

Metodyka projektowania wysokociśnieniowych dysz chłodziwa

Methodology of design high pressure coolant nozzles.

MARCIN PŁODZIEN
ŁUKASZ ŻYŁKA*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.599

W artykule przedstawiono proces projektowania wysokociśnieniowych dysz chłodziwa. Wyszczególniono poszczególne etapy, które należy rozważyć podczas projektowania. Przedstawiono wybrane wyniki symulacji MES przepływu chłodziwa oraz sformułowano na bazie wyników wytyczne pomocne podczas konstrukcji dyszy.

SŁOWA KLUCZOWE: MES, szlifowanie CFG, chłodziwo

The article presents the design process of high-pressure coolant nozzles. Specified steps that should be considered when designing. Selected results FEM simulation of coolant flow and formulated based on the results helpful guidelines for nozzle design.

KEYWORDS: FEM, CFG, coolant

W procesie obróbki ubytkowej większość realizowanych operacji obróbkowych odbywa się z dostarczeniem chłodziwa do strefy skrawania w różnej postaci: powietrza, cieczy chłodząco-smarującej czy czynnika kriogenicznego. Głównym zadaniem chłodziwa jest [1]:

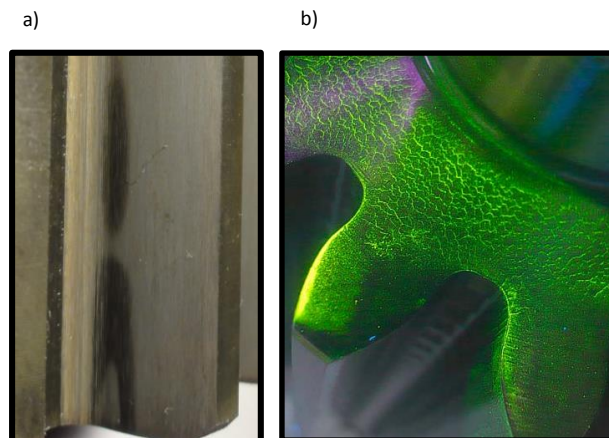
- tworzenie stabilnej warstwy smaru, która zmniejsza tarcie między ostrzem narzędzia i przedmiotem obrabianym,
- chłodzenie powierzchni przedmiotu i czynnej powierzchni narzędzia, poprzez przejmowanie i odprowadzanie ciepła,
- zwilżanie i czyszczenie narzędzia,
- wypłukiwanie wiórów ze strefy skrawania,
- zabezpieczenie antykorozyjne obrabiarki i materiału obrabianego,
- przeciwdziałanie rozwojowi bakterii, spienianiu się itp.

Zagadnienie chłodzenia jest szczególnie ważne w procesie szlifowania, gdzie występuje utrudniony dostęp chłodziwa do strefy skrawania. Przedstawione badania dotyczą metody wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania materiałów trudnoobrabialnych i są podsumowaniem dotychczas przeprowadzonych analiz [2,3,4,5]

W minionych latach zauważono znaczący rozwój w zakresie stosowania nowych materiałów na elementy krytyczne w przemyśle lotniczym. Dotyczy to szczególnie części silników lotniczych pracujących w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych, np. poddawanych działaniu bardzo wysokich temperatur. Materiałami bardzo często stosowanymi na elementy silników lotniczych, np. łopatki, są stopy na osnowie niklu do których zalicza się stop Inconel 718. Stopy tego typu zawierają zazwyczaj ponad 50% niklu, od 10 do 20% chromu, do 8% aluminium i tytanu, od 5 do 15% kobaltu oraz niewielkie ilości boru, cyrkonu, magnezu i węgla. Skład chemiczny oraz właściwości tych stopów powodują ich utrudnioną skrawalność. Bardzo często stosowanie toczenia i frezowania w tym przypadku jest zbyt kosztowne i czasochłonne, dlatego też techniki te są zastępowane zwykle poprzez szlifowanie [2,6,8].

Najczęściej stosowaną odmianą szlifowania stopu Inconel 718 jest szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym CFG (Creep Feed Grinding). Ta odmiana szlifowania jest procesem, który charakteryzuje się dużą wydajnością objętościową usuwanego materiału. Jest to efektem zastosowania znacząco większych głębokości szlifowania a_e , które niejednokrotnie osiągają wartości nawet do 15 mm [7,9,10].

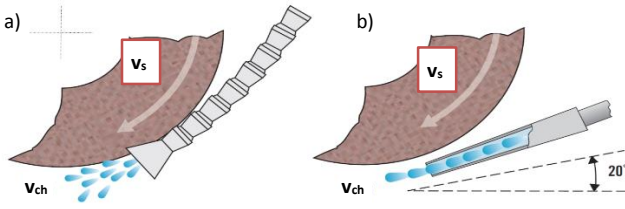
Stosowanie bardzo dużych wartości dosuwu wiąże się z koniecznością szlifowania z niewielkim posuwem minutowym v_w , który nazywany jest posuwem pełzającym. Zastosowanie większych głębokości szlifowania powoduje także wzrost wartości składowych siły szlifowania, mocy szlifowania jak również ciepła generowanego w strefie skrawania, które są efektem większego kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym. Powoduje to zwiększone ryzyko występowania przypaleń szlifierskich, plastycznego płynięcia materiału oraz pęknięć termicznych, które decydują o dyskwalifikacji obrabianej części (rys. 1). Ryzyko to może być zredukowane poprzez odpowiednie dostarczenie chłodziwa do strefy skrawania[.



Rys. 1. Defekty szlifierskie wynikające z mało efektywnego chłodzenia strefy skrawania: a) przypalenia szlifierskie, b) pęknięcia szlifierskie [12]

W warunkach przemysłowych często stosowaną metodą chłodzenia jest tzw. chłodzenie zalewowe. Charakteryzuje się mało efektywnym dostarczeniem chłodziwa do strefy skrawania. Struga chłodziwa wypływająca z dyszy ma charakter rozproszony. Zwykle w tym rozwiązaniu prędkość wypływu chłodziwa v_{ch} jest znacznie mniejsza niż prędkość obwodowa ściernicy v_s , czego efektem jest zmniejszenie parametrów technologicznych szlifowania (rys. 2a), w celu uniknięcia defektów struktury powierzchni. Poprawę warunków chłodzenia można uzyskać poprzez zastosowanie i opracowanie konstrukcji wysokociśnieniowych dysz wraz z układem wysokociśnieniowym, co analizowano w wcześniejszych badaniach autorów [5]. Konstrukcja ta pozwala

zwiększyć intensywność chłodzenia, prędkość wypływu chłodziwa v_{ch} do prędkości obwodowej ściernicy v_s lub większych oraz stopień skoncentrowania strugi chłodziwa (rys. 2b).

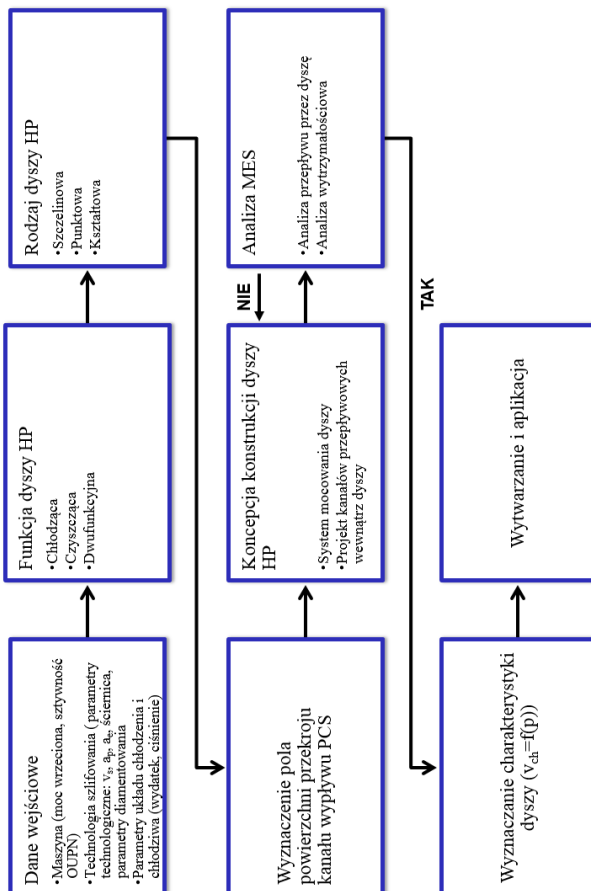


Rys. 2. Metoda chłodzenia: a) zalewowa, b) wysokociśnieniowa.[7]

Celem pracy jest przedstawienie metodologii projektowania dysz wysokociśnieniowych do realizowania procesu szlifowania CFG, jak również określenie wytycznych, które pozwolą na szybsze projektowanie oprzyrządowania do szlifowania CFG.

Proces projektowania dysz wysokociśnieniowych.

Przebieg procesu projektowania pokazano na rys. 3. Zaczynając proces projektowania należy rozważyć dane wejściowe takie jak: obrabiarkę i jej dysponowaną moc, sztywność całego układu OUPN, parametry technologiczne oraz parametry układu chłodzenia: wydatek i ciśnienie robocze. Stwierdzono, że aby realizować proces szlifowania w warunkach prawidłowego chłodzenia należy zapewnić 10 l/min wydatku chłodziwa na każdy 1 KW mocy obrabiarki [11].

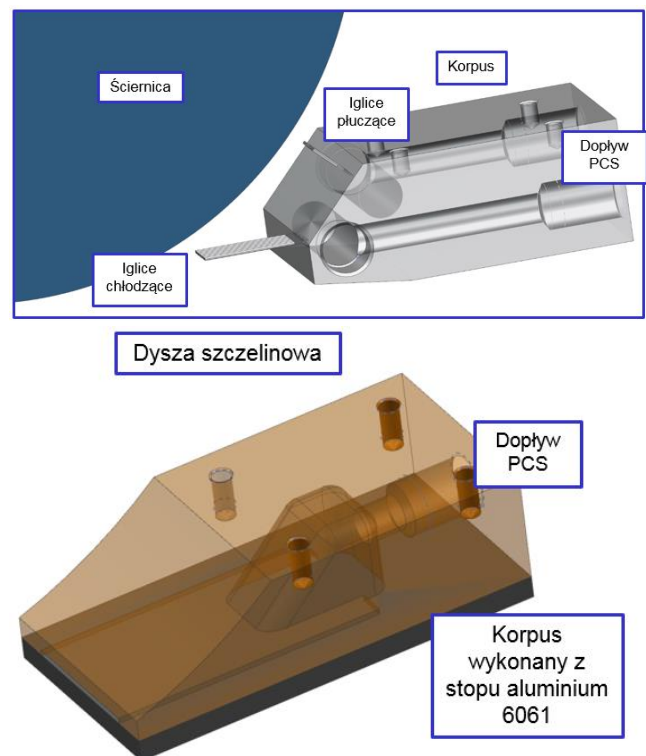


Rys. 3. Przebieg procesu projektowania dysz wysokociśnieniowych.

Kolejnym etapem w projektowaniu dysz jest określenie funkcji oraz rodzaju dyszy. Można wyszczególnić funkcję: chłodzącą, czyszczącą oraz dwufunkcyjną, zaś pod wzglę-

dem rodzaju: dyszę szczelinową, punktową, oraz kształtową. Funkcja dyszy będzie w głównej mierze wpływać na oczekiwaną prędkość wypływu chłodziwa z dyszy. Przyjęto, że dysza chłodząca powinna charakteryzować się prędkościami wypływu v_{ch} na poziomie równym prędkości obwodowej ściernicy v_s . Większe prędkości wypływu powinny być stosowane przy funkcji czyszczącej. Pozwoli to na zniwelowanie efektu poduszki powietrznej powstającej na powierzchni ściernicy.

Z kolei rodzaj dyszy ma wpływ głównie na stopień pokrycia całej szerokością ściernicy. Dysza szczelinowa generuje równomierną strugę wypływu na całej szerokości. Z kolei dysza punktowa ma mniejszy stopień pokrycia, natomiast pozwala na precyzyjne, punktowe dostarczanie chłodziwa do strefy obróbki. Dlatego też, do realizowania funkcji czyszczącej lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie dysz szczelinowych, natomiast w przypadku funkcji chłodzącej - dysz punktowych. Na rys. 4 przedstawiono koncepcyjne konstrukcje dysz.



Rys. 4. Koncepcyjne konstrukcje dysz: a) funkcja chłodząco – płuczająca, rodzaj punktowa, b) funkcja chłodząca, rodzaj szczelinowa

Wyznaczenie pola powierzchni przekroju kanału wypływowego chłodziwa

Projektowanie dysz wysokociśnieniowych należy zacząć od określenia pola przekroju kanału wypływowego chłodziwa za pomocą zależności (1) [7, 11].

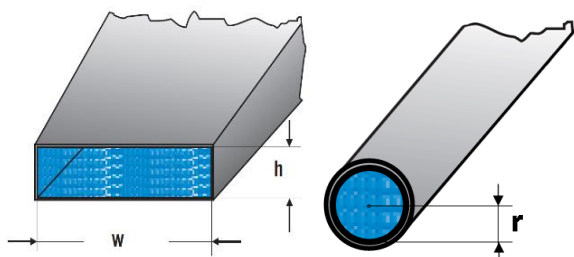
$$A_D = \frac{Q_{ch} \cdot 1000}{v_{ch} \cdot 60}, \quad (1)$$

gdzie: A_D – przekrój dyszy [mm²]; Q_{ch} – wydatek przepływu chłodziwa [l/min], v_{ch} – prędkość wypływu chłodziwa z dyszy [m/s].

W zależności (1) należy jako graniczne parametry określić wydatek przepływu Q_{ch} jakim dysponuje układ chłodzenia jak również oczekiwaną prędkość wypływu chłodziwa v_{ch} na wypływie z dyszy.

Prędkość wypływu jest wartością uśrednioną i nie w każdym przypadku wartość przyjętej prędkości wypływu v_{ch} będzie stała na całej szerokości dyszy.

Poniżej przedstawiono zależności do wyznaczania pola przekroju dla dysz szczelinowych oraz punktowych [7].



$$A_{Dsz} = w \cdot h, \quad (2)$$

$$A_{Dr} = i \cdot r^2 \cdot \pi, \quad (3)$$

Rys. 5. Określenie pola przekroju na wypływie z dyszy szczelinowej oraz punktowej, gdzie: r - promień wewnętrzny dyszy [mm], i - ilość dysz, A_{Dr} - suma pól przekrojów wszystkich rurek w miejscu wylotu chłodziwa [mm²], A_n - pole przekroju dyszy w miejscu wylotu chłodziwa [mm²], w - wysokość dyszy [mm], h - szerokość dyszy [mm]

Analiza przepływu w zaprojektowanych konstrukcjach

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest weryfikacja konstrukcji pod względem przepływu chłodziwa w dyszy. Celem symulacji jest sprawdzenie założonych warunków prędkości wypływu v_{ch} , rozkładu ciśnienia oraz przebiegu linii prądu wewnątrz dysz, które świadczą o lokalnych turbulencjach. Turbulencje mogą powodować utrudniony przepływ oraz lokalne zmiany prędkości wypływu na wylocie z dyszy.

Poniżej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przepływu chłodziwa wewnątrz dyszy. W badaniach sprawdzano wpływ modyfikacji konstrukcyjnych pod względem: wielkości zbiornika wyrównawczego i lokalizacji miejsca dopływu chłodziwa oraz ich wpływu na kształtowanie się przepływu. Badania przeprowadzono przy założeniu stałej prędkości wypływu na wylocie z dyszy, która wynosiła $v_{ch}=30$ m/s dla dyszy o funkcji chłodzącej oraz dla prędkości $v_{ch}=100$ m/s w przypadku dyszy płuczącej.

Na bazie zależności (1) określano wymagane pola przekroju wypływu, które uwzględniono w konstrukcji dyszy. Dla założonej prędkości wypływu $v_{ch}=30$ m/s pole przekroju wyniosło $A_d=100$ mm², natomiast dla prędkości 100 m/s pole przekroju wyniosło $A_d=18$ mm². W obu przypadkach dysze zasilane były z kanału wlotowego o przekroju A_w równym ok. 126 mm².

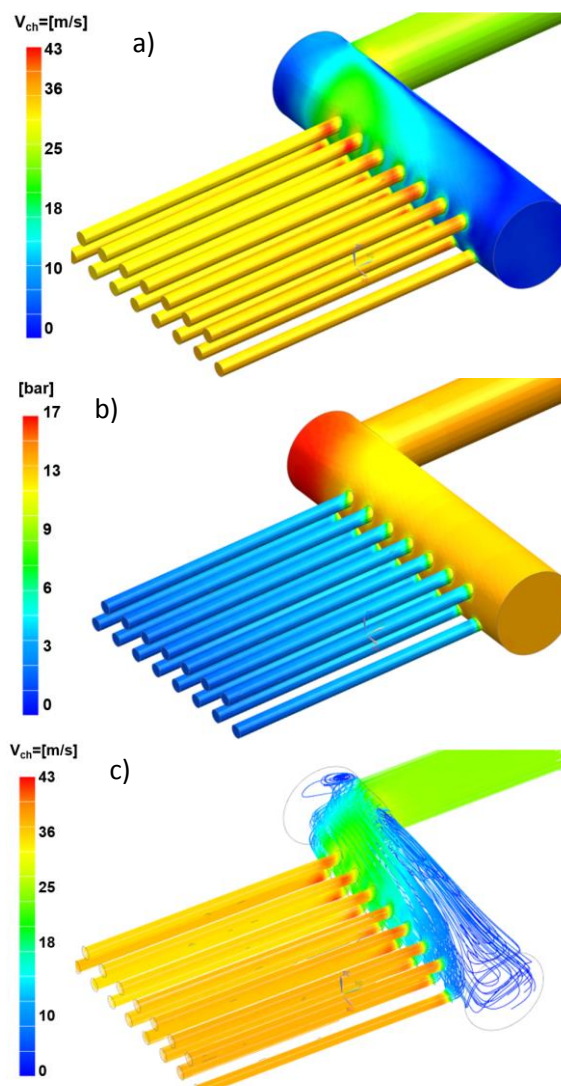
Badania symulacyjne przepływu przeprowadzono w systemie Siemens NX w wersji 9.0 wykonując obliczenia z użyciem solwera Nastran w module Advanced Simulation.

Na rysunkach 6÷9 przedstawiono wyniki symulacji przepływu w dyszach chłodzących o konstrukcji szczelinowej oraz punktowej. Dla omawianych wariantów rozważano wpływ modyfikacji konstrukcji na parametry przepływu: rozkład prędkości na wylocie, rozkład ciśnienia wewnętrznego oraz przebieg linii prądu w kanałach dyszy. W rozważanych konstrukcjach modyfikowano wielkość zbiornika wyrównawczego oraz położenie kanału dopływowego chłodziwa.

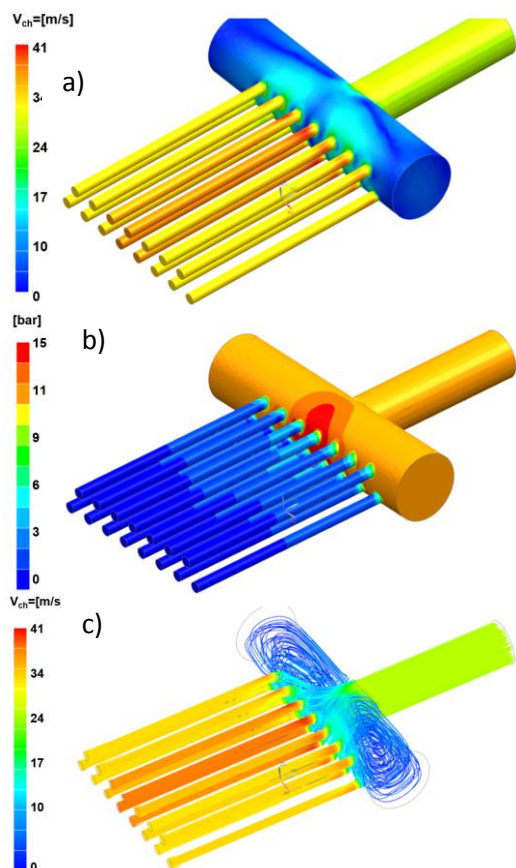
W przypadku dyszy punktowej bardziej równomierny rozkład prędkości wypływu chłodziwa v_{ch} na wylocie z dyszy uzyskano dla wariantu z centralnym doprowadzeniem cieczy. Rozrzut prędkości wypływu v_{ch} kształtował się na poziomie 3 m/s. Natomiast w konstrukcji z chłodzeniem centralnym rozrzut ten był znacznie większy i wynosił 10 m/s (rys. 6a÷7a). Z kolei na rys. 6b÷7b przedstawiono rozkład ciśnień. Można zauważyć, że dla wariantu z bocznym dopływem chłodziwa uzyskano bardziej równomierny rozkład. Wynik takiego rozkładu przekłada się na przebieg linii

prądu wewnątrz kanału oraz mniejsze zawirowania (rys. 6c). W przypadku wariantu z centralnym doprowadzeniem cieczy występuje lokalny wzrost ciśnienia w rejonie środkowej części układu iglic (rys. 7b) oraz występowanie obszarów o mniejszym ciśnieniu po bokach zbiornika wyrównawczego. Przyczynia się to do powstawania większych zawirowań w obszarach zbiornika o niższym ciśnieniu. Efekt ten powoduje zaburzenie przepływu oraz zmniejszenie prędkości wypływu v_{ch} na wyjściu z dyszy (rys. 7c)

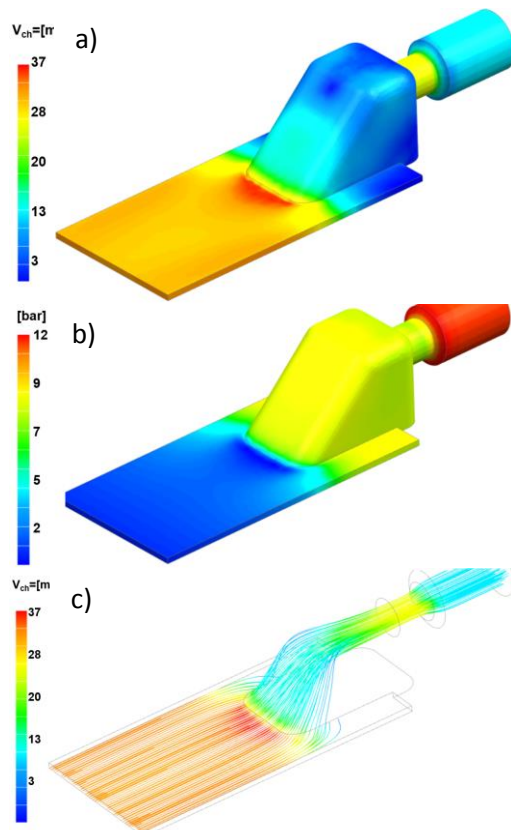
W przypadku konstrukcji dyszy szczelinowej lepszym rozwiązaniem okazała się konstrukcja z wąskim zbiornikiem wyrównawczym. Rozrzut prędkości wypływu v_{ch} dla tego wariantu plasował się na poziomie 3 m/s (rys. 9a). Natomiast w przypadku konstrukcji z szerokim zbiornikiem wyrównawczym nie uzyskano równomiernego rozkładu prędkości. Konstrukcja charakteryzowała się większym rozrzutem, który wyniósł nawet 8 m/s (rys. 8a). Również w tym przypadku zauważono zmienny rozkład ciśnienia (rys. 8b) z występującymi lokalnie obszarami o obniżonej wartości ciśnienia, które przyczyniają się do powstawania zawirowań (rys. 8c). Z kolei w konstrukcji dyszy z wąskim zbiornikiem uzyskano bardziej jednorodny rozkład ciśnienia oraz płynniejszy przepływ chłodziwa widoczny na liniach prądu (rys. 9bc).



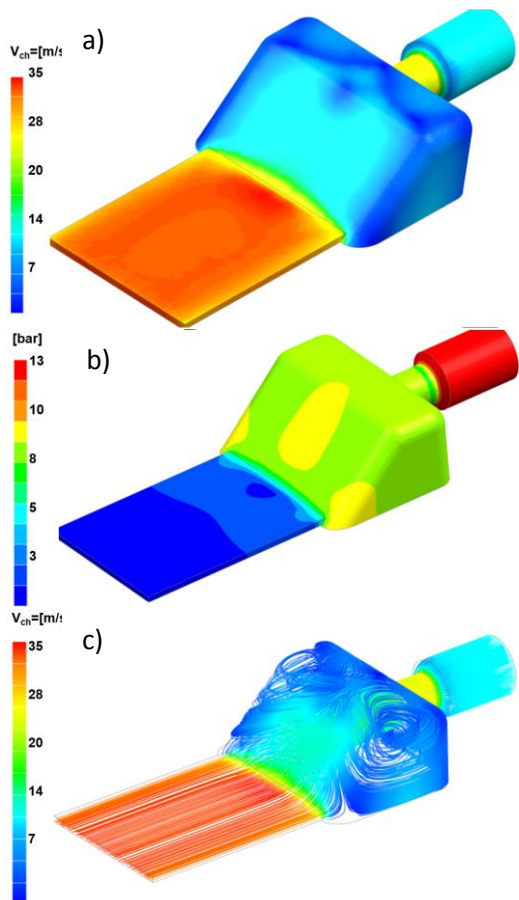
Rys. 6. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=100$ mm², dysza punktowa z bocznym doprowadzeniem chłodziwa: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu. [4]



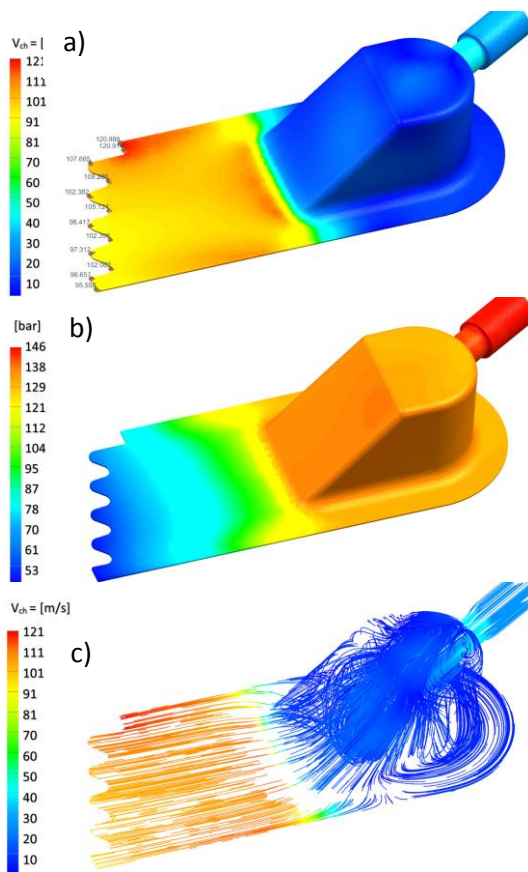
Rys. 7. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=100\text{mm}^2$, dysza punktowa z centralnym doprowadzeniem chłodziwa: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu [4]



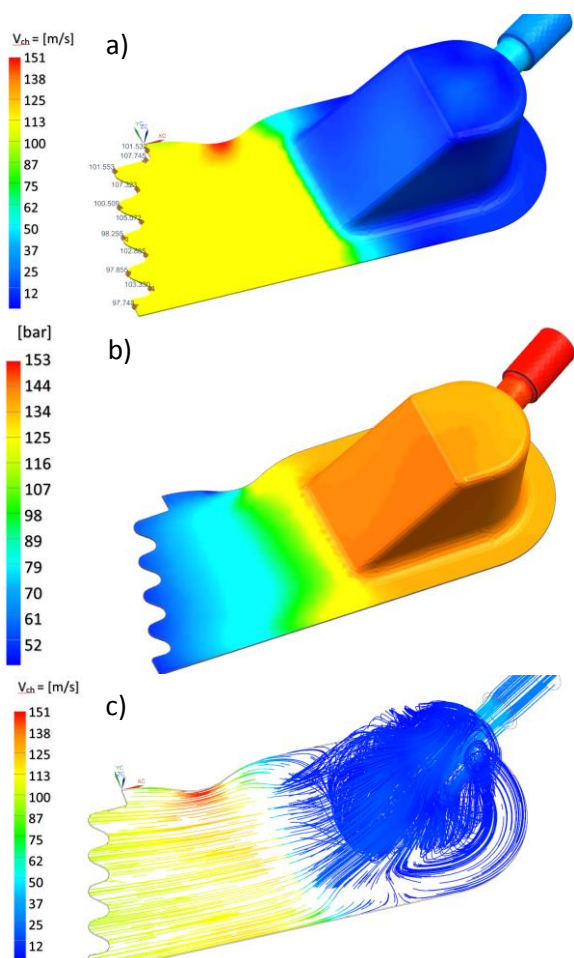
Rys. 9. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=100\text{mm}^2$, dysza szczelinowa z centralnym doprowadzeniem chłodziwa, wąski zbiornik wyrównawczy: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu.[4]



Rys. 8. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=100\text{mm}^2$, dysza szczelinowa z centralnym doprowadzeniem chłodziwa, szeroki zbiornik wyrównawczy: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu.[4]



Rys. 10. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=18\text{mm}^2$, dysza szczelinowa z kątowym doprowadzeniem chłodziwa, wąski zbiornik wyrównawczy: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu.[2]



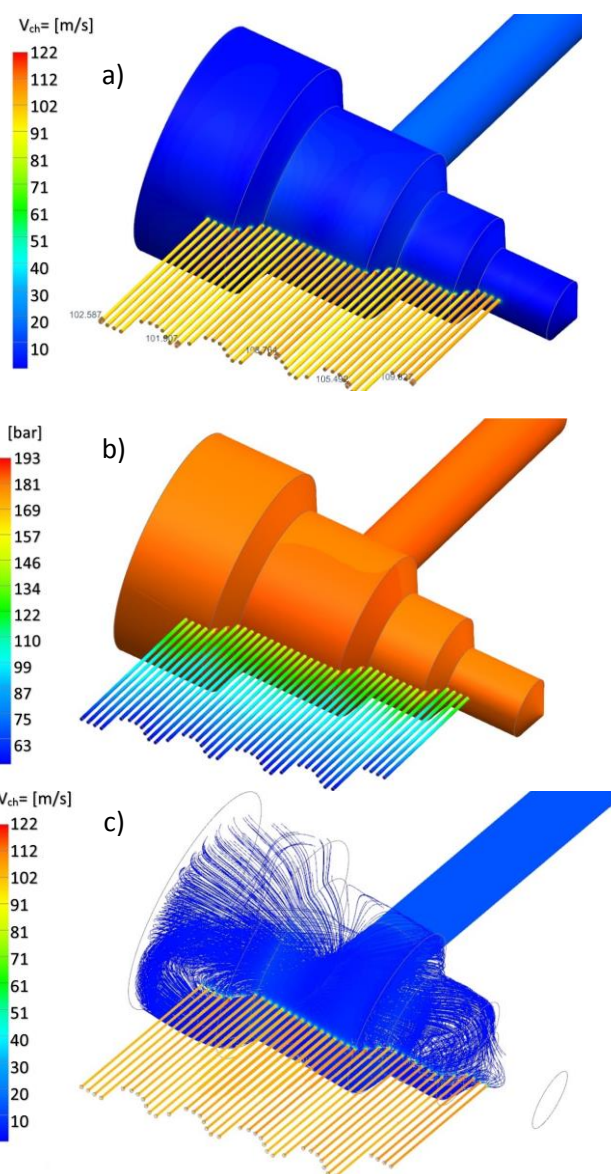
Rys. 11. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=18\text{mm}^2$, dysza szczelinowa z kątowym doprowadzeniem chłodziwa, wąski zbiornik wyrównawczy oraz z wykonanym przewężeniem: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu.[2]:

W przypadku konstrukcji, w których pole przekroju kanału dopływowego ma wartość zbliżoną do pola przekroju kanału wypływowego (sumy pól przekroju kanałów wypływowych w przypadku iglic). Zauważono, że modyfikacje konstrukcyjne wielkości zbiornika oraz miejsca dopływu istotnie wpływają na rozkład prędkości, ciśnienia oraz powstawania zawirowań.

Na rysunkach 10÷12 przedstawiono wyniki symulacji przepływu cieczy w dyszy płuczącej szczelinowej oraz punktowej przeznaczonej do szlifowania zamka łopatki o profilu tzw. „choinkowym”. Charakteryzuje się ona zmienną długością kanału wypływowego.

W celu uzyskania założonej prędkości wypływowej chłodziwa $v_{ch}=100\text{ m/s}$, konstrukcja kanału wypływowego charakteryzuje się znacznie mniejszym polem przekroju A_d niż przekrój dopływowy chłodziwa A_w .

Na rysunku 10 i 11 przedstawiono wyniki symulacji przepływu w dyszy szczelinowej. W pierwszym etapie rozważano modyfikacje konstrukcji pod kątem wielkości zbiornika wyrównawczego oraz miejsca dopływu chłodziwa do dyszy. Dla wszystkich modyfikacji uzyskano identyczny rozkład prędkości, a przykładowy wynik przedstawiono na rys. 10a. W rozważanej konstrukcji rozrzut prędkości wypływu v_{ch} wyniósł 20 m/s . Analizując ciśnienie wewnątrz zbiornika wyrównawczego można zaobserwować jego nierównomierny rozkład. Największe wartości ciśnienia występują w miejscu bezpośredniego dopływu chłodziwa (rys. 10b). Zmienny rozkład ciśnienia powoduje powstawanie zawirowań w zbiorniku wyrównawczym przyczyniając się do zmiennego rozkładu prędkości wypływu v_{ch} (rys. 10c).

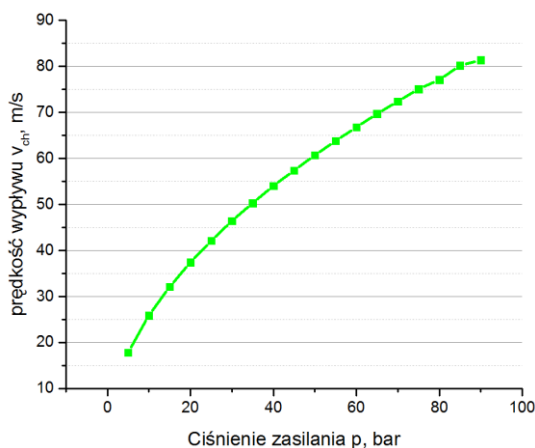


Rys. 12. Symulacja przepływu dla przekroju $A_d=18\text{mm}^2$, dysza punktowa z centralnym doprowadzeniem chłodziwa, stopniowanym zbiornikiem wyrównawczym: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia, c) przebieg linii prądu.[2]:

Ponieważ nie zauważono znaczącego wpływu zmiany lokalizacji kanału dopływowego jak również wielkości zbiornika wyrównawczego, skupiono uwagę na kształcie kanału wypływowego. W celu poprawy rozkładu prędkości wypływu v_{ch} w miejscu występowania największych prędkości zastosowano przewężenie. Wyniki symulacji przepływu przedstawiono na rys. 11. Można zauważyć, że zastosowane przewężenie przyczyniło się do równomiernego rozkładu prędkości wypływu v_{ch} (rys. 11a). Rozrzut dla tej modyfikacji wyniósł 4 m/s . Zastosowanie przewężenia przyczyniło się do wzrostu ciśnienia wewnątrz zbiornika (rys. 11b) jak również do bardziej płynnego przepływu wynikającego z przebiegu linii prądu (rys. 11c).

Na rys. 12. przedstawiono wynik symulacji przepływu cieczy w dyszy punktowej płuczącej. W tym rozwiązaniu badano wpływ modyfikacji konstrukcyjnych (wielkość zbiornika wyrównawczego, miejsce dopływu chłodziwa) na przebieg linii prądu, rozkład ciśnienia oraz prędkości wypływu v_{ch} z dyszy. W omawianej konstrukcji zastosowano stopniowy zbiornik wyrównawczy, który spowodował wyrównanie ciśnienia w układzie (rys. 12b) oraz płynny (bez zawirowań) przebieg linii prądu chłodziwa (rys. 12c). Rozkład prędkości charakteryzował się niewielkim rozrzutem, który wynosił 4 m/s (rys. 12a).

Ważnym etapem konstruowania dyszy jest wyznaczenie jej charakterystyki. Charakterystyka ta przedstawia zależność ciśnienia zasilania na wlocie do dyszy w funkcji prędkości wypływu v_{ch} na wylocie (rys. 13). Wyznaczenie charakterystyki przyczynia się do precyzyjnego nastawiania prędkości wypływowej, która jest potrzebna do zapewnienia efektywności procesu chłodzenia. Pozwala również ocenić, jakie są możliwe prędkości wypływu v_{ch} dla istniejącego układu chłodzenia.



Rys. 13. Przykład charakterystyki dyszy

Podsumowanie

Projektując dysze do wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania należy uwzględnić wiele czynników. Po pierwsze moc szlifowania oraz możliwości techniczne układu chłodzenia: ciśnienie p i wydatek Q_{ch} . Następnie funkcje i rodzaj dyszy, które wpływają na aplikację oraz deklarowaną prędkość wypływu v_{ch} . Konstruując dysze wysokociśnieniowe można posłużyć się zaleceniami, które opracowano na bazie prowadzonych badań symulacyjnych:

- Analitycznie można wyznaczyć jedynie przybliżoną oczekiwaną prędkość wypływu v_{ch} chłodziwa z dyszy na bazie zależności (1), jednakże jej rozkład na całej szerokości wypływu może być nierównomierny.
- W przypadku analiz konstrukcji dysz, z polem przekroju A_d zbliżonym do pola przekroju kanału wlotowego A_w istotny wpływ mają elementy konstrukcyjne takie jak: miejsce dopływu chłodziwa i wielkość zbiornika wyrównawczego.
- Dla dysz szczelinowych gdzie $A_d \approx A_w$ korzystniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest zastosowanie węższego zbiornika wyrównawczego niż szerokość kanału wypływowego (rys. 8÷9).
Dla dysz punktowych gdzie $A_d \approx A_w$ korzystniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest stosowanie bocznego doprowadzenia chłodziwa do zbiornika wyrównawczego celem uzyskania bardziej równomiernego rozkładu prędkości wypływu chłodziwa (rys. 6÷7).

- W przypadku konstrukcji dyszy szczelinowej z polem przekroju wypływu A_d znacznie mniejszym niż pole przekroju kanału wlotowego A_w , modyfikacje konstrukcyjne takie jak zbiornik wyrównawczy, czy miejsce doprowadzenia chłodziwa nie wpływają znacząco na rozkład prędkości i ciśnienia (rys. 10). Spowodowane jest to wyrównaniem ciśnienia w całym układzie zasilania. W tego typu przypadkach należy rozważyć modyfikacje kanału wylotowego w miejscach o zwiększonej prędkości wypływu np. przewężenie lokalne (rys. 11)
- W przypadku analizy konstrukcji dyszy punktowej z polem przekroju wypływu znacznie mniejszym niż pole przekroju kanału wlotowego zauważa się istotny wpływ elementów konstrukcyjnych: miejsca dopływu jak również kształtu i wielkości zbiornika wyrównawczego (rys.12).

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Kieraś S. Nadolny K. Wójcik R.: Aktualny stan wiedzy i techniki w zakresie chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesach szlifowania Mechanik nr 9/2015, CD, s.204-211
2. Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarski R., Baran B.: Projekt i analiza MES dysz kształtowych chłodziwa do szlifowania zamka łopaty silnika lotniczego Mechanik nr 9/2015, CD, s. 270-2276
3. Babiarski R., Żyłka Ł., Płodzień M.: Badania wpływu parametrów doprowadzenia chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel. Mechanik nr 9/2014, CD, s. 1-3
4. Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarski R.: Konstrukcja i obliczenia dysz wysokociśnieniowych stosowanych w szlifowaniu CFG stopów lotniczych. Mechanik nr 9/2014, CD, s. 280-283
5. Babiarski R., Żyłka Ł., Koncepcja budowy układu wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania stopów lotniczych. Mechanik nr 9/2014, CD, s. 4-7
6. Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków. Mechanik nr 9/2014, CD, s. 289-292
7. Winterthur Technology Group: Handbook Creep-feed and surface grinding.
8. Oğuz Çolak: Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, 683-690.
9. Grigoriev S. N., Starkov V. K., Gorin N. A., Krajni P., Kopač J., Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 60(2014)4, 213-220
10. 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
11. Webster J. A: Coolant Calculus, Cutting Tool Engineering 2/2008
12. <http://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/innovation-technology/quality/>