



Zagrożenie środowiskowe powodowane przez włókna szklane

Rafał L. Górny, Małgorzata Gołofit-Szymczak

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

1. Włókna szklane – ich rodzaje, charakterystyka fizyczna i zastosowanie

Włóknami określamy cząstki, których długość jest kilka razy większa od ich średnicy. Włókna szklane należą do sztucznych włókien mineralnych (ang. man-made mineral fibers, MMMF). Najpowszechniej wytwarzane MMMF mają strukturę szklistą (niekryształiczną, amorficzną), tj. ich atomy składowe nie są rozmieszczone w postaci regularnej sieci przestrzennej, tak jak w kryształicznych materiałach. Są one produkowane poprzez topienie odpowiedniego surowca i nadawanie mu pożądanego kształtu w wyniku szybkiego jego chłodzenia. W przypadku włókien szklanych, najpowszechniej stosowanym surowcem są krzemiany i nieorganiczne tlenki krzemu z dodatkiem różnych stabilizatorów i modyfikatorów. MMMF są zazwyczaj klasyfikowane w trzech grupach jako: ciągłe włókna szklane, wełna mineralna i ogniotrwałe włókna (ceramiczne) (Costa & Orriols 2012, Rapisarda i in. 2015). Ciągłe włókna szklane są mniej lub bardziej prostoliniowe, o jednolitych średnicach i są zwykle grubsze od włókien wełny mineralnej. Zazwyczaj ze względu na charakter procesu produkcji powstają bardzo długie włókna, ale w miarę ich rozdrabniania rozpadają się na krótsze o średnicach pomiędzy 3 a 25 μm . W tej grupie włókien szklanych znane są ich dwa typy, tj. włókna E i S. Włókna E są tańsze w produkcji, ale mają gorsze właściwości mechaniczne niż włókna S (Costa & Orriols 2012, Mauderly i in. 2000).

Wełny mineralne są masą splecionych, niezorganizowanych włókien o różnej długości i średnicy. Wełny mineralne zwyczajowo dzieli się na 3 rodzaje: włókno szklane kompozytowe, wełna skalna i wełna żużlowa. Choć średnice włókien wełny mineralnej wahają się od 2 do 10 μm , a ich długość często przekracza 250 μm , to w powietrzu zakładów ją produkujących najczęściej obserwuje się włókna o długościach w zakresie 8-15 μm i średnicach w zakresie 0,7-1 μm . Z punktu widzenia oddziaływania aerozolu na człowieka, na szczególną uwagę zasługują mikrowłókna wełny szklanej o średnicach mniejszych niż 1 μm . Są one stosowane w produktach zaawansowanych technologii, takich jak wysokosprawne filtry powietrza czy izolacje w przemyśle lotniczym (Marek 2003, Mauderly i in. 2000).

Ogniotrwałe włókna są mieszaniną glinu, krzemionki i trudno topliwych tlenków. Włókna te mają średnicę 1,2-3,5 μm , a ich długość jest zmienna. Włókna ogniotrwałe są wykorzystywane głównie jako izolacja cieplna dla potrzeb zabezpieczenia wysokotemperaturowych procesów (Costa & Orriols 2012, Marek 2003).

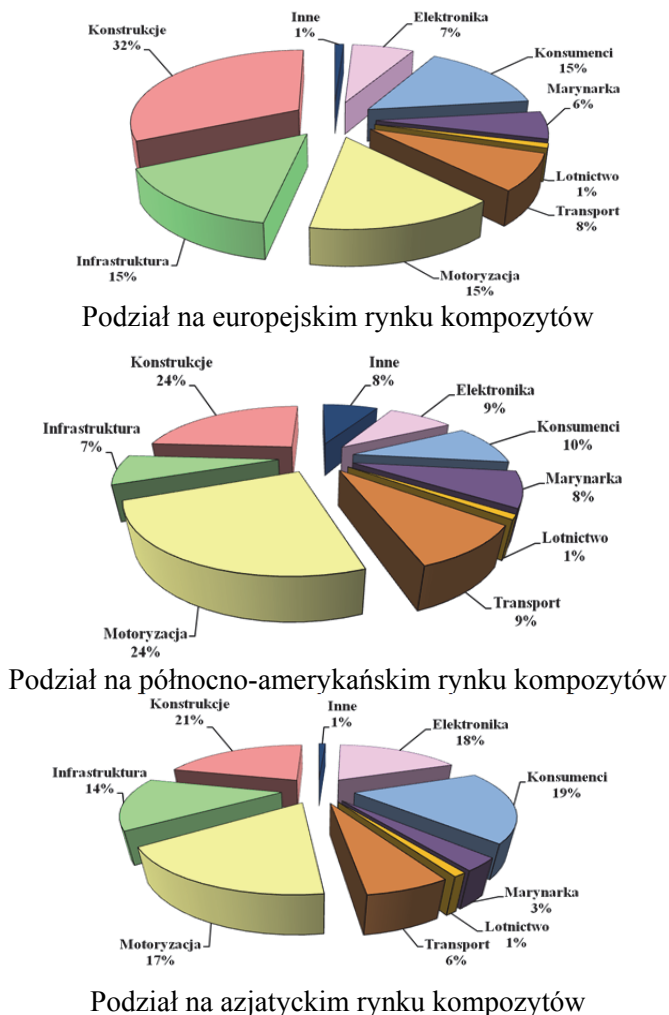
Włókna szklane charakteryzują się małym wydłużeniem i wysokimi wartościami modułu sprężystości. Wytrzymałość pojedynczych włókien szklanych zależy od ich średnicy. Im jest ona większa, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia wad materiałowych, defektów oraz tzw. mikrocarbów i mikropęknięć w finalnych wyrobach. Włókna szklane mają dobre właściwości dielektryczne. Są też odporne na działanie ognia i czynników chemicznych. Niekorzystną cechą włókien szklanych jest ich wrażliwość na działanie wody (Mayer & Kaczmar 2008).

Ciągłe włókna szklane zaczęły być produkowane na początku XX wieku. Są wykorzystywane do wzmacniania materiałów stosowanych w izolacji, w elektronice i w budownictwie (Costa & Orriols 2012, Mauderly i in. 2000). Na rysunku 1 przedstawiono zastosowania kompozytów tworzywo-włókno szklane w różnych regionach świata¹.

Szczytowy okres produkcji wełny skalnej i żużlowej przypada na połowę XX wieku, gdy wełna szklana, a zwłaszcza izolacje z włókna szklanego typu fiberglass, zyskiwały na technicznym znaczeniu. Wełny

¹<http://tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/%C5%9Awiatowy-rynek-kompozyt%C3%B3w-tworzywo-w%C5%82%C3%B3kno-szklane-21664.html> (07.12.2015)

szklane są wykorzystywane np. do izolacji termicznej i akustycznej budynków, jak również do ochrony materiałów łatwopalnych (Costa & Oriols 2012).



Rys. 1. Zastosowanie kompozytów tworzywo-włókno szklane w różnych regionach świata (źródło: Reinforced Plastics)¹

Fig. 1. The use of material-glass fiber composites in various regions of the world (source: Reinforced Plastics)¹

Dziś, około 60% produkowanych włókien szklanych stosuje się do wytwarzania kompozytów na osnowach polimerowych. Zaletą włókien szklanych jest możliwość tworzenia trwałych i mocnych połączeń na granicy międzyfazowej polimer-szkło. Najczęściej do wzmacniania kompozytów na osnowie polimerowej stosuje się włókna szklane typu E, których średnice mieszczą się w zakresie 6,4-7,6 μm (Mayer & Kaczmar 2008, Wallenberger i in. 2001).

2. Zanieczyszczenie środowiska pracy aerozolem włókien szklanych

Szacuje się, że na świecie, co roku w ponad 100 zakładach wytwarza się około 9 milionów ton MMMF. Włókna szklane znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. W budownictwie wełna szklana, skalna i żuźlowa wykorzystywane są do termicznej i akustycznej izolacji konstrukcji oraz do wzmacniania konstrukcji cementowych. Odporność chemiczna włókien szklanych sprawia, że są one stosowane w produktach o wysokiej mechanicznej odporności m.in. do wytwarzania wanien galwanicznych i zbiorników na paliwo. W przemyśle motoryzacyjnym i transportowym z żywic poliestrowych lub epoksydowych z włóknem szklanym wytwarzane są np. nadwozia samochodów. Materiały kompozytowe uzupełnione dodatkiem włókien szklanych znalazły również zastosowanie w sporcie i rekreacji (np. tyczki, narty, rakiety tenisowe itp.). W telekomunikacji, technice komputerowej i telewizji cyfrowej coraz częściej transmisja danych odbywa się za pomocą światłowodów, w skład których wchodzi cylindryczne włókna szklane otoczone powłoką izolacyjną. Wkłady z włókna szklanego wykorzystywane są także w stomatologii dla odbudowy zęba po leczeniu endodontycznym (Inthavong i in. 2013, Rapisarda i in. 2015).

Poziom narażenia pracowników na pył włókien szklanych zależy od rodzaju zastosowanego włókna, jego cech fizycznych i sposobu jego konfekcjonowania (Hesterberg i in. 2012, Rapisarda i in. 2015):

- włókna szklane grube (tzw. wełna szklana lub wata szklana) są włóknami nieciąglymi, o średnicy 5-30 μm ; stosowane głównie w budownictwie jako izolacja cieplna, akustyczna oraz przeciw wilgoci,
- włókna szklane ciągłe, o średnicy 3-13 μm są stosowane w postaci przędzy, wyrobów tkanych i dzianych oraz rowingu jako materiał izo-

lacyjny w elektrotechnice, do wyrobu tkanin, wzmacniania tworzyw sztucznych lub zbrojenia betonu,

- włókna szklane jako mata, w rolkach, średnio o szerokości 100 cm i wadze do 50 kg, używa się do produkcji różnych wyrobów w formach silikonowych i formach twardych z użyciem żywicy poliestrowej,
- włókna super cienkie o średnicy 1-3 μm są stosowane do wyrobu dobrych izolacji akustycznych i cieplnych,
- włókna szklane typu fiberglass, kompozyt o szerokim zastosowaniu w produkcji łodzi, samochodów, zbiorników wodnych, rur i dachów,
- włókna światłowodowe, nici szklane (najczęściej o średnicy 125 μm) wykorzystywane do prowadzenia światła.

Średnie stężenia MMMF w czasie procesów ich produkcji (wyrażone jako wartości średnie dla 8-godzinnej pracy) nie przekraczają zwykle wartości 0,5 włókna/cm³ powietrza (Costa & Orriols 2012), choć mogą sięgać poziomu równego kilkukrotności tej wartości. Obserwowany zakres wartości stężeń w środowisku pracy mieści się w granicach od 0,002 (produkcja ciągłych włókien szklanych) do 1,56 włókna/cm³ powietrza (produkcja wełny szklanej). Gdy włókna są stosowane w praktyce lub usuwane ze środowiska, wtedy ich stężenia mogą bardzo znacząco wzrastać, nawet do poziomu 12,7 włókien/cm³ powietrza (Marchant i in. 2002, Mauderly i in. 2000).

Kontrola zanieczyszczenia środowiska pracy włóknami szklanymi odbywa się poprzez kontrolę ich stężenia w określonej objętości powietrza. W tego typu ocenie ważne jest wyznaczenie stężenia włókien respirabilnych. W wielu krajach ustalone są wartości dopuszczalnych stężeń, i tak np.:

- a) w Polsce, wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń (dla włókien respirabilnych) wynoszą: dla pyłów sztucznych włókien mineralnych, z wyjątkiem włókien ceramicznych – 1 włókno/cm³; dla pyłów włókien ceramicznych – 0,5 włókna/cm³, dla pyłów włókien ceramicznych w mieszaninie z innymi sztucznymi włóknami mineralnymi – 0,5 włókna/cm³ (Augustyńska & Pośniak 2014),
- b) w Stanach Zjednoczonych, średnia ważona czasowa ustalona przez National Institute for Occupational Safety and Health² jako zalecane

² www.cdc.gov/niosh/npgd/npgd0288.html (02.12.2015)

- dopuszczalne stężenie wynosi 3 włókna/cm³ (dla włókien o średnicach $\leq 3,5 \mu\text{m}$ i długości $\geq 10 \mu\text{m}$) (Marchant i in. 2002),
- c) w Hiszpanii, dopuszczalna wartość narażenia w środowisku pracy dla włókien ogniotrwałych (w tym ceramicznych) oraz włókien specjalnego przeznaczenia została ustalona na poziomie 0,5 włókna/cm³, a dla włókien szklanych typu fiberglass i wełny mineralnej na poziomie 1 włókna/cm³ (Costa & Orriols 2012).

3. Pozaprzemysłowe narażenia na włókna szklane

W światowym piśmiennictwie przedmiotu praktycznie brak jest doniesień na temat pozaprzemysłowego narażenia na włókna szklane. Jednymi z nielicznych badań dotyczących tej tematyki są pomiary prowadzone w budynkach biurowych i mieszkalnych. W amerykańskich badaniach Cartera i wsp. przeprowadzonych w 51 domach i budynkach użyteczności publicznej, stężenia włókien szklanych w powietrzu były niezwykle niskie (0,0001 włókna/cm³), a same włókna tego typu były stwierdzone jedynie w dwóch budynkach. W fińskich badaniach, w ponad 60% ewaluowanych biur, MMMF były obecne w pyłe osiadłym zebranym z powierzchni w tychże wnętrzach (Salonen i in. 2009). Z kolei badania Prasauskasa i wsp. prowadzone w budynkach mieszkalnych wykazały, że w nowo wybudowanym domu jednorodzinnym, stężenia powierzchniowe MMMF mieściły się w przedziale 2,3-5,6 włókien/cm², a w użytkowanych już od lat mieszkaniach w budynkach wielopiętrowych zawierały się w przedziale 0,11-0,67 włókien/cm². Te ostatnie stężenia były zbliżone do wartości dopuszczalnego zanieczyszczenia dla regularnie czyszczonych powierzchni określonego przez Schneidera na poziomie 0,2 włókna/cm².

4. Niekorzystne skutki zdrowotne wywołane działaniem włókien szklanych

Włókna szklane mogą wywierać niekorzystny wpływ na zdrowie, jeśli mają one bezpośredni kontakt ze skórą, błonami śluzowymi lub są zdolne do wnikięcia do układu oddechowego. Włókna szklane, zwłaszcza te, których średnica przekracza 4-5 μm mogą powodować podrażnienia skóry objawiające się powstaniem rumienia plamistego (Inthavong i in. 2013, Marek 2003).

Niekorzystne skutki zdrowotne związane z narażeniem na włókna szklane mogą manifestować się również w postaci podrażnienia spojówek oczu. W narażeniu zawodowym już 4-dniowy kontakt pracownika z pyłem tego typu włókien mineralnych skutkować może powstaniem dużej liczby mikronabłonkowych uszkodzeń spojówek i wzrostem poziomu granulocytów w płynie spojówkowym (Inthavong i in. 2013).

Najpoważniejsze jednak skutki zdrowotne włókna szklane mogą powodować w narażeniu inhalacyjnym. Zdolność danego włókna do powodowania tego rodzaju niekorzystnej reakcji zdrowotnej u narażonej osoby jest uwarunkowana jego: wymiarami, dawką i biologiczną trwałością. Jeśli chodzi o wymiary, najważniejsze znaczenie w patologii mają włókna respirabilne, posiadające średnicę mniejszą niż 3 μm , długość większą niż 5 μm , a stosunek długości do średnicy równy lub większy niż 3. Przyjmuje się, że „grubsze” włókna, chociaż mogą być inhalowane, zwykle na skutek mechanizmu intercepcji są zatrzymywane w górnych drogach oddechowych. Ponieważ depozycja włókien szklanych w krtaniowym i tchawiczym rejonie układu oddechowego człowieka jest minimalna, wszystkie pozostałe włókna, które nie zostały zatrzymane w górnych drogach oddechowych mogą penetrować w głąb płuc, a następnie mogą być fagocytowane przez makrofagi pęcherzykowe i eliminowane z organizmu. Dawka odnosi się natomiast do liczby (lub ilości) włókien, które docierają do mięszu płuc w stężeniu przekraczającym możliwości mechanizmów obronnych do ich wyeliminowania, co może powodować skutki patologiczne. Trwałości lub biotrwałości, to czas, w którym włókna mogą pozostawać w płucach. Jest on zależny od szybkości, z którą włókna mogą być rozpuszczone lub ulec podziałowi po ich depozycji, co związane jest ściśle z ich składem chemicznym (Hesterberg i in. 2012, Inthavong i in. 2013).

4.1 Badania *in vivo* na zwierzętach

Badania niekorzystnego oddziaływania włókien szklanych dotyczyły zazwyczaj układu oddechowego i były prowadzone z wykorzystaniem gryzoni. Eksperymenty z udziałem chomików są obecnie uważane za niereprezentatywne lub nawet nieodpowiednie w kontekście ekstrapolacji ich wyników dla potrzeb oceny toksyczności tego typu włókien u ludzi ze względu na specyficzną u tego gryzonia budowę i ultrastrukturę płuc, nadmierną wrażliwość jego opłucnej, trudności w rozwoju nowo-

tworu płuc pod wpływem pyłów mineralnych oraz biotrwałość włókien w wydzielinie płucnej (Costa & Orriols 2012, Hesterberg i in. 2012). W badaniach na zwierzętach symulowano różne drogi narażenia wykorzystując podawanie badanych dawek włókien w sposób doopłucnowy, dootrzewnowy, inhalacyjny i poprzez wkraplanie dotchawicze. Istnieją wątpliwości, co do reprezentatywności wyników badań uzyskanych poprzez doopłucnowe i dootrzewnowe podanie badanych dawek włókien dla potrzeb oceny ryzyka ich rakotwórczego działania, ponieważ obie te metody podawania różnią się od standardowej drogi wnikania włókien do organizmu, omijając jego naturalne mechanizmy obronne. Z kolei badania wykorzystujące wkraplanie dotchawicze różnych typów MMMF często prowadziło do zainicjowania rozwoju raka, głównie międzybłoniaka opłucnej (Costa & Orriols 2012). W rzeczywistości można zaobserwować, iż w odpowiednich dawkach, wszystkie włókna mineralne mogą wywołać proces kancerogenezy. Niemniej jednak efekt ten nie jest obserwowany w badaniach epidemiologicznych zarówno u ludzi, jak i u zwierząt, jeśli narażenie na włókna ma charakter inhalacyjny. Z tych też powodów uznaje się dziś, że tylko wyniki długookresowych badań z wziewnym podawaniem stosownych dawek włókien mogą być wykorzystywane do prognostycznej oceny niekorzystnych skutków zdrowotnych u ludzi. Należy tu również pamiętać o tym, iż stosowane w tych badaniach dawki włókien (zwykle od 100 do ponad 1000 włókien/cm³ powietrza) są wielokrotnie wyższe od tych powodujących narażenie w środowisku pracy (w przybliżeniu 0,2 włókna/cm³ powietrza) (Marchant i in. 2002).

W odniesieniu do wełny szklanej i włókien szklanych kompozytowych (wełna szklana typu fiberglass) dotychczas prowadzone badania wykazały, że inhalacja tych włókien przez szczury (trwająca nawet 2 lata) nie wykazała ich rakotwórczego działania (Hesterberg i in. 1996). Niemniej jednak, w badaniach inhalacyjnych u chomików zaobserwowano, że choć włókna szklane typu 475 nie wywoływały raka płuc, to indukowały zwłóknienie płuc oraz międzybłoniaka opłucnej. Również Cullen i wsp. zaobserwowali powstawanie raka płuc i międzybłoniaka u szczurów, które były narażone na wdychanie włókien szklanych typu E (Costa & Orriols 2012).

W badaniach oceniających możliwość rozwoju zwłóknień lub nowotworu pod wpływem przewlekłej inhalacji włókien wełny skalnej

czy żuźlowej nie wykazano niekorzystnych skutków działania obu tych włókien mineralnych w postaci nowotworów, choć odnotowano możliwość powstawania zwłóknień pod wpływem inhalacji wełny skalnej (Costa & Orriols 2012, Hesterberg i in. 2012).

Badania nad przewleklą inhalacją ogniotrwałych włókien ceramicznych wykazały możliwość pojawienia się zwłóknień i nowotworów u gryzoni (Costa & Orriols 2012). Potwierdzone są m.in. przypadki wywołania u szczurów raka płuc i międzybłoniaka opłucnej oraz zmian zwłóknieniowych w płucach i opłucnej pod wpływem inhalacji włókien ceramicznych (Marek 2003).

4.2 Badania *in vitro* z wykorzystaniem hodowli komórkowych

Badania z wykorzystaniem hodowli komórkowych, nie są uznawane za odpowiednie dla oceny toksyczności włókien. Z powodzeniem natomiast służyć mogą w rozróżnianiu pierwotnych i wtórnych efektów genotoksycznych oraz w wykrywaniu potencjalnych niekorzystnych skutków narażenia na nowe rodzaje włókien oraz w identyfikowaniu mechanizmów ich działania (Bernstein 2007).

MMMF wywierają cytotoksyczny, genotoksyczny i rakotwórczy wpływ na komórki. Efekty cytotoksyczne na poziomie błony komórkowej potwierdzono w doświadczeniach na makrofagach pęcherzyków płucnych szczurów poddanych ekspozycji na respirabilne włókna szklane oraz na ludzkich komórkach mezotelialnych narażonych na włókna wełny skalnej. Efekty genotoksyczne zaobserwowano po ekspozycji fibroblastów płuc chomika chińskiego V79 oraz fibroblastów płuc embrionów ludzkich Hel299 na włókna szklane. Działanie rakotwórcze powodowane przez wytwarzanie reaktywnych form tlenu (ROS) czy będące wynikiem indukcji stresu oksydacyjnego i transformacji komórek obserwowano pod wpływem narażenia na włókna wełny mineralnej i ogniotrwałych włókien ceramicznych (Donaldson & Lang Tran 2004, Rapisarda i in. 2015).

Wnioski z badań *in vitro* (potwierdzone też badaniami inhalacyjnymi *in vivo*) sugerują, że im dłuższe i cieńsze są włókna, tym większa jest ich toksyczność i skuteczność pobudzania komórek do produkcji mediatorów prozapalnych (Donaldson & Lang Tran 2004, Rapisarda i in. 2015).

Włókna szklane wywołują w hodowli szczurzych makrofagów skutki jakościowo podobne do azbestu, a długość włókien wydaje się tu być kluczowym czynnikiem decydującym o ich toksyczności (Donaldson & Lang Tran 2004, Forget i wsp, 1986).

4.3 Badania epidemiologiczne w populacji ludzkiej

W piśmiennictwie przedmiotu dostępne są wyniki kilku badań kohortowych przeprowadzonych wśród pracowników zawodowo narażonych na kontakt z ciągłymi włóknami szklanymi. We wszystkich z nich analizy nie potwierdziły ani zwiększonej śmiertelności z powodu raka płuc ani innych chorób dróg oddechowych wśród narażonej populacji w porównaniu do lokalnego poziomu zachorowań na nowotwory (Hesterberg i in. 2012, Szadkowska-Stańczyk & Stroszejn-Mrowca 2002). Wyniki tego typu badań w odniesieniu do narażenia zawodowego na wełnę szklaną, w tym i tą typu fiberglass, nie są już tak jednoznaczne. Choć w większości z nich nie potwierdzono istotnego statystycznie wzrostu zachorowań na nowotwory układu oddechowego czy inne rodzaje nowotworów, to w kilku z nich takie zjawisko zaobserwowano. Przykładem mogą tu być m.in. amerykańskie badania wśród pracowników fabryki włókien szklanych, wśród których zaobserwowano 6% wzrost śmiertelności z powodu raka płuc w porównaniu do lokalnego poziomu zachorowań na nowotwory czy europejskie badania, w których pewien wzrost częstości występowania nowotworów płuc był również widoczny (Costa & Orriols 2012, Hesterberg i in. 2012). W odniesieniu do tego rodzaju narażenia, w piśmiennictwie przedmiotu spotkać można pojedyncze opisy wyników badań, które potwierdzają istotny statystycznie związek pomiędzy narażeniem na wełnę szklaną typu fiberglass, a wystąpieniem u narażonych pracowników zwłóknienia płuc. Zależność tego typu stwierdzono m.in. u osoby przez 40 lat narażonej na tego typu włókna w zakładzie wełny szklanej oraz u kierowcy autobusu, którego pojazd był od wewnątrz wypełniony izolacją z wełny szklanej. Istnieją również potwierdzone przypadki rozwoju ziarniniakowej choroby płuc pod wpływem narażenia na ciągłe włókna szklane i wełnę mineralną (Drent i in. 2000). W piśmiennictwie przedmiotu jest też opis przypadku nasilenia się objawów astmatycznych u pracowników fabryki mikrowłókien szklanych pod wpływem tego typu narażenia, choć współistniało ono wraz z narażeniem na formaldehyd (Sripaiboonkij i in. 2009). Badania kohortowe i kliniczno-kontrolne związane z narażeniem na wełnę szklaną i żużlową w kilku przypadkach wykazały związek ze wzrostem zachorowań na nowotwory układu oddechowego. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, iż we wszystkich tych przypadkach na moc takiego wnio-

skowania wpływ miały liczne czynniki zakłócające, którymi zazwyczaj była równoległa ekspozycja na włókna azbestu lub wcześniejsza historia palenia tytoniu u narażonych pracowników (Costa & Orriols 2012). W przypadku narażenia pracowników na ogniotrwałe włókna ceramiczne, wyniki badań kohortowych, jak i kliniczno-kontrolnych nie potwierdzają istotnej statystycznie zależności pomiędzy częstością występowania nowotworów płuc czy podwyższonej śmiertelności będących wynikiem narażenia zawodowego na tego rodzaju włókna (LeMasters i in. 2003).

Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) kierując się konkluzjami wyników eksperymentalnych badań na zwierzętach i epidemiologicznych badań w populacji ludzkiej zaklasyfikowała ciągle włókna szklane, wełnę szklaną, skalną i żuźlową do grupy 3 czyli do substancji, które nie są klasyfikowane jako rakotwórcze dla ludzi, a ogniotrwałe włókna ceramiczne – do grupy 2B czyli do substancji, które są prawdopodobnie rakotwórcze dla ludzi (Donaldson & Lang Tran 2004, Rapisarda i in. 2015).

5. Nowoczesne rozwiązania materiałowe eliminujące zagrożenie powodowane przez włókna szklane

Istniejące wciąż kontrowersje dotyczące potencjalnej szkodliwości włókien szklanych sprawiają, iż nieustannie poszukiwane są alternatywne rozwiązania materiałowe i techniczne, które skutecznie zapobiegająby powstawaniu zagrożenia przez nie powodowanego. Jedną z dziedzin, w której włókna szklane znajdują stosunkowo powszechne zastosowanie jest produkcja różnego typu materiałów filtracyjnych. Wciąż poszukuje się nowych rozwiązań, których celem jest stworzenie i praktyczne wykorzystanie materiałów mających lepsze parametry filtracji i obniżających zużycie energii. Zaletą tego typu materiałów powinno być również wyeliminowanie szkodliwej dla zdrowia migracji włókien szklanych podczas procesu instalowania i filtrowania oraz zapewnienie prawidłowej żywotności higienicznej zabezpieczającej przed ich nadmierną kontaminacją drobnoustrojami.

Jednym z takich nowoczesnych rozwiązań materiałowych są syntetyczne włókniny filtracyjne typu nanowave. Charakteryzują się one kilkukrotnie większą powierzchnią filtracyjną niż obecnie stosowane włókna syntetyczne czy szklane oraz dłuższą żywotnością niż włókna

szklane. Włókniny typu nanowave gwarantują lepszą wydajność i trwałość wykonanych z nich filtrów. Te z kolei mają większą skutecznością pochłaniania pyłów, co przekłada się na wzrost wydajności filtrów i oszczędność energetyczną. Szacowane oszczędności energii elektrycznej w systemie klimatyzacyjnym lub wentylacyjnym wykorzystującym filtry z włóknin typu nanowave sięgają 70% w porównaniu z tradycyjnymi materiałami filtracyjnymi. Włókniny typu nanowave cechuje też wyższa sztywność umożliwiająca właściwe otwarcie kieszeni filtracyjnych, które utrzymują swój pierwotnie nadany kształt w różnych warunkach pracy. Włókniny typu nanowave mogą być oferowane w formie naładowanej elektrostatycznie lub rozładowanej. Naładowane elektrostatycznie włókna charakteryzują się zwiększoną wydajnością początkową. Nigdy też nie obniżają swojej wydajności poniżej wydajności stosowanych obecnie włókien szklanych przez cały okres pracy. W porównaniu do tradycyjnych materiałów syntetycznych, których mechanizm filtracyjny opiera się na oddziaływaniu elektrostatycznym, włókniny typu nanowave w warunkach rozładowania posiadają identyczną wydajność przy połowie oporów tradycyjnych filtrów. Bezpośrednią korzyścią wynikającą z zastosowania rozwiązań opartych na włókninach typu nanowave jest całkowita eliminacja szkodliwego pylenia włókien szklanych.

6. Podsumowanie

W świetle dostępnych dziś w piśmiennictwie przedmiotu danych eksperymentalnych i epidemiologicznych, o ile niekorzystne oddziaływanie włókien szklanych na skórę oraz błony śluzowe jest dość dobrze medycznie udokumentowane i nie budzi wątpliwości, o tyle trudno jest jednoznacznie zdefiniować wszystkie uwarunkowania związane z niekorzystnym ich działaniem w narażeniu inhalacyjnym. Jest oczywistym, że dla wykluczenia bądź potwierdzenia szkodliwego działania włókien szklanych na drogi oddechowe konieczne są nowe, dobrze zaplanowane badania epidemiologiczne w populacjach osób, które były i są narażone na tego rodzaju aerozol włóknisty. Badania te powinny dotyczyć przede wszystkim środowiska pracy i sytuacji narażenia na wysokie stężenia potencjalnie kancerogennych włókien. Nie mniej ważna wydaje się też kontrola środowiska pozazawodowego pod kątem jego zanieczyszczenia aerozolem włókien szklanych. Postęp technologiczny w dziedzinie roz-

woju nowoczesnych materiałów pozwoli, jeśli nie wyeliminować, to przynajmniej zminimalizować większość zagrożeń związanych z obecnością włókien szklanych w środowisku poprzez wprowadzanie do codziennej praktyki nowych, bezpiecznych rozwiązań.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014–2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt: II.P.18). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Literatura

- Augustyńska, D., & Pośniak, M. (red.). (2014). *Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. Wartości dopuszczalne 2014*. Warszawa: Wydawnictwo CIOP-PIB.
- Bernstein, D.M. (2007). Synthetic Vitreous Fibers: a Review Toxicology, Epidemiology and Regulations. *Critical reviews in toxicology*, 37, 839-886.
- Carter, C.M., Axten, C.W., Byers, C.D., Chase, G.R., Koenig, A.R., Reynolds, J.W., Rosinski, K.D. (1999). Indoor Airborne Fiber Levels of MMVF in Residential and Commercial Buildings. *American industrial hygiene association journal*, 60, 794-800.
- Costa, R., & Orriols, R. (2012). Man-made Mineral Fibers and the Respiratory Tract. *Archivos de bronconeumologia*, 48, 460-468.
- Donaldson, K., & Lang Tran, C. (2004). An Introduction to the Short-term Toxicology of Respirable Industrial Fibers. *Mutation research*, 553, 5-9.
- Drent, M., Bomans, P.H., Van Suylen, R.J., Lamers, R.J., Bast, A., Wouters, E.F. (2000). Association of Man-made Mineral Fibre Exposure and Sarcoid-like Granulomas. *Respiratory medicine*, 94, 815-820.
- Forget, G., Lacroix, M.J., Brown, R.C., Evans, P.H., Sirois, P. (1986). Response of Perfused Alveolar Macrophages to Glass Fibers: Effect of Exposure Duration and Fiber Length. *Environmental research*, 39, 124-135.
- Hesterberg, T.W., Anderson, R., Bernstein, D.M., Bunn, W.B., Chase, G.A., Libby Jankousky, A., Marsh, G.M., McClellan, R.O. (2012). Product Stewardship and Science: Safe Manufacture and Use of Fiber Glass. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 62, 257-277.

- Hesterberg, T.W., McConnel, E.E., Müller, W.C., Chevalier, J., Everitt, J., Thevenaz, P., Fleissner, H., Oberdörster, G. (1996). Use of Lung Toxicity and Lung Particle Clearance to Estimate the Maximum Tolerated Dose (MTD) for a Fiber Glass Chronic Inhalation Study in the Rat. *Fundamental and applied toxicology*, 32, 31-44.
- Inthavong, K., Mouritz, A.P., Dong, J., Yuan Tu, J. (2013). Inhalation and Deposition of Carbon and Glass Composite Fibre in the Respiratory Airway. *Journal of aerosol science*, 65, 58-68.
- LeMasters, G.K., Lockey, J.E., Yiin, J.H., Hilbert, T.J., Levin, L.S., Rice, C.H. (2003). Mortality of Workers Occupationally Exposed to Refractory Ceramic Fibers. *Journal of occupational and environmental medicine*, 45, 440-450.
- Marchant, G.E., Amen, M.A., Bullock, C.H., Carter, C.M., Johnson, K.A., Reynolds, J.W., Connelly, F.R., Crane, A.E. (2002). A Synthetic Vitreous Fiber (SVF) Occupational Exposure Database: Implementing the SVF Health and Safety Partnership Program. *Applied occupational and environmental hygiene*, 17, 276-285.
- Marek, K. (red.). (2003). *Choroby zawodowe*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- Mauderly, J.L., Cheng, Y.S., Hoover, M.D., Yeh, H.-C. (2000). *Particles inhaled in the occupational setting*. W: Gehr, P., & Heyder, J. (red.). *Particle-lung interactions*. Marcel Dekker, Inc., Nowy Jork.
- Mayer, P., & Kaczmar, J.W. (2008). Właściwości i Zastosowanie Włókien Węglowych i Szklanych. *Tworzywa sztuczne i chemia*, 6, 52-56.
- Prasauskas, T., Krugly, E., Ciuzas, D., Sidaraviciute, R., Kliucininkas, L., Martuzevicius, D. (2014). *Characterization of mineral fibre emissions from processes of building refurbishment and operation*. Barcelona: Proceedings of World Sustainable Building 2014 Conference.
- Rapisarda, V., Loreto, C., Ledda, C., Musumeci, G., Bracci, M., Santarelli, L., Renis, M., Ferrante, M., Cardile, V. (2015). Cytotoxicity, Oxidative Stress and Genotoxicology Induced by Glass Fibers on Human Alveolar Epithelial Cell Line A549. *Toxicology in vitro*, 29, 551-557.
- Salonen, H.J., Lappalainen, S.K., Riuttala, H.M., Tossavainen, A.P., Pasanen, P.O., Reijula, K.E. (2009). Man-made Vitreous Fibers in Office Buildings in the Helsinki Area. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6, 624-631.
- Schneider, T. (2000). *Synthetic vitreous fibers*. W: Spengler J.D., Samet J.M., McCarthy J.F. (red.). *Indoor air quality handbook*. Nowy Jork: McGraw-Hill.

- Sripaiboonkij, P., Sripaiboonkij, N., Phanprasit, W., Jaakkola, M.S. (2009). Respiratory and Skin Health among Glass Microfiber Production Workers: a Cross-sectional Study. *Environmental health*, 8, 36.
- Szadkowska-Stańczyk, I., & Stroszejn-Mrowca, G. (2002). Kancerogenne Działanie Sztucznych Włókien Mineralnych – Dowody w Badaniach Epidemiologicznych. *Medycyna pracy*, 53, 137-143.
- Wallenberger, F.T., Watson, J.C., Li, H. (2001). *Glass fibers*. W: ASM handbook. vol. 21: composites. Materials Park: ASM International.

Glass Fibers as Environmental Hazard

Abstract

Due to their prevalence, the hazards posed by glass fibers are an important health problem. In this article, in a synthetic way, the types of glass fibers are characterized as well as the most important physical properties and applications are described. This paper analyzed the scale of the threat that glass fibers posed in occupational and non-occupational environments, including forms of their occurrence and ways to control the size of exposure. The adverse health effects caused by glass fiber exposures, including the results of *in vivo*, *in vitro* and epidemiological studies in human populations are also discussed. Finally, the modern material solutions applied to eliminate the hazards posed by glass fibers are presented as well.

Słowa kluczowe:

włókna szklane, zagrożenie środowiskowe, skutki zdrowotne, włókniny filtracyjne

Keywords:

glass fibers, environmental hazard, health effects, filter nonwovens