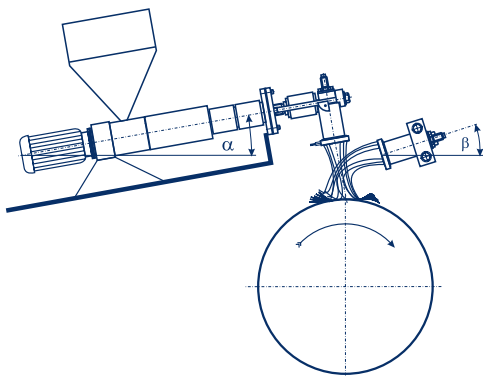


mgr inż. AGNIESZKA BROCHOCKA
dr inż. KATARZYNA MAJCHRZYCKA
dr inż. SABINA DOMARADZKA
Centralny Instytut Ochrony Pracy

Warunki aktywacji elektrostatycznej włókien pneumotermicznych a ich trwałość

Publikacja opracowana w ramach programu wieloletniego (b. SPR-1) pn. „Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia człowieka w środowisku pracy” dofinansowanego przez Komitet Badań Naukowych

Najważniejszą funkcją sprzętu ochrony układu oddechowego jest stworzenie bariery pomiędzy pracownikiem a środowiskiem pracy, w którym występują szkodliwe dla zdrowia i życia aerozole. Dobry filtr przeznaczony do ochrony układu oddechowego powinien charakteryzować się niską wartością penetracji cząstek aerozolu przez włókninę filtracyjną przy jednoczesnym zachowaniu niskich wartości oporu przepływu powietrza. W przypadku filtrów działających na zasadzie filtracji mechanicznej osiągnięcie takiego poziomu parametrów było niezwykle trudne, ponieważ wysokoskuteczne filtry wykazywały znaczne opory przepływu powietrza. Problem ten rozwiązano dopiero dzięki opracowaniu technologii włókien elektretowych, gdzie pole elektrostatyczne przyciągania, wytworzone wokół naładowanych włókien, przyczynia się do wzrostu sprawności wychwytywania cząstek



Rys. 1. Schemat stanowiska do wytwarzania włókien pneumotermicznych z wykorzystaniem dwóch głowic ustawionych prostopadle względem siebie

aerozoli. Przeprowadzone badania wykazały [1, 2, 3], iż wprowadzenie ładunku elektrycznego do włókien znacznie poprawia ich właściwości filtracyjne.

Badania symulujące warunki użytkowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego, a także ocena skuteczności elektretowych włókien pneumotermicznych w czasie ich przechowywania [6, 7], wykazały znaczną niestabilność parametrów ochronnych wyrażoną przez zwiększenie penetracji aerozolu testowego. Proces ten niewątpliwie wiąże się z niestabilnością ładunku wprowadzonego na włókna. Należy więc dążyć do opracowania takiej techniki wprowadzania ładunku elektrycznego w materiale filtracyjnym, aby zagwarantować stabilność własności filtracyjnych w czasie. W tym celu wytworzono elektretowe włókniny pneumotermiczne o wysokiej skuteczności ochronnej, elektryzowane różnoimienną metodą wyładowań koronowych i dokonano oceny ich skuteczności w czasie 12 miesięcy.

Stanowisko do formowania włókien pneumotermicznych

Włókniny pneumotermiczne wytwarzano z włókien formowanych ze stopionego polimeru, rozdmuchiwanych w silnym strumieniu gorącego powietrza. Włókna aktywowano elektrostatycznie w czasie ich wyciągania lub aktywowano gotową włókninę. Proces aktywacji elektrostatycznej realizowano na drodze sterowania rozkładem przestrzennym jednoimiennych i dwuimiennych ładunków wprowadzonych na włókninę, gdyż na proces depozycji cząstek wpływa nie tylko ilość ładunków elektrostatycznych, lecz także ich rozmieszczenie.

Stosowane do badań włókniny pneumotermiczne formowano z jednorodnego polimeru polipropylenu na dwóch współpracujących ze sobą wyłaczarkach, przy ustawieniu głowic w płaszczyznach prostopadłych względem siebie (rys. 1).

Każda wyłaczarka posiada własne oprzyrządowanie w postaci nagrzewnicy powietrza i głowicy wielorzędowej. Wspólnym ich elementem jest urządzenie odbiorcze, służące do formowania włókniny. Stopione polimery podawane są do dysz za pomocą wyłaczarek. Gorące sprężone powietrze rozdmuchuje wychodzące z dysz polimery na elementarne włókienka, które po schłodzeniu powietrzem są osadzane na urządzeniu odbiorczym. Urządzenie to wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi i posuwisty względem dysz, z ustaloną prędkością. Strumienie włókien, stykając się z powierzchnią urządzenia odbiorczego zostają nawinięte na jego powierzchnię, tworząc włókninę. Zaprezentowane stanowisko umożliwia wytwarzanie pneumotermicznych włókien filtracyjnych w szerokim zakresie parametrów geometrycznych.

Sposoby aktywacji elektrostatycznej

Z przeglądu danych literaturowych [4, 5, 8] wynika, że efektywność wyłapywania cząstek przez naładowane włókna wzrasta ze wzrostem gęstości ładunku oraz natężenia pola elektrostatycznego. Aby ustalić napięcie zasilania na elektrodach strunowych, optymalnie z punktu widzenia skuteczności filtracji włókien, wykonano wstępne badania, począwszy od wartości 5 do 25 kV napięcia zasilania stosowanych aktywatorów. Powyżej tej wartości obserwowano wyładowania iskrowe, które powodowały zmiany strukturalne we włókninie, co dyskwalifikowało ją jako materiał filtrujący stosowany w sprzęcie ochrony układu oddechowego.

Wielkość ładunku zgromadzonego na wytworzonych włókninach wyznaczano metodą pomiaru natężenia pola wokół próbki. Próbkę umieszczano na specjalnie do tego celu skonstruowanej ramie, a następnie za pomocą woltomierza elektrostatycznego dokonywano pomiaru na-

pięcia w pięciu punktach, równomiernie rozmieszczonych na jej powierzchni. Odległość badanej próbki od czujnika pomiarowego woltomierza była stała i wynosiła 2 mm. Wartość bezwzględna ładunku obliczono, mnożąc uzyskaną wartość napięcia przez stałą k , związaną z układem pomiarowym i odnosząc ją do powierzchni badanej próbki. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

ŚREDNIE WARTOŚCI BEZWZGLĘDNE ŁADUNKU ELEKTRETOWEJ WŁÓKNINY PNEUMOTERMICZNEJ

Wartość napięcia aktywatorów, kV	Wartość bezwzględna ładunku, pC/cm ²
0	26,95
5	131,30
25	237,53

Wyniki badań potwierdziły, że wyższa wartość napięcia zasilania aktywatorów powoduje wzrost sił elektrostatycznego oddziaływania włókien, o czym świadczą wyniki badań ładunku wokół ich powierzchni. W związku z tym dalsze badania, zmierzające do optymalizacji sposobu rozkładu przestrzennego ładunków jedno i dwumiennych, prowadzono przy stałym napięciu zasilania aktywatorów $U = 25$ kV.

W celu ustalenia wpływu miejsca nanoszenia aktywacji elektrostatycznej w metodzie wyładowań koronowych na właściwości filtracyjne włókien pneumatycznych, wykonano układ dwóch elektrod strunowych umieszczonych w obudowie izolacyjnej. Ładunki elektrostatyczne wprowadzano na etapach:

- formowania włókien w strumieniu gorącego powietrza – aktywator umieszczony w sąsiedztwie dysz polimerowych pod głowicami
- nawijania włókniny na urządzeniu odbiorczym – aktywator umieszczony na walcu urządzenia odbiorczego
- jednoczesnego formowania włókien i tworzenia włókniny – aktywatory umieszczone w sąsiedztwie dysz pod głowicami i przy urządzeniu odbiorczym.

Ponadto, w celu ustalenia zależności właściwości filtracyjnych włókien od znaku naniesionego ładunku i jego przestrzennego rozmieszczenia, wyprodukowano serię włókien pneumatycznych o tej samej geometrii warstwy filtracyjnej

(masa powierzchniowa 120 g/m², opory przepływu powietrza ok. 130 Pa) w następujących wariantach:

- włóknina, której wszystkie warstwy ładowane były znakiem dodatnim (+ + + +)
- włóknina, której wszystkie warstwy ładowane były znakiem ujemnym (- - - -)
- włóknina, której wszystkie warstwy ładowane były jednocześnie znakiem dodatnim z jednej głowicy i ujemnym z drugiej (+ i -)
- włóknina ładowana warstwowo, przemiennie (+ - - -), tzn. dwie pierwsze warstwy ładowane były znakiem dodatnim, a dwie następne znakiem ujemnym.

Metodyka oceny skuteczności filtracji

Oceny parametrów filtracyjnych wytworzonych włókien dokonano przyjmując parametr zwany penetracją testowego aerozolu chlorku sodu [9]. Włókniny po wytworzeniu przechowywano w warunkach pokojowych, przy wilgotności względnej powietrza (50±2%) i temperaturze (20±3)°C przez 48 godzin, w celu ustabilizowania się ładunku nadmiarowego. Po tym czasie wyznaczano początkową wartość penetracji aerozolem chlorku sodu. Badania te powtarzano co 50 dni, przez okres 12 miesięcy.

Wskaźnik penetracji, rozumiany jako stosunek koncentracji aerozolu za próbką do koncentracji aerozolu przed próbką, wyznaczono stosując submikronowy aerozol chlorku sodu, w którym masowa mediana średnicy cząstek wynosiła 0,6 mm, przy prędkości liniowej przepływu powietrza 0,16 m/s.

Zasada pomiaru penetracji metodą aerozolu chlorku sodu polega na przepuszczeniu aerozolu przez płomień wodorowy, gdzie następuje wzbudzenie atomów sodu w wysokiej temperaturze. Układ jest zasilany suchym powietrzem, którego część jest kierowana do pneumatycznego generatora aerozolu, w którym znajduje się 1-procentowy roztwór NaCl. Tak otrzymany aerozol kierowany jest do osuszacza, gdzie następuje mieszanie z głównym strumieniem powietrza i odparowanie wody, co na wylocie umożliwia uzyskanie suchego aerozolu chlorku sodu. Aerozol testowy sprzed i zza badanego materiału filtracyjnego, za pośrednictwem układu zaworów, kierowany jest do pal-

Tabela 2 ŚREDNIA WARTOŚĆ PENETRACJI NaCl WYTWORZONYCH WŁÓKNIN PNEUMOTERMICZNYCH PRZY RÓŻNYM UMIEJSCOWIENIU AKTYWATORÓW

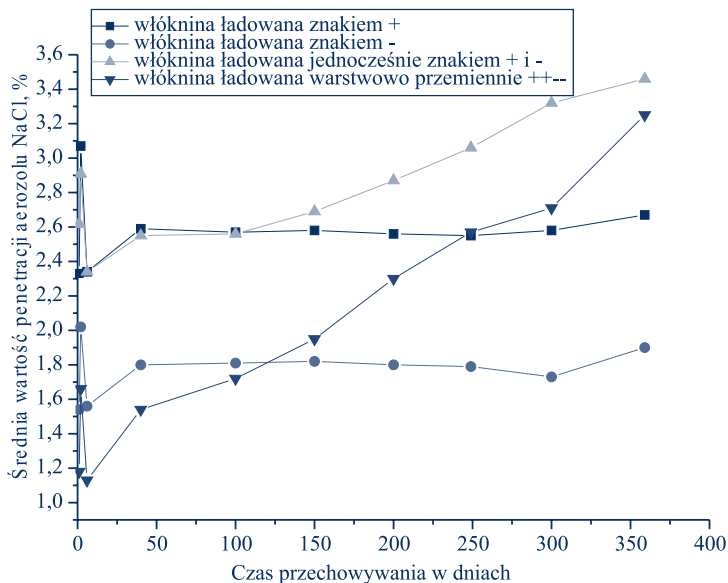
Sposób nanoszenia ładunku	Wariant aktywacji elektrostatycznej	Średnia wartość penetracji NaCl, %
Bez aktywacji	brak	15
Aktywacja przy urządzeniu odbiorczym	+ + + + - - - - + i - + + + -	8,65
Aktywacja pod głowicami	+ + + + - - - - + i - + + + -	2,97
Aktywacja przy urządzeniu odbiorczym i pod głowicami	+ + + + - - - - + i - + + + -	2,1

nika, gdzie następuje jego silne ogrzanie. W podwyższonej temperaturze atomy sodu pobudzane są do świecenia. Natężenie światła jest proporcjonalne do masowego stężenia chlorku sodu. Emitowane w płomieniu światło trafia do układu optycznego złożonego z szeregu filtrów. Pierwszy z nich – monochromatyczny przepuszcza jedynie światło o długości fali odpowiadającej świeceniu wzbudzonych atomów sodu. Następnie, za pomocą szeregu kalibrowanych filtrów szarych, ilość przepuszczanego światła dostosowuje się do zakresu detektora, którym jest fotopowielacz zapewniający dużą czułość aparatu. Zakres pomiaru penetracji z zastosowaniem opisanej metody wynosi od 0,0001÷100%.

Wyniki przeprowadzonych badań

Średnie wartości parametrów elektretowych włókien pneumatycznych, bezpośrednio po wytworzeniu, przy różnych wariantach usytuowania aktywatorów, przedstawiono w tabeli 2.

Najmniejszą początkową penetrację aerozolu chlorku sodu uzyskała włóknina, której dwie pierwsze warstwy ładowane były znakiem „+”, a dwie następne znakiem „-”. Jednakże dla tego samego wariantu, po okresie 12 miesięcy od momentu wytworzenia włókniny, obserwo-



Rys. 2. Zmiana wartości penetracji chlorku sodu w czasie przechowywania włókien aktywowanych jednoimiennym i różnoimiennym ładunkiem

wano wzrost penetracji aerozolu chlorku sodu z wartości 1,30% do wartości 3,25%, co w odniesieniu do sprzętu ochrony układu oddechowego oznacza znaczny spadek ich skuteczności w czasie. Proces ten może być wynikiem powolnej neutralizacji ładunków zgromadzonych wewnątrz włókniny, co uzasadnia obecność zbliżonej ilości ładunków przeciwnych znaków. Wniosek ten znajduje także swoje potwierdzenie w obserwacjach przebiegu zmian penetracji aerozolu chlorku sodu w czasie 12 miesięcy w odniesieniu do włókniny aktywowanej ładunkiem tego samego znaku (rys. 2). Szczegółowa analiza zmian wartości penetracji w czasie w tym wariancie wykazała, że od momentu wytworzenia zachowała ona właściwości ochronne na poziomie tej samej klasy, na co wskazuje zmiana wskaźnika penetracji z wartości 1,6% do wartości 1,9%, po 12 miesiącach przechowywania (tab. 3).

Przeprowadzone badania wykazały, że własności filtracyjne włókien elektretowych

bardzo zależą od sposobu nanoszenia ładunku na włókninę oraz od znaku tego ładunku, co ma szczególne znaczenie w odniesieniu do trwałości właściwości filtracyjnych sprzętu ochrony układu oddechowego. Uzyskane wyniki badań skuteczności filtracji w okresie 12 miesięcy przechowywania wskazują, że istnieje konieczność prowadzenia systematycznych badań, szczególnie w odniesieniu do nowo opracowanych włókien elektretowych, w zakresie trwałości efektu elektryzacji w czasie, aby prawidłowo ustalić okres przechowywania, gwarantujący zachowanie własności ochronnych na zadowalającym poziomie.

* * *

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano wskazówki do optymalizacji warunków aktywacji elektrostatycznej metodą wyładowań koronowych, z punktu widzenia skuteczności filtracji i trwa-

łości właściwości filtracyjnych elektretowych włókien pneumatycznych. Wyniki badań wskazują, że najlepszym sposobem nanoszenia ładunku elektrostatycznego jest jednoczesna aktywacja przy urządzeniu odbiorczym i pod głowicami. Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, że włóknina ładowana jednoimiennym ładunkiem zapewnia najmniejszy spadek skuteczności ochronnej sprzętu ochrony układu oddechowego, w przeciwieństwie do włókniny ładowanej różnoimiennym ładunkiem. Wynikają z tego praktyczne rady dla producentów filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego, szczególnie w odniesieniu do ustalania czasu przydatności tego sprzętu do użytkowania, który może znacznie różnić się w zależności od technologii wytwarzania włókien elektretowych.

PIŚMIENNICTWO

[1] Bollinger N.J., Schutz R.H. *NIOSH Guide to industrial respiratory protection*. U.S. Department of Health and Human Services. NIOSH, Division of Safety Research, 1987

[2] Brown R.C., Wake D., Gray R., Blackford D.B., Bostock G.J. *Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material*. Ann. Occup. Hyg., Vol. 32, No.3, 1988

[3] Brown R.C. *Air filtration. An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. Pergamon Press, 1993

[4] Brown R.C., Wake D., Blackford D.B., East G.C., Smith P.A. *The use of electrically charged polymers in air filters*. First International Conference on Electrical, Optical and Acoustic properties of polymers. University of Kent. Canterbury, UK, 5-7 September 1988

[5] Brown R.C. *Electrical effects in dust filters*. World filtration Congress II, 1979, s. 291-301

[6] Majchrzycka K. *Filtracja aerozoli w warunkach symulujących użytkowanie indywidualnych ochron układu oddechowego*. Praca doktorska CIOP, Warszawa 1999

[7] Ciach T., Czwaro L., Gradoń L. *Metody zwiększania sprawności filtracji materiałów włókninowych. Włókniny pneumatyczne*. Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, t. XXII, z. 1-2, 1995

[8] Brown R.C. *Air filtration*. Pergamon Press 1993

[9] PN-EN 143:1996 *Sprzęt ochrony układu oddechowego. Filtry. Wymagania, badanie, znakowanie*

Tabela 3
WYNIKI POCZĄTKOWEJ PENETRACJI AERAZOLU CHLORKU SODU PRZEZ WŁÓKNINY AKTYWOWANE JEDNOIMIENNYM I RÓŻNOIMIENNYM ŁADUNKIEM

Sposób nanoszenia ładunku	Wariant aktywacji elektrostatycznej	Początkowa penetracja NaCl %		Penetracja NaCl po okresie 12 miesięcy %	
		średnia wartość	odchylenie standardowe	średnia wartość	odchylenie standardowe
Aktywacja przy urządzeniu odbiorczym i pod głowicami	+++	2,45	0,39	2,67	0,12
	---	1,60	0,24	1,9	0,25
	+i-	3,12	0,59	3,46	0,46
	++--	1,30	0,29	3,25	1,18