fir-tree profile. The analysis, optimization of design and FEM calculations were made. KEYWORDS: FEM, CFG grinding, blade*

Materiały stosowane do produkcji łopatki turbiny niskiego ciśnienia muszą spełniać szczególne wymagania ze względu na charakter pracy silnika lotniczego jak i ogromne obciążenia temperaturowe sięgające do 1100 °C panujące na wylocie turbiny. Podstawowymi wymaganiami materiałowymi są m.in.: bardzo wysoka wytrzymałość i sztywność w wysokich temperaturach, żarowytrzymałość (szczególnie odporność na pełzanie), żaroodporność (odporność na korozję gazową w podwyższonych temperaturach) oraz odporność na erozję (agresywność środowiska naturalnego). Powyższe wymagania spełniane są przez tak zwane super stopy („superalloys”) – materiały trudno obrabialne, lecz posiadające odpowiednie właściwości fizyczne jak i chemiczne. Jednym z takich materiałów jest stop typu Inconel [9, 11].

Inconel to ogólna nazwa stopów niklu (Ni od 45% do 80%) zawierających chrom (Cr od 15% do 29%), molibden (Mo od 3% do 26%), kobalt (Co od 14% do 20%) oraz żelazo (Fe od 1% do 22%). Główną cechą stopów Inconelu jest wysoka odporność na utlenianie oraz korozję. Po nagraniu, dzięki pasywacji tworzy grubą i trwałą ochronną warstwę tlenku zapobiegającą erodowaniu powierzchni łopatki. Jest również łatwo spawalny, dzięki czemu łopatki mogą zostać poddane napawaniu miejscowemu w celu dodatkowej ochrony neralgicznych miejsc. Wytrzymałość na wysoką temperaturę uzyskiwana jest dzięki wzmocnieniu roztworu stałego lub utwardzaniu wydzieleniowemu. Ze względu trudność obróbki tego materiału jedną z wiodących metod obróbki zamków łopatek jest szlifowanie [2, 12].

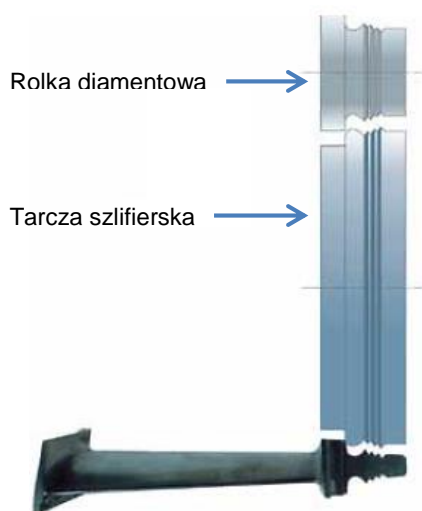
Szlifowanie należy do obróbki ostrzem o nieokreślonej geometrii i polega na mikro skrawaniu materiału obrabianego przez ziarna ściernic związane ze spoiwem. Narzędziem jest ściernica, która wykonuje ruch główny obrotowy, a ruch posuwowy wykonuje zazwyczaj przedmiot obrabiany (może to być również sama ściernica). Głównym sposobem szlifowania zamków łopatek jest szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym (CFG), charakteryzujące się dużymi wartościami głębokości szlifowania  $a_e$ , które mogą osiągać wartości od 2 do 5 mm. Przez tak duże wartości, proces ten można porównać wydajnościowo do procesu frezowania [12]. Jednak aby uzyskać takie wyniki należy używać bardzo małych wartości posuwu, który nazywa się posuwem pełzającym  $v_w$  (rys. 1) [12].



Rys. 1. Schemat szlifowania CFG [2]

Do szlifowania zamków używa się ściernic kształtowych, których profil uzyskać można dzięki zastosowaniu rolek diamentowych o bardzo dużej dokładności. Ściernica jest tu narzędziem pośrednim pomiędzy przedmiotem obrabianym, a obciążaczem rolkowym (rys. 2). Gotowy profil zamka odzwierciedlany jest na ściernicy, a ta z kolei odwzorowuje go na obrabianej części.

\* dr inż. Łukasz Żyłka (zylka@prz.edu.pl) - Politechnika Rzeszowska, mgr inż. Kamil Grendysa (kamilgrendysa@gmail.com)



Rys. 2. Wizualizacja połączenia elementów podczas obróbki [3]

### Rola chłodzenia w procesie szlifowania

Zastosowanie chłodzenia odgrywa bardzo ważną rolę w optymalizacji procesu szlifowania, w wyniku znacznego zwiększenia wymaganej energii w celu usunięcia dużych nadadtków [1, 8]. Powoduje to zwiększone zapotrzebowanie na element chłodząco-smarujący. Ciepło, które powstaje w strefie szlifowania ma olbrzymi wpływ na obróbkę części, a przede wszystkim na stan warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów. Nadmierne natężenie ciepła uwalnianego w procesie szlifowania i wnikańcającego w przedmiot obrabiany może powodować uszkodzenie powierzchni przedmiotu w postaci mikropęknięć, zmianę mikrotwardości oraz przypalenia szlifierskie związane z przemianami fazowymi w materiale [6].

W celu obniżenia temperatury w strefie szlifowania stosuje się płyny chłodząco-smarujące. Są to najczęściej wodne roztwory emulsji olejowych: naturalnych, półsyntetycznych lub syntetycznych. Ich rola w procesie szlifowania polega na:

- chłodzeniu ściernicy,
- chłodzeniu przedmiotu obrabianego,
- smarowaniu strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym,
- oczyszczanie strefy obróbki z resztek ściernicy i materiału bazowego tzw. szlamu poszlifierskiego,
- zabezpieczeniu antykorozyjnego warstwy wierzchniej,
- oczyszczanie porów ściernicy z wiórów w celu zachowania jej właściwości skrawających i uniknięcia tzw. zalepienia ściernicy.

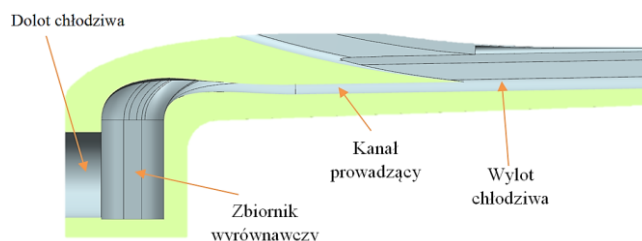
Podstawowym zadaniem wszystkich dysz jest równomierny rozkład smarowania całej strefy szlifowania. Dysza wykonuje to zadania poprzez skupienie i skierowanie strumienia środka smarującego oraz przyspieszenie strumienia cieczy [3, 5, 7]. Badania wykazują bardzo korzystny wpływ na wydajność chłodzenia, właśnie dzięki skupieniu środka smarującego oraz zminimalizowaniu turbulencji przepływu przez zastosowanie ostrych krawędzi na wylocie dyszy [4, 10]. Złożoność zarysu profilu tarczy szlifierskiej (zamka łopatk), powoduje konieczność stosowania kształtowych dysz chłodzących (rys. 3) w celu doprowadzania chłodziwa do każdego punktu na całej długości szlifowanego profilu. Cechą charakterystyczną tych dysz jest wylot w postaci szczeliny o stałym, bądź nieregularnym przekroju.



Rys. 3. Dysza kształtowa - szczelinowa

W budowie dyszy można rozróżnić kilka charakterystycznych elementów konstrukcyjnych (rys. 4):

- dolot chłodziwa - kanał, przez który chłodziwo dostaje się do dyszy,
- zbiornik wyrównawczy – zbiornik, który ma za zadanie wyrównanie ciśnienia w całej objętości, tak aby chłodziwo wpadając do kanału prowadzącego miało identyczną prędkość,
- kanał prowadzący – ma zapewnić dodatkową stabilizację przepływu chłodziwa,
- wylot – kanał, którym chłodziwo wydostaje się z dyszy.

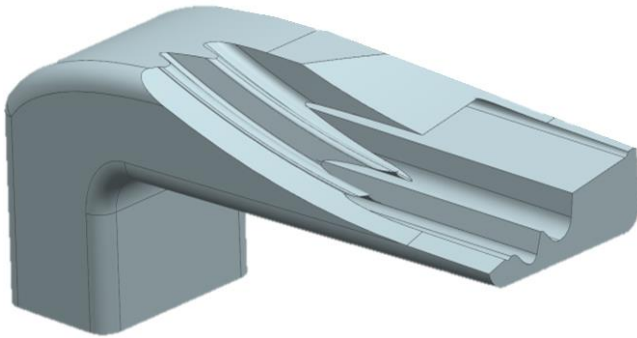


Rys. 4. Przekrój dyszy kształtowej

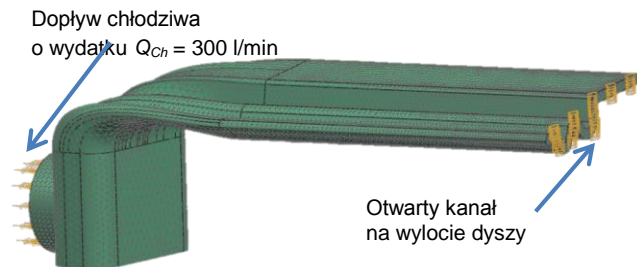
### Warunki badań

Badania symulacyjne przepływu przeprowadzono w systemie *Siemens NX* w wersji 9.0 wykonując obliczenia z użyciem solvera *Nastran* w module *Advanced Simulation*. Do obliczeń przyjęto, że do dyszy dopływa ciecz o wydatku  $Q_{ch} = 300$  l/min. Badania symulacyjne przeprowadzono, przyjmując dla uproszczenia płyn o właściwościach wody. Przeprowadzono analizę wpływu ukształtowania geometrycznego wewnętrznych elementów konstrukcyjnych dyszy kształtowej szczelinowej: zbiornika wyrównawczego oraz dolotu chłodziwa. Porównano ze sobą 2 identyczne warianty dyszy o różnej szerokości wylotu chłodziwa (2 mm oraz 1 mm) oraz 7 wariacji dyszy o szczelinie 1 mm [6].

W celu przeprowadzenia analizy przepływu, z modeli dysz kształtowych (rys. 5) wydzielono układ kanału przepływowego (rys. 6). Następnie dla analizowanych modeli została wygenerowana siatka elementów skończonych czworobocznych o wielkości 1 mm dla powierzchni wlotowej oraz wylotowej dyszy, a dla powierzchni zewnętrznych oplatających cały kanał – 2 mm.



Rys. 5. Widok koncepcyjny dyszy kształtowej

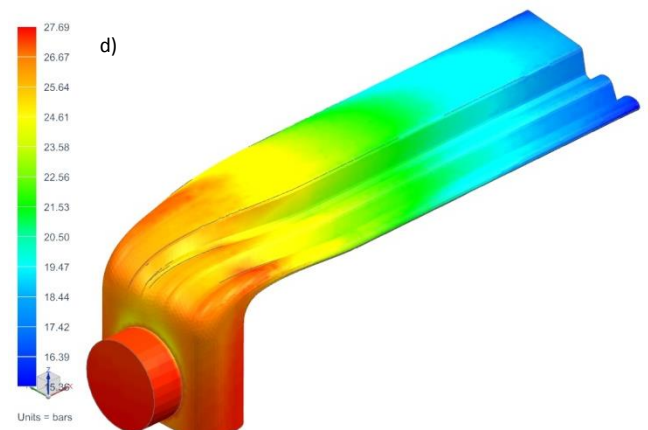
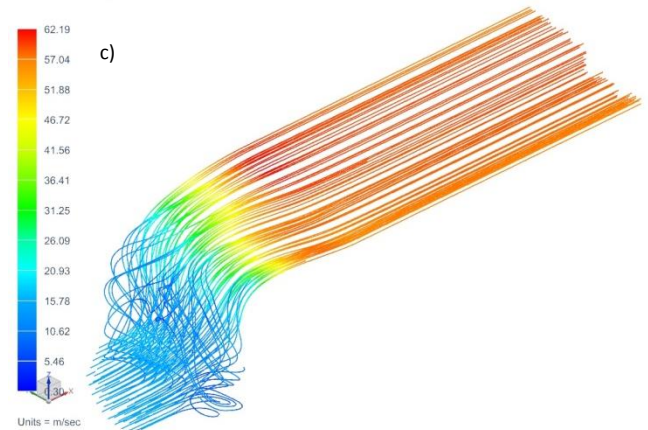
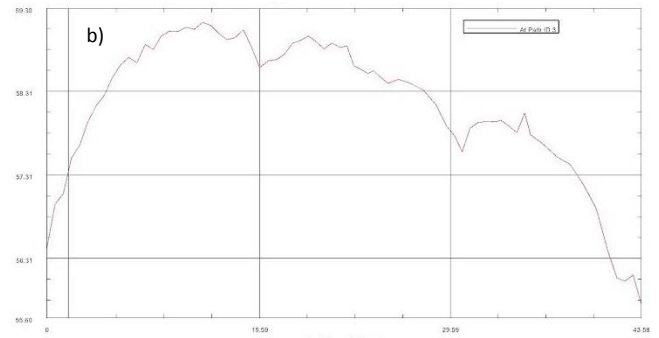


Rys. 6. Widok koncepcyjny wydzielonego układu kanału przepływowego wraz z siatką elementów skończonych

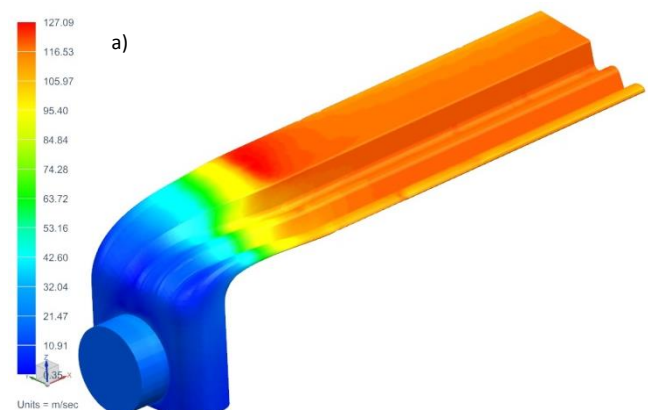
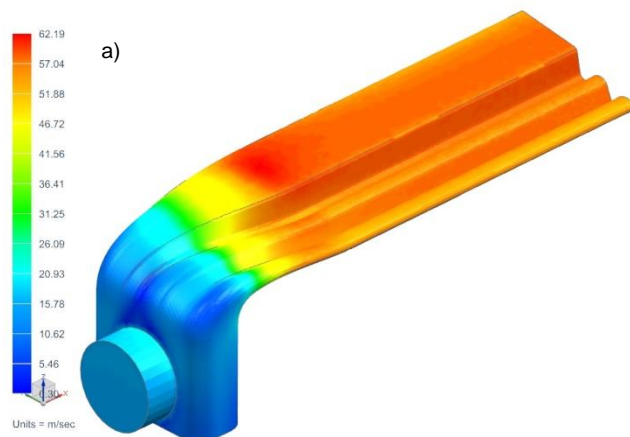
Koncepcja konstrukcji dyszy kształtowej zakłada skomplikowane kształty kanałów wewnętrznych poprzez wykonanie dyszy na bazie technik przyrostowych. Metoda przyrostowa polega najczęściej na drukowaniu 3D gotowych modeli. Użykuje się pewną dowolność kształtu dyszy bez ograniczania się do konwencjonalnych metod obróbki. Najczęściej dysze drukowane są metodą selektywnego spiekania laserem (SLS - Selective Laser Sintering) proszku poliamidowego lub metali. Następnie dysza poddawana jest dodatkowej obróbce powierzchniowej, mającej zapewnić dodatkowe właściwości, np.: lakierowanie, nakładanie powłok galwanicznych, uszczelnianie.

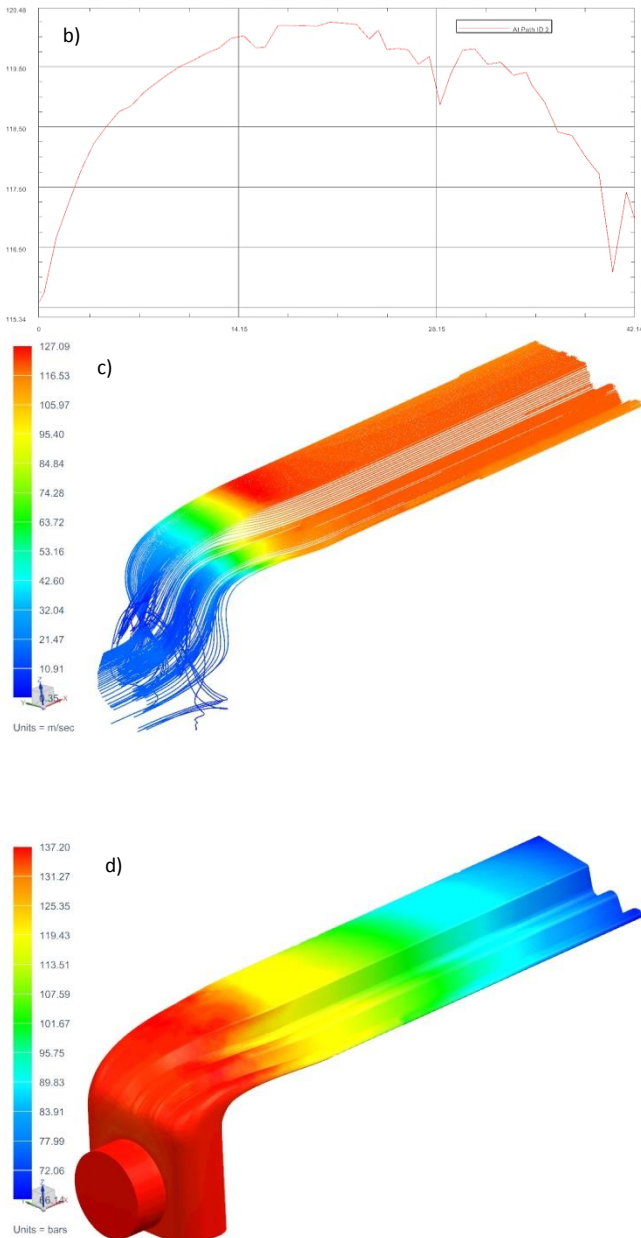
### Wyniki badań symulacyjnych dyszy kształtowej

Pierwszym nasuwającym się wnioskiem jest wpływ pola powierzchni wylotu dyszy do uzyskiwanych prędkości. Przy wypływie strumienia chłodziwa z kanału o szerokości 1 mm (rys. 7a) występuje dwukrotnie większa prędkość wypływu niż przy kanale o szerokości 2 mm (rys. 8a). Jest to związane z ogólną powierzchnią kanału wylotowego – przy 2 razy większej powierzchni wylotu prędkość chłodziwa maleje dwukrotnie.



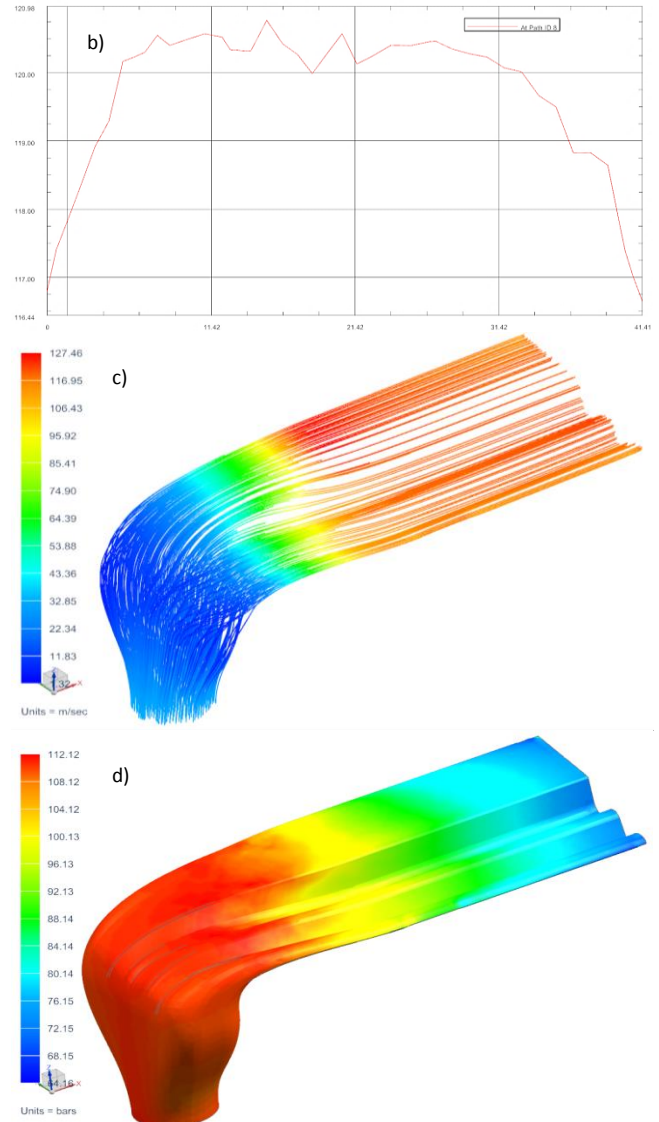
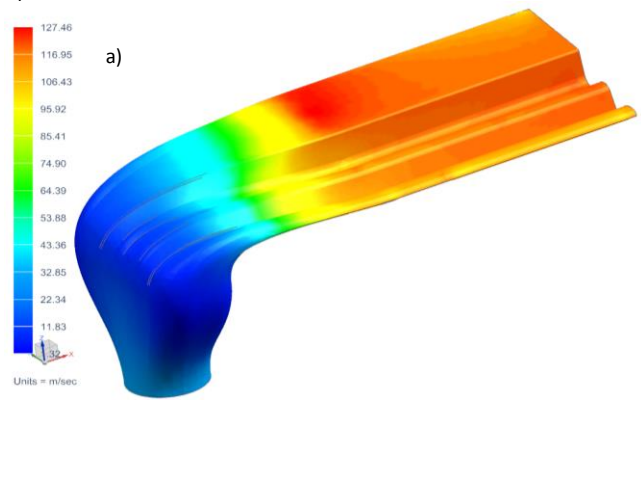
Rys. 7. Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 2 mm: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia





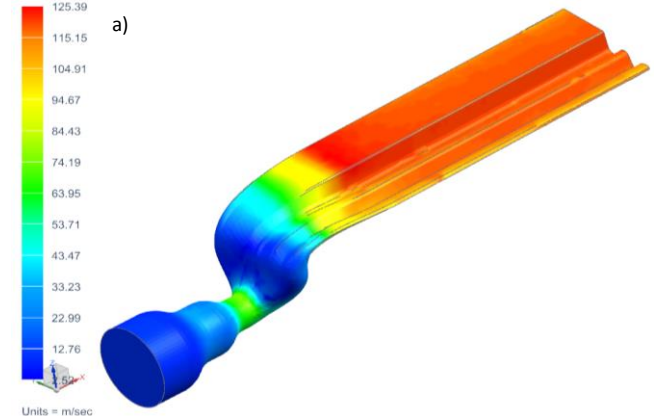
Rys. 8. Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 1 mm – wariacja I: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia

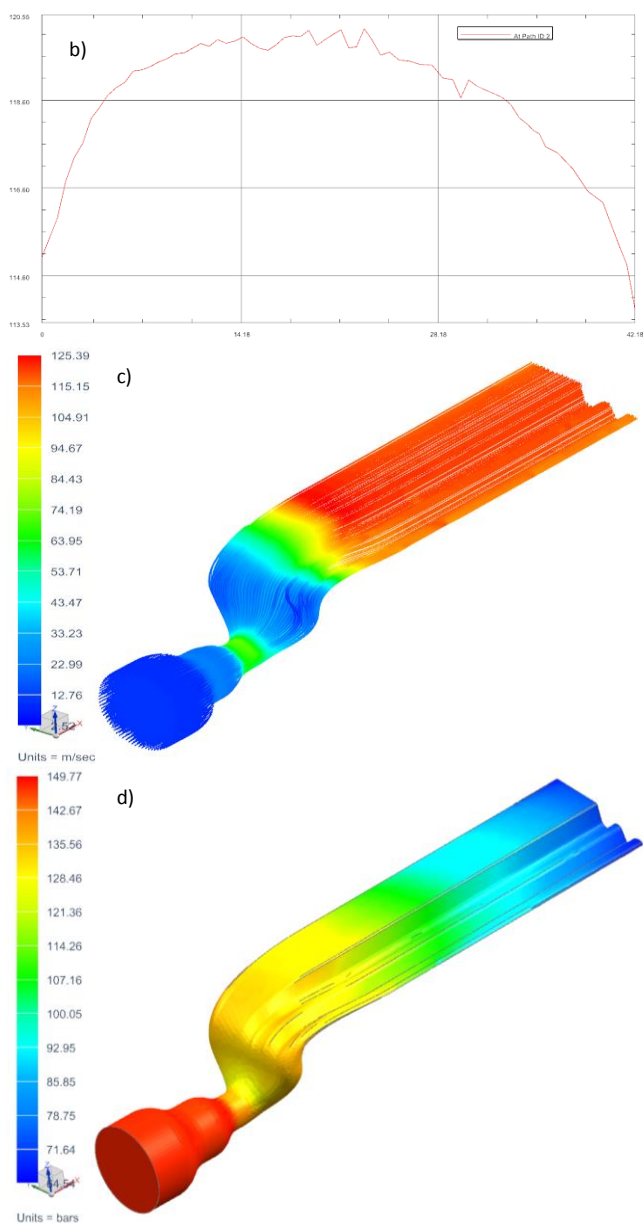
Najkorzystniejszą wariacją dyszy okazała się wariacja II. Uzyskano najlepszy rozkład i średnią wartość prędkości (rys. 9).



Rys. 9 Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 1 mm – wariacja II: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia

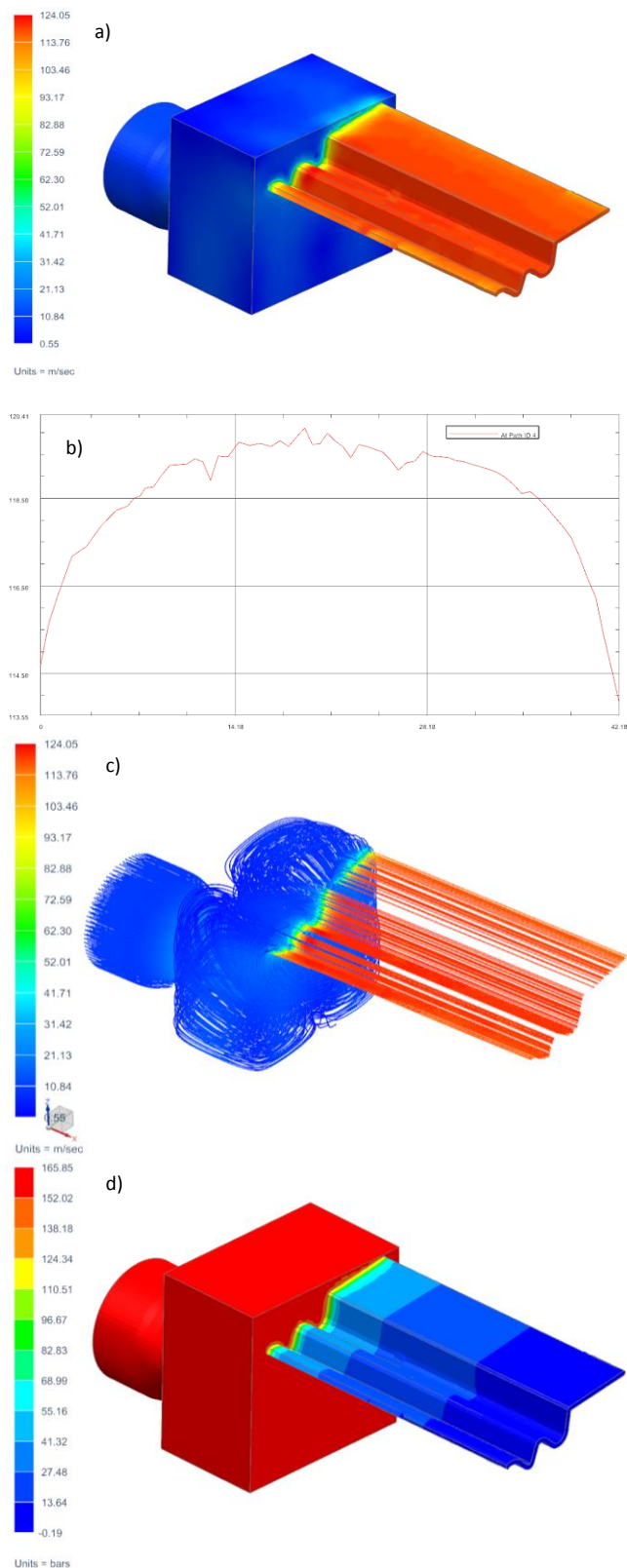
Kształt profilu kanału doprowadzającego chłodziwo do zbiornika dyszy kształtowej powinien być prosty ( np. przekrój kołowy) - nie ma on wpływu na prędkość wylotową, a jedynie na skupienie się linii przepływu (rys. 10c). Dzięki długiemu kanałowi wypływowemu prędkość stabilizuje się po krótkim dystansie. Daje to możliwość uzyskania stałej prędkości w kanale prowadzącym chłodziwo, nawet jeśli kanał ten jest ukształtowany nieregularnie poprzez przeszlifowanie dyszy (kształt zamka).





Rys. 10 Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 1 mm – wariacja III: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia

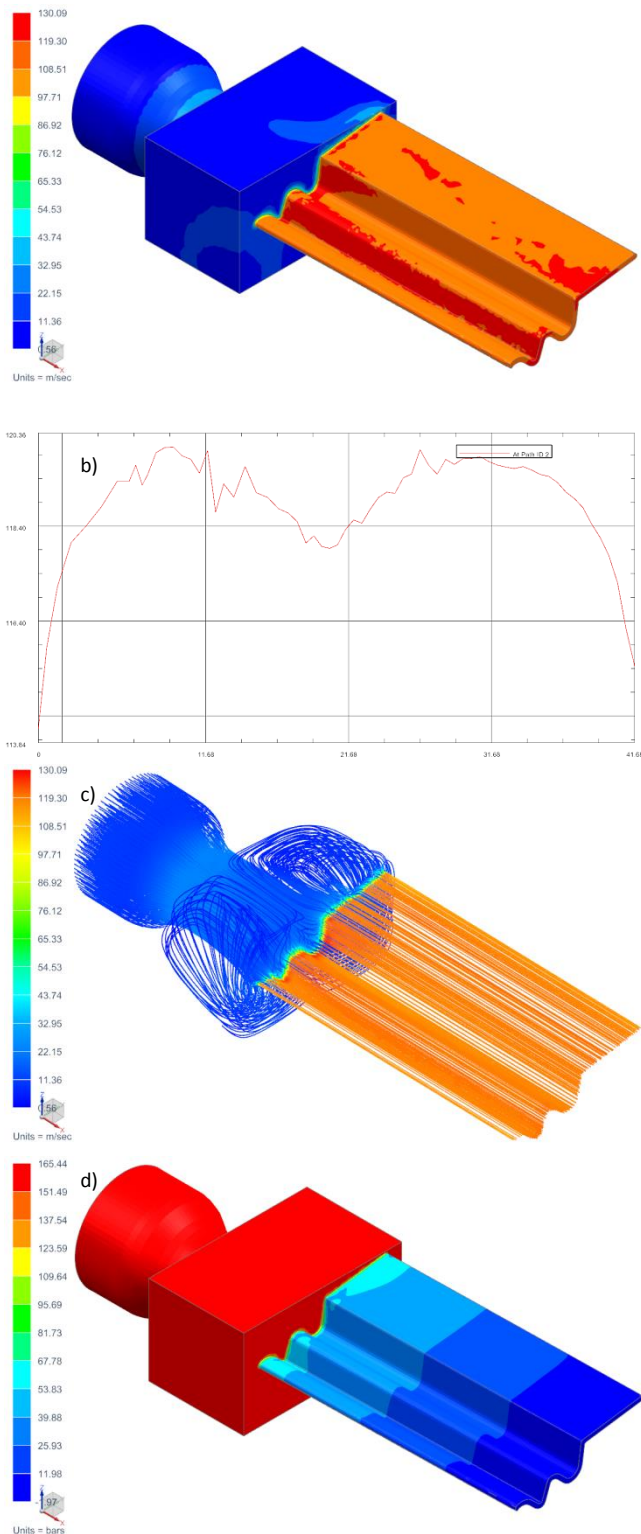
Ważnym elementem dyszy jest zbiornik wyrównawczy. Przy zastosowaniu dużego zbiornika wyrównania ciśnienia otrzymujemy stały rozkład ciśnień w jego wnętrzu, co daje efekt stałego i stabilnego przepływu chłodziwa w dalszej części dyszy. Chłodziwo jest kumulowane – nie ma efektu zwykłego przepłynięcia cieczy przez dysze. Zastosowanie zbyt dużego zbiornika w połączeniu z małą wartością przepływu początkowego może skutkować jednak w zmniejszeniu ciśnienia, co będzie miało również wpływ na prędkość chłodziwa na wylocie dyszy. Przy zastosowaniu bardzo prostych kształtów zbiornika np. prostokątów tworzą się zawrota w przepływie cieczy, zmniejszające ciśnienie w tych miejscach. Należy używać zbiorników o kształcie walcowym lub używać zaokrąglonych krawędzi, aby unikać załamywania się linii przepływu na krawędziach (rys. 11c).



Rys. 11 Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 1 mm – wariacja IV: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia

Przy dyszy kształtowej kanał wypływu przyjmuje kształt odwzorowany z zamka łopatk. Jest to więc długość profilu zamka oraz o szerokości traktowanej jako offset profilu w dwóch kierunkach, zamknięty z dwóch stron łukami. Przy szlifowaniu CFG ważne jest doprowadzenie chłodziwa na całej szerokości tarczy oraz profilu. Dysze kształtowe mają tendencje do tracenia prędkości przy końcówkach profilu lub do wzrostu jeżeli źle doprowadzimy kanał dolotowy chłodziwa,

np. bezpośrednio na środku (rys. 12b). Ma to związek z nieregularnym kształtem profilu zamka (krzywe, łuki). Przy dyszy szczelinowej kanały prowadzące chłodziwo nie mają równomiernego przekroju wzdłuż całej dyszy. Często profil ten jest załamany lub zakrzywiany, przez co miejscowo następuje zwężenie lub poszerzenie kanału.



Rys. 12 Wyniki symulacji dla dyszy o szczelinie 1 mm – wariacja V: a) rozkład prędkości wewnątrz dyszy, b) wykres prędkości wzdłuż szczeliny wylotu dyszy, c) przebieg linii prądu, d) rozkład ciśnienia

## Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że niemożliwe jest uzyskanie stałej prędkości wypływu chłodziwa na całej szerokości szczeliny dyszy kształtowej. Wahania w zależności od wariantu wynoszą od 0,5 do 2 m/s. Należy oczywiście odrzucić wyniki skrajne, ze względu na tarcie chłodziwa o ścianki kanału przepływowego, co nie było uwzględnia podczas obliczeń teoretycznych. Konstruując dyszę należy więc wydłużyć szczelinę wylotową poza profil zamka, aby zmaksymalizować prędkość chłodziwa uderzającego w profil obrabianego przedmiotu. Nawet minimalne zmiany w konstrukcji dyszy wpływają na wartość prędkości chłodziwa na wylocie oraz na zawirowania przepływu i ciśnienia.

## Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

1. Adibi H., Rezaei S. M., Sarhan Ahmed A. D., Investigation on using high-pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded areas, *Int J Adv Manuf Technol* 70:2233–2240, 2014
2. Babiarez R., Żyłka Ł., Płodzień M.: Badania wpływu parametrów doprowadzenia chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 1-3
3. Babiarez R., Żyłka Ł., Koncepcja budowy układu wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania stopów lotniczych. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 4-7
4. Baines-Jones V.A., Morgan M.N., Batako A.D., Brown E., Modelling and simulation of grinding fluid nozzles, *The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08)* Brunel University, UK, 9-11th September 2008
5. Baines-Jones V.A., Morgan M.N., Allanson D. R., Batako A.D.L, *Grinding Fluid Delivery System Design - Nozzle Optimisation*, Liverpool John Moores University
6. Gviniashvili V.K., Woolley N.H., Rowe W.B., Useful coolant flowrate in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 629–636, Liverpool
7. López-Arraiza A., Alberdi R., Santos J., Castillo G.: High Performance Composite Nozzle for the Improvement of Cooling in Grinding Machine Tools. *16th International Conference on Composite Structures ICCS 16*. A. J. M. Ferreira (Editor). FEUP, Porto, 2011
8. Morgan M.N., Jackson A.R., Wu H., Baines-Jones V., Batako A., Rowe W.B., Optimisation of fluid application in grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 363–366, Liverpool
9. Oğuz Çolak: Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. *Journal of Mechanical Engineering* 58(2012)11, 683-690.
10. Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarez R.: Konstrukcja i obliczenia dysz wysokociśnieniowych stosowanych w szlifowaniu CFG stopów lotniczych. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 280-283
11. Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 289-292
12. Winterthur Technology Group: *Handbook Creep-feed and surface grinding*.