

Zastosowanie technologii druku 3D do szybkiego prototypowania dysz zraszających

dr inż. Dominik Bałaga
dr inż. Marek Kalita
mgr inż. Michał Siegmund
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W artykule zaprezentowano możliwości zastosowania technologii druku 3D do szybkiego prototypowania dysz zraszających. Przedstawiono procedury badawcze jakie przeprowadzono dla sprawdzenia przydatności opisywanej technologii. Zweryfikowano wytworzone egzemplarze, zarówno pod względem jakości wydruku, jak i oceny generowanych przez dysze strumieni zraszających. Wyniki badań dysz drukowanych porównano z wynikami badań dysz wytwarzanych za pomocą tradycyjnej technologii obróbki.

Słowa kluczowe: zwalczanie zapylenia, dysze zraszające, druk 3D, szybkie prototypowanie

Keywords: dust control, spraying nozzles, additive manufacturing, rapid prototyping

Abstract:

Possibility of using the additive manufacturing technology in production of spraying nozzles is presented. Testing procedures used for verification of usability of the described technology are given. Items manufactured by this technology were checked in terms of their quality and parameters of the generated water stream. The results obtained from testing the printed nozzles are compared with those manufactured using traditional technology.

1. Wprowadzenie

Szybkie prototypowanie, nazywane również szybkim wykonywaniem prototypów (ang. Rapid Prototyping), jest określeniem zbioru metod służących do szybkiej, precyzyjnej i powtarzalnej produkcji elementów najczęściej w technologii addytywnej (np. z wykorzystaniem technik druku przestrzennego). Głównym etapem procesu szybkiego prototypowania jest zdefiniowanie przedmiotu jako trójwymiarowego modelu, który jest następnie przetwarzany w procesach numerycznych do postaci zbioru danych odpowiednich dla systemów wytwarzających np. przez systemy typu CAM bądź odpowiednie oprogramowania drukarek 3D. Najczęściej stosowane w szybkim prototypowaniu wytwarzanie przez kształtowanie przyrostowe (druk 3D), eliminuje konieczność stosowania specjalnego oprzyrządowania np. w postaci form czy specjalnych narzędzi. Przewaga wytwarzania przyrostowego nad tradycyjną metodą wytwarzania w sposób ubytkowy uwidacznia się zwłaszcza podczas procesu przygotowania produkcji, gdzie eliminuje się konieczność określenia półfabrykatów oraz technologii wytwarzania. Wszystkie dane niezbędne do wytworzenia gotowego produktu tworzone są w bezpośredniej integracji z komputerowo wspomaganym konstruowaniem CAD [7, 10].

W ITG KOMAG od wielu lat opracowywane są konstrukcje dysz zraszających mających na celu redukcję zapylenia [1, 3]. Wysoka skuteczność ich działania uzyskiwana jest dzięki odpowiednio dobranym parametrom kropel w strumieniach zraszających. Przykładowo, w pracy [2], potwierdzono wpływ ich wielkości na efektywność wytrącania pyłu i skuteczność redukcji zapylenia. Wykazano, że jakość wytwarzanego strumienia zależy od parametrów zasilania dyszy oraz jej kształtu. Opracowanie kształtu dyszy zraszającej o określonych parametrach pracy oraz jakościowych strumienia zraszającego jest jednak procesem czasochłonnym, a dodatkowo nawet najmniejsze modyfikacje (np. zmiana średnicy

czy kąta wylotu) w konstrukcji dyszy mogą skutkować znacząco zmianą parametrów pracy i jakości strumienia dyszy. Stosowana dotychczas do wytwarzania dysz technologia obróbki ubytkowej znacząco wydłuża czas powstawania prototypów oraz generuje zwiększone koszty ich wytworzenia, ze względu na jednostkowy charakter produkcji. Zastosowanie szybkiego prototypowania (RP), przy użyciu technologii druku 3D, pozwala niemal natychmiast po zakończeniu prac konstrukcyjnych rozpocząć proces wytwarzania, którego koszt nie zależy od liczby wytwarzanych egzemplarzy. W ramach prac [4, 5, 6], realizowanych w ITG KOMAG, podjęto działania mające na celu weryfikację możliwości zastosowania druku 3D do wytwarzania dysz zraszających.

2. Dobór urządzenia drukującego

Podstawowym założeniem przy użyciu technologii druku 3D było wytworzenie pojedynczego egzemplarza dyszy o kosztach kilkukrotnie niższych od tradycyjnej obróbki ubytkowej w metalu, przy zachowaniu dużej dokładności wydruku. Analizując dostępne na rynku urządzenia druku 3D oraz zakres oferowanych usług stwierdzono, iż drukarka Zortrax M200 (rys.1) będzie wystarczająca do spełnienia założeń realizowanej pracy badawczej.



Rys. 1. Drukarka Zortrax M200 podczas druku dysz powietrzno-wodnych [11]

Urządzenie to drukuje w technologii Layer Plastic Deposition (LPD), w której drukarka rozpuszcza termoplastyczny materiał (filament) w ekstruderze i układa go na podgrzewanej platformie roboczej, tworząc w ten sposób trójwymiarowy model – jest to technologia tożsama z FFF (Fused Filament Fabrication) i FDM (Fused Deposition Modeling). Do drukarki Zortrax M200 dedykowane są materiały firmy Zortrax: Z-ABS, Z-ULTRAT, Z-HIPS, Z-GLASS, Z-PCABS oraz Z-PETG [9].

3. Dobór materiału, wytwarzanie dysz oraz badania weryfikacyjne

Mając do dyspozycji różne rodzaje materiałów (filamentów) należało wytypować najbardziej nadający się do wytworzenia i użytkowania dyszy zraszającej. Dobór odpowiedniego materiału zrealizowano poprzez wydruk z każdego rodzaju filamentów dyszy o tej samej konstrukcji oraz jednej próbki badawczej. Na rysunku 2 pokazano jeden z pięciu

kompletów badawczych, mających na celu określenie najlepszego, dostępnego materiału do wytwarzania dysz w technologii druku 3D.

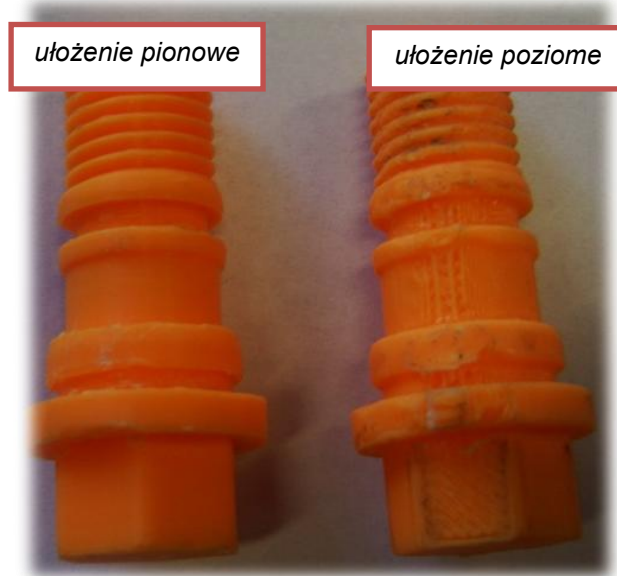


Rys. 2. Przykładowy wydruk dyszy oraz próbki do badań zmęczeniowych [11]

Przygotowano dysze i próbki badawcze, które poddano badaniom weryfikacyjnym w aspekcie:

- oceny organoleptycznej jakości wydruku,
- próby gwintowania wydrukowanego pręta,
- próby skręcania wydrukowanego pręta,
- badania odporności dysz na działanie wysokiej temperatury,
- badania parametrów pracy oraz strumienia zraszającego.

Proces druku dysz rozpoczęto od określenia najlepszego kierunku ułożenia modelu (drukowanej dyszy) podczas procesu nakładania kolejnych warstw materiału. Na rysunku 3 przedstawiono ten sam model dyszy ułożonej w pozycji pionowej i poziomej (podczas druku). Zdecydowanie lepszą jakość wydruku uzyskano dla dysz ułożonych pionowo. Walcowe powierzchnie dyszy były gładkie oraz zachowały kształt okręgu w przekroju. Można było również zaobserwować zdecydowanie wyraźniejszy zarys gwintu. Z kolei dysza drukowana poziomo, posiadała bardziej zdeformowane walcowe powierzchnie boczne, które w przekroju przybierały kształt eliptyczny.



Rys. 3. Różnice w jakości drukowanej dyszy, w zależności od kierunku ułożenia dyszy [11]

Wydrukowane z różnego rodzaju materiału dysze, pomimo tej samej konstrukcji oraz technologii druku, różniły się między sobą jakością powierzchni (szczególnie walcowej), odwzorowaniem zarysu gwintu, czy średnicami otworów wlotowych i wylotowych dyszy. Niemal we wszystkich egzemplarzach wydrukowanych dysz, przed ich podłączeniem do zasilania, należało poprawić otwór wylotowy strumienia zraszającego oraz otwory wlotowe wody i sprężonego powietrza. Gwint w dyszach był gwintem drukowanym, którego zarys określono podczas modelowania konstrukcji dyszy. Jak pokazały już pierwsze próby użytkowania dysz, wkręcenie drukowanych dysz do gniazd w korpusie zasilającym było bardzo utrudnione, bądź prawie niemożliwe ze względu na odchyłki rozmiaru gwintu opracowanego w konstrukcji dyszy od rozmiaru rzeczywistego [5, 6]. Gwint wydrukowany w materiale Z-GLASS oraz Z-PETG klinował się podczas wkręcania (niemożliwe było pełne wkręcenie dyszy). Gwint wykonany w próbkach z Z-ABS oraz Z-HIPS dawał się wkręcić do korpusu przyłączeniowego, jednak łatwo ulegał zniszczeniu poprzez skręcenie na przewężeniu dyszy. Jedynie gwinty drukowane z Z-ULTRA pozwalały na kilkukrotne wkręcanie do korpusu zasilającego, bez uszkodzenia konstrukcji dyszy zraszającej. Sprawdzone możliwość nagwintowania pręta badawczego, wydrukowego na potrzeby badań. Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie z przebiegu prób gwintowania. Na wszystkich próbkach badawczych możliwe było nacięcie ciągłego zarysu gwintu, umożliwiającego współpracę z nakrętką M12x1,5. Jedynie gwint na próbce drukowanej poziomo był nieciągły, a wiór powstający podczas gwintowania zdecydowanie różnił się od pozostałych.



Rys. 4. Wyniki prób gwintowania próbek badawczych [11]

Większość tradycyjnych dysz opracowywanych w ITG KOMAG montowanych jest w bateriach zraszających za pomocą gwintów przyłączeniowych. W celu doszczelnienia dyszy w gnieździe przyłączeniowym należy wkręcić ją na właściwą głębokość. Stąd istotne było również sprawdzenie wytrzymałości na skręcanie próbek drukowanych z różnego rodzaju materiałów. W tabeli 1 zamieszczono wyniki próby skręcania wydrukowanego i nagwintowanego pręta $\Phi 12$. Próbę przeprowadzono dla dwóch wariantów zamocowania: a) wkręconego w nakrętkę M12x1,5 oraz b) złapanego w szczęki imadła na gładkiej powierzchni walcowej.

Wartości momentów skręcających poszczególnych próbek badawczych [5]

Tabela 1

Rodzaj badanej próbki	Wartość niszczonego momentu skręcającego próbkę na gwincie M12x1,5 [Nm]	Wartość niszczonego momentu skręcającego próbkę na powierzchni walcowej $\Phi 12$ [Nm]
Czarna Z-PETG	3,19	8,31
Żółta Z-ABS	0,79	2,02
Szara Z-HIPS	1,24	3,26
Pomarańczowa Z-ULTRAT (drukowana pionowo)	2,57	4,09
Pomarańczowa Z- ULTRAT (drukowana poziomo)	5,16	7,67
Transparentna Z-GLASS	2,47	7,84

Badania weryfikacyjne potwierdziły, że najniższe wartości momentu skręcającego uzyskano dla prętów wykonanych z materiału Z-ABS oraz Z-HIPS. Uszkodzenia na próbkach wykonanych z Z-PETG oraz Z-GLASS miały charakter plastyczny. Duże znaczenie na wytrzymałość miał również kierunek ułożenia modelu podczas druku.

Dysze wytwarzane technologią druku 3D, poddano również badaniom oddziaływania wysokiej temperatury. Dysze umieszczono w komorze klimatycznej i poddane działaniu temperatury, w granicach od 50°C do 130°C. Przyrost temperatury odbywał się co 10°C. Po uzyskaniu zadanej temperatury, dysze pozostawały w niej przez okres 1 godziny. Efekt oddziaływania temperatury na dysze pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Widok dysz po badaniach w komorze klimatycznej [11]

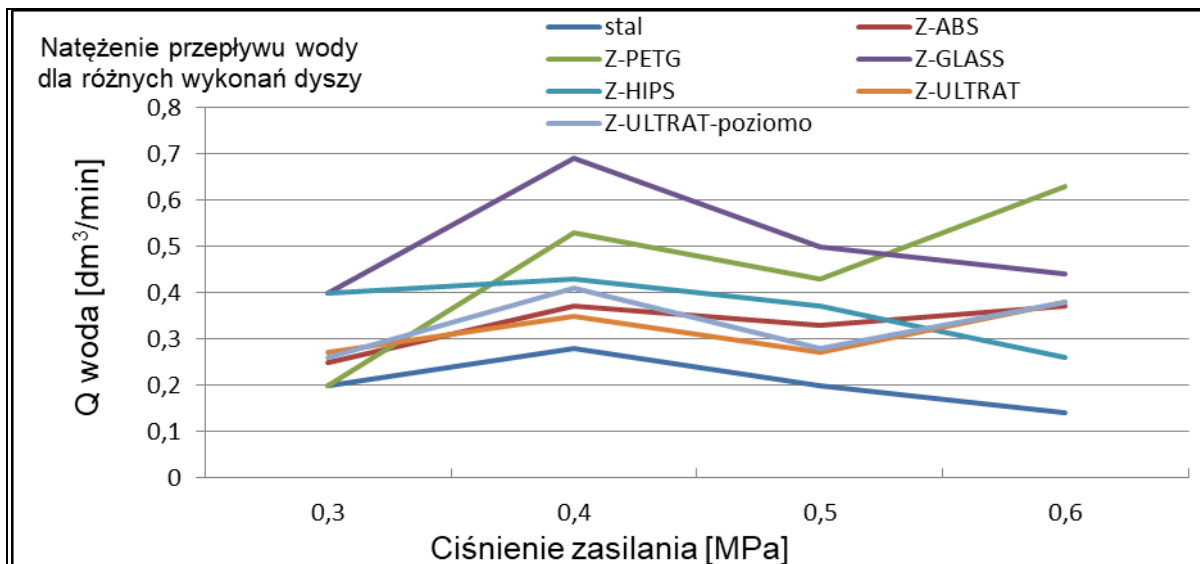
Przeprowadzone badania wykazały, iż dysze w zakresie temperatur 50-90°C zachowywały kształt oraz sztywność. W temperaturze 100°C, dysze zaczęły ulegać uplastycznianiu. Dalszy wzrost temperatury powodował całkowite topienie się materiału dyszy Z-GLASS (transparentna) i Z-PETG (czarna). Przy temperaturze 130°C dysza Z-PETG (szara) uległa uplastycznieniu i znacznemu wydłużeniu. Z kolei dysze Z-ULTRAT (pomarańczowa) oraz Z-ABS (żółta), zaczęły się nieznacznie rozciągać, zmniejszając przy tym średnicę poszczególnych części walcowych. Żadna z badanych dysz po przekroczeniu 130°C nie nadawała się do użycia [4].

W celu sprawdzenia jakości dysz wykonywanych w technologii druku 3D, z każdego rodzaju filamentu wykonano badawczy egzemplarz dyszy typu STK-ZZ-2 (najczęściej stosowany, powietrzno-wodny typ dysz w instalacjach zraszających). Badanie parametrów pracy dyszy, polegało na pomiarze zakresów ciśnień i natężeń przepływu oraz rozkładu frakcyjnego kropeł w strumieniu zraszającym każdej dyszy, w zależności od ciśnienia wody i sprężonego powietrza. Podczas badań, przetestowano siedem wykonań dyszy STK-ZZ-2. Pięć dysz wykonano z różnego rodzaju materiału, jedną dyszę (pomarańczową Z-ULTRAT) drukowaną w ułożeniu poziomym oraz jedną handlową wykonaną w metalu, w celach porównawczych. Dysze przed badaniami oczyszczono z resztek materiału podporowego oraz wyposażono w komplet uszczelnień typu o-ring. Otwór wlotowy powietrza oraz wylotowy z dyszy rozwiercono do nominalnej wielkości $\Phi 2$, natomiast otwór wlotowy wody poprawiono do wielkości $\Phi 1$. Dodatkowo oryginalnie drukowany gwint zewnętrzny poprawiono narzynką M12x1,5. Było to konieczne ze względu na trudności podczas wkręcania dyszy do korpusu zasilającego. Komplet dysz przygotowanych do badań przedstawiono na rysunku 6.



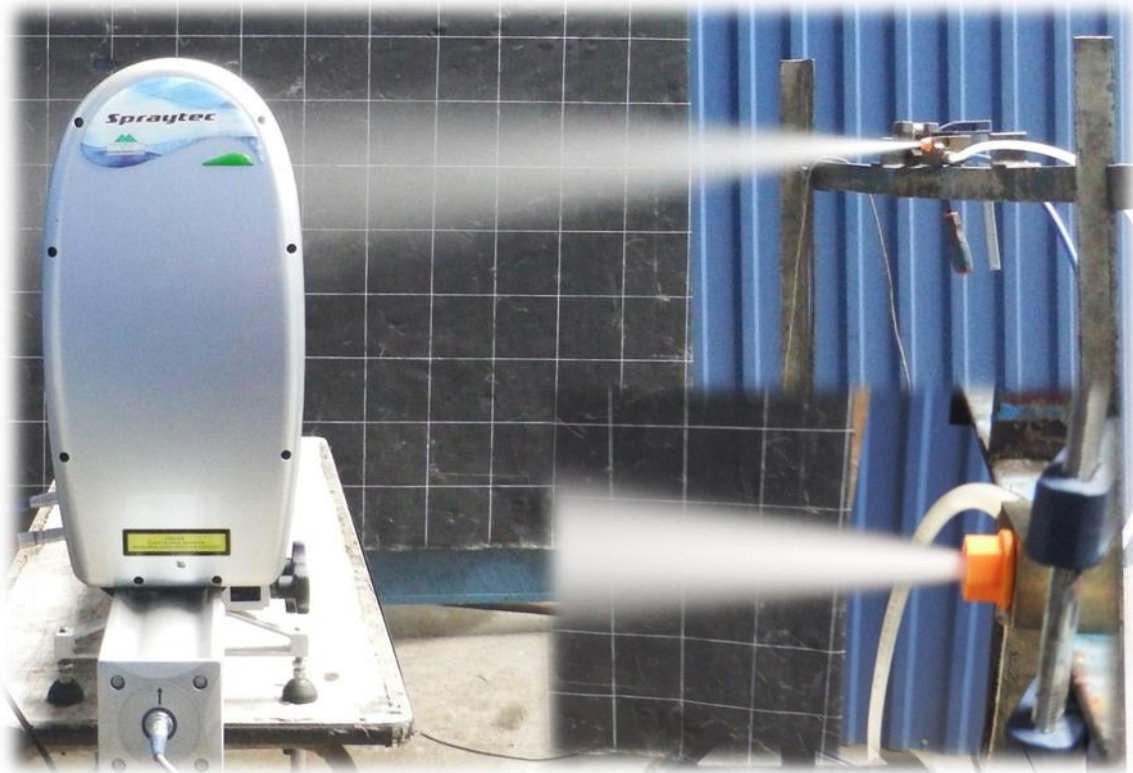
Rys. 6. Komplet badawczy różnych wykonń dysz STK-ZZ-2

Dysze testowano dla równych wartości ciśnienia zasilającego w zakresie 0,3 MPa, 0,4 MPa, 0,5 MPa oraz 0,6 MPa. Zestawienie wyników przepływu wody zraszającej, w zależności od parametrów zasilania, pokazano na rysunku 7. Najmniejszym zużyciem wody cechowała się tradycyjna dysza wykonana z metalu (w technologii ubytkowej). Zbliżone wartości miały również dysze wykonane z Z-ULTRAT.



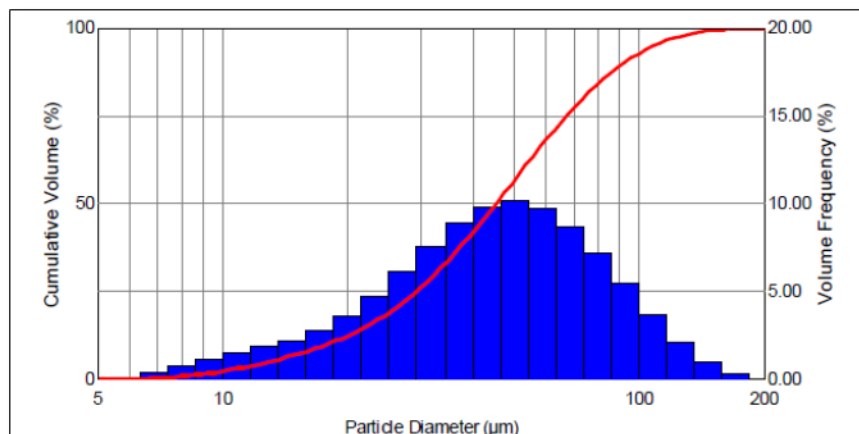
Rys. 7. Natężenie przepływu wody, w zależności od ciśnienia zasilania (wody i sprężonego powietrza), dla różnych materiałów wykonania dyszy STK-ZZ-2

Równocześnie z pomiarami natężenia przepływu mediów roboczych, w wytwarzanym strumieniu zraszającym mierzono rozkład frakcyjny kropeł. Stanowisko do badań jakości strumienia pokazano na rysunku 8. Każdy z siedmiu badanych egzemplarzy dyszy montowano na konstrukcji ramowej, na poziomie linii detekcyjnej urządzenia pomiarowego, w odległości 1 m.



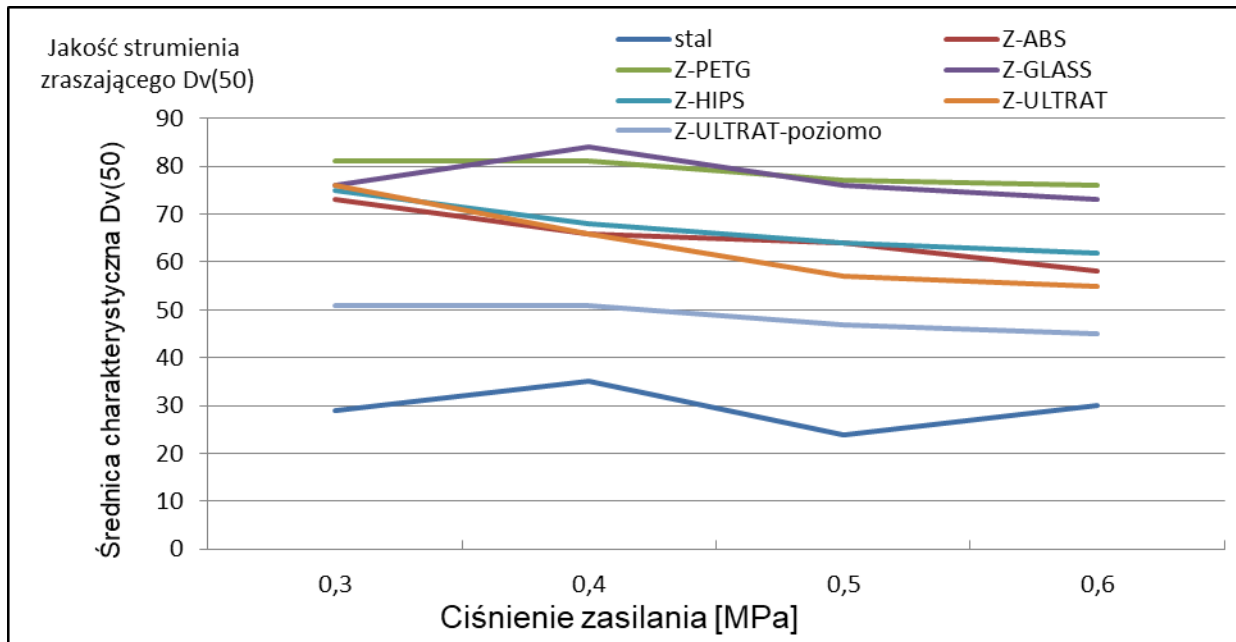
Rys. 8. Stanowisko badawcze jakości strumienia zraszającego [11]

Dla każdego wykonania dyszy mierzono rozkład frakcyjny strumienia, w zależności od ciśnienia mediów zraszających. Przykład takiego rozkładu, dla ciśnienia zasilania równego 0,5 MPa, pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowy rozkład frakcyjny kropeł w strumieniu zraszającym jednej z drukowanych dysz [4]

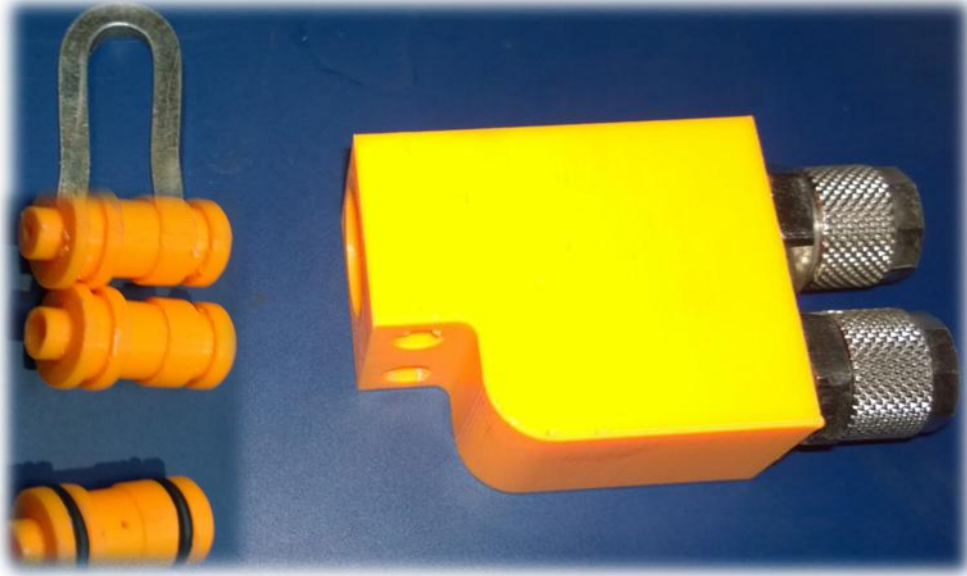
Z danych pomiarowych wyodrębniono takie wielkości, jak $Dv(10)$, $Dv(50)$ oraz $Dv(90)$. Jako najbardziej reprezentatywny oraz najczęściej stosowany w ocenie jakości strumienia zraszającego przyjęto wskaźnik $Dv(50)$, pokazujący jaka jest maksymalna średnica kropeł połowy objętości rozpylanej cieczy [8]. Na rysunku 9 przedstawiono zmianę parametru jakościowego strumienia $Dv(50)$ w zależności od ciśnienia mediów zasilających, dla różnych wykonania dyszy STK-ZZ-2.



Rys. 10. Średnica charakterystyczna Dv(50) dla różnych materiałów wykonania dyszy STK-ZZ-2 [5]

Najlepszym rozbięciem kropeł w strumieniu zraszającym cechowała się tradycyjna dysza wykonana z metalu w technologii ubytkowej. Dysza wykonana z materiału Z-ULTRAT, w układzie poziomym, generowała strumień o zdecydowanie najlepszej jakości spośród dysz drukowanych. Pozostałe wykonania dysz cechowały się gorszymi wynikami. Zachowana została jednak prawidłowość poprawy jakości strumienia wraz z wzrostem ciśnienia zasilania. Gorsze wyniki jakości strumienia zraszającego dysz drukowanych w układzie pionowym były najprawdopodobniej spowodowane ułożeniem włókien filamentu podczas druku. Włókna te układały się prostopadle do kierunku wylotu strumienia, co mogło zaburzać proces rozbijania filmu wodnego.

W rezultacie przeprowadzonych prób badawczych, jako najbardziej odpowiedni do druku dysz wytypowany został materiał Z-ULTRAT, obrabiany za pomocą technologii (LPD) na drukarce Zortrax M200. Cechuje się on bardzo dobrą jakością wydruku, z jednoczesną, stosunkowo wysoką wytrzymałością mechaniczną, w aspekcie kosztów wytwarzania oraz dostępności technologii. Badania wykazały, że znacznym ograniczeniem w użytkowaniu drukowanych dysz zraszających jest montaż dysz za pomocą gwintów przyłączeniowych. W celu rozwiązania tego problemu opracowano i wytworzono nowe rozwiązanie dyszy montowanej wciskowo, utwierdzonej za pomocą przetyczki powszechnie stosowanej w złączkach typu STECKO (rys. 11). Nowy typ dysz opracowany i wytworzony został zgodnie z zasadami szybkiego prototypowania (RP).



Rys. 11. Prototypowe rozwiązanie dyszy zraszającej, montowanej wciskowo [11]

4. Podsumowanie

Przeprowadzone w ITG KOMAG prace projektowe oraz badawcze [6, 7] miały na celu ocenę możliwości zastosowania technologii druku 3D do szybkiego wytwarzania dysz zraszających. Przeprowadzona analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- odporność użytego materiału na zużycie jest wystarczająca nawet podczas kilkugodzinnych testów działania zraszania, nie jednak na tyle wysoka, aby dysze drukowane mogły być wdrożone przemysłowo,
- dysze wykonane w technologii druku 3D pozwalają na szybkie sprawdzenie poprawności działania nowo opracowywanych rozwiązań,
- wszystkie wykonania dysz wytwarzały poprawny kształt strumienia zraszającego,
- dysze drukowane cechują się nieznacznie gorszymi parametrami jakości strumienia zraszającego, w odniesieniu do dysz wykonanych w metalu,
- podczas drukowania modeli następuje skurcz materiału, który należy uwzględnić podczas projektowania modelu 3D, szczególnie przy elementach współpracujących,
- podczas wytwarzania dyszy należy zwrócić szczególną uwagę na położenie modelu w stosunku do kierunku druku (otwory drukowane poziomo nie zachowują swojego cylindrycznego kształtu),
- skurcz materiału powoduje zmianę wymiarów m.in. otworów wlotowych czy gwintów przyłączeniowych, które należy poprawić po wydruku poprzez obróbkę mechaniczną.

W celu przemysłowego wdrożenia dysz drukowanych należałoby wykonywać je za pomocą technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering - proszki metali topione laserem dużej mocy), co generowałoby jednak wysokie koszty ich wytworzenia. Nie wyklucza się jednak możliwości stosowania rozwiązań hybrydowych, w których obszary najbardziej narażone na zużycie wykonywane byłyby z materiałów bardziej wytrzymałych. Dynamiczny

wzrost jakości oferowanych drukarek i stosowanych materiałów, oraz spadek ich cen, może w krótkim czasie przyczynić się do znacznego rozpowszechnienia produktów wykonywanych w technologii druku 3D.

Literatura

- [1] Bałaga D., Cebula D., Kalita M., Siegmund M.: Powietrzno-wodne instalacje zraszające do redukcji zapylenia. *Wiadomości Górnicze* 2015 nr 11 s. 560-568
- [2] Karowiec K.: Zwalczanie zapylenia za pomocą wyrzutu strumienia powietrza nasyconego mgłą wodną na źródło pyłu. *Maszyny Górnicze* 1984 nr 5
- [3] Pieczora E., Prostański D., Bałaga D., Rojek P.: Ocena skuteczności strumienia wytworzonego w dyszy dwuczynnikowej w aspekcie ograniczania zagrożenia zapłonu metanu i wybuchu pyłu węglowego. *Maszyny Górnicze* 2009 nr 3 s. 20-24
- [4] Rybka A., Orzech Ł.: Badania powietrzno-wodnych dysz produkowanych za pomocą technologii druku 3D. Sprawozdanie z badań, ITG KOMAG Gliwice 2016 (materiały niepublikowane)
- [5] Siegmund M.: „Młody naukowiec” - Wirtualne prototypowanie konstrukcji dysz zraszających wykorzystujące technologię druku 3D. ITG KOMAG, Gliwice 2016 (materiały niepublikowane)
- [6] Siegmund M., Bałaga D., Kalita M.: Dysza dwuczynnikowa STK-WM, egzemplarz badawczy. Sprawozdanie z badań, Gliwice 2015 (materiały niepublikowane)
- [7] Sobolak M., Budzik G., Miechowicz S.: Szybkie prototypowanie wirnika turbiny turbosprężarki, International Scientific Conference PRO-TECH-MA Rzeszów–Bezmiechowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005, s. 16-20
- [8] PN-G-52001:2015-11: Urządzenia do zwalczania zapylenia w górnictwie podziemnym - - Dysze zraszające
- [9] Karta katalogowa drukarki ZORTRAX M200. Źródło: <https://zortrax.pl/>
- [10] Materiały konferencji naukowej "Szybkie prototypowanie. Modelowanie – Wytwarzanie – Pomiary" organizowanej przez Politechnikę Warszawską: źródło: <http://www.szybkieprototypowanie.edu.pl/index.php/pl/>
- [11] Archiwum fotograficzne ITG KOMAG