



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.13>

Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w warunkach górniczych z zastosowaniem suchych gazów

Piotr Dobrzaniecki – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Kaczmarczyk – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Marek Kalita – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Artur Tarkowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Nieśpiałowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Marek Majewski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Tomasz Sinka – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Zbigniew Szkuclarek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Bartłomiej Janik – 3N Solutions

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono metodę czyszczenia, wykorzystującą cząstki zestalonego CO₂, wykorzystywaną w procesach utrzymania ruchu maszyn i urządzeń przemysłowych. Dodatkowo przybliżono dotychczasowe efekty prac, zrealizowanych w ramach projektu, mającego na celu dostosowanie omówionej metody czyszczenia do warunków zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

Słowa kluczowe: utrzymanie ruchu, czyszczenie suchym lodem, zestalony CO₂, przestrzenie zagrożone wybuchem

The technology of cleaning machines and devices with dry gases under coal mines conditions

Abstract: The paper describes the technology of cleaning machines, devices and their parts with solid-state CO₂, which is used in the maintenance processes of machines and devices. In addition, it summarizes works that have been done in the project, focused on adjusting the described method to coal mines conditions (methane and/or coal dust explosion hazard).

Keywords: machines and devices maintenance, solid-state CO₂ cleaning process, explosion hazard



Rzeczpospolita
Polska



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Projekt nr POIR.01.01.01-00-0968/20 współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



1. Wstęp

Metody czyszczenia, wykorzystujące efekty kinematyczne, zachodzące podczas podawania czynnika abrazyjnego z dużą prędkością są powszechnie znane i stosowane od wielu lat. Jako przykład można tu wymienić:

- piaskowanie,
- hydropiaskowanie,
- czyszczenie hydrodynamiczne,
- czyszczenie z zastosowaniem zestalonego CO₂, zwanego potocznie „suchym lodem”.

Wybrane techniki czyszczenia zostały opisane, w zakresie technicznym oraz zagrożeń, jakie ze sobą niosą, m.in. w [1, 2, 3, 4, 5]. Piaskowanie jako metoda obróbki zostało opatentowane w 1870 r. przez Benjaminą Chew Tilghmana [6, 7]. Piaskowanie, hydropiaskowanie i czyszczenie hydrodynamiczne to metody inwazyjne. Alternatywą dla nich jest technologia czyszczenia części maszyn i urządzeń z zastosowaniem zestalonego CO₂, należące do metod mało inwazyjnych i jako taka może być stosowana m.in. w następujących aplikacjach, zgodnie z informacjami zawartymi w [8]:

- czyszczenie elementów maszyn elektrycznych (np. wirniki),
- czyszczenie wyposażenia elektrycznego w szafach przemysłowych,
- czyszczenie elementów przekładni, w których niedopuszczalna jest zmiana wymiarów lub uszkodzenie czy zmiana gładkości powierzchni.

Szczególnym przypadkiem jest metoda czyszczenia zestalonym CO₂, jednakże w obecności specjalnie przygotowywanej mieszaniny suchych gazów. W tej metodzie wyspecjalizowała się, obecna na rynku od 2010 roku, firma 3N Solutions, oferując pełny zakres obsługi m.in. urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności ich czyszczenia i konserwacji.

Chcąc rozszerzyć tę ofertę na klientów, których urządzenia i instalacje pracują w strefach zagrożonych wybuchem palnych pyłów i/lub gazów, 3N Solutions oraz ITG KOMAG rozpoczęły projekt, mający na celu opracowanie systemu pozwalającego na użycie technologii czyszczenia z zastosowaniem suchych gazów w warunkach zagrożenia wybuchowego, np. w zakładach górniczych. Niniejszy rozdział przybliży metodę czyszczenia z zastosowaniem suchych gazów oraz opisuje dotychczasowe efekty prac zrealizowanych w ramach projektu współfinansowanego ze środków NCBR, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, nr umowy POIR.01.01.01-00-0968/20. Tytuł projektu to: „Opracowanie innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – UCT (Underground Cleaning Technology)” [9].

2. Metoda czyszczenia zestalonym CO₂ w atmosferze suchych gazów – opis technologii stosowanej przez firmę 3N Solutions

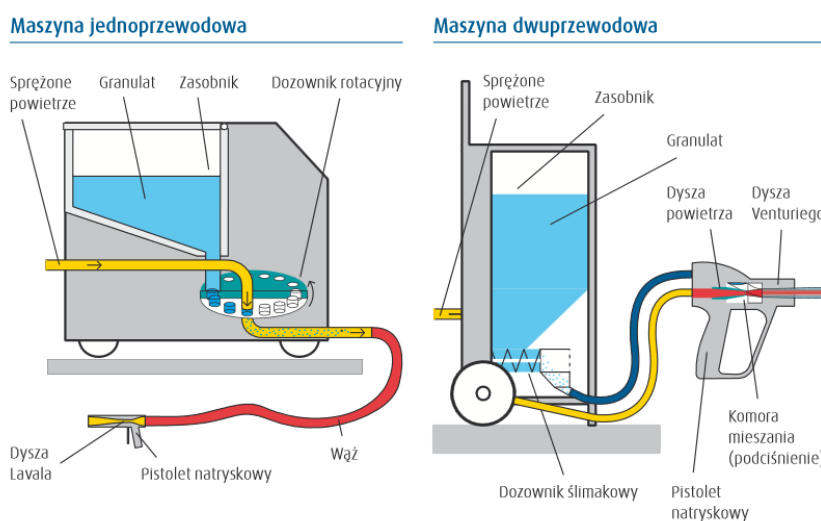
Stosowana przez firmę 3N Solutions technologia oparta jest na zastosowaniu innowacyjnego medium czyszczącego, którego głównym elementem jest specjalnie przygotowywana mieszanka gazów (azot, dwutlenek węgla, gazy szlachetne) [8]. Technologia ta pozwala na czyszczenie urządzeń pod napięciem do 30 kV.

Mieszanka gazów przygotowywana jest przez zespół urządzeń zabudowanych w samochodzie technologicznym (rys. 1).



Rys. 1. Urządzenie przygotowujące mieszankę gazów zabudowane w samochodzie technologicznym [10]

Za wytworzenie granulatu CO_2 o wymaganej jakości odpowiedzialny jest mieszalnik, który podłączany jest do przewodów pneumatycznych, dostarczających sprężone gazy, wytwarzane w urządzeniach na samochodzie technologicznym. Mieszalnik, wykorzystując zgromadzony w swoim zasobniku pelet CO_2 w postaci stałej i przy dostępie do energii sprężonych gazów, wytwarza i transportuje do dyszy wylotowej dwufazową mieszankę o wymaganych parametrach (ilość fazy stałej, prędkość przepływu mieszaniny). W technice czyszczenia zestalonym CO_2 znane jest wykorzystanie mieszalników o zasadzie działania jak pokazano na rysunku 2.

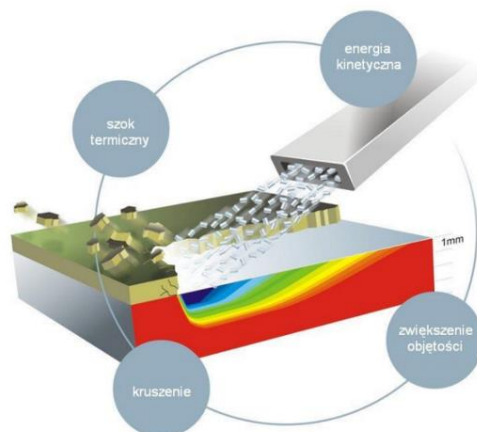


Rys. 2. Mieszalniki – stosowane rozwiązania (maszyna jednoprzewodowa i dwuprzewodowa) [11]

Proces czyszczenia oparty jest na wykorzystaniu:

- prawa Bunsena-Grahama (zjawisko dyfuzji gazów; rozprężanie i mieszanie się cząsteczek gazów tuż za dyszą),
- ciśnienia parcjalnego poszczególnych składników mieszanki i ich parametrów roboczych.

Rozprężanie się mieszanki nie powoduje wzrostu ciśnienia środowiskowego, a ma charakter jedynie molekularny. Zjawisko to powoduje odrywanie zabrudzenia. Schematycznie przedstawiono to na rysunku 3.



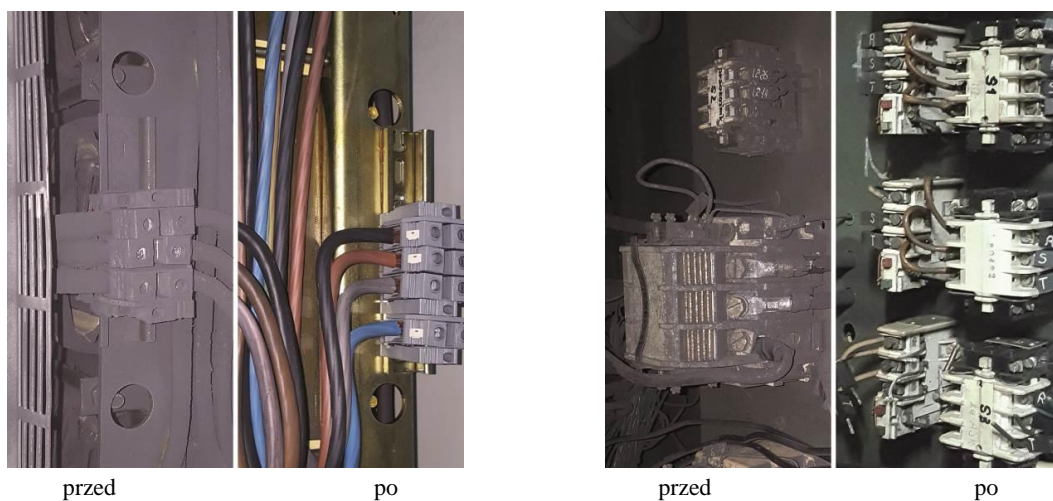
Rys. 3. Zjawiska i przemiany zachodzące podczas czyszczenia z użyciem CO₂ w postaci stałej [6, 12]

Proces czyszczenia diametralnie różni się od użycia np. sprężonego powietrza, które zdmuchuje zabrudzenie jedynie z miejsc dostępnych i wpycha je w obszary, które powinny być szczególnie wolne od zabrudzeń np. styki, magistrale na kartach sterowniczych, podzespoły falowników, zasilaczy, sterowniki, izolatory, itp.

Mieszanka dociera w niedostępne dla tradycyjnych metod (chemia, sprężone powietrze, pędzelki, czyściwo, benzyna, nafta) miejsca czyszczonych podzespołów. Medium po dostaniu się pod zabrudzenie i zetknięciu się z ciśnieniem atmosferycznym zwiększa swoją objętość około kilkusetkrotnie, skutecznie usuwając zanieczyszczenia, nie ingerując w strukturę podzespołów ani w jakość powierzchni rodzimej [8]. Mieszanka gazów jest całkowicie sucha i pozbawiona wilgoci, nie powoduje zawilgocenia, nie wchodzi w reakcje fizyczne ani chemiczne z czyszczonymi elementami, nie ma właściwości ściernych, jest nietoksyczna, bezwonna, niepalna i aseptyczna. Jest również całkowicie bezpieczna dla wrażliwych elementów elektronicznych, jak również osób, które mają z nią bezpośrednią styczność [13].

Mieszanka gazowa podawana jest w osłonie argonu, aby wyeliminować możliwość absorpcji wilgoci z otoczenia. Całość zdjętego zabrudzenia zabierana jest przez wyciągi podciśnieniowe do pochłaniacza filtrującego. Powierzchnia po czyszczeniu jest całkowicie jałowa (potwierdzone mikrobiologicznymi badaniami laboratoryjnymi).

Przykładowe efekty stosowania technologii czyszczenia firmy 3NS przedstawiono na rysunkach 4÷7.



Rys. 4. Usuwanie zabrudzeń pochodzenia pyłowego z elementów wyposażenia elektrycznego – styczników, przewodów i elementów łączeniowych [10]



przed



po

Rys. 5. Usuwanie zabrudzeń pochodzenia pyłowego z elementów wyposażenia elektrycznego – zespołów elektronicznych, elementów łączeniowych i przewodów [10]



przed

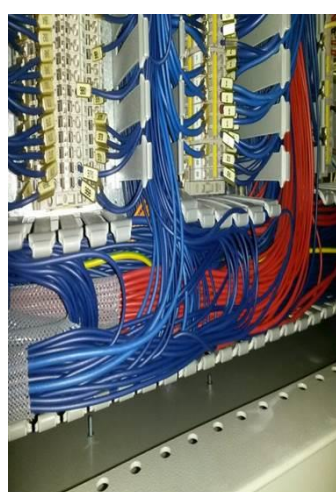


po

Rys. 6. Usuwanie zabrudzeń pochodzenia pyłowego z elementów wyposażenia elektrycznego – elementów elektronicznych, energoelektronicznych, styczników, elementów montażowych i ekranujących [10]



przed



po

Rys. 7. Usuwanie zabrudzeń pochodzenia pyłowego z elementów wyposażenia elektrycznego – elementów łączeniowych i przewodów [10]

Dodatkowo:

- podczas czyszczenia po pożarze mieszanka usuwa charakterystyczny „popożarowy” zapach, co jest szczególnie ważne dla morale pracowników, którzy mogą powrócić na miejsca pracy w krótkim czasie,
- powierzchnia po czyszczeniu jest całkowicie odtłuszczona i nadaje się do malowania bez potrzeby gruntowania,
- oszczędności przy wykorzystaniu technologii 3NS przy usuwaniu skutków pożaru sięgają kwot o bardzo dużej wartości - eliminacja potrzeby wymiany nawet do 90% podzespołów,
- bardzo krótki czas usunięcia awarii wywołanej przez pożar, podzespoły przywracane są do stanu funkcjonalności w czasie krótszym niż wymiana spalonego okablowania pod warunkiem, że użytkownik dopuszcza możliwość wykorzystania instalacji po pożarze, a sama instalacja nie została zniszczona, a jedynie zabrudzona,
- użyta metoda suchej mieszanki gazów, pozwala na 100% usunięcia sadzy z podzespołów, konstrukcji i pomieszczeń.

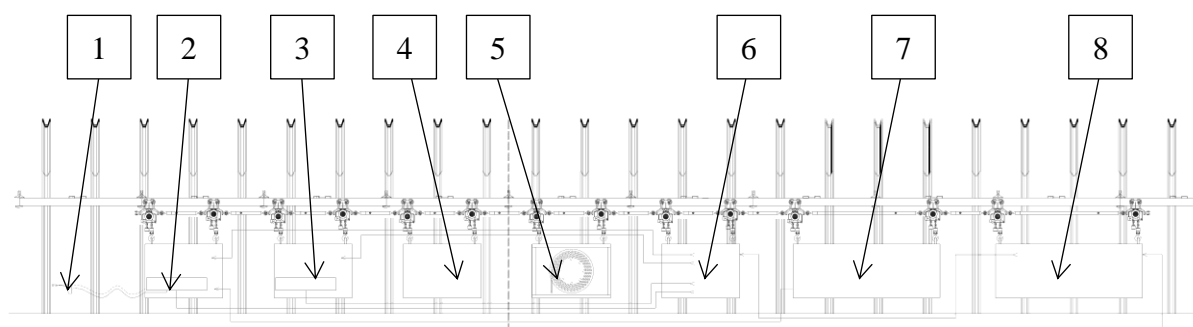
Technologia 3NS zabezpiecza przed korozją, nie zawiera wody, która w reakcji ze związkami halogenowymi (produkt uboczny spalania izolacji), powoduje korozję na elementach z tworzyw sztucznych, miedzianych i aluminiowych.

3. System czyszczenia i konserwacji urządzeń - UCT

Główna idea projektu realizowanego przez firmę 3NS oraz ITG KOMAG, polega na opracowaniu, dostosowanego do warunków zagrożenia wybuchem, systemu czyszczenia przy użyciu suchych gazów, przy zastosowaniu doświadczeń powstałych w trakcie eksploatacji w warunkach przemysłowych, w przestrzeniach niezagrożonych wybuchem. W praktyce oznacza to:

- opracowanie konstrukcji umożliwiającej bezpieczne stosowanie takiego systemu w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego,
- dostosowanie systemu do przewożenia go przy użyciu typowych środków transportowych, stosowanych w lokalizacjach, w których system będzie mógł pracować (np. w zakładach górniczych),
- dostosowanie systemu do współpracy z siecią energetyczną właściwą dla miejsca użytkowania (np. sieć energetyczna zakładu górniczego).

W ramach projektu zaproponowano organizację systemu jak pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat systemu UCT [14]

Przedstawiony system składa się z następujących elementów:

- dysza czyszcząca (poz. 1),

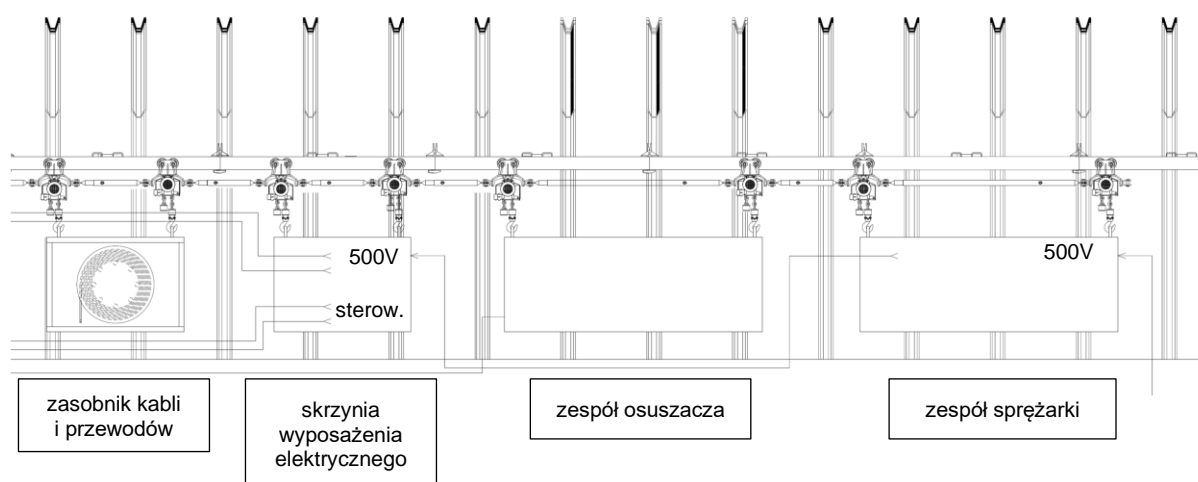
- zespół mieszalnika (poz. 2),
- zespół odbierający zabrudzenia (poz. 3),
- zasobnik do przechowywania CO₂ w postaci stałej (poz. 4),
- zasobnik kabli i przewodów (poz. 5),
- skrzynia wyposażenia elektrycznego (poz. 6),
- zespół osuszacza (poz. 7),
- zespół sprężarki (poz. 8).

Z uwagi na przebieg procesu czyszczenia system UCT przewidziany jest do stosowania w umownym podziale, w którym jedna jego część pozostaje w pobliżu przyłącza energetycznego lub w innym miejscu, co może być podyktowane np. warunkami ruchowymi w miejscu realizacji czyszczenia. Natomiast główne elementy wykonawcze zostają przetransportowane w pobliże miejsca, w którym odbywa się proces czyszczenia.

Przewiduje się, że w części stacjonarnej znajdą się następujące zespoły:

- zespół przygotowania powietrza, na który składają się:
 - zespół sprężarki,
 - zespół osuszacza,
- skrzynia wyposażenia elektrycznego,
- zasobnik kabli i przewodów.

Schematycznie przedstawiono to na rysunku 9.



Rys. 9. Część stacjonarna systemu UCT [14]

Zespół przygotowania powietrza ma za zadanie zapewnić dostęp do energii sprężonego powietrza, z uwzględnieniem szczególnych wymagań, typowych dla systemów stosowanych przez firmę 3NS. W ogólności powietrze musi być kondycjonowane – osuszone, niezaolejone itp. Tylko spełnienie tych wymogów pozwala na osiągnięcie zadowalających rezultatów w dalszym etapie procesu czyszczenia. Ponadto zespół przygotowania powietrza, zaprojektowany w ramach realizowanego przedsięwzięcia musi posiadać wydajność, pozwalającą na pracę urządzeń wykonawczych z pełną wydajnością, zapewniając jednocześnie dostęp do marginesu bezpieczeństwa w postaci rezerwy mocy.

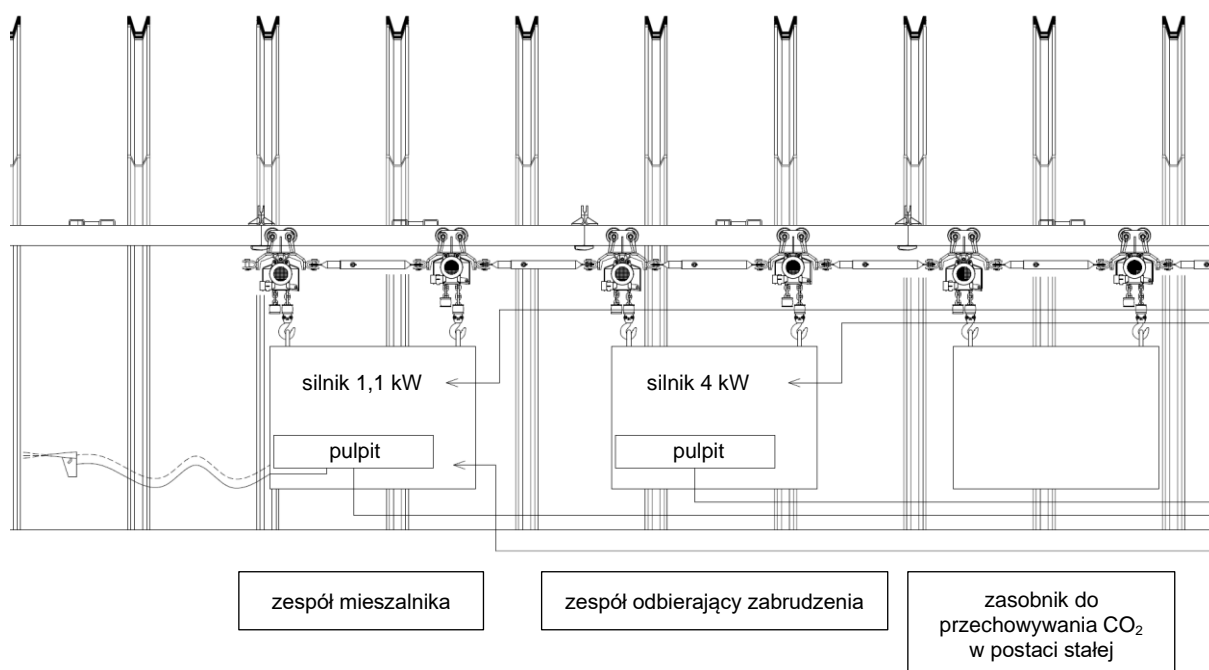
Skrzynia wyposażenia elektrycznego jest kolejnym, istotnym składnikiem systemu, w szczególności jeśli wziąć pod uwagę wymagania stawiane systemom pracującym w przestrzeniach zagrożonych wybuchem palnych pyłów i gazów. Skrzynia wyposażenia elektrycznego stanowi zasilanie systemu, ponadto realizuje wymaganą logikę łączy obwodów, powodując załączenie lub wyłączenie poszczególnych urządzeń wykonawczych. Zapewnia również realizację funkcji bezpieczeństwa, takich jak: wyłączenie awaryjne, kontrola stanu izolacji oraz inne. Wyposażenie elektryczne systemu zapewnia realizację wszystkich wymogów zawartych m.in. w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. – tzw. dyrektywie ATEX. Odpowiednio dobrane elementy oraz sposób ich organizacji zapewniają bezpieczną eksploatację systemu.

Zasobnik kabli i przewodów stanowi element zestawu, który z uwagi na założenie projektowe, dotyczące pracy urządzeń wykonawczych w odległości do 50 m od źródła zasilania, zapewnia możliwość organizacji przewodów elektrycznych i pneumatycznych. Przewiduje się, że zasobnik będzie zrealizowany w formie systemu szpul, które zapewnią łatwy dostęp do przewodów. W ramach projektu zaproponowane zostały przewody elektryczne i pneumatyczne wyposażone w system szybkozłącz, ułatwiających proces łączenia i rozłączania poszczególnych urządzeń systemu.

Część mobilna systemu składać się będzie z następujących elementów:

- zespołu mieszalnika wyposażonego w dyszę czyszczącą,
- zespołu odbierającego zabrudzenia,
- zasobnika do transportu i przechowywania CO₂ w postaci stałej.

Schematycznie przedstawiono to na rysunku 10.



Rys. 10. Część mobilna systemu UCT [14]

Zespół mieszalnika jest głównym elementem wykonawczym systemu i odpowiada za:

- przygotowanie frakcji zestalonego CO₂ o odpowiedniej wielkości, z punktu widzenia skuteczności procesu czyszczenia,



- przygotowania mieszaniny suchych gazów i przygotowanej wcześniej frakcji stałej CO₂ o wymaganym stosunku ilościowym,
- podawanie przygotowanej mieszaniny na wyjście urządzenia, do dyszy czyszczącej.

Zespół mieszalnika jest precyzyjnym urządzeniem, zapewniającym przygotowanie dwufazowej mieszanki CO₂ i sprężonego gazu, o jakości gwarantującej maksymalną skuteczność procesu czyszczenia. Mieszalnik współpracuje z dyszą czyszcząca, która jest obsługiwana przez operatora. Operator za pomocą przycisku w uchwycie dyszy uruchamia urządzenie, doprowadzając mieszaninę do czyszczonego miejsca. W zależności od stanu czyszczonej powierzchni oraz rodzaju zanieczyszczenia, to operator decyduje o przebiegu całego procesu, regulując czas ekspozycji czyszczonego miejsca na strumień czyszczący.

Ściśle związany z procesem czyszczenia jest proces odbioru zanieczyszczeń, który odbywa się dzięki obecności zespołu odbioru zanieczyszczeń – specjalistycznego „odkurzacza”, zasysającego produkty procesu czyszczenia i jednocześnie ograniczającego zapylenie w miejscu czyszczenia. W dotychczasowym sposobie realizacji, proces czyszczenia wymaga obecności dwóch operatorów: jeden z nich operuje dyszą czyszcząca, zaś drugi operuje węzłem, zasysającym zanieczyszczenia powstające w trakcie czyszczenia. Aktualnie trwają prace nad integracją obu funkcjonalności w jednej dyszy.

Jednym z czynników decydujących o efektywności procesu czyszczenia jest niezmiennosc jakości peletu CO₂, który ulega degradacji w obecności wilgoci. Podstawowymi wymogami stawianymi zasobnikowi do transportu i przechowywania zestalonego CO₂ były:

- zapewnienie właściwej izolacji termicznej, pozwalającej na przechowywanie przez zadany czas materiału bez jego degradacji,
- zapewnienie właściwej izolacji powietrznej, zapobiegającej wnikaniu zewnętrznej atmosfery do wnętrza zasobnika,
- zapewnienie możliwości rozładunku peletu CO₂ bez otwierania pokrywy zasobnika, co ma kluczowy wpływ na wnikanie powietrza zewnętrznego do wewnątrz.

W ramach realizowanego projektu, opracowano konstrukcję poszczególnych zespołów, bazując zarówno na wymaganiach formalnych, dotyczących pracy w przestrzeniach zagrożonych, jak i założeń projektowych, opartych o doświadczenia i wypracowane praktyki firmy 3NS.

4. Badania laboratoryjne systemu UCT

W ramach projektu firma 3NS zaprojektowała i zbudowała laboratorium badawcze, w którym w skalowalnych warunkach możliwe jest prowadzenie prac badawczo-rozwojowych, w szczególności dotyczących tematyki projektu związanego z opracowaniem metody czyszczenia stosowanej przez 3NS i dostosowanej do przestrzeni zagrożonych wybuchem palnych pyłów i gazów. Ogólny widok zabudowań laboratorium zbudowanego w technice kontenerowej przedstawiono na rysunku 11, a na rysunku 12 układ wymuszonego przepływu powietrza w części badawczej laboratorium.



Rys. 11. Zabudowania laboratorium powstałego w ramach projektu UCT [10]



Rys. 12. Układ wymuszonego przepływu powietrza w części badawczej laboratorium [10]

Laboratorium umożliwia prowadzenie badań wpływu pracy urządzeń systemu UCT, zapewniając kontrolę nad parametrami otoczenia, m.in.:

- klimatycznymi (temperatura, wilgotność),
- zapyleniem,
- kinetycznymi (prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu badawczym w zakresie 0-10 m/s).

Wyposażenie badawcze laboratorium umożliwia ponadto realizację pomiarów wielkości zapylenia w wybranych punktach przekroju poprzecznego pomieszczenia badawczego, temperatury, wilgotności, stężenia gazów, m.in.: CO₂, CH₄. Przykładową zabudowę urządzeń pomiarowych w komorze badawczej pokazano na rysunku 13, natomiast na rysunku 14 pokazano urządzenia pomiarowe, zlokalizowane w pomieszczeniu kontrolnym, mierzące parametry środowiskowe w komorze badawczej.



Rys. 13. Urządzenia pomiarowe w komorze badawczej [10]



Rys. 14. Urządzenia pomiarowe w pomieszczeniu kontrolnym [10]

Wstępne badania doświadczalne prowadzone w nowym laboratorium mają na celu m.in.:

- określenie warunków odniesienia w stosunku do aktualnie stosowanych urządzeń:
 - praca mieszalnika w typowym cyklu czyszczenia i jej wpływ na parametry otoczenia,
 - praca układu odbioru zanieczyszczeń i jej wpływ na parametry otoczenia,
- weryfikację wpływu zmiennych warunków otoczenia na skuteczność pracy systemu czyszczenia.

5. Podsumowanie

System czyszczenia za pomocą mieszaniny suchych gazów i CO₂ w postaci stałej jest szeroko stosowany przez firmę 3NS w wielu gałęziach przemysłu. Firma ma bogate doświadczenie w realizacji procesu czyszczenia, zarówno urządzeń elektrycznych, w tym również pod napięciem, jak i konstrukcji mechanicznych. Firma 3NS posiada również duże doświadczenie w usuwaniu zanieczyszczeń po pożarach. W ramach rozszerzania oferty usług dla partnerów przemysłowych, związanych z utrzymaniem ruchu, 3NS wraz z ITG KOMAG oraz AGH i Politechniką Warszawską realizuje projekt, mający na celu opracowanie nowej technologii czyszczenia, korzystającej



z dotychczasowych doświadczeń i przeznaczonych do stosowania w warunkach zagrożenia wybuchem palnych pyłów i gazów. W chwili obecnej trwają intensywne prace projektowo-konstrukcyjne oraz produkcyjne, mające na celu zbudowanie egzemplarzy doświadczalnych, posiadających budowę i cechy urządzeń przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Oprócz prac projektowych prowadzone są również prace badawcze, mające na celu określenie parametrów procesowych, zarówno związanych z urządzeniem, jak również z otoczeniem, w którym odbywa się proces czyszczenia. Dzięki temu, w trakcie badań egzemplarza prototypowego, będzie możliwe odniesienie się do aktualnie stosowanego systemu i określenie skuteczności nowego rozwiązania. Następnym krokiem będzie przeprowadzenie testów funkcjonalnych potwierdzających osiągnięcie założeń projektowych oraz ewentualnego wprowadzenia zmian, wpływających korzystnie na ergonomię oraz funkcjonalność opracowanych urządzeń. Dalsze prace będą miały na celu przeprowadzenie badań, których wyniki będą niezbędne w procesie oceny opracowanej technologii (w tym urządzeń) przez Jednostkę Certyfikującą w aspekcie możliwości stosowania w wyrobiskach zaliczonych do stopnia „a”, „b” lub „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy A lub B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Literatura

1. Karpuschewski B., Hoogstrate A.M., Achtsnick M.: Simulation and Improvement of the Micro Abrasive Blasting Process, *CIRP Annals*, Volume 53, Issue 1, 2004, Pages 251-254, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60691-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60691-X) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060760691X>) (dostęp:02.09.2021)
2. Achtsnick M., Geelhoed P.F., Hoogstrate A.M., Karpuschewski B.: Modelling and evaluation of the micro abrasive blasting process, *Wear*, Volume 259, Issues 1–6, 2005, Pages 84-94, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.045> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805000918>) (dostęp:02.09.2021)
3. Rosenberg B., Yuan L., Fulmer S.: Ergonomics of abrasive blasting: A comparison of high pressure water and steel shot, *Applied Ergonomics*, Volume 37, Issue 5, 2006, Pages 659-667, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.05.014> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687005001304>) (dostęp:02.09.2021)
4. Carvalhão M., Dionísio A.: Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcareous stones, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 16, Issue 4, 2015, Pages 579-590, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.10.004> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207414001484>) (dostęp:02.09.2021)
5. Porter D. W., Hubbs A. F., Robinson V. A., Battelli L. A., Greskevitch M., Barger M., Landsittel D., Castranova W. J. & V.: Comparative pulmonary toxicity of blasting sand and five substitute abrasive blasting agents, *Journal of Toxicology and Environmental Health*, (2002), Part A, 65:16, 1121-1140, DOI: 10.1080/152873902760125363
6. Smil V.: *Creating the twentieth century: technical innovations of 1867–1914 and their lasting impact*, Oxford University Press US. p. 211. ISBN 978-0-19-516874-7, 2005
7. <https://patents.google.com/patent/US108408A/en> (dostęp:02.09.2021)
8. <https://www.3ns.com.pl/czyszczenie> (dostęp:02.09.2021)
9. <https://www.3ns.com.pl/przetargi> (dostęp:02.09.2021)
10. Dokumentacja fotograficzna firmy 3N Solutions (materiały niepublikowane)



11. https://www.linde-gas.com/en/images/4-5953-Brochure%20CRYOCLEAN%20Dry%20Ice%20Blasting_56935_tcm17-121598.pdf (dostęp:02.09.2021)
12. <https://docplayer.pl/2709162-Czyszczenie-suchym-lodem.html> (dostęp:02.09.2021)
13. <https://dlaprodukcji.pl/czyszczenie-maszyn-i-urzadzen-kluczem-do-sprawnej-produkcji/> (dostęp:02.09.2021)
14. Dokumentacja ITG KOMAG projektu UCT (materiały niepublikowane)