



Sztuczne włókna mineralne, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – frakcja wdychalna

Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego^{1,2,3}

Man-made mineral fibers,
except refractory ceramic fibers – inhalable fraction
Documentation of proposed values of occupational exposure limits (OELs)

ELŻBIETA BRUCHAJZER

<https://orcid.org/0000-0002-4494-5722>

e-mail: elzbieta.bruchajzer@umed.lodz.pl

JADWIGA SZYMAŃSKA

<https://orcid.org/0000-0002-3320-008X>

BARBARA FRYDRYCH

<https://orcid.org/0000-0002-9383-5319>

Uniwersytet Medyczny w Łodzi

Medical University of Lodz, Poland

NDS	5 mg/m ³
NDSch	nie ustalono
NDSP	nie ustalono
DSB	nie ustalono

Carc. 2	podejrzewa się, że powoduje raka
I	substancja o działaniu drażniącym

Data zatwierdzenia przez Zespół Ekspertów: 6-8.07.2022 r.

Data zatwierdzenia przez Komisję ds. NDS i NDN: 30.10.2023 r.

Streszczenie

Sztuczne włókna szkliste (*man-made vitreous fibers* – MMVF; sztuczne włókna mineralne, *man-made mineral fibers* – MMMF), wprowadzono na szeroką skalę jako zamienniki azbestu. Są to nieorganiczne materiały włókniste produkowane ze szkła, skał, minerałów, żużla i przetworzonych tlenków nieorganicznych. Dane o narażeniu zawodowym w Polsce na

¹ Wartość NDS sztucznych włókien mineralnych, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – frakcji wdychalnej została w dniu 30.10.2023 r. przyjęta na 106. posiedzeniu Międzyresortowej Komisji do spraw Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy i następnie została przedłożona ministrowi właściwemu ds. pracy (wniosek nr 122) w celu jej wprowadzenia do rozporządzenia w załączniku nr 1 w części A wykazu najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy.

² Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr II.PB.03 pt. „Opracowanie dokumentacji poziomów narażenia zawodowego dla 30 czynników chemicznych szkodliwych dla zdrowia, w tym rakotwórczych”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

³ Dokumentacja dotyczy frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych. Dane odnoszące się do włókien respirabilnych opublikowano w pracy Bruchajzer E., Szymańska J., Frydrych B., Sztuczne włókna mineralne, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – włókna respirabilne. Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego, Podst. Met. Oceny Środow. Pr. 2(120) 2024, 5–74 (dalej jako: Bruchajzer i in. 2024). Część informacji pochodzi z tych samych źródeł literaturowych, dlatego opisano je w sposób skrócony, z odniesieniami do wcześniejszej publikacji.

MMVF dotyczą tylko ekspozycji na włókna respirabilne, a żadna z narażonych osób nie pracowała w stężeniach przekraczających wartość NDS (1 włókno/cm³). O toksyczności MMVF decyduje długość włókien, ich średnica i biotrwałość. Sztuczne włókna szkliste o większej średnicy i długości działają drażniaco na skórę, oczy i drogi oddechowe. Włókna respirabilne dochodzące do płuc powodują stany zapalne, zwłóknienia, zmiany proliferacyjne. Badania epidemiologiczne nie wykazały jednoznacznie zależności między rakiem płuca a narażeniem na MMVF. Zmianom takim może sprzyjać palenie tytoniu. Po narażeniu inhalacyjnym zwierząt zdolności organizmu do oczyszczania płuc są znaczne. Najczęściej notowane w Polsce średnie stężenia włókien respirabilnych na stanowiskach pracy wynosiły około 0,106 wł./cm³, a frakcji wdychalnej (pyłów całkowitych) – 3,27 mg/m³. Obecnie przy braku wartości NDS dla frakcji wdychalnej MMVF można je zaliczyć do „pyłów nieklasyfikowanych ze względu na toksyczność – frakcji wdychalnej”, dla których NDS wynosi 10 mg/m³ (Rozporządzenie Ministra Pracy 2018). Po analizie dostępnych danych zaproponowano przyjąć wartość NDS dla frakcji wdychalnej o połowę niższą od wartości dla pyłów niesklasyfikowanych ze względu na toksyczność, czyli 5 mg/m³. Brakuje podstaw do wyznaczenia wartości NDSch, NDSP i DSB. Działanie drażniące wymaga oznakowania „I”, a z uwagi na trudne do interpretacji dane epidemiologiczne dotyczące ewentualnego działania rakotwórczego proponuje się dodać oznakowanie „Carc. 2” (substancja, którą podejrzewa się, że powoduje raka).

Słowa kluczowe: sztuczne włókna mineralne, frakcja wdychalna, narażenie zawodowe, rakotwórczość, NDS, nauki o zdrowiu, inżynieria środowiska.

Abstract

Man-made vitreous fibers (MMVFs; man-made mineral fibers (MMMFs)), have been introduced as replacements for asbestos. These are inorganic fiber materials produced from glass, rocks, minerals, slag and processed inorganic oxides. Data on occupational exposure to MMVF in Poland relate only to exposure to respirable fibers, and none of the exposed persons worked at concentrations exceeding the MAC (1 fibre/cm³). The toxicity of MMVF is determined by fiber length, diameter and biopersistence. Artificial vitreous fibers of greater diameter and length are irritating to the skin, eyes and respiratory tract. Respirable fibers reaching the lungs, cause inflammation, fibrosis and proliferative changes. Epidemiological studies have not conclusively demonstrated a relationship between lung cancer and MMVF exposure (changes may be favoured by smoking). Following inhalation exposure of animals, the lung-clearing capacity of the organism is considerable. The most frequently recorded concentrations of respirable fibers at workplaces in Poland were about 0.106 fiber/cm³, and the inhalable fraction (total dust) - 3.27 mg/m³. In the absence of an MAC value for the inhalable fraction of MMVF, they can be categorised as “dust not classified for toxicity”, for which the MAC is 10 mg/m³. After analysing the available data, it was proposed for the inhalable fraction half the value of the MAC for dust not classified for toxicity, i.e. 5 mg/m³. There is no basis for determination the values of the STEL, TLV-C and BEI. Irritant activity requires an “I” label and to add the label “Carc. 2” (substance suspected of causing cancer).

Keywords: man-made mineral fibers, inhalable fraction, occupational exposure, carcinogenicity, MAC, health sciences, environmental engineering.

Adres do korespondencji/Contact details: Elżbieta Bruchajzer, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Katedra i Zakład Toksykologii, ul. J. Muszyńskiego 1, 90-151 Łódź, e-mail: elzbieta.bruchajzer@umed.lodz.pl

CHARAKTERYSTYKA SUBSTANCJI, ZASTOSOWANIE, NARAŻENIE ZAWODOWE

Ogólna charakterystyka substancji

Sztuczne włókna szkliste (ang. *man-made vitreous fibers* – MMVF, *synthetic vitreous fibers* – SVF; dawniej nazywane także sztucznymi włóknami mineralnymi, ang. *man-made mineral fibers* – MMMF, *synthetic mineral fibers* – SMF) to ogólna

nazwa nieorganicznych materiałów włóknistych produkowanych głównie ze szkła, skał, minerałów, żużla i przetworzonych tlenków nieorganicznych (IARC 2002). Podział mineralnych włókien szklistych z uwzględnieniem ich rozmiarów (średnicy) przedstawiono na schemacie (ryc. 1).

Ze względu na bardzo dobre właściwości izolacyjne oraz odporność chemiczną sztuczne włókna mineralne były wprowadzane na szeroką skalę jako zamienniki azbestu. Na rynku są dostępne wyroby w postaci luźnej oraz mat, płyt, taśm, sznurów, tektury i papieru. Najpopularniejsze z nich to wata

szklana, wełna mineralna (kamienna, skalna) i żuźlowa, mikrowłókna szklane specjalnego przeznaczenia oraz ogniotrwałe włókna ceramiczne (RCF). Obecnie najwięcej danych dotyczy syntetycznych włókien nieorganicznych, co wiąże się z ich powszechnym stosowaniem. Bardzo popularna wełna szklana (odporna na temperaturę $600 \div 750^{\circ}\text{C}$) jest produkowana z tlenku krzemu, boru, glinu, tlenków żelaza, manganu. Głównym surowcem do produkcji wełny szklanej jest piasek szklarski (około 50%), zaś włókna szklane wytwarza się ze stopionego kwarcu ($>96\%$), (Hartwig, MAK Commission 2019).

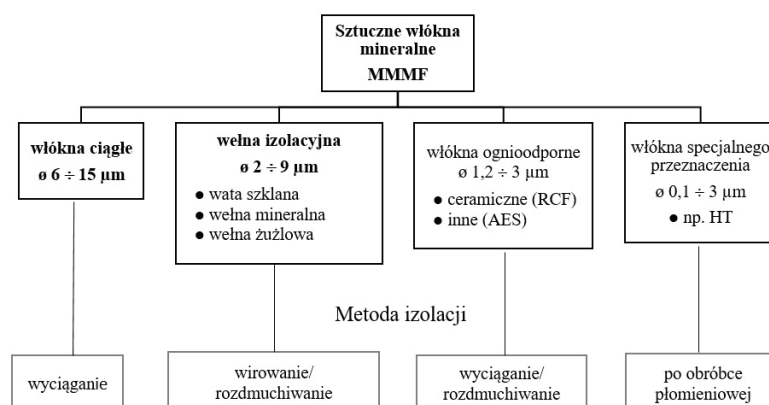
Poszczególne produkty MMVF mogą różnić się składem i technologią produkcji, co wiąże się z zapotrzebowaniem użytkowników oraz troską o wpływ na ich zdrowie uwalnianych z produktów włókien (IARC 2002), (zob. Bruchajzer i in. 2024).

Wszystkie ważne handlowo sztuczne włókna mineralne to produkty na bazie krzemionki (SiO_2), zawierające różne ilości innych tlenków nieorganicznych. Składniki niekrzemionkowe zazwyczaj obejmują tlenki metali (np. Al, Zn, Na, K, Fe, Ti, Zr), w tym ziem alkalicznych (m.in. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}$) w ilości przekraczającej 18% udziału wagowego (zob. Bruchajzer i in. 2024). Taki skład włókien powoduje, że przepisy regulacyjne umożliwiają w trybie europejskiej Noty Q wykazanie ich małej trwałości biologicznej (na podstawie

badan na zwierzętach), a tym samym może być ona „nieklasyfikowana” jako substancja rakotwórcza (Mazurkiewicz 2014).

Aby zmniejszyć zagrożenia wynikające z odkładania się nierozpuszczalnych włókien w płucach, w latach 80. XX wieku opracowano pierwszą wełnę szklaną rozpuszczalną biologicznie. Od 2000 r. większość komercyjnych wełen szklanych i skalnych w UE jest określana jako produkty niskiego ryzyka (odzwierciedla to np. certyfikat RAL, znak jakości umieszczany na produktach przez stowarzyszenie producentów wełny mineralnej [GGM – Gütegemeinschaft Mineralwolle]). Zaleca się jednak podejmowanie dodatkowych środków ostrożności w celu zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników, szczególnie w branży budowlanej.

Wełna mineralna ma zharmonizowaną klasyfikację i oznakowanie, zgodne z tabelą 3 załącznika VI rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniającego i uchylającego dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniającego rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 (Dz. Urz. UE L 353 z 31.12.2008 r. ze zm.), (tab. 1, ryc. 2).



Objaśnienia:

ø – nominalna średnica włókien.

AES – ogniotrwałe wełna z krzemianów ziem alkalicznych.

HT – włókna HT (ang. *high tensile* – o dużej wytrzymałości) o dużej zawartości tlenku glinu ($18 \div 24\%$) i małej zawartości krzemianów ($33 \div 43\%$), numer CAS 287922-11-0, znana pod nazwami: „wysokoglinowa wełna o niskiej zawartości krzemowej”, „wełna kamienna HT” lub „biorozpuszczalna (ulegająca biodegradacji) wełna kamienna”.

MMVF – sztuczne włókna mineralne (ang. *man-made vitreous fibers*).

RCF – ogniotrwałe włókna ceramiczne (ang. *refractory ceramic fibers*).

Rycina 1. Klasyfikacja i metody produkcji sztucznych włókien mineralnych (Bernstein 2007; EHC 1988; Kupczewska-Dobecka i in. 2019)

Figure 1. Classification and production methods of main-made vitreous fibers (Bernstein 2007; EHC 1988; Kupczewska-Dobecka i in. 2019)

Tabela 1. Zharmonizowana klasyfikacja oraz oznakowanie substancji stwarzających zagrożenie (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady nr 1272/2008 ze zm.)

Table 1. Harmonized classification and labeling of hazardous substances (Regulation of the European Parliament and of the Council No. 1272/2008, as amended)

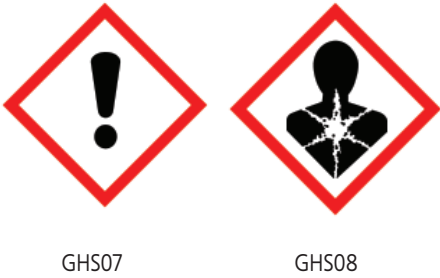
Numer indeksowy	Międzynarodowa terminologia chemiczna	Numer WE	Numer CAS	Klasyfikacja		Oznakowanie		Specyficzne stężenia graniczne i współczynniki „M”	Uwagi
				klasa zagrożenia i kody kategorii	kody zwrotów wskazujących rodzaj zagrożenia	piktogram, kody haseł ostrzegawczych	kody zwrotów wskazujących rodzaj zagrożenia		
650-016-00-2	węglina mineralna z wyjątkiem tych wymienionych gdzie indziej w niniejszym załączniku [syntetyczne włókna ceramiczne (krzemianowe) bez określonej orientacji z zawartością tlenków alkalicznych i metali ziem alkalicznych (Na ₂ O + K ₂ O + CaO + MgO + BaO) powyżej 18% wag.]	–	–	Carc. 2 Skin Irrit. 2	H351 H315	GHS08 GHS07 Wng	H351 H315		AQR

Objaśnienia:
Carc. 2 – Rakotwórczość, kategoria 2.
H351 – Podejrzewa się, że powoduje raka (podać drogę narażenia, jeżeli definitywnie udowodniono, że inna droga narażenia nie powoduje zagrożenia).
Skin Irrit. 2 – Działanie żrące/drażniące na skórę, kategoria 2.
H315 – Działa drażniąco na skórę.
Wng – dla hasła ostrzegawczego „Uwaga”.

Uwaga A:
Bez uszczerbku dla art. 17 ust. 2 nazwa substancji musi występować na etykiecie w postaci jednego z oznaczeń podanych w części 3.
W części 3 używa się czasem ogólnego opisu, np. „związki ...” lub „sole...”. W tym przypadku dostawca jest zobowiązany do podania na etykiecie prawidłowej nazwy przy uwzględnieniu sekcji 1.1.1.4.

Uwaga Q:
Stosuje się zharmonizowaną klasyfikację substancji jako substancji rakotwórczej, chyba że spełniony jest jeden z następujących warunków:
– w krótkoterminowych badaniach inhalacyjnych biotrwłości wykazano, że połowiczny zanik włókien o długości większej niż 20 µm wynosi mniej niż 10 dni, lub
– w krótkoterminowych badaniach biotrwłości poprzez podanie dotchawicze wykazano, że połowiczny zanik włókien o długości większej niż 20 µm wynosi mniej niż 40 dni; lub
– w odpowiednich badaniach po podaniu do jamy otrzewnej nie wykazano działania rakotwórczego; lub
– nie wykazano stosownych zmian patogenicznych ani zmian neoplastycznych w długoterminowych badaniach toksyczności inhalacyjnej.

Uwaga R:
Stosuje się zharmonizowaną klasyfikację substancji jako substancji rakotwórczej, z wyjątkiem włókien o ważonej długością średniej geometrycznej średnicy (LWGMMD) pomniejszonej o dwa błędy standardowe większej niż 6 µm, mierzonej zgodnie z metodą badania A.22 z załącznika do rozporządzenia Komisji (WE) nr 440/2008 (Rozporządzenie Komisji (WE) nr 440/2008 z dnia 30 maja 2008 r. ustalające metody badań zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH), (Dz.Urz. UE L 142 z 31.05.2008, s. 1).



Rycina 2. Piktogramy wskazujące rodzaj zagrożenia
Figure 2. Hazard pictograms

Właściwości fizykochemiczne

Włókna mineralne to wydłużone cząstki o różnym stosunku długości do średnicy – parametrów, które decydują o ich wchłanianiu i działaniu biologicznym. Zgodnie z międzynarodową konwencją (WHO 1997) pyły włókniste są uważane za toksyczne/szkodliwe dla płuc u ludzi, jeśli ich stosunek długości do średnicy przekracza 3: 1 i jednocześnie ich długość wynosi $>5\text{ }\mu\text{m}$, a średnica $<3\text{ }\mu\text{m}$. Taki rodzaj włókien został zdefiniowany przez WHO jako „włókna respirabilne”. Włókna o innych stosunkach długości do średnicy, w szczególności włókna o długości $\geq 5\text{ }\mu\text{m}$, nie są objęte definicją WHO i mogą być określane jako „pył całkowity” lub „frakcja wdychalna”.

W zależności od zastosowania nominalna średnica ciągłego włókna szklanego wynosi zwykle $3 \div 25\text{ }\mu\text{m}$ (mieszczą się one najczęściej w zakresie $6 \div 15\text{ }\mu\text{m}$). Włókno szklane grube (tzw. wełna szklana lub wata szklana) to nieciągłe włókna o średnicy $5 \div 30\text{ }\mu\text{m}$, stosowane głównie jako izolacja cieplna, akustyczna, przeciwwilgociowa.

Gęstość sztucznych włókien mineralnych waha się w zakresie $2,1 \div 2,9\text{ g/cm}^3$ (ciągłe włókna szklane $2,1 \div 2,7\text{ g/cm}^3$, wełna szklana $2,4 \div 2,6\text{ g/cm}^3$, wełna skalna i żuźlowa – $2,7 \div 2,9\text{ g/cm}^3$), (IARC 2002).

Wymiary fizyczne mają decydujące znaczenie dla toksyczności. Średnia długość włókien szklanych jest zazwyczaj rzędu kilku centymetrów, ale średnica jest najczęściej rzędu kilku mikrometrów. Średnice nominalne włókien w gotowym produkcie różnią się w zależności od rodzaju włókna, zastosowania i procesu produkcyjnego (ACGIH 2001). Średnice włókien w powietrzu są istotną właściwością fizyczną z biologicznego punktu widzenia: cienkie włókna respirabilne mogą odkładać się w drogach oddechowych, w tym w pęcherzykach płucnych. Istnieje duża zależność pomiędzy średnicą włókien a ich poziomem w powietrzu w miejscu pracy (Esmen, Erdal 1990; Esmen i in. 1979a; 1979b). Im większa jest średnica włókien, tym niższe jest ich stężenie w powietrzu, co spowodowane jest przede wszystkim ich ciężarem i opadaniem na powierzchnię.

Klasyczne pojęcie właściwości fizykochemicznych (istotne np. dla związków organicznych) nie ma zastosowania do materiałów nieorganicznych takich jak włókna szklane. Sztuczne włókna mineralne są amorficzne, nie mają wyraźnej temperatury

topnienia, ale miękną w dość szerokim zakresie temperatur. Syntetyczne włókna szklane są często stosowane w wyrobach włókienniczych jako materiał wzmacniający, dlatego też „punkt mięknięcia” jest ważną właściwością fizyczną (EHC 1988; IARC 2002).

Chociaż syntetyczne włókna szklane nie są rozpuszczalne w wodzie, to jednak często do opisu ich trwałości jest używany termin „rozpuszczanie”. Szybkość rozpuszczania w tym przypadku wiąże się z rozkładem włókna w roztworze. Ze względu na większą powierzchnię włókna cienkie mają większą szybkość rozpuszczania niż włókna grube (EHC 1988; IARC 2002).

Potencjał włókien do wywoływania skutku toksycznego w płucach jest często opisywany w kategoriach 3D, czyli dawki, wymiaru i trwałości. Dawka może odnosić się do dawki w mięszu płucnym dłuższych włókien, których makrofag nie jest w stanie w pełni pochłonąć i usunąć. Wymiar odnosi się do średnicy, która określa, czy włókno może być wdychane w głębi płuc (tj. czy włókno jest respirabilne), oraz długości, która określa, czy włókno może być pochłonięte i usunięte przez makrofag. Trwałość określa, jak szybko włókno może się rozpuścić i/lub rozłożyć po osadzeniu się w płucach (Bernstein 2007).

Otrzymywanie i narażenie

Sztuczne włókna mineralne są wytwarzane podczas stapiania w temperaturze $1500 \div 1600^\circ\text{C}$ materiałów skalnych takich, jak: bazalt, gabbro, dolomit, kruszywo wapienne, brykiety mineralne. W zależności od procesu formowania włókien są one produkowane jako wełna mineralna, włókna ciągłe, włókna ogniotrwałe i specjalnego przeznaczenia (ryc. 1). Do materiałów tych dodaje się różne spoiwa (np. żywice) umożliwiające formowanie końcowych produktów. Metody produkcji obejmujące mechaniczne wyciąganie, rozdmuchiwanie gorącym gazem i wirowanie pozwalają na uzyskanie włókien o różnych średnicach. Włókna ciągłe uzyskane w procesie wyciągania osiągają średnice $6 \div 15\text{ }\mu\text{m}$ (nieliczne są respirabilne), natomiast wełna izolacyjna pozyskiwana w procesie wirowania/rozdmuchiwania to produkt o nominalnej średnicy $2 \div 9\text{ }\mu\text{m}$ (włókna respirabilne stanowią znaczny udział), (EHC 1988; Kupczewska-Dobecka i in. 2019).

Narażenie populacji generalnej (narażenie pozazawodowe) na syntetyczne włókna szkliste jest bardzo niskie (około $0,0001 \text{ wł./cm}^3$ powietrza). Populacja ogólna może być narażona, gdy materiał izolacyjny lub inny materiał zawierający te włókna (np. płyty sufitowe) zostanie fizycznie naruszony. Osoby, które samodzielnie wykonują prace modernizacyjne lub izolacyjne, mogą być krótkotrwale narażone na wyższe niż normalne poziomy (ekspozycja ta może być znacznie ograniczona poprzez zastosowanie sprzętu ochronnego). Poziomy syntetycznych włókien szklistych unoszące się w powietrzu szybko zmniejszają się po instalacji (Jaffrey i in. 1990).

Narażenia na sztuczne włókna mineralne nie należy spodziewać się poprzez żywność, wodę pitną lub inne media środowiskowe (Toxicological profile... 2004).

Narażenie zawodowe

Narażenie zawodowe człowieka na syntetyczne włókna mineralne zachodzi poprzez wdychanie i kontakt skórny. W czasie produkcji, stosowania i usuwania włókien mineralnych mogą pojawiać się w powietrzu włókna o różnej wielkości (duże, widoczne gołym okiem oraz drobne włókna respirabilne).

Produkty zawierające sztuczne włókna są stosowane przede wszystkim w budownictwie (izolacje termiczne, akustyczne) oraz w zakładach wykorzystujących je do produkcji np. ceramiki (głównie sanitarnej), urządzeń gospodarstwa domowego. Produkty z MMVF są wykorzystywane także w przemyśle lotniczym, samochodowym, stoczniowym. Włókna ciągle wykorzystuje się również do wzmocnienia tworzyw sztucznych oraz jako światłowody.

W Polsce produkcja wełny mineralnej (do wyrobów stosowanych do izolacji termicznej) w latach 2000-2017 systematycznie rosła. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) z 2017 r. (Kupczewska-Dobecka i in. 2019) w 2000 r. produkcja ta wynosiła 213 548 ton, w 2005 r. – 392 934 ton, w 2010 r. – 394 000 ton, w 2015 r. – 494 000 ton, a w 2017 r. – 578 935 ton.

Osoby narażone zawodowo na pyły sztucznych włókien mineralnych to najczęściej pracownicy zatrudnieni: (1) przy ich produkcji, (2) w zakładach stosujących włókna jako surowiec do produkcji wyrobów uszczelniających i termoizolacyjnych, (3)

przy montażu i demontażu wyrobów uszczelniających i termoizolacyjnych.

Robotnicy zaangażowani w prace rozbiórkowe, wykonujący konserwację i naprawy budynków są potencjalnie narażeni na podwyższony poziom syntetycznych włókien szklanych, gdy materiały te zostaną naruszone lub rozebrane (Maxim i in. 1999).

Najwięcej informacji o narażeniu robotników na sztuczne włókna mineralne dotyczy analiz przedstawianych jako ilość włókien w cm^3 powietrza, czyli frakcji respirabilnej (zob. Bruchajzer i in. 2024).

Dla ograniczenia narażenia na włókna duże znaczenie ma stosowanie termotopliwych spoiw i lepiszczy. Najczęściej są nimi żywice fenolowo-formaldehadowe (tradycyjna wełna w kolorze żółtym), żywice na bazie poliakrylu (biała wełna szklana), biożywice na bazie skrobi roślinnej (wełna brązowa). Alternatywnymi spoiwami mogą być także żywice melaminowe i akrylowe (Kupczewska-Dobecka i in. 2019). Jako lepiszcze stosowano również: żywice mocznikowo-formaldehadowe, octan poliwinylowy, żywicę Vinsol, mocznik, silikony, siarczany amonu, wodorotlenek amonu, żywice epoksydowe i pseudoepoksydowe oraz substancje bitumiczne (EHC 1988). Lepiszczce stosowane do produkcji wełny szklanej i kamiennej mogą stanowić $5 \div 10\%$ masy produktu końcowego. Wełna mineralna może zawierać także inne substancje ograniczające pylenie, np. oleje i smary (Mineral wools... 2013). Produkcja i stosowanie izolacji z wełny szklanej z lepiszczami mogą wielokrotnie (nawet $6 \div 15$ -krotnie) obniżyć stężenia włókien w powietrzu (De Vuyst i in. 1995; Krajewski, Tarowski 2002; Less i in. 1993). Jest to ważne przy instalowaniu izolacji metodą natryskową (wełna wdmuchiwana). Możliwość narażenia na wełnę mineralną obecną w płytach sufitowych i dachówkach jest niższe (około dwukrotnie) niż narażenie w czasie zakładania izolacji z wełny szklanej (Marchant i in. 2002).

Ocena narażenia robotników pracujących przy produkcji, wykorzystaniu, montażu i demontażu izolacji ze sztucznych włókien mineralnych (szklanych, skalnych i żuźlowych) może wynikać z pomiaru stężeń pyłów całkowitych (wyrażonych w mg/m^3) lub liczby włókien respirabilnych (opisanych jako liczba włókien/ cm^3 powietrza). Zależność między tymi wariantami pomiarów jest trudna do jednoznacznej interpretacji. Wiąże się to przede wszystkim z rozmiarami włókien (głównie z ich średnicą aerodynamiczną).

Jedne z pierwszych zróżnicowanych pomiarów wykonano, porównano je i opisano w 1979 r. (*Esmen i in. 1979a*), (tab. 2). Badacze z uniwersytetu w Pittsburghu przedstawili dane pomiarowe uzyskane w 16 fabrykach, w których łącznie było narażonych 8450 pracowników. Wykonano 1454 pomiary powietrza na stanowiskach pracy związanych z produkcją, przetwarzaniem, formowaniem, obsługą techniczną (pracami pomocniczymi i porządkowymi) oraz spedycją. Autorzy badań (*Esmen i in. 1979a*) określili nominalną średnicę włókien, a w wynikach analiz uwzględnili: a) średnie stężenie pyłów całkowitych (wyrażone w mg/m³), (tab. 2); b) liczbę włókien widocznych w mikroskopie świetlnym (wyrażoną jako liczba włókien/cm³), (tab. 3) oraz c) liczbę mikrowłókien respirabilnych o średnicy poniżej 1 µm (widocznych w mikroskopie elektronowym, wyrażoną jako liczba włókien/cm³), (tab. 4).

Analiza danych przedstawionych w tabeli 2 wskazuje, że w procesach formowania sztucznych

włókien mineralnych zakresy pomiarowe średnich stężeń (pochodzące z 16 zakładów produkcyjnych w USA) wynosiły 0,3 ÷ 3 mg/m³. Pomiary w 12 zakładach nie przekraczały 2 mg/m³. Dane o stężeniach pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) mierzonych w czasie procesów produkcji, przetwarzania oraz prac pomocniczych i porządkowych dochodziły do 4,31 ÷ 8,48 mg/m³. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że dane te zostały zawyżone przez pomiary dokonane w 2 zakładach (nr 7 – produkującym włókna skalne i nr 8 – produkującym włókna szkalne; te dane w tabeli 2 zostały wytluszczone). Poziomy notowane w pozostałych zakładach to znacznie niższe stężenia, zwykle nieprzekraczające 2 mg/m³. Najniższe stężenia pyłów całkowitych sztucznych włókien mineralnych produkowanych w 16 zakładach zanotowano w czasie wszelkich działań związanych ze spedycją gotowych produktów – średnie poziomy stężenie wynosiły wtedy 0,39 ÷ 1,77 mg/m³ (*Esmen i in. 1979a*).

Tabela 2. Średnie stężenia pyłów całkowitych [mg/m³] w narażeniu zawodowym na włókna mineralne w 16 zakładach produkcyjnych w USA (*Esmen i in. 1979a*). W tabeli przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe (SD)

Table 2. Mean total dust concentrations [mg/m³] in occupational exposure to mineral fibers at 16 manufacturing plants in the USA (*Esmen et al. 1979a*). Mean values and standard deviations (SD) are presented in the table

Numer zakładu	Średnica nominalna włókien, µm	Rodzaj produkcji					
		formowanie	produkcja	przetwórstwo	prace pomocnicze i porządkowe	spedycja	ogólnie
1 (G)	1 ÷ 12	0,47±0,47	1,04±1,34	0,96±0,96	0,71±0,45	0,39±0,09	0,89±1,12
2 (S)	6	1,65±1,17	2,53±2,30	2,28±1,51	2,00±1,32	1,34±0,58	1,94±1,68
3 (G)	3 ÷ 6	bd.	0,51±0,30	bd.	0,83±0,61	0,70±0,42	0,65±0,46
4 (G)	1 ÷ 6	1,22±0,51	0,77±0,49	1,23±0,95	2,00±4,40	1,32±0,96	1,24±2,26
5 (S)	8	0,76±0,25	0,67±1,52	0,29±0,95	0,55±0,32	0,62±0,33	0,60±1,04
6 (R)	5 ÷ 15	1,30±0,71	1,77±2,23	0,51±0,39	2,00±2,50	0,45±0,19	1,17±1,72
7 (R)	5	2,18±1,62	2,00±0,31	4,31±4,03	6,72±7,84	1,77±1,02	4,00±4,27
8 (G)	7 ÷ 10	bd.	8,48±9,02	1,17±0,55	4,64±8,28	0,84±0,67	4,73±8,69
9 (G)	7 ÷ 10	1,18±0,48	1,90±1,52	1,14±0,53	1,33±0,57	1,08±0,46	1,33±1,02
10 (G)	6 ÷ 16	2,45±0,93	0,75±0,47	0,73±0,33	1,25±1,07	0,69±0,15	1,07±0,91
11 (S)	7	2,18±1,64	1,08±1,82	0,87±0,46	1,26±0,49	1,04±0,41	1,37±1,09
12 (G)	6 ÷ 115	0,34±0,35	0,20±0,30	0,28±0,26	0,53±0,26	0,88±0,08	0,21±0,16
13 (R+S)	7	4,10	1,34±0,46	1,19±1,08	1,80±1,69	1,31±0,59	1,40±1,08
14 (G)	6 ÷ 13	3,00±1,37	0,85±0,59	1,06±0,47	1,57±1,41	0,91±0,72	1,42±1,21
15 (G)	0,05 ÷ 1,6	0,30±0,21	0,61±0,51	1,08±0,80	1,09±0,75	0,54±0,18	0,75±0,67
16 (G)	6 ÷ 10	0,77±0,46	0,82±0,69	0,86±0,52	1,79±1,50	0,76±0,53	1,07±1,02
Zakresy średnich		0,30 ÷ 3,0	0,20 ÷ 8,48	0,28 ÷ 4,31	0,53 ÷ 6,72	0,39 ÷ 1,77	0,21 ÷ 4,73

Objaśnienia:
bd. – brak danych.
G – włókna szklane (ang. *glass*).
R – włókna skalne (ang. *rock*).
S – włókna żuźlowe (ang. *slag*).

Tabela 3. Średnie stężenia włókien respirabilnych [włókno/cm³] w 16 zakładach produkcyjnych w USA (*Esmen* i in. 1979a). Analizy wykonane z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego. W tabeli przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe (SD)

Table 3. Mean respirable fiber concentrations [fiber/cm³] in 16 U.S. manufacturing plants (*Esmen* et al. 1979a). Analyses performed by light microscopy. Mean values and standard deviations (SD) are presented in the table

Numer zakładu	Średnica nominalna włókien, μm	Rodzaj produkcji					
		formowanie	produkcja	przetwarzanie	prace pomocnicze i porządkowe	spedycja	ogólnie
1 (G)	1 ÷ 12	0,0025±0,0008	0,38±0,32	0,031±0,015	0,022±0,021	0,011±0,0011	0,0094±0,25
2 (S)	6	0,071±0,032	0,165±0,14	0,122±0,11	0,080±0,062	0,065±0,06	0,11±0,12
3 (G)	3 ÷ 6	bd.	0,022±0,021	bd.	0,068±0,18	0,0053±0,0079	0,035±0,10
4 (G)	1 ÷ 6	0,0061±0,0039	0,072±0,12	0,038±0,049	0,025±0,021	0,018±0,011	0,042±0,077
5 (S)	8	0,016±0,010	0,028±0,023	0,029±0,023	0,016±0,01	0,026±0,012	0,024±0,018
6 (R)	5 ÷ 15	0,045±0,10	0,007±0,0057	0,0088±0,0091	0,012±0,031	0,0047±0,0035	0,012±0,032
7 (R)	5	0,146±0,028	0,235±0,12	0,429±0,32	0,436±0,37	0,154±0,17	0,34±0,35
8 (G)	7 ÷ 10	bd.	0,025±0,02	0,035±0,031	0,011±0,009	0,008±0,007	0,021±0,022
9 (G)	7 ÷ 10	0,024±0,018	0,014±0,007	0,019±0,066	0,013±0,0064	0,004±0,0023	0,017±0,014
10 (G)	6 ÷ 16	0,0012±0,0014	0,0031±0,0038	0,0037±0,0035	0,0023±0,0026	0,0018±0,0018	0,0024±0,0032
11 (S)	7	0,092±0,109	0,049±0,032	0,038±0,029	0,041±0,039	0,025±0,019	0,053±0,049
12 (G)	6 ÷ 115	0,013±0,0093	0,016±0,031	0,0077±0,0039	0,011±0,015	0,0067±0,0052	0,012±0,017
13 (R+S)	7	0,578	0,083±0,056	0,111±0,17	0,093±0,08	0,032±0,016	0,097±0,10
14 (G)	6 ÷ 13	0,013±0,013	0,043±0,093	0,046±0,054	0,054±0,13	0,033±0,027	0,037±0,031
15 (G)	0,05 ÷ 1,6	0,19±0,22	0,92±1,02	1,56±3,79	0,11±0,10	0,097±0,092	0,78±2,01
16 (G)	6 ÷ 10	0,022±0,0074	0,024±0,022	0,049±0,033	0,066±0,23	0,015±0,0088	0,04±0,12
Zakresy średnich		0,0025 ÷ 0,19	0,0031 ÷ 0,92	0,0037 ÷ 1,56	0,0023 ÷ 0,436	0,0047 ÷ 0,154	0,094 ÷ 0,78

Objaśnienia:

bd. – brak danych.

G – włókna szklane (ang. *glass*).

R – włókna skalne (ang. *rock*).

S – włókna żuźlowe (ang. *slag*).

Analiza stężeń włókien respirabilnych (tab. 3) oraz mikrowłókien o średnicy poniżej 1 μm (tab. 4), ocenianych odpowiednio w mikroskopie świetlnym i elektronowym, wykazała, że narażenie robotników na włókna było bardzo niskie i nie przekraczało 1 wł./cm³ (co jest obowiązującym obecnie w Polsce i wielu innych państwach dopuszczalnym normatywnym higienicznym, odpowiadającym wartości NDS), (tab. 3). Wyjątkiem jest jeden zakład (nr 15 – produkujący włókna szklane), w którym zanotowano znacznie wyższe poziomy mikrowłókien o średnicy poniżej 1 μm (tab. 4), (*Esmen* i in. 1979a).

Analizy stężeń frakcji wdychalnej w fabrykach produkujących sztuczne włókna mineralne w Wielkiej Brytanii (*Head, Wagg* 1980) wykazały ich średnie wartości na poziomie 4,1 ÷ 11,1 mg/m³. Zdarzały się jednak przypadki, że dochodziły one nawet do 78,2 mg/m³. Mimo to średnie ilości włókien we frakcji respirabilnej wahały się między 0,12 wł./cm³ a 0,89 wł./cm³ (tab. 5).

Wysokie średnie stężenia frakcji wdychalnej notowano także w strefie oddychania pracowników podczas prac instalacyjnych wełny mineralnej i szklanej (*Head, Wagg* 1980), (tab. 6). Wartości te dochodziły do 35,5 mg/m³, a w niektórych pomiarach nawet do 90 mg/m³. Średnie ilości włókien respirabilnych w tych przypadkach najczęściej nie przekraczały 1 wł./cm³. Wyjątkiem było stosowanie włókien szklanych w postaci luźnego wypełnienia – wtedy notowano stężenia włókien szklanych w zakresie 0,54 ÷ 20,9 wł./cm³ (średnio 8,19 wł./cm³), (tab. 6).

Przy stosowaniu natryskowej izolacji wysokie stężenia frakcji wdychalnej notowano także w czasie pomiarów wykonanych w Szwecji (*Hallin* 1981). Wynosiły one średnio 13,5 mg/m³. Chociaż zdarzało się, że osiągały wartość do 43,7 mg/m³, średnie stężenia włókien respirabilnych nie przekraczały zwykle 1 wł./cm³ (tab. 7).

Tabela 4. Średnie stężenia włókien respirabilnych [włókno/cm³] w 13 z 16 zakładów produkcyjnych w USA (*Esmen* i in. 1979a). Analizy wykonane z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego – mikrowłókna o średnicy poniżej 1 μm. W tabeli przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe (SD)

Table 4. Mean respirable fiber concentrations [fiber/cm³] in 13 of 16 U.S. manufacturing plants (*Esmen* et al. 1979a). Analyses performed by electron microscopy – microfibers less than 1 μm in diameter. Mean values and standard deviations (SD) are presented in the table

Numer zakładu	Średnica nominalna włókien, μm	Rodzaj produkcji					
		formowanie	produkcja	przetwarzanie	prace pomocnicze i porządkowe	spedycja	ogólnie
1 (G)	1 ÷ 12	0,0022±0,0001	0,73±2,3	0,012±0,007	0,013±0,028	0,0023±0,0023	0,38±0,17
2 (S)	6	0,04±0,027	0,041±0,021	0,031±0,029	0,038±0,037	0,0099±0,006	0,035±0,031
3 (G)	3 ÷ 6	bd.	0,031±0,032	bd.	0,20±0,71	0,0047±0,0034	0,083±0,42
4 (G)	1 ÷ 6	0,0081±0,0045	0,19±0,29	0,12±0,42	0,017±0,016	0,0092±0,0052	0,10±0,28
5 (S)	8	0,01±0,012	0,008±0,0065	0,004±0,002	0,008±0,0051	0,006±0,002	0,008±0,006
6 (R)	5 ÷ 15	0,0023±0,0008	0,0044±0,0042	0,0039±0,0030	0,0084±0,028	0,0036±0,0038	0,0052±0,015
8 (G)	7 ÷ 10	bd.	0,052±0,041	0,016±0,012	0,02±0,016	0,015±0,011	0,025±0,031
10 (G)	6 ÷ 16	0,0031±0,0017	0,0026±0,0019	0,0035±0,0020	0,0081±0,012	0,0024±0,0023	0,0043±0,0067
11 (S)	7	0,123±0,089	0,024±0,023	0,023±0,025	0,013±0,013	0,013±0,0065	0,033±0,056
12 (G)	6 ÷ 115	0,0056±0,0054	0,0037±0,0047	0,0028±0,0033	0,0024±0,0005	0,0025±0,0006	0,034±0,0038
13 (R+S)	7	0,036	0,026±0,032	0,031±0,035	0,023±0,019	0,006±0,006	0,024±0,036
15 (G)	0,05 ÷ 1,6	2,0±2,6*	6,49±9,37*	5,25±14,6*	1,3±2,2*	0,58±0,38*	4,4±9,9*
16 (G)	6 ÷ 10	0,029±0,021	0,042±0,026	0,071±0,040	0,22±0,84	0,0083±0,0067	0,089±0,043
Zakresy średnich		0,0022 ÷ 0,123 (2,0)*	0,0026 ÷ 0,73 (6,49)*	0,0028 ÷ 0,12 (5,25)	0,0024 ÷ 0,20 (1,3)*	0,0023 ÷ 0,013 (0,58)*	0,0034 ÷ 0,38 (4,4)*

Objaśnienia:

bd. – brak danych.

G – włókna szklane (ang. *glass*).

R – włókna skalne (an. *rock*).

S – włókna żuźlowe (ang. *slag*).

* wysokie wartości notowane tylko w jednej fabryce.

Tabela 5. Średnie stężenia frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] przy produkcji wełny izolacyjnej w Wielkiej Brytanii (*Head, Wagg* 1980)

Table 5. Average concentrations of inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibres [fibre/cm³] in the production of insulation wool in Great Britain (*Head, Wagg* 1980)

Typ włókna	Numer fabryki	Stężenie frakcji wdychalnej, mg/m ³		Stężenie włókien respirabilnych, włókno/cm ³	
		średnie	zakres stężeń	średnie	zakres stężeń
Włókno szklane	1	11,1	0,7 ÷ 78,2	0,31	0,02 ÷ 1,1
Włókno szklane	2	4,1	0,5 ÷ 14,3	0,27	0,01 ÷ 0,79
Włókno szklane	3	8,9	0,4 ÷ 51,3	0,12	0,003 ÷ 0,85
Włókno skalne/żuźlowe	4	6,5	0,7 ÷ 16,2	0,89	0,03 ÷ 10,3

Tabela 6. Średnie stężenia frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] w strefie oddychania podczas prac izolacyjnych przy użyciu sztucznych włókien mineralnych (MMVF) w Wielkiej Brytanii (*Head, Wagg* 1980)

Table 6. Average concentrations of inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibres [fibre/cm³] in the breathing zone during insulation work using man-made vitreous fibres (MMVF) in Great Britain (*Head, Wagg* 1980)

Produkt, użycie lub proces	Stężenie frakcji wdychalnej, mg/m ³		Stężenie włókien respirabilnych, włókno/cm ³	
	średnie	zakres stężeń	średnie	zakres stężeń
Izolacja konstrukcyjna (włókno szklane)				
- koce	35,5	8,2 ÷ 90	0,75	0,24 ÷ 1,76
- luźne wypełnienie	30,9	5,0 ÷ 59,7	8,19	0,54 ÷ 20,9
Ochrona przeciwpożarowa (wełna mineralna)	17,2	1,9 ÷ 51,5	0,77	0,16 ÷ 2,57
Izolacja wyrobów przemysłowych (jeden zakład)	0,8	0,6 ÷ 1,0	0,10	0,02 ÷ 0,36

Tabela 7. Średnie stężenia frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] podczas instalacji materiałów izolacyjnych w Szwecji (1979-1980), (Hallin 1981)

Table 7. Average concentrations of inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibres [fibre/cm³] during installation of insulation materials in Sweden (1979-1980), (Hallin 1981)

Rodzaj narażenia	Stężenie frakcji wdychalnej, mg/m ³		Stężenie włókien respirabilnych, włókno/cm ³	
	średnie	zakres	średnie	zakres
Izolacja poddaszy, budynki istniejące	11,6	1,7 ÷ 21,7	1,11	0,1 ÷ 1,9
Izolacja nowych budynków	2,63	0,5 ÷ 11,1	0,57	0,07 ÷ 1,8
Izolacja techniczna	3,14	0,4 ÷ 25	0,37	<0,01 ÷ 1,39
Izolacja akustyczna	1,8	1,7 ÷ 1,9	0,15	0,11 ÷ 0,18
Izolacja natryskowa	13,5	1,3 ÷ 43,7	0,51	0,13 ÷ 1,1
Wieszanie tkanin	4,18	3,6 ÷ 5,2	0,60	0,30 ÷ 0,76

Średnie ilości włókien respirabilnych nie przekraczały także dopuszczalnych norm w badaniach wykonanych w Danii (Schneider 1984). Przy pracach izolacyjnych średnie stężenia frakcji wdychalnej wahały się i wynosiły 0,88 ÷ 26,8 mg/m³, a miejscami dochodziły nawet do 134 mg/m³ (w czasie pracy przy izolacji poddaszy), (tab. 8).

Znaczne różnice i problemy interpretacyjne związane z ewentualnym przekroczeniem dopuszczalnych normatywów higienicznych w warunkach narażenia zawodowego na pyły całkowite (frakcję wdychalną) i włókna respirabilne sztucznych włókien mineralnych dotyczą także pomiarów dokonywanych w Polsce (tab. 9 i 10). Wyniki analiz dotyczących ilości włókien respirabilnych dawały wartości znacznie poniżej wartości NDS wynoszącej 1 wł./cm³ (tab. 9 i 10). Pomiary te wykonano w zakładach produkujących sztuczne włókna mineralne, wyroby uszczelniające i termoizolacyjne, na stanowiskach pracy monterów materiałów uszczelniających i termoizolacyjnych w zakładach przemysłowych i budownictwie (tab. 9). Średnie stężenia pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) wahały się jednak i wynosiły 0,5 ÷ 12,7 mg/m³ (CIOP-PIB 2018; Krajewski, Tarkowski 2002; Kupczewska-Dobacka i in. 2020).

Dane dotyczące poziomów narażenia monterów izolacji z wełny mineralnej (szklanej i skalnej) przedstawione w tabeli 10 pochodzą ze sprawozdania z badań wykonanych w 2018 r. Pomiary wykonane w czerwcu i lipcu można było interpretować zgodnie z rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 2014 r. W tym czasie obowiązywały dwie wartości NDS: dla frakcji wdychalnej – 2 mg/m³ oraz dla frakcji respirabilnej – 1 wł./cm³.

Zgodnie z tymi normami można stwierdzić, że w żadnym przypadku nie zanotowano przekroczeń dla frakcji respirabilnej. Jednak zmierzone średnie stężenia dla frakcji wdychalnej dochodziły do 9,79 mg/m³ (tab. 10). Interpretacja wyników pomiarów dokonanych we wrześniu i listopadzie 2018 r. jest już zupełnie inna w odniesieniu do frakcji wdychalnej, ponieważ w czerwcu 2018 r. ukazało się nowe rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z wykazem wartości NDS. Nie ma w nim normy dla frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych. W takim przypadku można uznać, że pyły te zaliczono do nietoksycznych, dla których wartość NDS wynosi 10 mg/m³. Zgodnie z tym dokonane w 2018 r. pomiary stężeń pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) nie przekraczały obowiązującej w Polsce normy (Sprawozdanie z badań 2018), (tab. 10).

Wątpliwości te powinny zostać wyjaśnione, dlatego pojawiła się konieczność ponownego wprowadzenia lub korekty istniejącej wcześniej wartości NDS dla frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych, co jest podstawowym celem przedstawionej dokumentacji.

Najnowsze dane na temat narażenia zawodowego na sztuczne włókna mineralne w Polsce przedstawiono w pracy Bruchajzer i in. (2024). Dotyczą one pomiarów tylko frakcji respirabilnej (wyrażonej jako liczba włókien/cm³ powietrza). Informacje te odnoszą się jedynie do dwóch lat: 2019 i 2020 r., kiedy obowiązywał w Polsce normatyw tylko dla frakcji respirabilnej i tylko takich pomiarów dokonywano. Według nich w 2019 r. w narażeniu na sztuczne włókna mineralne pracowały 774 osoby, a w 2020 r. – prawie 990 osób. Na żadnym stanowisku pracy nie zanotowano wtedy przekroczeń obowiązującego normatywu (NDS to 1 włókno respirabilne/cm³).

Tabela 8. Średnie stężenia frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] podczas instalacji materiałów izolacyjnych w Danii (*Schneider* 1984)

Table 8. Average concentrations of inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibres [fibre/cm³] during installation of insulation materials in Denmark (*Schneider* 1984)

Rodzaj narażenia	Stężenie frakcji wdychalnej, mg/m ³		Stężenie włókien respirabilnych, włókno/cm ³	
	średnie	zakres	średnie	zakres
Izolacja poddaszy, budynki istniejące	26,8	1,5 ÷ 134	0,89	0,04 ÷ 3,5
Izolacja nowych budynków	12,6	0,22 ÷ 44	0,10	0,04 ÷ 0,17
Izolacja techniczna	7,1	1,8 ÷ 12,8	0,35	0,03 ÷ 1,6
Zastosowanie w produktach przemysłowych	0,88	0,83 ÷ 0,91	0,05	0,01 ÷ 0,11
Kładzenie podłoża pod instalację grzewczą	3,00	0,61 ÷ 3,9	0,06	0,03 ÷ 0,09

Tabela 9. Wyniki pomiarów stężeń frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] na różnych stanowiskach pracy w Polsce

Table 9. Results of measurements of inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibers [fiber/cm³] concentrations at various workplaces in Poland

Narażenie zawodowe	Stężenie frakcji wdychalnej, mg/m ³		Stężenie włókien respirabilnych, włókno/cm ³		Piśmiennictwo
	średnie	zakres	średnie	zakres	
Praca w zakładach produkujących sztuczne włókna mineralne					
Operatorzy urządzeń produkcyjnych (pieca, linii produkcyjnej, pakowarek, granulatorów), (46 pomiarów)	2,7	0,3 ÷ 19,1	0,057	0,013 ÷ 0,204	CIOP-PIB 2018
Sortowanie produktów i wyrobu gotowego (4 pomiary)	0,8	0,4 ÷ 1,3	0,070	0,03 ÷ 0,109	
Transport wewnątrzzakładowy (6 pomiarów)	1,2	0,8 ÷ 1,6	0,041	0,019 ÷ 0,074	
Pracownicy utrzymania ruchu (elektrycy, mechanicy), (4 pomiary)	0,5	0,2 ÷ 0,7	0,042	0,029 ÷ 0,069	
Dozór (mistrz), (4 pomiary)	1,0	0,8 ÷ 1,2	0,067	0,048 ÷ 0,082	
Praca w zakładach produkujących wyroby uszczelniające i termoizolacyjne					
Produkcja płyt uszczelkarskich (16 pomiarów)	1,6	0,3 ÷ 5,7	0,117	0,023 ÷ 0,559	CIOP-PIB 2018
Produkcja uszczelek (13 pomiarów)	0,5	1,1 ÷ 0,8	0,033	0,012 ÷ 0,05	
Produkcja tektury termoizolacyjnej (15 pomiarów)	3,0	0,1 ÷ 15,4	0,398	0,069 ÷ 1,0161	
Produkcja materiałów ciernych (3 pomiary)	0,4	0,4 ÷ 0,7	0,043	0,017 ÷ 0,105	
Produkcja szczeliw, sznurów, taśm (16 pomiarów)	1,5	0,2 ÷ 5,9	0,105	0,007 ÷ 0,737	
Praca na stanowiskach pracy izolatorów i monterów materiałów uszczelniających i termoizolacyjnych w elektrowniach i elektrociepłowniach					
Demontaż zużytej i montaż nowej tkaniny ceramiczno-szklanej na ekranach dźwiękoszczelnych	3,0		0,191		CIOP-PIB 2018
Demontaż i montaż izolacji termicznej (wełna mineralna) na ekranach termicznych	12,7		0,145		
Demontaż i montaż izolacji termicznej (maty z wełny mineralnej) na rurociągu ciepłowniczym	1,3		0,073		
Montaż izolacji termicznej (płyty z wełny mineralnej) na wentylatorach	11,5		0,029		
Praca w budownictwie					
Montaż i wymiana materiałów termoizolacyjnych	7,3	1,3 ÷ 14,3	0,18	0,029 ÷ 0,510	Krajewski, Tarkowski 2002
Monterzy izolacji w budynkach mieszkalnych		1,08 ÷ 11,46		0,035 ÷ 0,17	Kupczewska-Dobacka i in. 2020

Tabela 10. Wyniki pomiarów stężeń frakcji wdychalnej [mg/m³] i włókien respirabilnych [włókno/cm³] na 12 stanowiskach pracy monterów izolacji z wełny mineralnej (Sprawozdanie z badań 2018)

Table 10. Results of measurements of the concentrations of the inhalable fraction [mg/m³] and respirable fibers [fiber/cm³] at 12 workstations of a mineral wool insulation installer (Research report 2018)

Numer próbki	Miejsce pobrania próbki	Stanowisko pracy		Średnie stężenie pyłu – frakcja wdychalna, mg/m ³	Średnie stężenie mineralnych włókien respirabilnych, włókno/cm ³
Pomiary wykonane w czerwcu i lipcu 2018 r. (obowiązujące do czerwca 2018 r. normy to: NDS dla frakcji wdychalnej = 2 mg/m ³ ; NDS dla frakcji respirabilnej – 1 włókno/cm ³)					
1a*	budynek mieszkalny	monter izolacji I	przygotowanie wełny mineralnej Ursa Glaswool Gold 35, cięcie i rozkładanie między krokiewmi na poddaszu użytkowym przy użyciu narzędzi ręcznych, prace pomocnicze i porządkowe	3,52±0,6	0,007±0,0009
1b*	budynek mieszkalny	monter izolacji II		9,79±1,67	0,009±0,001
2a*	garaż – nowo budowany budynek mieszkalny	monter izolacji I	przygotowanie wełny mineralnej Rockwool Fasrock G, cięcie i smarowanie klejem przy użyciu narzędzi ręcznych, klejenie wełny do sufitu garażu (prace na rusztowaniu), prace pomocnicze i porządkowe	1,47±0,06	0,008±0,0012
2b*		monter izolacji II		1,25±0,22	0,006±0,0009
2c*		monter izolacji III		2,51±0,44	0,008±0,0012
2d*		monter izolacji IV		2,74±0,48	0,005±0,0008
2e*		monter izolacji V		1,3±0,26	0,005±0,0007
Pomiary wykonane we wrześniu i listopadzie 2018 r. (obowiązujące od czerwca 2018 r. normy to: NDS dla włókien respirabilnych – 1 włókno/cm ³ , brak wartości NDS dla frakcji wdychalnej)					
3a**	nowo budowany budynek szkolny (hala sportowa)	monter izolacji I	prace związane z ociepleniem budynku, szlifowanie wełny mineralnej (Rockwool Frontrock Max E) papierem ściernym, oczyszczanie fasady, kołkowanie, doklejanie, prace pomocnicze i porządkowe – pobór próbek wykonano podczas pracy na rusztowaniu pod zamontowaną siatką ochronną	1,44	0,055±0,008
3b**		monter izolacji II		1,08	0,035±0,005
3c**		monter izolacji III		2,59	0,029±0,004
4a***	budynek mieszkalny	monter izolacji I	przygotowanie wełny mineralnej Ursa Glaswool Gold 35 oraz Climawool DF1, cięcie i rozkładanie materiału między krokiewmi na poddaszu użytkowym budynku mieszkalnego przy użyciu narzędzi ręcznych, prace pomocnicze i porządkowe	4,28	0,012
4b***		monter izolacji I		7,68	0,017

Objaśnienia:
* pobór próbek przeprowadzono w sposób ciągły w czasie trwania 8-godz. zmiany roboczej.
** pobór próbek przeprowadzono w sposób ciągły w okresie co najmniej 90% zmiany roboczej.
*** pobór próbek przeprowadzono w sposób ciągły w okresie co najmniej 75% zmiany roboczej.

DZIAŁANIE TOKSYCZNE U LUDZI

Na ewentualne biologiczne działanie naturalnych i mineralnych włókien zwrócono uwagę już ponad 100 lat temu w odniesieniu do robotników narażonych zawodowo w latach 1890-1935. Jednak dopiero w latach 60.-70. XX wieku zainteresowano się wpływem włókien na zdrowie ludzi, u których po krótkotrwałym narażeniu zaobserwowano działanie drażniące na skórę i błony śluzowe górnych

dróg oddechowych (Marsh i in. 1990; Milby, Wolf 1969; Petersen, Sabroe 1991). W ostatnich latach zwraca się także uwagę na skutki długoterminowe, zwłaszcza zwłóknienie płuc i nowotwory układu oddechowego (Fireman 2014).

Obserwacje kliniczne. Zatrucie ostre

W dostępnej literaturze brakuje danych o zatruciach ostrych wywołanych przez sztuczne włókna mineralne.

Obserwacje kliniczne. Zatrucia przewlekłe

Narażenie na pył całkowity (frakcję wdychalną) sztucznych włókien mineralnych może wywoływać działanie drażniące na oczy, skórę i drogi oddechowe. Objawia się ono m.in. świądem i stanami zapalnymi, będącymi reakcją na bezpośredni, fizyczny kontakt (Sulzberger, Baer 1942; Schwartz, Botvinick 1943). Podrażnienia mechaniczne to efekt działania głównie grubszych włókien (o średnicy przekraczającej $4,5 \div 5 \mu\text{m}$). Objawy są wprost proporcjonalne do średnicy i odwrotnie proporcjonalne do długości włókna. Skutkami nakłucia naskórka przez włókna szklane są m.in.: ból, uczucie pieczenia, świąd, rumień, odczyny pokrzywkowe (Björnberg 1985; Fisher 1982; Fisher, Warkentin 1969; Koh i in. 1992; Margineanu i in. 2012; Possick i in. 1970). Dolegliwości związane z podrażnieniem ustępują zwykle po zakończeniu narażenia. Jednak mechaniczne uszkodzenia skóry przez grube włókna mineralne (będące we frakcji wdychalnej) mogą być przyczyną nadkażeń bakteryjnych.

Dokładniejsze informacje na temat działania drażniącego (pochodzące m.in. z Finlandii, Danii) (Lundgren i in. 2014; Petersen, Sabroe 1991; Schneider, Stokholm 1981; Stokholm i in. 1982) i uczulającego (Kieć-Świerczyńska, Szymczak 1995; Tarkowski i in. 2001) MMVF przedstawiono w dokumentacji Bruchajzer i in. (2024).

Badania epidemiologiczne

Dane epidemiologiczne pochodzące z obserwacji robotników ekspozowanych na sztuczne włókna mineralne dotyczą głównie układu oddechowego. Nienowotworowe działanie włókien mineralnych obejmuje głównie stany zapalne, zwłóknienia, zaburzenia funkcji płuc i astmę. Dokładne informacje na ten temat przedstawiono w pracy Bruchajzer i in. (2024). Publikacje dotyczące tego tematu pochodziły najczęściej z lat 1968-1982 i nie zawierały poziomów narażenia i charakterystyki włókien (ich podziału na frakcję wdychalną i respirabilną).

Początkowo dane epidemiologiczne odnosiły się do pracowników narażonych ponad 10 lat na wełnę szklaną. Trudność w ocenie tych informacji związana jest głównie z wykonywaniem wówczas tylko badań rentgenowskich płuc. Również dane o poziomie narażenia ($0,93 \div 13,3 \text{ mg/m}^3$) nie mówią, o jaką wielkość włókien chodziło (Nasr i in. 1971; Wright 1968). W późniejszym czasie obserwacje te

rozszerzono o objawy ze strony układu oddechowego (na podstawie ankiet) oraz ocenę parametrów funkcji płuc. Nie wykazały one żadnych zaburzeń (Utidiyan, Cooper 1976).

Inne obserwacje robotników wykazały, że u 45% nowo zatrudnionych stwierdzono świąd spowodowany narażeniem na włókna szklane. U osób pracujących powyżej 10 lat zwrócono także uwagę na możliwość występowania przewlekłych chorób płuc związanych przede wszystkim z intensywnością, a nie z czasem narażenia (Hill i in. 1973).

Na niekorzystne objawy ze strony układu oddechowego (kaszel, odkrztuszanie wydzieliny z drzewa oskrzelowego, duszność) u pracowników narażonych na włókna szklane wskazywały również badania wykonane we Francji (Moulin i in. 1987; 1988) i Danii (Clausen i in. 1993; Petersen, Sabroe 1991).

U duńskich robotników ekspozowanych na wełnę skalną stwierdzono rosnące (choć nieznamienne statystycznie) ryzyko wystąpienia kaszlu (RR = 1,2), duszności (RR = 1,4) i zapalenia oskrzeli (RR = 1,5), (Hansen i in. 1999).

Istnieją także dane, które wskazują, że u pracowników narażonych na wełnę skalną ryzyko wystąpienia nieżyty oskrzeli (Finnegan i in. 1985; Moulin i in. 1987), trudności w oddychaniu (Ernst i in. 1987) oraz objawy astmy (Ernst i in. 1987; Finnegan i in. 1985) są niewielkie. Autorzy tych doniesień sugerowali, że zmiany te nie muszą być związane z narażeniem na sztuczne włókna mineralne, ale z jednoczesnym paleniem tytoniu i pracą w narażeniu na inne czynniki (m.in. azbest).

W piśmiennictwie światowym są również informacje na temat szwedzkich pracowników budowlanych narażonych na wełnę izolacyjną. Nie zaobserwowano u nich istotnych różnic w pojemności życiowej płuc (VC) i natężonej objętości wydechowej pierwszosekundowej (FEV₁) w porównaniu z grupą kontrolną (Albin i in. 1998).

Nie zanotowano także związku między narażeniem na włókna mineralne a skutkami zdrowotnymi w badaniach (ankietowych i testach wydolnościowych) przeprowadzonych w USA (Hughes i in. 1993), Australii (Brown i in. 1996) i Japonii (Yano, Karita 1998).

W wieloośrodkowych europejskich badaniach kohortowych stwierdzono (nieistotną statystycznie) nadwyżkę śmiertelności z powodu schorzeń związanych z nienowotworowym działaniem włó-

kien mineralnych (przy produkcji włókien szklanych SMR = 1,18), (Boffetta i in. 1992; 1997; Sali i in. (1999). Zanotowano także zwiększenie (nieznamiennie) częstości występowania zapalenia oskrzeli, rozedmy płuc i astmy (łączny SMR = 1,12), (Sali i in. 1999).

W kohorcie europejskiej (analizowano przyczyny zgonów 2578 mężczyzn spośród 11 373 osób) wykazano zwiększoną śmiertelność z powodu choroby niedokrwiennej serca u zatrudnionych przy produkcji szklanych włókien ciągłych (SMR = 1,22). U narażonych na wełnę skalną (SMR = 1,05) i żużlową (SMR = 0,97) skutek ten nie występował. Zwiększonego ryzyka umieralności z powodu chorób układu naczyniowego (SMR = 0,99 ÷ 1,22) i naczyniowo-mózgowego (SMR = 0,95 ÷ 1,21) nie stwierdzono w kohorcie europejskiej (Sali in. 1999), amerykańskiej (Marsh i in. 2001c) ani kanadyjskiej (Shannon i in. 1987).

Większość włókien o dużych wymiarach (pył całkowite we frakcji wdychalnej) w narażeniu inhalacyjnym może dostać się także do przetyku i ulec połknięciu. Nie stwierdzono jednak, by było to przyczyną zwiększonego ryzyka zgonu z powodu chorób przewodu pokarmowego (Gustavsson i in. 1992; Marsh i in. 2001c; Sali i in. 1999; Shannon i in. 1984; 1987).

W badaniach epidemiologicznych obserwacje dotyczyły przede wszystkim działania rakotwórczego (m.in. ryzyka wystąpienia międzybłoniaka opłucnej) sztucznych włókien mineralnych u ludzi. Boffetta i in. (2014) opisali wyniki badań kohortowych przeprowadzonych wśród osób zatrudnionych w USA, Kanadzie i Europie przy produkcji wełny szklanej lub ciągłych włókien szklanych oraz wełny skalnej/żużlowej. Badania przeprowadzone w USA (Marsh i in. 2001b) nie potwierdziły, by jeden przypadek śmierci spowodowany przez międzybłoniaka był spowodowany narażeniem na wełnę skalną/żużlową (spośród 1018 zgonów w kohorcie 3478 pracowników narażonych/obserwowanych w latach 1945-1989), wełnę szklaną i ciągle włókna szklane (9173 zgony wśród 32 110 osób narażonych/obserwowanych w latach 1938-1992).

W europejskich badaniach wielośrodkowych (4 państwa, 13 fabryk) wśród 10 108 pracowników narażonych/obserwowanych w latach 1933-1991 na wełnę skalną/żużlową zanotowano cztery przypadki śmierci z powodu międzybłoniaka (w tym dwie osoby były eksponowane także na azbest). Z 8335

robotników w 5 krajach europejskich, pracujących przy produkcji wełny szklanej, tylko jeden zmarł z powodu międzybłoniaka (Boffetta i in. 1997).

Dane epidemiologiczne dotyczące narażenia na sztuczne włókna mineralne (szklane, skalne, żużłowe) nie dostarczają wystarczająco dużo dowodów, by stwierdzić, że narażenie zawodowe zwiększało ryzyko wystąpienia międzybłoniaków. Jest to związane z niską biotrwałością tych włókien – mają one bowiem biologiczny okres półtrwania (w badaniach na zwierzętach) wynoszący dziesiątki dni, a nie setki, jak w przypadku azbestów (Boffetta i in. 2014).

Pozostałe informacje na temat danych epidemiologicznych, dotyczących głównie nowotworów płuc u osób narażonych zawodowo, przedstawiono w podrozdziale „Działanie rakotwórcze u ludzi”.

DZIAŁANIE TOKSYCZNE NA ZWIERZĘTA

W dostępnej literaturze brakuje rzetelnych informacji o wpływie pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) na zwierzęta laboratoryjne. W niektórych doświadczeniach wykonywanych do lat 80. XX wieku włókna szklane poddawano mieleniu (Lee i in. 1979). W innych przypadkach nie sprecyzowano, jaki pył stosowano (czy frakcję wdychalną, czy respirabilną). Większość badań wykonanych w późniejszym czasie dotyczyła frakcji respirabilnej włókien określanych wg definicji jako „włókna WHO” (zob. Bruchajzer i in. 2024).

Toksyczność ostra i krótkoterminowa

Narażenia na pyły, których toksyczność jest związana w ich odkładaniem się w organizmie (przede wszystkim w płucach), powoduje, że nie należy oczekiwać zatruć ostrych. Nie znaleziono informacji dotyczących wartości median dawki (DL₅₀) lub stężenia śmiertelnego (CL₅₀). Dawki, które stosowano w badaniach toksyczności ostrej, przedstawiano zwykle jako liczbę włókien respirabilnych na cm³ powietrza. Brakuje danych na temat ewentualnych stężeń pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) przedstawionych jako mg/m³.

Wyniki doświadczeń wykonanych na szczurach (Fisher-344, po 32 zwierzęta w grupie narażanej i kontrolnej) wskazały, że zwierzęta przeżyły nawet bardzo wysokie poziomy narażenia (przez okres 2 ÷ 5 dni, 5 ÷ 6 h dziennie) na mikrowłókna szklane (50 000 wł./cm³). W badaniach histopatologicznych

(przeprowadzonych po 1, 4, 5, 8 i 12 miesiącach po zakończeniu ekspozycji) nie stwierdzono znamiennych różnic w porównaniu z kontrolą (Pickrell i in. 1983).

W czasie doświadczeń oceniających biotrwłość włókien respirabilnych zaobserwowano, że krótkoterminowa (5 dni narażenia) ekspozycja szczurów (Fisher-344) na tradycyjną wełnę skalną (MMVF21) oraz biorozpuszczalne włókno wełny skalnej (MMVF34) w stężeniu 150 wł./cm^3 (rozmiar włókien $>20 \text{ }\mu\text{m}$) spowodowała zależne od czasu zakończenia ekspozycji zmniejszenie obciążenia płuc włóknami (Kamstrup i in. 1998).

Na znacznie wyższe poziomy włókien respirabilnych (wełnę szklaną MMVF10) w powietrzu: 316 wł. WHO/cm^3 , 550 wł. WHO/cm^3 lub 714 wł. WHO/cm^3 (co odpowiadało ich stężeniom gravimetrycznym: 30 mg/m^3 , 45 mg/m^3 lub 60 mg/m^3) narażano inhalacyjnie (tylko przez nos) samce chomików (Golden Syrian, $n = 5/\text{grupe}$) przez 7 tygodni (5 dni/tyg., 6 h/dzień). Zanotowano zależne od stężenia zwiększenie liczby włókien w płucach i niewielką reakcję makrofagów z tym związaną (Hesterberg i in. 1996a).

Toksyczność podprzewlekła i przewlekła

Toksyczność podprzewlekłą i przewlekłą sztucznych włókien mineralnych opisano dokładnie w Bruchajzer i in. (2024).

Wczesne badania przeprowadzono na myszach, szczurach, kawiach domowych i chomikach (Lee i in. 1979; Pickrell i in. 1983; Shepers, Delahant 1955; Smith i in. 1984). Zwierzęta narażano przede wszystkim na włókna szklane, jednak nie podawano, jakie włókna stosowano (respirabilne czy pyły). Stężenia, na jakie narażano zwierzęta, dochodziły aż do 100 mg/m^3 .

Efekty niektórych doświadczeń opisywano jako „minimalną śródmiąższową reakcję komórkową na pył, bez oznak włóknienia”. Badania przewlekłe wykonano wtedy na szczurach i kawiach domowych narażanych na włókna szklane w stężeniach około 5 mg/m^3 (Shepers 1955; Shepers, Delahant 1955) oraz 10 mg/m^3 (12-miesięczne narażenie szczurów na mikrowłókna szklane), (McConnell i in. 1994; RoC 2016; Wagner i in. 1984).

Przeprowadzono także eksperymenty inhalacyjne na szczurach i chomikach narażanych przez 24 miesiące na włókna szklane w stężeniu 100 mg/m^3 . Stwierdzono wtedy, że włókna szklane są „biologicznie obojętne” (Goss i in. 1970).

W późniejszych latach autorzy publikacji wyciągnęli wnioski, że potencjał toksyczny i biotrwłość zależą przede wszystkim od rozmiaru włókien. W latach 90. XX wieku rozpoczęto badania na zwierzętach, które narażano inhalacyjnie na konkretne wymiary włókien, definiowanych jako „włókno WHO” (wł. WHO), czyli włókna respirabilne, które mogą dotrzeć do pęcherzyków płucnych. Opis wyników tych doświadczeń zob. w Bruchajzer i in. (2024). W eksperymentach tych stosowano zwykle stężenia $3 \div 60 \text{ mg/m}^3$ (czyli około $25 \div 700 \text{ wł. WHO/cm}^3$), a zwierzęta narażano przez okres od 13 tygodni do 24 miesięcy. Dodatkowo monitorowano okres „regeneracji” (po zakończeniu narażenia).

Większość danych z doświadczeń dotyczących toksyczności sztucznych włókien mineralnych przeprowadzonych na gryzoniach była związana z oceną ich biotrwłości w układzie oddechowym. Stosunek średnicy absolutnej (fizycznej) do średnicy aerodynamicznej włókien wynosi w przybliżeniu 1: 3. Można więc przyjąć, że włókna, dla których średnica fizyczna (mierzona w mikroskopie) wynosi $1 \text{ }\mu\text{m}$, mają średnicę aerodynamiczną w przybliżeniu $3 \text{ }\mu\text{m}$. Dodatkowo wszelkie zakrzywienia włókien mogą mieć wpływ na wzrost rzeczywistej średnicy aerodynamicznej. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że za górną granicę rozmiarów włókien uznanych za respirabilne u szczurów przyjmuje się cząsteczki o średnicy aerodynamicznej około $3 \text{ }\mu\text{m}$. Zwykle badania na szczurach są tak projektowane, by dłuższe włókna miały średnicę mniejszą niż $0,8 \text{ }\mu\text{m}$ (Bernstein 2007). Należy jednak zwrócić uwagę na różnice między osadzaniem się włókien w obszarze wymiany gazowej u szczura i człowieka. W przypadku człowieka do pęcherzyków płucnych mogą docierać włókna o średnicy aerodynamicznej $5 \div 6 \text{ }\mu\text{m}$ (Dai, Yu 1998).

Doświadczenia wykonane w ciągu ostatnich 30 lat były prawidłowo zaplanowane (zgodnie z wytycznymi OECD) i dotyczyły narażenia szczurów i chomików na frakcję respirabilną konkretnych szklanych włókien, takich jak: MMVF10 (JM 901), MMVF10a (typowe włókna wykorzystywane do izolacji budynków), MMVF11 (wełna szklana Teed), MMVF33 (włókna szklane specjalnego zastosowania), a także MMVF21 (tradycyjna wełna skalna) i MMVF22 (wełna żużlowa), (Hesterberg i in. 1993; 1994; 1996a; 1997; 1999; McConnell i in. 1994; 1999).

Włókna szklane

Hesterberg i in. (1993; 1994; 1996b) badali wełnę szklaną (MMVF10 i MMVF 11), na którą narażali inhalacyjnie szczury przez okres 13 ÷ 104 tygodni. Stosowali wtedy stężenia w granicach 3 ÷ 60 mg/m³ (około 29 ÷ 714 wł. WHO/cm³). Po najniższym stężeniu (3 mg/m³) obserwowali nieswoiste zmiany zapalne będące wynikiem reakcji makrofagów na obecność włókien w płucach. Po wyższych stężeniach: 16 mg/m³ (145 ÷ 153 wł. WHO/cm³) i 30 mg/m³ (232 ÷ 246 wł. WHO/cm³) zmiany te nasilały się. Liczba włókien w płucach zwiększała się wraz ze wzrostem stężenia.

U chomików narażanych na MMVF10a (włókno szklane JM 901) obserwowano przejściowe zmiany wybranych parametrów mierzonych w płynie oskrzelowo-pęcherzykowym (BAL) oraz zależne od stężenia zwiększenie liczby makrofagów zawierających włókna. Po wyższych stężeniach (16 mg/m³ lub 30 mg/m³, czyli 206 wł. WHO/cm³ lub 316 wł. WHO/cm³) zmiany w BAL obniżały się po 10. tygodniu rekonwalescencji, a po stężeniach 45 mg/m³ lub 60 mg/m³ (550 wł. WHO/cm³ lub 714 wł. WHO/cm³) – utrzymywały się jeszcze przez kolejne 10 tygodni. Nie obserwowano wtedy jednak zmian zwłóknieniowych (Hesterberg i in. 1997; 1999).

Niewielkie zwłóknienie płuc i opłucnej obserwowano po 18 miesiącach narażenia chomików na wełnę szklaną MMVF10a i włókna szklane specjalnego przeznaczenia (MMVF33), (Hesterberg i in. 1997; 1999).

Wyniki badań przeprowadzonych na szczurach i chomikach narażanych na włókna szklane pozwoliły ich autorom na wyznaczenie maksymalnej dawki tolerowanej (MTD) na poziomie 30 mg/m³ (232 ÷ 316 wł. WHO/cm³), (Hesterberg i in. 1993; 1994; 1996a; 1997; 1999).

Po przewlekłym narażeniu chomików na włókno szklane specjalnego przeznaczenia (MMVF33) oraz wełnę szklaną typową do izolacji budynków (MMVF10a) stwierdzono, że włókno MMVF10a (bardziej rozpuszczalne) było niefibrogenne, nie-rakotwórcze i stosunkowo mało toksyczne. Włókno MMVF33 (bardziej trwałe, powodujące dłużej utrzymujące się zmiany zapalne i zwłóknienia) powinno być uważane za potencjalnie fibrogenne i rakotwórcze w warunkach wysokiego narażenia. Stosowano wtedy tylko jedno stężenie – 37 mg/m³ (310 wł. WHO/cm³ dla MMVF33) lub 30 mg/m³ (300 ÷ 339 wł. WHO/cm³ dla MMVF10a), (McConnell i in. 1999).

Wełna skalna

Skutki toksycznego działania tradycyjnej wełny skalnej (MMVF21) badano po przewlekłym narażeniu inhalacyjnym szczurów (Kamstrup i in. 2001; McConnell i in. 1994). Stosowano stężenia 3 ÷ 30 mg/m³ (około 30 ÷ 240 wł. WHO/cm³). Stany zapalne w płucach (niewielkie) wystąpiły po narażeniu na stężenie 3 mg/m³ (34 wł. WHO/cm³). Po wyższych stężeniach (16 mg/m³ lub 30 mg/m³; 150 wł. WHO/cm³ lub 243 ÷ 291 wł. WHO/cm³) zanotowano dodatkowo zwiększenie liczby włókien w płucach, odkładanie się kolagenu w oskrzelach bez włóknienia oraz zwiększenie względnej masy płuc wynikające z przeładowania ich włóknami (Kamstrup i in. 2001).

Wełna żuźlowa

McConnell i in. (1994) badali działanie toksyczne i rakotwórcze wełny żuźlowej (MMVF22). Szczury narażono przewlekłe na stężenia: 3 mg/m³, 16 mg/m³ lub 30 mg/m³ (30 wł. WHO/cm³, 130 wł. WHO/cm³ lub 213 wł. WHO/cm³). Efektem była odpowiedź zapalna (zależna od stężenia). Stężenie 3 mg/m³ (30 wł. WHO/cm³) uznano za NOAEL (DECOS 1995; SCOEL 2012).

Podsumowanie doświadczeń podprzewlekłych i przewlekłych na gryzoniach

Holenderski Komitet Ekspertów ds. Standardów Zawodowych (DECOS), (1995) ocenił dane z eksperymentów wykonanych po przewlekłym narażeniu inhalacyjnym szczurów i chomików. Za skutek krytyczny uznał zwłóknienie płuc i zaproponował wartości NOAEL i LOAEL (tab. 11). W doświadczeniach na zwierzętach stosowano najczęściej włókna respirabilne w stężeniach około 25 ÷ 30 wł. WHO/cm³, 150 wł. WHO/cm³ lub 240 ÷ 270 wł. WHO/cm³, co odpowiadało stężeniom: 3 mg/m³, 16 mg/m³ lub 30 mg/m³. Stężenie 3 mg/m³ (około 25 wł. WHO/cm³) zostało uznane przez DECOS (1995) oraz ekspertów Komitetu Naukowego ds. Dopuszczalnych Wartości Narażenia Zawodowego (SCOEL), (2012) za najistotniejsze z punktu widzenia ustalania normatywów higienicznych dla sztucznych włókien mineralnych.

Tabela 11. Wartości NOAEL i LOAEL dla frakcji respirabilnej sztucznych włókien mineralnych pochodzące z podprzewlekłych i przewlekłych doświadczeń inhalacyjnych na zwierzętach zaproponowane przez DECOS (DECOS 1995; SCOEL 2012)
Table 11. NOAEL and LOAEL values for the respirable fraction of man-made mineral fibres derived from subchronic and chronic inhalation experiments on animals proposed by DECOS (DECOS 1995; SCOEL 2012)

Rodzaj włókna	Gatunek zwierząt	Czas narażenia	Stężenia, mg/m ³	Wartość NOAEL	Wartość LOAEL	Piśmiennictwo
Wełna szklana						
MMVF10	szczur	24 miesiące, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30	3 mg/m ³ 25 wł./cm ³		Hesterberg i in. 1993
MMVF10	szczur	78 tygodni, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30, 45, 60		3 mg/m ³ 25 wł./cm ³	Hesterberg i in. 1996a
MMVF11	szczur	24 miesiące, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30	3 mg/m ³ 25 wł./cm ³		Hesterberg i in. 1993
MMVF10a MMVF33	chomik	78 tygodni, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	30	nie wyznaczono		McConnell i in. 1994
MMVF10.1	chomik	13 tygodni, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30, 45, 60		3 mg/m ³ 25 wł./cm ³	Hesterberg i in. 1999
Wełna skalna						
MMVF21	szczur	24 miesiące, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30	3 mg/m ³ 30 wł./cm ³		McConnell i in. 1994
MMVF21	szczur	13 ÷ 104 tygodnie, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	16, 30	nie wyznaczono		Kamstrup i in. 2001
MMVF34/HT	szczur	13 ÷ 104 tygodnie, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	30	nie wyznaczono		Kamstrup i in. 2001
Wełna żuźłowa						
MMVF22	szczur	24 miesiące, 5 dni/tyg., 6 h/dzień	3, 16, 30	3 mg/m ³ 30 wł./cm ³		McConnell i in. 1994

Objaśnienia:
MVVF10 – wełna szklana 901.
MMVF10.1 – wełna szklana 901.
MMVF10a – typowe włókna szklane do izolacji budynków.
MMVF11 – określona wełna szklana Teed.
MMVF21 – tradycyjna (skalna) wełna skalna. HL 65 i 92 dni (WHO, długie włókna).
MMVF22 – wełna żuźłowa.
MMVF33 – włókno szklane do zastosowań specjalnych.
MMVF34/HT – biosolwentowe włókno wełny skalnej. HL 25 i 6 dni (WHO, włókna długie).

ODLEGŁE SKUTKI
DZIAŁANIA TOKSYCZNEGO

Działanie mutagenne i genotoksyczne

Dane na temat działania mutagennego i genotoksycznego sztucznych włókien mineralnych są bardzo ograniczone i mają niewielkie znaczenie w warunkach narażenia in vivo (IARC 2002).
W dostępnym piśmiennictwie można jednak znaleźć wyniki badań in vitro. Według nich syntetyczne włókna szklane mogą wywoływać m.in.:

- aberracje chromosomalne w komórkach chomika chińskiego (Brown i in. 1979);
- zwiększoną częstość występowania mikrojąder w komórkach jajnika i fibroblastach płuc

chomika chińskiego (Ong i in. 1997; Zhong i in. 1997), komórkach nabłonka płuc (Peraud, Riebe-Imre 1994) i fibroblastach zarodka chomika syryjskiego (Dopp, Schiffmann 1998) oraz komórkach ludzkiego płynu owodniowego (Dopp, Schiffmann 1998);

- transformacje morfologiczne w komórkach embrionu chomika syryjskiego (Hesterberg, Barrett 1984; Hesterberg i in. 1985) i komórkach mysich fibroblastów BALB/c-3T3 (Gao i in. 1995);
- poliploidalność w komórkach płuc chomika chińskiego (Koshi i in. 1991; Sincok i in. 1982);
- pęknięcia nici DNA i wiązania krzyżowe między niciami DNA w ludzkich komórkach nabłonka płuc A549 (Wang i in. 1999).

Syntetyczne włókna szklane są mniej aktywne niż włókna azbestowe (Leanderson i in. 1988; Peraud, Riebe-Imre 1994; Wang i in. 1999), a aktywność cytogenetyczna in vitro zależy od wymiarów włókien (Hesterberg, Barrett 1984; Hesterberg i in. 1985; Ong i in. 1997).

Działanie rakotwórcze

Działanie rakotwórcze u ludzi

Od ponad 50 lat wiele badań epidemiologicznych dotyczy działania rakotwórczego sztucznych włókien mineralnych u ludzi w warunkach narażenia zawodowego. Są one ciągle uaktualniane i analizowane, co niestety czasami powoduje trudności interpretacyjne, związane z pewnym „zazębianiem się” danych. W badaniach epidemiologicznych wyniki są przedstawiane także w postaci różnych parametrów, np. SIR (standaryzowane wskaźniki zapadalności na nowotwory), SMR (znormalizowane wskaźniki umieralności) i ich przedziały ufności (zwykle 95-procentowe CI), RR (ryzyko względne), OR (iloraz szans, wskazujący na prawdopodobieństwo zgonu wśród narażonych w porównaniu z osobami nienarażonymi).

Dokładne dane dotyczące badań epidemiologicznych związanych z narażeniem zawodowym ludzi podano w pracy Bruchajzer i in. (2024).

W badaniach epidemiologicznych najwięcej informacji można uzyskać analizując dane z trzech kohort: amerykańskiej (z USA), (tab. 12), kanadyjskiej (tab. 13) i wielośrodkowej europejskiej (tab. 14). We wszystkich tych kohortach nie było zwykle podanych informacji na temat wielkości włókien i stężeń pyłów w powietrzu. Jeśli czasami takie dane istniały, to najczęściej dotyczyły włókien respirabilnych, o największym znaczeniu w przypadku zagrożeń zdrowotnych. Stężenia wełny szklanej, na jakie byli narażeni robotnicy w amerykańskich kohortach, były w granicach $0,034 \div 0,35 \text{ wł./cm}^3$ (Marsh i in. 2001a; 2001b; 2001c), w kohorcie kanadyjskiej – $0,01 \div 0,32 \text{ wł./cm}^3$ (Shannon i in. 2005), a w kohorcie europejskiej – $0,01 \div 1 \text{ wł./cm}^3$ (Boffetta i in. 1997; 1999).

Kohorta amerykańska

Kohorta amerykańska była opisywana przez naukowców z uniwersytetu w Pittsburghu. Wybrane dane pochodzące z badań tego zespołu przedstawiono w tabeli 12 (Enterline, Henderson 1975; Enterline i in. 1987;

Marsh i in. 1990; 2001a; 2001c). Dotyczą one pracowników narażonych na sztuczne włókna mineralne: szklane, skalne i żuźlowe. W opracowaniach kohorty z Pittsburgha można zauważyć pewne różnice, m.in. w liczbie obserwowanych zakładów i ich pracowników; czasami brak dokładnych informacji o rodzaju włókien, co może utrudniać analizę danych epidemiologicznych.

W badaniach kohorty pittsburskiej przyjęto, że włókna szklane są włóknami wytłaczanymi o średnicy $6 \div 25 \mu\text{m}$ i długości mierzonej w metrach, podczas gdy wełna szklana jest wykonana ze znacznie krótszych włókien wydmuchiwanych, o średnicy zazwyczaj poniżej $12 \mu\text{m}$ i długości mierzonej w milimetrach lub centymetrach. Ponieważ włókna szklane nie rozdzielają się wzdłużnie (jak włókna azbestowe), średnica włókien szklanych unoszących się w powietrzu nie może być mniejsza niż średnica materiału macierzystego. Gdy włókna szklane zostaną zmiażdżone, ich odłamki mogą czasami odpowiadać definicji włókien respirabilnych. W badaniu kohorty pittsburskiej stężenia włókien respirabilnych w przypadku pracy ze sztucznymi włóknami mineralnymi były często $1 \div 3$ rzędów wielkości niższe niż w przypadku pracy z wyjściową wełną skalną (odpowiednio $0,001 \text{ wł./cm}^3$ i $0,1 \div 1,00 \text{ wł./cm}^3$). Narażenie na sztuczne włókna mineralne w zakładach je produkujących zasadniczo odzwierciedla narażenie na włókna wełny, ponieważ szacowana ekspozycja na włókna respirabilne jest bardzo niska. Najniższy poziom włókien respirabilnych w czasie produkcji materiałów izolacyjnych wynosił w badaniach amerykańskich $0,001 \text{ wł./cm}^3$, co jest zgodne z poziomem włókien w środowisku zewnętrznym (Stone i in. 2004).

Badacze z uniwersytetu w Pittsburghu skupili się na kohorcie mężczyzn z 17 zakładów, którzy przez co najmniej rok byli zatrudnieni (w latach 1945-1963) przy produkcji lub wykorzystaniu włókien szklanych (11 zakładów) i wełny skalnej (kamiennej) lub żuźlowej (6 zakładów). Najstarszy raport przedstawiał statystyki śmiertelności do 1982 r. (Enterline i in. 1987). Później badania przedłużano: najpierw do 1985 r. (Marsh i in. 1990), a następnie do 1992 i 2001 r. (Marsh i in. 2001a; 2001b; 2001c). Najwcześniejsze badania nie wykazały istotnych tendencji wzrostowych w śmiertelności z powodu nowotworów układu oddechowego u pracowników narażonych na wełnę szklaną, choć zanotowano pewną nadwyżkę nowotworów układu oddechowego po ekspozycji na wełnę skalną ($\text{SMR} = 1,48$).

Tabela 12. Działanie rakotwórcze sztucznych włókien mineralnych – badania kohortowe z Pittsburgha (USA), (zob. też Bruchajzeri in. 2024)
Table 12. Carcinogenic effects of man-made vitreous fibers - cohort study from Pittsburgh (USA) (v. Bruchajzer et al. 2024)

Opis kohorty	Czas narażenia	Liczba przypadków	Wyniki/ocena ryzyka	Piśmiennictwo
6 zakładów, produkcja materiałów izolacyjnych z włókna szklanego; 416 mężczyzn; okres zatrudnienia/obserwacji: 1945-1972	>10 lat	5 zgonów z powodu raka płuca	SMR = 0,82	Enterline, Henderson 1975
17 zakładów produkcyjnych; 16 730 mężczyzn; narażenie: 1940-1963 obserwacje: 1941-1977	<20 lat	87 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 0,945	Enterline i in. 1983
	≥20 lat	160 zgonów – nowotwory układu oddechowego	SMR = 1,067	
	<20 lat	72 zgony – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 0,87	
	≥20 lat	130 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,08	
	<20 lat	15 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,66	
	≥20 lat	30 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,57	
- szkło włókniste (14 884 mężczyzn)			SMR = 1,086	
- wełna skalna (1846 mężczyzn)				
- mikrowłókna (4 zakłady)				
17 zakładów produkcyjnych; 16 661 mężczyzn (14 815 – wełna szklana), (1846 – wełna skalna); narażenie: 1945-1963 obserwacje : do 1982 r.	>1 rok	287 nowotworów ukł. oddechowego	OR = 1,1	Enterline i in. 1987
- wełna szklana (11 zakładów)	<10 lat	5 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 0,86	Marsh i in. 1990
	10 ÷ 19 lat	22 zgony – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,00	
	20 ÷ 29 lat	39 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,03	
	>30 lat	13 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR =1,38	
		łącznie – 79 zgonów	SMR = 1,05	
- wełna skalna (6 zakładów)	<10 lat	2 zgony – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,00	
	10 ÷ 19 lat	13 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,71	
	20 ÷ 29 lat	20 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,40	
	>30 lat	25 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,52	
		łącznie – 60 zgonów	SMR = 1,48*	
8 zakładów, narażenie na wełnę szklaną i ciągłe włókna szklane, 6 zakładów produkujących głównie wełnę szklaną; 11 380 mężczyzn; narażenie: 1945-1963 obserwacje: do 1985 r.	>1 rok	340 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,12 (1,00 ÷ 1,24)	
	<10 lat	190 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,21	
	10 ÷ 19 lat	56 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 0,98	
	20 ÷ 29 lat	62 zgony – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,09	
	≥30 lat	32 zgony – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 0,97	
10 zakładów w Ohio produkujących wełnę szklaną, ciągłe włókna szklane; 32 110 (5431 – ciągłe włókna szklane), (15 718 – wata szklana i ciągłe włókna szklane), (10 961 – głównie wełna szklana); narażenie: 1945-1978 obserwacje: 1946-1992	<5 lat	378 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,12* (1,01 ÷ 1,24)	Marsh i in. 2001a
	≥5 lat	496 zgonów – nowotwory ukł. oddechowego	SMR = 1,03 (0,94 ÷ 1,12)	
		2243 – wszystkie zgony z powodu różnych nowotworów (1941-1992)	SMR = 0,98	
		63 zgony – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,07	
		874 zgony – nowotwory ukł. oddechowego, w tym:	SMR = 1,16*	
		838 zgonów – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,17*	
10 zakładów produkujących wełnę szklaną i skalną, 6 zakładów produkujących wełnę skalną i żużlową; 14 029 mężczyzn (Ohio); 1970-2001	>1 rok	nowotwory ukł. oddechowego (płuc)	SMR = 1,21* (wełna szklana) SMR = 1,38* (wełna skalna) SMR = 1,17 (wszystkie rodzaje)	Marsh i in. 2001c

Objaśnienia:
* – wartość istotna statystycznie.
OR – iloraz szans (ang. *odds ratio*).
SMR – standaryzowany wskaźnik umieralności.

W analizie tej nie uwzględniono jednak nawyku palenia tytoniu (*Enterline, Henderson 1975; Enterline i in. 1987*), (tab. 12).

Po wydłużeniu okresu obserwacji i uwzględnieniu danych po 1982 r. określono średnie stężenia włókien respirabilnych na $0,039 \div 0,047$ wł./cm³. Wśród 11 380 mężczyzn w fabrykach produkujących włókna szklane nie stwierdzono związku między występowaniem nowotworów układu oddechowego a czasem zatrudnienia (*Marsh i in. 1990*), (tab. 12).

Kolejne wydłużenie obserwacji kohorty pittsburskiej do 1992 r. pozwoliło na poszerzenie analizowanych danych o pełniejszą charakterystykę historii pracy, dane o nawyku palenia, retrospektywną ocenę narażenia oraz udział kobiet i dokładny opis składu rasowego robotników (*Marsh i in. 2001a; 2001b; 2001c*). Opisano wtedy przyczyny śmiertelności (w latach 1946-1992) wśród 32 110 pracowników zatrudnionych przez co najmniej rok w latach 1945-1978. Z analiz wykluczono robotników narażonych na włókna kwarcowe (czysta krzemionka). Pomiary stężeń włókien wykonane w latach 80. i 90. XX wieku wykazały, że pracownicy (32 110 mężczyzn) byli narażeni na stężenia $0,034 \div 0,35$ wł./cm³. W badaniach zanotowano wzrost ryzyka umieralności z powodu narażenia na włókna mineralne – zgony te dotyczyły nowotworów układu oddechowego (SMR = 1,16, jednak obserwowany tu 16-procentowy nadmiar śmiertelności został zredukowany do 6%, gdy zastosowano porównania do lokalnych wskaźników dla grupy kontrolnej), w tym tchawicy, oskrzeli i płuc (SMR = 1,17). Ostatecznie autorzy publikacji stwierdzili, że brakuje dowodów na nadmierny wzrost ryzyka umieralności z powodu zawodowego narażenia na wełnę szklaną i ciągłe włókna szklane (*Marsh i in. 2001a*), (tab. 12).

Niewielki, ogólny nadmiar zachorowalności na nowotwory układu oddechowego u narażonych na wełnę szklaną (nadmiar 7%) i skalną/żuźłową (nadmiar 24%) zaobserwowano w kohorcie 14 029 mężczyzn pracujących w 10 zakładach produkujących wełnę szklaną i skalną oraz w 6 zakładach produkujących wełnę skalną i żuźłową. Nie wykluczono, że za te skutki mogło także odpowiadać palenie tytoniu (*Marsh i in. 2001c*), (tab. 12). Nie jest też wykluczone, że znaczenie mogło mieć jednocześnie narażenie na inne związki rakotwórcze: azbest, formaldehyd i krzemionkę krystaliczną (*Stone i in. 2001; Youk i in. 2001*).

Kohorta kanadyjska

Wyniki badań kohorty kanadyjskiej zostały opracowane przez *Shannona i in.* (1984; 1987; 1990) i kontynuowane przez 20 lat (*Shannon i in. 2005*), (tab. 13). Analizowano wtedy dane uzyskane od robotników narażanych w latach 1955-1977 przy produkcji wełny izolacyjnej (głównie szklanej) oraz ciągłych włókien szlanych. Obserwacje (zgonny spowodowane rakiem płuca) prowadzono do lat 80. XX wieku (*Shannon i in. 1987; 1990*). Na ich podstawie określono standaryzowane wskaźniki umieralności (SMR), które wykazywały najczęściej tendencję wzrostową – wahały się w granicach $1,36 \div 2,23$. Wyjątkiem było narażenie na ciągłe włókna szklane (najczęściej notowany poziom narażenia to $0,91$ wł./cm³) przez okres powyżej 25 lat, gdy SMR = 0,67 (*Shannon i in. 1990*). Wydłużenie okresu obserwacji do 1997 r. wykazało istotne zwiększenie liczby przypadków nowotworów płuc (SIR = 1,6; 95% CI: $1,19 \div 2,11$) i zgonów z tego powodu (SMR = 1,63; 95% CI: $1,18 \div 2,21$), (*Shannon i in. 2005*). W analizie danych kohorty kanadyjskiej nie uwzględniono narażenia na inne substancje.

Wieloośrodkowa kohorta europejska

Wieloośrodkowa kohorta europejska posłużyła do oceny danych epidemiologicznych dotyczących narażenia na sztuczne włókna mineralne robotników zatrudnionych w 13 zakładach w 7 państwach (tab. 14). Początkowe informacje pochodziły głównie z retrospektywnych badań, w których notowano zgonny spowodowane nowotworami (w tym płuc) u pracowników zatrudnionych w latach 1900-1955 przy produkcji włókien mineralnych. W kohorcie 25 146 osób, obserwowanej do 1977 r., zanotowano wzrost (nieistotny statystycznie) ryzyka wystąpienia nowotworów układu oddechowego (*Sarraci i in. 1984*), (tab. 14).

W kohorcie 21 967 mężczyzn ekspozowanych przez ponad 30 lat na sztuczne włókna mineralne w latach 1933-1982 i obserwowanych w latach 1977-1982 stwierdzono zwiększoną śmiertelność spowodowaną rakiem płuca (SMR dochodziło do 2,46), (*Simonato i in. 1986; 1987*). Dane te mogą być przeszacowane – informacje o nadmiernej śmiertelności dotyczą obserwacji do 1977 r. W latach 1978-1982 SMR obniżył się do 1,35 (*Simonato i in. 1986*). Nie jest wykluczone, że na wartości SMR w początkowych latach (szczególnie w Danii i Niemczech) miało wpływ wcześniejsze narażenie na azbest.

Tabela 13. Działanie rakotwórcze sztucznych włókien mineralnych – badania kohortowe w Kanadzie (zob. też Bruchajzer i in. 2024)
Table 13. Carcinogenic effects of man-made vitreous fibers - cohort studies in Canada (v. Bruchajzer et al. 2024)

Opis kohorty	Czas narażenia	Liczba przypadków	Wyniki/ocena ryzyka	Piśmiennictwo
Produkcja wełny izolacyjnej (Ontario), 1 zakład; 2576 mężczyzn; okres zatrudnienia/obserwacji: 1955-1977	>90 dni	7 zgonów – rak płuca	SMR = 1,66	Shannon i in. 1984
	<5 lat	1 zgon – rak płuca	SMR = 2,23	
	≥5 lat	5 zgonów – rak płuca	SMR = 1,57	
Produkcja izolacyjnej wełny szklanej (Ontario); 2557 mężczyzn; narażenie: 1955-1977; obserwacje: do 1984 r.	>90 dni	19 zgonów – rak płuca	SMR = 1,99*	Shannon i in. 1987
	<5 lat	4 zgony – rak płuca	SMR = 1,59	
	≥5 lat	13 zgonów – rak płuca	SMR = 1,82	
Produkcja ciągłych włókien szklanych; 1465 mężczyzn i kobiet; okres zatrudnienia/obserwacji: 1951-1986	>1 rok	11 zgonów – rak płuca	SMR = 1,36	Shannon i in. 1990
	<5 lat	1 zgon – rak płuca	SMR = 1,38	
	5 ÷ 9 lat	2 zgony – rak płuca	SMR = 1,56	
	10 ÷ 24 lata	2 zgony – rak płuca	SMR = 1,71	
	≥25 lat	2 zgony – rak płuca	SMR = 0,67	
Produkcja wełny szklanej (Ontario); 2557 mężczyzn; różne okresy zatrudnienia/obserwacji	>90 dni (1955-1977)		SIR = 1,34	Shannon i in. 2005
	>90 dni (1977-1990)	56 przypadków nowotworów układu oddechowego w całej kohorcie		
	>90 dni (1955-1997)	94 zgony – wszystkie nowotwory	SMR = 1,15 (kontrola = 1,13)	
		42 zgony – nowotwory płuc	SMR = 1,63*	
	>20 ÷ 40 lat	zgony – nowotwory płuc	SMR = 1,89*	
	>20 ÷ 40 lat (1969-1996)	50 przypadków raka płuca	SIR = 1,6*	
		6 przypadków raka skóry	SIR = 0,99	
		2 przypadki raka krtani	SIR = 0,48	
		11 przypadków raka nerki	SIR = 1,92*	

Objaśnienia:
* wartość istotna statystycznie.
SIR – standaryzowany wskaźnik zapadalności.
SMR – standaryzowany wskaźnik umieralności.

Tabela 14. Działanie rakotwórcze sztucznych włókien mineralnych – wieloośrodkowe badania kohortowe i kliniczno-kontrolne (case-control) w Europie (zob. też Bruchajzer i in. 2024)
Table 14. Carcinogenic effects of man-made vitreous fibres – multicentre cohort studies and case-control studies in Europe (v. Bruchajzer et al. 2024)

Opis kohorty	Czas narażenia	Liczba przypadków	Wyniki/ocena ryzyka	Piśmiennictwo, państwo
13 zakładów, produkcja sztucznych włókien mineralnych; 25 146 (20 766 mężczyzn i 4380 kobiet); badania kohortowe; narażenie: 1900-1955; obserwacje: do 1977 r.	>1 rok	1 zgon – międzybłonniak		Sarracini in. 1984 Szwecja, Finlandia, Norwegia, Dania, Niemcy, Włochy, Wielka Brytania
		wszystkie zgony: 1505 – mężczyźni 154 – kobiety	SMR = 0,9 SMR = 0,7	
		wszystkie nowotwory: 373 – mężczyźni 49 – kobiety	SMR = 0,95 SMR = 0,7	
		zgony – nowotwory jamy ustnej i gardła: 6 – mężczyźni 0 – kobiety	SMR = 0,91 0	
		zgony – rak krtani: 7 – mężczyźni 0 – kobiety	SMR = 1,67 0	
		zgony – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc: 109 – mężczyźni 3 – kobiety	SMR = 1,06 SMR = 0,61	

cd. tab. 14 / Table. 14 cont.

Opis kohorty	Czas narażenia	Liczba przypadków	Wyniki/ocena ryzyka	Piśmiennictwo, państwo	
- wełna skalna mężczyźni; narażenie: 1900-1955; obserwacje do 1977 r.	≤19 lat	27 zgonów – nowotwory tchawicy, płuc i oskrzeli	SMR = 0,91		
	20 ÷ 29 lat	12 zgonów	SMR = 1,24		
	≥30 lat	11 zgonów	SMR = 1,95		
	razem	50 zgonów	SMR = 1,11		
- wełna szklana mężczyźni; narażenie: 1900-1955; obserwacje do 1977 r.	> 1 ÷ 30 lat	189 zgonów – rak płuca	SMR = 1,25*		
	≤19 lat	30 zgonów	SMR = 0,96		
	20 ÷ 29 lat	30 zgonów	SMR = 0,76		
	≥30 lat	10 zgonów	SMR = 1,57		
	razem	40 zgonów	SMR = 0,94		
- włókna szkliste mężczyźni; narażenie: 1900-1955; obserwacje do 1977 r.	≤19 lat	11 zgonów – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,39		
	20 ÷ 29 lat	2 zgony	SMR = 1,04		
	≥30 lat	2 zgony	SMR = 3,33		
	razem	15 zgonów	SMR = 1,43		
13 zakładów (7 państw), produkcja; 21 967 mężczyzn; badania kohortowe; narażenie: 1933-1982; obserwacje: 1977-1982	> 1 ÷ 30 lat	189 zgonów – rak płuca	SMR = 1,25*	Simonato i in. 1986	
- wełna skalna		81 zgonów – rak płuca	SMR = 1,24	Dania, Norwegia, Finlandia, Szwecja, Niemcy, Włochy, Wielka Brytania	
- wełna skalna		93 zgony – rak płuca: w tym: 0 ÷ 9 lat >30 lat	SMR = 1,27* SMR = 0,82 SMR = 1,73*		
- szklane włókna ciągłe		15 zgonów – rak płuca w tym: (9 zgonów) 0 ÷ 9 lat (6 zgonów) 10 ÷ 19 lat	SMR = 2,24* SMR = 0,96		
- wszystkie włókna	> 30 lat (do 1977 r.)	14 zgonów – rak płuca	SMR = 2,46*		
	> 30 lat (do 1982 r.)	29 zgonów – rak płuca	SMR = 1,73*		
	> 30 lat (1978-1982)	15 zgonów – rak płuca	SMR = 1,35		
13 zakładów (7 państw), produkcja sztucznych włókien mineralnych; 21 967 mężczyzn i kobiet; badania kohortowe; obserwacje: do 1983 r.	do ponad 30 lat		SMR = 1,11	Simonato i in. 1987	
		661 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,11	Dania, Norwegia, Finlandia, Szwecja, Niemcy, Włochy, Wielka Brytania	
		13 zgonów – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,23		
		9 zgonów – rak krtani	SMR = 1,43		
		189 zgonów – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,25		
- wełna szklana; (8286 pracowników)		93 zgony – rak płuca w tym: (13 zgonów) 0 ÷ 9 lat (17 zgonów) >30 lat	SMR = 1,27* SMR = 0,82 SMR = 1,73*		
- wełna skalna/żuźłowa; (10 115 pracowników)		81 zgonów – rak płuca w tym: (17 zgonów) 0 ÷ 9 lat (12 zgonów) >30 lat	SMR = 1,24 SMR = 1,03 SMR = 1,78		
- włókna ciągłe; (3566 pracowników)		15 zgonów – rak płuca w tym: (9 zgonów) 0 ÷ 9 lat (6 zgonów) >30 lat	SMR = 1,2 SMR = 2,24* SMR = 0,96		
13 zakładów (7 państw), produkcja wełny szklanej, skalnej i żuźłowej; 18 753 mężczyzn; 6278 – wełna szklana; 9694 – wełna skalna/ żuźłowa; badania kohortowe; narażenie: 1933-1983; obserwacje: 1933-1983 (5 ÷ 20 lat po narażeniu)	<1 ÷ ≥30 lat			Boffetta i in. 1992	
	<1 rok	3 przypadki raka płuca	RR = 1,00		Finlandia, Dania, Szwecja, Włochy, Norwegia, Wielka Brytania
	1 ÷ 4 lata	28 przypadków raka płuca	RR = 0,74		
	5 ÷ 9 lat	12 przypadków raka płuca	RR = 0,53		
	10 ÷ 19 lat	31 przypadków raka płuca	RR = 1,04		
	≥20 lat	5 przypadków raka płuca	RR = 0,30		
	≤9 lat	17 przypadków raka płuca	RR = 1,00		
	10 ÷ 19 lat	29 przypadków raka płuca	RR = 1,29		
	20 ÷ 29 lat	22 przypadki raka płuca	RR = 1,38		
≥30 lat	11 przypadków raka płuca	RR = 1,87			

cd. tab. 14 / Table 14 cont.

Opis kohorty	Czas narażenia	Liczba przypadków	Wyniki/ocena ryzyka	Piśmiennictwo, państwo
13 zakładów, 7 państw; 22 002 (kobiety i mężczyźni); badania kohortowe; narażenie: 1933-1977; obserwacje: do 1992 r. (1982-1992)		4521 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,14	Boffetta i in. 1997 Finlandia, Włochy, Niemcy, Norwegia, Szwecja, Wielka Brytania
		29 zgonów – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,49	
		15 zgonów – rak krtani	SMR = 1,36	
		344 zgony – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,32	
	<1 rok	1240 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,45	
		4 zgony – rak krtani	SMR = 1,36	
		83 zgony – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,48	
	≥1 rok (produkcja wełny szklanej, skalnej i żuźlowej)	3151 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,05	
		20 zgonów – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,42	
		11 zgonów – rak krtani	SMR = 1,41	
		251 zgonów – nowotwory tchawicy, oskrzeli i płuc	SMR = 1,29	
	≥1 rok (produkcja wełny szklanej)	1679 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,05	
		10 zgonów – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,47	
		9 zgonów – rak przełyku	SMR = 0,82	
		140 zgonów – nowotwory tchawicy, opłucnej i płuc	SMR = 1,27	
	≥1 rok (produkcja wełny skalnej i żuźlowej)	1271 zgonów – wszystkie nowotwory	SMR = 1,04	
		8 zgonów – nowotwory jamy ustnej i gardła	SMR = 1,33	
		8 zgonów – rak przełyku	SMR = 1,25	
		6 zgonów – rak krtani	SMR = 1,96	
		97 zgonów – nowotwory tchawicy, opłucnej i płuc	SMR = 1,34	
Produkcja wełny szklanej, skalnej i żuźlowej; mężczyźni i kobiety: 3685 – narażeni na wełnę skalną/żuźlową; 2611 – narażeni na wełnę szklaną; badania kohortowe; narażenie: 1933-1977; obserwacje: 1994-1995 (15 lat po okresie narażenia)	czas narażenia + 15 lat latencji	113 przypadków raka płuca (cała kohorta)	SIR = 1,15	Boffetta i in. 1999 Dania, Norwegia, Finlandia, Szwecja
		47 przypadków raka jamy ustnej, gardła i krtani (cała kohorta)	SIR = 1,44	
	narażenie na wełnę szklaną:	73 przypadki raka płuca	SIR = 1,28	
		31 przypadków raka jamy ustnej, gardła i krtani	SIR = 1,41	
	1 ÷ 4 lata	23 przypadki raka płuca	RR = 1,0	
	5 ÷ 9 lat	8 przypadków raka płuca	RR = 0,8	
	10 ÷ 19 lat	4 przypadki raka płuca	RR = 0,8	
	≥20 lat	1 przypadek raka płuca	RR = 0,7	
	narażenie na wełnę skalną/ żuźlową:	40 przypadków raka płuca	SIR = 1,08	
		16 przypadków raka jamy ustnej, gardła i krtani	SIR = 1,46	
	1 ÷ 4 lata	33 przypadki raka płuca	RR = 1,0	
	5 ÷ 9 lat	11 przypadków raka płuca	RR = 1,0	
	10 ÷ 19 lat	10 przypadków raka płuca	RR = 1,2	
	≥20 lat	5 przypadków raka płuca	RR = 2,0	
7 państw, narażenie na włókna szklane i skalne; 115 mężczyzn (5,2% osób wziętych do badania – $n = 2205$; kontrola $n = 2305$); badanie <i>case-control</i> ; okres obserwacji: 1998-2002		8 przypadków nowotworu płuc (wśród 115 mężczyzn) u narażonych na MMVF w stężeniach $>1 \text{ wł.}/\text{cm}^3$ wzrost ryzyka powstania nowotworu płuc (nieistotny statystycznie)	OR = 1,23 (0,88 ÷ 1,71)	Careli i in. 2007 Polska (Łódź, Warszawa), Węgry, Czechy, Słowacja, Rosja, Rumunia, Wielka Brytania

Objaśnienia:

* wartość istotna statystycznie.

OR – iloraz szans (ang. *odds ratio*).RR – ryzyko względne (ang. *relative risk*).

SIR – standaryzowany wskaźnik zapadalności.

SMR – standaryzowany wskaźnik umieralności.

Analizy epidemiologiczne kohorty europejskiej opisane przez Boffettę i in. (1992; 1997; 1999) wykazały, że u robotników zatrudnionych przy produkcji włókien w latach 1933-1983 nie zanotowano zwiększonego ryzyka wystąpienia nowotworów płuc. Autorzy stwierdzili, że wyniki badań nie są wystarczające, by można mówić o zagrożeniu nowotworami układu oddechowego u robotników narażonych zawodowo na sztuczne włókna mineralne (tab. 14).

Statystycznie istotnego związku między narażeniem na MMVF a występowaniem raka płuca (po uwzględnieniu wieku, palenia tytoniu, narażenia na azbest, arsen, kadm, chrom, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i krzemionkę) nie stwierdzono także w populacyjnym badaniu kliniczno-kontrolnym (*case-control*) – wartość OR = 1,23 (95% CI: 0,88 ÷ 1,71), (Carel i in. 2007). Wynik ten był podobny we wszystkich 7 krajach, z których wyniki analizowano (tab. 14).

W dostępnej literaturze można znaleźć także informacje o badaniach epidemiologicznych w poszczególnych państwach Europy: Niemczech (Claude, Frentzel-Beyme 1986), Francji (Guida i in. 2013; Hours i in. 2007; Moulin i in. 1986), Szwecji (Engholm i in. 1987; Gustavsson i in. 1992; Plato i in. 1995a; 1995b), Wielkiej Brytanii (Gardner i in. 1988), (zob. Bruchajzer i in. 2024). Ich analiza nie pozwala na wyciągnięcie wniosku, że zawodowe narażenie pracowników na sztuczne włókna mineralne może przyczynić się istotnie do powstania nowotworów układu oddechowego i zwiększonej śmiertelności z tego powodu.

W piśmiennictwie światowym można znaleźć dwie publikacje przedstawiające obszerne metaanalizy związane z narażeniem pracowników na sztuczne włókna mineralne (Lipworth i in. 2009; Suder Egnot i in. 2020). Oparto je na ocenie 16 opracowań (Lipworth i in. 2009) oraz 19 istotnych badań (9 kohortowych i 10 *case-control*), (Suder Egnot i in. 2020) dotyczących ryzyka zachorowania na raka płuca. W obu metaanalizach autorzy nie stwierdzili istotnego statystycznie wzrostu ryzyka zachorowań na nowotwory układu oddechowego po narażeniu zawodowym na MMVF (zob. Bruchajzer i in. 2024).

Podsumowanie działania rakotwórczego u ludzi

Publikowane w latach 80. XX wieku wyniki badań kohortowych pracowników zatrudnionych przy produkcji MMVF w Stanach Zjednoczonych (USA), Kanadzie i Europie nie były jednoznaczne. Wskazy-

wały one m.in. na niewielki nadmiar śmiertelności z powodu nowotworów układu oddechowego (głównie nowotworów krtani, tchawicy, oskrzeli i płuc) wśród pracowników narażonych na wełnę szklaną, skalną i żużlową (Enterline i in. 1987; Saracci i in. 1984; Simonato i in. 1986; 1987). Na podstawie ograniczonych dowodów dotyczących rakotwórczości MMVF u ludzi oraz ze względu na obawy spowodowane wynikami badań eksperymentalnych na zwierzętach w 1988 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) sklasyfikowała włókna wełny szklanej, skalnej i żużlowej jako prawdopodobnie rakotwórcze dla ludzi (grupa 2B), a ciągłe włókna szklane jako nie dające się sklasyfikować pod względem rakotwórczości dla ludzi (grupa 3), (IARC 1988).

W 2002 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem wydała drugą ważną monografię. Uwzględniła w niej wyniki badań epidemiologicznych i kliniczno-kontrolnych z późniejszych obserwacji i po zmianach technologii produkcji (ograniczających zapylenie). Posłużyły one do zmiany klasyfikacji sztucznych włókien mineralnych i przeniesienia ich z grupy 2B (czynników przypuszczalnie rakotwórczych dla ludzi) do grupy 3 (czynników, które nie mogą być klasyfikowane pod względem działania rakotwórczego dla ludzi), (IARC 2002).

Decyzja ta skłoniła niektórych badaczy (Marsh i in. 2011) do dokładniejszego przyjrzenia się dotychczasowym badaniom epidemiologicznym (także tym danym, które opublikowano po decyzji IARC z 2002 r.) i porównania trzech najważniejszych kohort: amerykańskiej (USA, 26 679 osób opisanych przez Marsha i in. 2001c), kanadyjskiej (2557 osób, Shannon i in. 2005) oraz europejskiej (8335 osób, Boffetta i in. 1997; 1999). Analiza dostępnych danych spowodowała, że Marsh i in. (2011) stwierdzili, że decyzja IARC z 2002 r. o obniżeniu klasyfikacji wełny szklanej z grupy 2B do grupy 3 jest w pełni uzasadniona (tab. 15).

Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC 2002) oceniła, że włókna wełny mineralnej mogą zostać uwolnione od jakichkolwiek podejrzeń o działanie rakotwórcze, jeśli są biorozpuszczalne.

Tabela 15. Zmiany klasyfikowania sztucznych włókien mineralnych wprowadzone przez IARC (Baan, Grosse 2004)**Table 15.** Changes to the classification of man-made mineral fibers introduced by IARC (Baan, Grosse 2004)

Rodzaj włókna	IARC 1988 (Vol. 43)	IARC 2002 (Vol. 81)
Wełna szklana	2B	–
Włókna szklane specjalnego przeznaczenia	–	2B
Szklane włókna ciągłe	3	3
Wełna skalna (kamienna, mineralna)	2B	3
Wełna żuźlowa	2B	3

Objaśnienia:

2B – czynnik/mieszanina przypuszczalnie rakotwórcze dla ludzi.

3 – czynnik/mieszanina nie mogą być klasyfikowane pod względem działania rakotwórczego u ludzi.

Działanie rakotwórcze na zwierzęta

Rakotwórcze działanie sztucznych włókien mineralnych na zwierzęta badano w doświadczeniach oceniających toksyczność podprzewlekłą i przewlekłą. Szczury i chomiki narażano inhalacyjnie, dotchawczo i dootrzewnowo na wełnę szklaną, skalną i żuźlową. Droga narażenia miała istotne znaczenie przy ocenie działania rakotwórczego. W doświadczeniach, które spełniają obowiązujące obecnie wymogi metodyczne, zwraca się coraz częściej uwagę na konieczność prowadzenia takich badań dla każdego rodzaju włókien, ze szczególnym uwzględnieniem frakcji respirabilnej – najbardziej niebezpiecznej w przypadku ewentualnej rakotwórczości. Właśnie dla tej frakcji przeprowadzono najwięcej doświadczeń na zwierzętach laboratoryjnych, którym podawano różne, ale ściśle określone rodzaje włókien (m.in.: MMVF10, MMVF11, MMVF33, MMVF34/HT).

Włókna szklane

U szczurów narażanych inhalacyjnie na różne stężenia frakcji respirabilnej ($3 \div 30 \text{ mg/m}^3$, czyli około $25 \div 250 \text{ wł. WHO/cm}^3$) wełny szklanej przez okres $3 \div 24$ miesięcy nie obserwowano istotnego zwiększenia liczby nowotworów (Hesterberg i in. 1993; 1997; Hesterberg, Hart 2001; Lee i in. 1979; Wagner i in. 1984). Nowotworów nie zanotowano także po narażeniu inhalacyjnym szczurów i chomików na MMVF11 i MMVF10 w stężeniach: 100 wł. WHO/cm^3 przez 24 miesiące (Smith i in. 1987), 168 wł. WHO/cm^3 przez 3 miesiące (Lee i in. 1979), około $230 \div 340 \text{ wł. WHO/cm}^3$ przez 18 miesięcy szczurów (narażenie na MMVF10a), (Hesterberg i in. 1997; 1999; McConnell i in. 1999) oraz chomików (narażenie na MMVF33), (McConnell i in. 1999).

Po dawce skumulowanej 70 mg MMVF11 podanej dootrzewnowo ($1 \div 6$ dawek, podawanych raz w tygodniu), stwierdzono występowanie nowo-

tworów jamy brzusznej (głównie międzybłoniaki i mięsaki) – międzybłoniaki otrzewnej wystąpiły u 30% szczurów, a po wyższej dawce (180 mg) aż u 70% (Pott 1995; Roller i in. 1996; Roller, Pott 1998). Po łącznej dawce 144 mg MMVF10 podanej dootrzewnowo u 59% szczurów zanotowano międzybłoniaki. Guzów jamy otrzewnej nie obserwowano u chomików, którym wełnę szklaną podawano w dawkach 2 mg lub 10 mg (Pott i in. 1976).

Wyniki dotchawczego podania włókien szklanych szczurom nie są jednoznaczne. Podanie włókna JM104/474 w skumulowanej dawce 10 mg spowodowało guzy płuc (4 raki i 1 gruczolak u 34 szczurów Wistar), (Pott i in. 1987). Taka sama dawka włókna JM475 podana szczurom Osborne-Mendel nie wywołała nowotworów, a długość życia była nawet wyższa niż u zwierząt kontrolnych (Smith i in. 1987).

Wełna skalna

Wyniki badań rakotwórczości po narażeniu inhalacyjnym szczurów nie są jednoznaczne. Po narażeniu szczurów Wistar przez 12 lub 24 miesiące na frakcję respirabilną wełny skalnej nie zaobserwowano żadnych zmian nowotworowych w płucach (LeBouffant i in. 1984). Po 24 miesiącach narażenia inhalacyjnego szczurów Fisher-344 na MMVF21 zanotowano pojedyncze gruczolakoraki płuc. Ich liczba nie zależała od stężenia (stosowano 3 mg/m^3 , 16 mg/m^3 lub 30 mg/m^3 , czyli 34 wł. WHO/cm^3 , 150 wł. WHO/cm^3 lub 243 wł. WHO/cm^3), (McConnell i in. 1994).

Dootrzewnowe podanie szczurom włókien wełny kamiennej w dawkach skumulowanych 10 mg lub 25 mg spowodowało niewiele międzybłoniaków w otrzewnej (Maltoni, Minardi 1989; Pott i in. 1987). Po wyższych dawkach skumulowanych (rzędu $75 \div 183 \text{ mg}$) prawie u wszystkich szczurów wystąpiły międzybłoniaki (Miller i in. 1999; Pott i in. 1987; 1993; Roller i in. 1996).

Podanie dotchawicze włókien wełny skalnej w dawkach skumulowanych 5 mg lub 10 mg (szczu-ry), (Pott i in. 1994) oraz 10 mg (chomiki), (Adachi i in. 1991) nie spowodowało pierwotnych nowo-
tworów płuc.

Wetna żuźłowa

Narażenie inhalacyjne szczurów (Smith i in. 1984; McConnell i in. 1994) i chomików (Smith i in. 1987) przez 24 miesiące na pył wełny żuźłowej (m.in. MMVF22) w stężeniach od 3 mg/m³ (30 wł. WHO/cm³) do 30 mg/m³ (213 wł. WHO/cm³) nie wywo-
łało nowotworów.

Dootrzewnowe podanie włókien wełny żuźłowej szczurom w dawce 25 mg spowodowało nieznac-
ne zwiększenie częstości występowania mięsaków, międzybłoniaków i (rzadko) raków jamy brzusznej (Pott i in. 1987). Skrócenie czasu przeżycia i zależne
od dawki skumulowanej (20 mg, 50 mg lub 150 mg) zwiększenie częstości występowania międzybłonia-
ków (4/40, 8/40 i 18/40) jamy brzusznej notowano u szczurów, którym podawano MMVF22 (Pott i in.

1993; Roller i in. 1996). Również w innym doświad-
czeniu u ponad połowy szczurów, które otrzymały 129,6 mg MMVF22, stwierdzono międzybłoniaki (Miller i in. 1999).

Wniosek dotyczący badań rakotwórczości na zwierzętach
Narażenie inhalacyjne na sztuczne włókna mineral-
nych nie powodowało wzrostu ryzyka wystąpienia
nowotworów u szczurów i chomików. Nowotwory
(międzybłoniaki) notowano jedynie po dootrzew-
nowym i (znacznie rzadziej) dotchawiczym poda-
niu włókien.

Podsumowanie

Podsumowanie danych literaturowych dotyczących
rakotwórczego działania sztucznych włókien mine-
ralnych u ludzi i zwierząt doświadczalnych przed-
stawiono w tabeli 16.

Tabela 16. Podsumowanie badań rakotwórczości sztucznych włókien mineralnych opiniowane przez zespół ekspertów IARC (2002), (Kup-
czewska-Dobecka i in. 2019)

Table 16. Summary of studies on the carcinogenicity of man-made mineral fibers reviewed by the IARC expert panel (2002) (Kupczewska-
Dobecka et al. 2019)

Rodzaj włókien	Opinia IARC	Podstawy opinii IARC
Wełna szklana	brak wystarczających dowo- dów na działanie rakotwórcze u ludzi	– brak dowodów na zwiększenie częstotliwości występowania nowotworów u pracowników nara- żonych przewlekłe; nadwyżka występowania raka płuca (u mężczyzn) mogła być związana z na- łogiem palenia tytoniu – standaryzowane wskaźniki umieralności (SMR) z powodu nowotworów układu oddechowego nie były związane z czasem narażenia, skumulowanym narażeniem lub średnią intensywnością nara- żenia na włókna respirabilne – brak nadwyżki występowania międzybłoniaka płucnej
	ograniczone dowody na działanie rakotwórcze na zwierzęta doświadczalne	– u szczurów i chomików (które narażano inhalacyjnie na frakcję respirabilną włókien) nie zanotowano zwiększenia częstości występowania guzów płuc i międzybłoniaka płucnej – międzybłoniaki jamy otrzewnej po wysokich dawkach (około 10⁹ włókien) podawanych zwierzętom dootrzewnowo
Wełna kamienna (skalna) i żuźłowa	brak wystarczających dowo- dów na działanie rakotwórcze u ludzi	– w badaniach kohortowych i kliniczno-kontrolnych narażenie na wełnę skalną i wełnę żuźłową nie były rozpatrywane osobno – w kohorcie amerykańskiej nie stwierdzono zwiększonego ryzyka powstania nowotworów – w kohorcie europejskiej ogólne podwyższone ryzyko wystąpienia raka płuca, jednak głównie u pracowników zatrudnionych we „wczesnej fazie technologicznej” (przed wprowadzeniem oleju i środków wiążących, które umożliwiają zmniejszenie ilości włókien w powietrzu); po uwzględnieniu nawyku palenia tytoniu oraz innych potencjalnych czynników zakłócających nie stwierdzono zwięks- zonego ryzyka wystąpienia raka płuca, międzybłoniaka płucnej lub innych nowotworów
	ograniczone dowody na działanie rakotwórcze wełny skalnej na zwierzęta doświad- czalne	– w przewlekłym inhalacyjnym narażeniu szczurów na frakcję respirabilną włókien oraz po podaniu dotchawiczym włókien wełny skalnej nie stwierdzono zwiększonej częstości występowania raka płuca i międzybłoniaka – zwiększenie częstości występowania międzybłoniaka obserwowano po dootrzewnowym wstrzyk- nięciu wełny skalnej w wysokich dawkach (około 10⁹ włókien); skutek ten zależał od rodzaju włók- na: im wyższa była biotrwłość, tym częściej występowały nowotwory

Działanie embriotoksyczne, teratogenne oraz wpływ na rozrodczość

W dostępnym piśmiennictwie nie ma informacji dotyczących wpływu sztucznych włókien mineralnych na rozrodczość u ludzi i zwierząt.

TOKSYKOKINETYKA

Wchłanianie

Dane literaturowe podkreślają, że całkowite stężenie włókien mineralnych (frakcji wdychalnej) w powietrzu jest uzależnione od ich średnicy, a zatem im jest ona większa, tym niższe jest ich stężenie w powietrzu.

Wielkość włókien, ich gęstość i struktura są też najważniejszymi parametrami decydującymi o możliwości ich osadzania się na powierzchni nabłonka dróg oddechowych. Uogólniając, można stwierdzić, że stosunkowo grube włókna odkładają się w górnych drogach oddechowych (rejon nosogardła i tchawicy), a do dystalnych odcinków dróg oddechowych (oskrzela i pęcherzyki płucne) przenoszone są tylko cienkie włókna (Dai, Yu 1998; Lippmann 1990). Potwierdzają to oznaczenia znacznika izotopowego w kale, przewodzie pokarmowym i płucach zwierząt (szczurów) narażanych na znakowane włókna; wykazano, że są one wchłaniane w bardzo ograniczonej ilości – średni całkowity odzysk podanego znacznika izotopowego u wszystkich zwierząt wynosił 93% (Morgan i in. 1993).

Na podstawie danych literaturowych dotyczących osadzania się cząstek w płucach człowieka Amerykańska Konferencja Państwowych Higienistów Przemysłowych (ACGIH), (2001) opublikowała algorytm przewidujący efektywność przemieszczania się cząstek o różnych średnicach aerodynamicznych. Algorytm ten przewiduje, że narażenie inhalacyjne na cząstki o średnicy aerodynamicznej np. 1 µm, 5 µm, 6 µm lub 10 µm doprowadzi do osadzania się w rejonie pęcherzyków płucnych odpowiednio: 97%, 30%, 17% lub 1% włókien. Dokładniejsze informacje dotyczące rozmiarów cząstek w każdej z odpowiednich frakcji masowych przedstawiono w tabeli 17 (ACGIH 2022).

Modele fizjologiczno-farmakokinetyczne przewidują, że osadzanie pęcherzykowe włókien o średnicy aerodynamicznej >3,5 µm i stosunku długości do średnicy >10 jest nieistotne u szczurów i chomików (włókna nie dochodzą bowiem do pęcherzyków płucnych), podczas gdy u ludzi znaczne osadzanie pęcherzykowe występuje w przypadku włókien o średnicy aerodynamicznej 5 ÷ 6 µm (Dai, Yu 1998).

Chociaż brakuje danych literaturowych dotyczących wchłaniania syntetycznych włókien szklanych drogą pokarmową i przez skórę u ludzi lub zwierząt, to jednak uważa się, że narażenie dermalne nie powoduje wchłaniania włókien do organizmu.

Tabela 17. Zależność między rozmiarami cząstek (na podstawie średnicy aerodynamicznej) a ilością odpowiednich frakcji masowych zatrzymanych w płucach (ACGIH 2022)

Table 17. Relationship between particle size (based on aerodynamic diameter) and the amount of corresponding mass fractions retained in the lungs (ACGIH 2022)

Średnica aerodynamiczna cząstek stałych, µm	Frakcja wdychalna, %	Frakcja respirabilna, %
0*	100	100
1	97	97
2	94	91
3	–	74
4	–	50
5	87	30
6	–	17
7	–	9
8	–	5
10	77	1
20	65	–
30	58	–
40	54,5	–
50	52,5	–
100	50	–

Objaśnienie:

* wartość tę należy traktować jako średnicę poniżej 1 µm.

Rozmieszczanie

Kluczową rolę w określaniu biotrwałości włókien, która przekłada się na patogenezę zmian w płucach, odgrywają ich rozmiary (Bernstein i in. 2001a; 2001b; Hesterberg, Hart 2001; Oberdörster 2000). Włókna osadzone w górnych drogach oddechowych (na powierzchni przewodów nosowych i drzewa tchawiczo-oskrzelowego), które są wyścielone komórkami rzęskowymi i pokryte warstwą śluzu, są szybko przenoszone do gardła i ulegają usunięciu przez połknięcie lub odpłucie (Jones 1993; Lippmann 1990; Oberdörster 1994).

Mechanizm oczyszczania dolnych dróg oddechowych związany jest z makrofagami, jednak pochłanianie przez makrofagi jest ograniczone do włókien o długości mniejszej niż średnica makrofaga – u ludzi średnice makrofagów pęcherzykowych wynoszą $14 \div 21 \mu\text{m}$ (Hesterberg, Hart 2001; Oberdörster 2000). Włókna dłuższe niż około $20 \mu\text{m}$ mogą być usuwane przez makrofagi tylko wtedy, gdy ulegną poprzecznemu rozerwaniu (Eastes i in. 2000; Hesterberg, Hart 2001; Hesterberg i in. 1998; Oberdörster 2000).

Sztuczne włókna mineralne mogą również ulegać przemieszczaniu do krążenia limfatycznego, jednak efektywność tego procesu jest uzależniona od wielkości włókien. Morgan i in. (1982) wykazali, że węzły chłonne szczurów narażonych na działanie włókien o długości $10 \mu\text{m}$ i $30 \mu\text{m}$ zawierały niewielkie ich ilości, a obecności włókien o długości $60 \mu\text{m}$ po narażeniu na nie nie stwierdzono.

Na temat badań rozmieszczenia sztucznych włókien mineralnych w organizmach zwierząt laboratoryjnych zob. Bruchajzer i in. 2024.

Metabolizm

Sztuczne włókna mineralne po dostaniu się do organizmu nie podlegają tradycyjnie rozumianemu metabolizmowi. Należy raczej mówić o ich rozpadzie/rozpuszczeniu. Wpływ na te procesy mają przede wszystkim ich właściwości fizykochemiczne oraz skład chemiczny. Włókna zawierające tlenki wapnia, potasu i magnezu rozpuszczają się szybko, co osłabia matrycę krzemionkową i doprowadza do pęknięcia włókna (Hesterberg, Hart 2001).

Biotrwałość sztucznych włókien mineralnych jest znacznie niższa niż różnych form azbestów. Określony wagowo biologiczny okres półtrwania włókien ($WT_{1/2}$) dla wełny skalnej (MMVF21)

wynosi 67 dni, wełny izolacyjnej (włókien MMVF11 i MMVF10) – $37 \div 49$ dni, a wełny żużlowej (MMVF22) – tylko 9 dni. W przypadku azbestów $WT_{1/2}$ są rzędu $418 \div 817$ dni (odpowiednio dla amozytu i krokidolitu), (Toxicological profile... 2004).

Na podstawie badań wykonanych na szczurach Bernstein (2007) przeprowadził rozumowanie, w którym założył, że (przy założeniu, że szczur jest 300 razy mniejszy od człowieka, ma 25 razy mniej pęcherzyków płucnych i aż 400 razy mniejszą liczbę komórek pęcherzyków płucnych) przy 6-godzinny narażeniu na $100 \text{ wł. WHO}/\text{cm}^3$ w powietrzu całkowita liczba włókien wdychanych dziennie przez szczura będzie 7 razy większa w porównaniu ze średnim narażeniem zawodowym człowieka wynoszącym $0,2 \text{ wł.}/\text{cm}^3$. Powoduje to, że u szczura do każdego pęcherzyka dociera 170 razy większa liczba włókien niż u człowieka, a do każdej komórki pęcherzyka płucnego szczur otrzymuje dawkę ponad 3000 razy większą niż człowiek. Przy narażeniu $0,2 \text{ wł.}/\text{cm}^3$ w sposób ciągły przez 6 h w przybliżeniu tylko 1 z 2000 pęcherzyków płucnych człowieka otrzymałby 1 włókno dziennie. Musiałoby zatem upłynąć 5 lat takiego narażenia, aby każdy pęcherzyk płucny człowieka otrzymał 1 włókno. Przy półokresie trwania wynoszącym od kilku dni do $40 \div 50$ dni (w przypadku bardziej trwałych włókien szklanych) nie doszłoby do kumulacji MMVF w pęcherzyku płucnym (Bernstein 2007).

Wydalanie

Dane na temat wydalania sztucznych włókien mineralnych opisano dokładnie w pracy Bruchajzer i in. (2024). Brakuje danych o wydalaniu frakcji wdychalnej, ale z uwagi na obecność w niej także włókien o znacznych rozmiarach (oprócz frakcji respirabilnej) można wnioskować, że będą one usuwane także poprzez transprt śluzówkowo-rzęskowy, rozpuszczanie i łamanie poprzeczne. Część tych włókien może dostać się także do przewodu pokarmowego. Zostaną wtedy wydalone z kałem (Gross, Stanton 1973).

MECHANIZM DZIAŁANIA TOKSYCZNEGO

Wyniki badań prowadzonych przez ostatnie kilkadziesiąt lat z wykorzystaniem różnych włókien

wskazują, że mechanizm ich działania toksycznego zależy od ich wymiarów, dawki, składu chemicznego oraz trwałości.

Osadzanie włókien w pęcherzykach płucnych jest uzależnione przede wszystkim od ich średnicy (Dai, Yu 1998; Oberdörster 2000). Włókna o średnicach $>3 \div 4 \mu\text{m}$ ulegają depozycji w górnych odcinkach dróg oddechowych. Czynnikiem determinującym potencjalny rozwój działań niepożądanych w śródmiąszcu płuc i w błonie opłucnej jest ilość włókien odkładających się w rejonie pęcherzyków płucnych. Ich obecność w tkance płucnej powoduje stan zapalny i zmiany proliferacyjne.

Ilość włókien, która pozostaje w dolnej części płuc, jest wypadkową ilości zdeponowanych włókien oraz ilości włókien usuniętych przez makrofagi i przez połączone działania rozpuszczania i poprzecznego łamania długich włókien na krótsze. Podczas gdy średnica włókien jest czynnikiem krytycznym dla ich osadzania się, długość włókien jest czynnikiem krytycznym dla wchłaniania przez makrofagi. Włókna dłuższe niż $15 \div 20 \mu\text{m}$ są prawdopodobnie zbyt długie, aby makrofagi ludzkie mogły je całkowicie pochłoniąć i przetransportować poza płuco. Tak więc usunięcie długich włókien z dolnej części płuc nie może nastąpić, dopóki włókna te nie rozpuszczają się lub nie rozpadną na krótsze, które mogą zostać usunięte przez makrofagi (Eastes i in. 2000; Hesterberg, Hart 2001; Hesterberg i in. 1998; Oberdörster 2000).

Dane literaturowe wskazują także, że włókna mogą bezpośrednio indukować proliferację komórek poprzez m.in. indukcję komórek zapalnych i innych komórek płuc do uwalniania mediatorów, które powodują uszkodzenie tkanki. Kluczową rolę w indukowaniu proliferacji komórek przez różne typy włókien i różne scenariusze narażenia przypisuje się ich trwałości. Jednak obserwowane różnice w widocznej sile działania poszczególnych rodzajów włókien dowodzą istnienia jeszcze innych mechanizmów (Driscoll 1996).

Narażenie na sztuczne włókna mineralne może przyczyniać się do rozwoju raka płuca lub międzybłoniaka (Driscoll 1996; IARC Expert Panel 1996; Kane 1996). W badaniach na zwierzętach doświadczalnych wskazywano na mechanizm związany zarówno z działaniem genotoksycznym, jak i niegenotoksycznym (Kane 1996).

Na temat mechanizmów działania rakotwórczego zob. Bruchajzer i in. 2024.

DZIAŁANIE ŁĄCZNE

Na podstawie badań epidemiologicznych stwierdzono, że przy produkcji i wykorzystywaniu sztucznych włókien mineralnych pracownicy narażeni byli także na inne czynniki, m.in. ogniotrwałe włókna ceramiczne, azbest, arsen, asfalt, formaldehyd, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, fenole, krzemionkę, styren, mocznik (Stone i in. 2001; Youk i in. 2001). Wpływ na zwłóknienie płuc i rozwój nowotworów układu oddechowego miał także nawyk palenia papierosów (Toxicological profile... 2004).

Stosowane obecnie spoiwa wykorzystywane w produkcji materiałów izolacyjnych ze sztucznych włókien mineralnych mogą również wpływać na skutkitoksyczne. Łączne narażenie może występować m.in. z żywicami fenolowymi i furanowymi, krzemianami sodu, poliestrami, poliamidami oraz z lotnymi rozpuszczalnikami: amoniakiem, formaldehydem, hydroksymetylofenolem, trimetyloaminą (Toxicological profile... 2004).

Dokładniejsze dane na temat działania łącznego sztucznych włókien mineralnych i innych czynników fizycznych i chemicznych przedstawiono w opracowaniu Bruchajzer i in. (2024), choć opisane skutki nie zawsze można było określić ilościowo.

ZALEŻNOŚĆ SKUTKU TOKSYCZNEGO OD WIELKOŚCI NARAŻENIA

Na podstawie badań epidemiologicznych trudno zauważyć, by skutki narażenia ludzi na sztuczne włókna mineralne były zależne od poziomu narażenia. Dodatkowo analizy wyników obserwacji epidemiologicznych dotyczyły głównie działania rakotwórczego na układ oddechowy. Nie wykazano jednak zależności między ekspozycją zawodową na sztuczne włókna mineralne (wętkę szklaną, ciągłe włókna szklane, wełnę skalną i żużlową) a ryzykiem wystąpienia nowotworów, głównie raka płuca. Nie jest jednak wykluczone, że odkładanie się włókien w płucach może nasilać stres oksydacyjny, stany zapalne, zwłóknienia płuc i proliferację komórek, co może przyczyniać się do powstawania nowotworów, szczególnie u ludzi palących i/lub wcześniej narażonych na azbest – czynnik o znanym obecnie działaniu rakotwórczym, który dawniej powszechnie wykorzystywano do produkcji materiałów izolacyjnych.

Badania wykonane na zwierzętach doświadczalnych (szczurach, chomikach) narażanych przewlekłe drogą inhalacyjną na włókna wykazały (zależne od stężenia, w zakresie $3 \div 30 \text{ mg/m}^3$) zaleganie włókien w płucach. Nie spowodowało to jednak nowotworów płuc (Hesterberg i in. 1999; McConnell i in. 1994).

Dokładne dane na temat zależności między skutkami działania toksycznego a poziomem narażenia na sztuczne włókna mineralne dotyczyły przede wszystkim badań wykonanych na zwierzętach, które narażano na konkretne rodzaje włókien respirabilnych (zob. Bruchajzer i in. 2024). Badania takie wykonano w ciągu ostatnich 30 lat. Na ich podstawie eksperci DECOS (1995), a za nimi eksperci SCOEL (2012) określili wartości NOAEL i LOAEL dla poszczególnych włókien wełny szklanej, skalnej i żuźlowej (tab. 11).

W większości badań wykonanych na zwierzętach eksponowanych inhalacyjnie na poszczególne włókna respirabilne poziom narażenia podawano jako liczbę włókien WHO/cm^3 . W przypadku ogólnej liczby włókien (frakcji wdychalnej), obejmującej także włókna o większych rozmiarach, poziom narażenia podaje się w mg/m^3 . Hesterberg i Hart (1994) dokonali porównania poziomów, które stosowano w przewlekłych doświadczeniach wykonywanych na szczurach, z poziomami, jakie dotyczyłyby ludzi. Stwierdzili, że poziomy włókien szklanych w aerozolu, na który narażano szczury, były ponad 2000 razy wyższe niż w czasie produkcji wełny izolacyjnej i ponad 1000 razy wyższe niż podczas instalacji izolacji. Aerozol, na który narażano szczury, był 30-krotnie bardziej skoncentrowany niż najwyższe stężenia, na jakie są narażeni robotnicy przy instalowaniu „wdmuchiwanej” izolacji z włókien szklanych. Różnice morfologiczno-fizjologiczne płuc spowodowały, że wyższe było także obciążenie włóknami płuc szczurów niż ludzi. Hesterberg i Hart (1994) stwierdzili, że poziom całonocowego narażenia inhalacyjnego szczurów na włókna był ponad 4000 razy wyższy niż u robotników narażanych przez 11 lat.

Podobnych informacji na temat pyłów występujących we frakcji wdychalnej nie znaleziono.

NAJWYŻSZE DOPUSZCZALNE STĘŻENIE (NDS) W POWIETRZU NA STANOWISKACH PRACY ORAZ DOPUSZCZALNE STĘŻENIE W MATERIALE BIOLOGICZNYM (DSB)

Istniejące wartości NDS i ich podstawy

W Polsce wartość najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS) dla włókien respirabilnych sztucznych włókien mineralnych (z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych) wynosi 1 włókno/cm^3 (Rozporządzenie Ministra Rodziny... 2018). Do czerwca 2018 r. obowiązywała także wartość NDS dla frakcji wdychalnej – 2 mg/m^3 .

Zestawienie normatywów higienicznych obowiązujących w innych państwach przedstawiono w tabeli 18. Z danych w niej zawartych wynika, że większość państw oparła swe wartości graniczne na działaniu włókien respirabilnych, wychodząc z założenia, że mogą być one bardziej toksyczne ze względu na możliwość docierania do pęcherzyków płucnych. Wartości NDS dla pyłów całkowitych (frakcji wdychalnej) przyjęto tylko w niektórych państwach na bardzo różnym poziomie: od 5 mg/m^3 (w Wielkiej Brytanii, Nowej Zelandii i USA [NIOSH i ACGIH]), poprzez 10 mg/m^3 (wg OSHA w Kalifornii) do 15 mg/m^3 (USA, OSHA).

W 2001 r. eksperci ACGIH (2022) zaproponowali wartość TLV-TWA dla frakcji respirabilnej ciągłych włókien szklanych na poziomie 1 wł./cm^3 , a dla frakcji wdychalnej – 5 mg/m^3 . Dla pozostałych włókien (wełny szklanej, skalnej i żuźlowej oraz włókien szklanych specjalnego przeznaczenia) ustalili tylko wartość normatywną 1 wł./cm^3 dla włókien respirabilnych. Zwrócili także uwagę na działanie drażniące sztucznych włókien mineralnych (tab. 19).

Podstawy proponowanych wartości NDS i NDSch

Na podstawie wyników doświadczeń na zwierzętach nie ma możliwości ustalenia wartości NOAEL i/lub LOAEL dla frakcji wdychalnej (pyłów całkowitych) sztucznych włókien mineralnych, brakuje bowiem danych o ich toksyczności. Informacji na ten temat trudno też doszukiwać się w badaniach epidemiologicznych u ludzi. Jedyne dane toksykologiczne, które mogą dostarczyć

Tabela 18. Wartości dopuszczalnych stężeń dla włókien respirabilnych oraz frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych obowiązujące w różnych państwach
Table 18. The concentration limits for respirable fibers and the inhalable fraction of man-made mineral fibers applicable in various countries

Państwo/instytucja/organizacja (rok wprowadzenia w życie)	Wartość dopuszczalnego stężenia dla frakcji wdychalnej	Wartość dopuszczalnego stężenia dla włókien respirabilnych	Piśmiennictwo
Australia (2012)	2 mg/m ³	0,5 wł./cm ³	SWA 2020
Dania (2005)		1 wł./cm ³	Mineral wools... 2013
Francja (2011)		1 wł./cm ³	AIOH 2018
Hiszpania (2011)		1 wł./cm ³	AIOH 2018
Holandia (2011)		1 wł./cm ³	AIOH 2018
Niemcy (2001)		0,5 wł./cm ³	Mineral wools... 2013
Polska (frakcja wdychalna – do czerwca 2018 r.) (włókna respirabilne) (2018)	2 mg/m ³	1 wł./cm ³	Rozporządzenie Ministra Rodziny... 2018
Szwecja (2011)		1 wł./cm ³	AIOH 2018
Włochy (2011)		1 wł./cm ³	AIOH 2018
Wielka Brytania (2020)	5 mg/m ³	2 wł./cm ³	AIOH 2018; HSE 2020
Nowa Zelandia (2011)	5 mg/m ³	1 wł./cm ³	AIOH 2018
USA:			AIOH 2018
ACGIH (2001)	5 mg/m ³	1 wł./cm ³	ACGIH 2022
OSHA (2011) (pył całkowity) (frakcja respirabilna)	15 mg/m ³	5 mg/m ³	AIOH 2018; OSHA 2017
CAL/OSHA PEL (pył całkowity) (frakcja respirabilna)	10 mg/m ³	5 mg/m ³	OSHA 2021
NIOSH (2011) (pył całkowity) (włókna o średnicy ≤3,5 μm i długości ≥10 μm)	5 mg/m ³	3 wł./cm ³	AIOH 2018

Objaśnienia:
ACGIH – Amerykańska Konferencja Państwowych Higienistów Przemysłowych (American Conference of Governmental Industrial Hygienists).
CAL – Kalifornia.
NIOSH – Narodowy Instytut Bezpieczeństwa Zawodowego i Zdrowia w Stanach Zjednoczonych (National Institute for Occupational Safety and Health).
OSHA – Administracja Bezpieczeństwa i Higieny Pracy (Occupational Safety and Health Administration).
PEL – dopuszczalny limit narażenia (ang. *permissible exposure limit*).

informacji o wartościach NOAEL i LOAEL, pochodzą z doświadczeń na szczurach, które narażano na włókna respirabilne określone jako ilość włókien/cm³ powietrza przeliczoną na stężenie grawimetryczne wyrażone w mg/m³. Wartości 25 ÷ 30 wł./cm³ odpowiadały 3 mg frakcji respirabilnej/m³ (tab. 11).
Wiadomo także, że cząstki o średnicy aerodynamicznej 5 μm stanowią 30% frakcji respirabilnej. Można zatem w przybliżeniu przyjąć, że frakcja respirabilna w tym przypadku to około 1/3 wszystkich cząstek w pyłe, na który jest narażony człowiek. Wartości te zmieniają się znacznie, gdy rozpatruje się wielkości cząstek o średnicy 10 μm – wtedy frakcja respirabilna (dochodząca do pęcherzyków płucnych w strefie wymiany gazowej)

stanowi tylko 1% wszystkich pyłów (tab. 17), (ACGIH 2022). Wiadomo również, że aerozole, które zawierają bardzo duże cząstki, determinujące wielkość stężenia masowego (grawimetrycznego), mają zazwyczaj tylko znikome znaczenie biologiczne (Więcek 2011).
Do czerwca 2018 r. obowiązywał w Polsce normatyw dla frakcji wdychalnej, który wynosił 2 mg/m³. Na podstawie danych zawartych w przedstawionej dokumentacji można zauważyć, że najczęściej notowane w Polsce stężenia włókien respirabilnych wynosiły około 0,106 wł./cm³ (wynik uśredniony z 15 średnich zawartych w tabeli 10), a stężenia frakcji wdychalnej (pyłów całkowitych) – 3,27 mg/m³.

Tabela 19. Wartości TWA-TLV dla różnych sztucznych włókien mineralnych zaproponowane przez ACGIH (2022)

Table 19. TWA-TLV values for various man-made mineral fibers proposed by ACGIH (2022)

Substancja	Wartość TWA	Oznakowanie	Uwagi
Włókna szklane ciągłe (frakcja respirabilna >5 µm)	1 wł./cm ³	A4	działanie drażniące na górne drogi oddechowe
Włókna szklane ciągłe (frakcja wdychalna)	5 mg/m ³	A4	
Włókna z wełny szklanej, skalnej i żużlowej	1 wł./cm ³	A3	działanie drażniące na skórę i błony śluzowe
Włókna szklane specjalnego przeznaczenia	1 wł./cm ³	A3	

Objaśnienia:

A3 – potwierdzony czynnik rakotwórczy dla zwierząt.

A4 – nieklasyfikowalny jako czynnik rakotwórczy dla ludzi.

Zależność między ilością włókien we frakcji respirabilnej (wyrażoną jako ilość włókien/cm³) a stężeniem pyłów we frakcji wdychalnej (wyrażoną w mg/m³) próbowano przedstawić ilościowo. Schneider i Breum (1987) zaproponowali współczynnik przeliczeniowy MNI (*mass/number indices*) równy 2,5. Na jego podstawie określili, że stężenie masowe włókien szklanych równe 2,5 mg/m³ odpowiada wartości 1 włókna respirabilnego/cm³ powietrza (Schneider 1987; Schneider, Breum 1987).

Safety Work Australia (SWA), (2020) podaje, że przestrzeganie stężenia 1 wł./cm³ może zabezpieczyć pracowników przed ryzykiem nowotworów płuc, a stężenie włókien nierespirabilnych (frakcji wdychalnej, pyłów wdychalnych) 2 mg/m³ ochroni przed działaniem drażniącym. W Australii przyjęto kompromis, który pozwolił ustalić normatyw dla włókien respirabilnych (łącznie z włóknami ceramicznymi) na poziomie 0,5 wł./cm³, który uznano za komplementarny ze stężeniem 2 mg/m³ dla frakcji wdychalnej (AIOH 2018).

Za skutek krytyczny działania włókien we frakcji wdychalnej przyjęto działanie drażniące na oczy, skórę i drogi oddechowe u ludzi, opisane w podrozdziale „Obserwacje kliniczne. Zatrucia przewlekłe”. Objawia się ono m.in. świądem i stanami zapalnymi będącymi reakcją na bezpośredni kontakt. Podrażnienia mechaniczne wywołują przede wszystkim grubsze włókna (o średnicy przekraczającej 4,5 ÷ 5 µm). Objawy są wprost proporcjonalne do średnicy włókna i odwrotnie proporcjonalne do jego długości. Wyraźnymi oznakami nakłucia naskórka przez włókna szklane są przede wszystkim ból, uczucie pieczenia, świąd, rumień, odczyny pokrzywkowe (Björnberg 1985; Fisher 1982; Fisher, Warkentin

1969; Koh i in. 1992; Margineanu i in. 2012; Possick i in. 1970).

Obecnie przy braku w Polsce wartości NDS dla frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych można je zaliczyć do „pyłów nieklasyfikowanych ze względu na toksyczność – frakcji wdychalnej”, dla której NDS wynosi 10 mg/m³ (Rozporządzenie Ministra Pracy... 2018). Za wartość NOAEC do wyliczenia wartości NDS dla frakcji wdychalnej sztucznych włókien mineralnych przyjęto stężenie 10 mg/m³, tj. stężenie, które odpowiada wartości NDS obowiązującej w Polsce dla frakcji wdychalnej pyłów niesklasyfikowanych ze względu na toksyczność.

$$NDS = \frac{NOAEC \text{ mg/m}^3}{UF}$$

gdzie

UF – iloczyn współczynników niepewności:

A = 2, związany z wrażliwością osobniczą człowieka,

B = 1, związany z różnicami międzygatunkowymi i drogą podania,

C = 1, przejście z badań krótkoterminowych do przewlekłych (NDS dla pyłów nieklasyfikowanych jako toksyczne dotyczy okresu aktywności zawodowej pracownika),

D = 1, do wyliczenia wartości NDS przyjęto wartość NOAEC,

E = 1, współczynnik modyfikacyjny dotyczący oceny kompletności danych oraz potencjalnych skutków odległych.

Zatem:

$$NDS = \frac{NOAEC}{A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E} = \frac{10}{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 5 \text{ mg/m}^3$$

Obowiązująca w Polsce wartość NDS dla włókien respirabilnych sztucznych włókien mineralnych, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych, tj. frakcji wnikałej do dróg oddechowych, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej, wynosi 1 wł./cm³. Dodatkowo dla frakcji wdychalnej włókien proponuje się przyjąć wartość 5 mg/m³, aby ochronić pracownika przed skutkami narażenia na frakcję pyłów włókien wnikałą przez nos i usta, która po zdepo-

nowaniu w drogach oddechowych stwarza zagrożenie dla zdrowia. Brakuje podstaw do wyznaczenia wartości NDSch, NDSP i DSB. Działanie drażniące (szczególnie włókien szklanych o większej grubości) wymaga oznakowania „I”, a z uwagi na trudne do interpretacji dane epidemiologiczne dotyczące ewentualnego działania rakotwórczego proponuje się dodać oznakowanie „Carc. 2” („Podejrzewa się, że powoduje raka”). Oznakowania te będą zgodne z rozporządzeniem nr 1272/2008 (ze zm.).

Wykaz skrótów stosowanych w dokumentacji

ACGIH	Amerykańska Konferencja Państwowych Higienistów Przemysłowych (ang. American Conference of Governmental Industrial Hygienists)	MMVF	sztuczne włókna szklane (ang. <i>man-made vitreous fibers</i>)
BAL	płyn z płukania oskrzelowo-pęcherzykowego (ang. <i>bronchoalveolar lavage</i>)	MMVF10.1	wełna szklana 901
BEI	dopuszczalne stężenie biologiczne – DSB (ang. <i>biological exposure index</i>)	MMVF10a	typowe włókna szklane do izolacji budynków
CI	przedział ufności (ang. <i>confidence intervals</i>)	MMVF11	określona wełna szklana Teed
CL ₅₀	mediana stężenia śmiertelnego (letalnego)	MMVF21	tradycyjna wełna skalna, HL 65 i 92 dni (WHO, długie włókna)
DECOS	Holenderski Komitet Ekspertów ds. Standardów Zawodowych (ang. Dutch Expert Committee on Occupational Standards)	MMVF22	wełna żuźlowa
DL ₅₀	mediana dawki śmiertelnej (letalnej)	MMVF33	włókno szklane specjalnego stosowania
DNA	kwas dezoksyrybonukleinowy	MMVF34/HT	biosolwentowe włókno wełny skalnej. HL 25 i 6 dni (WHO, włókna długie)
DSB	dopuszczalne stężenie biologiczne	MTD	maksymalna dawka tolerowana (ang. <i>maximum tolerated dose</i>)
FEV ₁	natężona objętość wydechowa 1-sekundowa (ang. <i>forced expiratory volume in 1 second</i>)	MVF10	wełna szklana 901
IARC	Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (ang. International Agency for Research on Cancer)	NDS	najwyższe dopuszczalne stężenie
LC ₅₀	mediana stężenia śmiertelnego (dla 50% osobników)	NDSch	najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe
LD ₅₀	mediana dawki śmiertelnej (dla 50% osobników)	NDSP	najwyższe dopuszczalne stężenie pułapowe
LOAEL	najniższy poziom, przy którym obserwuje się efekty szkodliwe (ang. <i>lowest observed adverse effect level</i>)	NIOSH	Narodowy Instytut Bezpieczeństwa Zawodowego i Zdrowia w Stanach Zjednoczonych (ang. National Institute for Occupational Safety and Health)
MAC	najwyższe dopuszczalne stężenia (ang. <i>maximum allowable concentration; maximum admissible concentration; maximum acceptable concentration</i>)	NOAEL	najwyższy poziom, przy którym nie obserwuje się efektów szkodliwych (ang. <i>no observed adverse effect level</i>)
MMMF	sztuczne włókna mineralne (ang. <i>man-made mineral fibers</i>)	ø	średnica
		OECD	Organizacja Współpracy Ekonomicznej i Rozwoju (ang. Organization for Economic Co-operation and Development)
		OEL	limit narażenia zawodowego, dopuszczalna wielkość narażenia zawodowego, najwyższe dopuszczalne stężenie (ang. <i>occupational exposure limit</i>)
		OR	iloraz szans (ang. <i>odds ratio</i>)

OSHA	Administracja Bezpieczeństwa i Higieny Pracy (ang. Occupational Safety and Health Administration)	STEL	najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe (ang. <i>short term exposure limit</i>)
PEL	dopuszczalny limit ekspozycji (ang. <i>permissible exposure limit</i>)	TLV-C	najwyższe dopuszczalne stężenie pułapowe (ang. <i>threshold limit value – ceiling limit</i>)
RCF	ogniotrwałe włókna ceramiczne (ang. <i>refractory ceramic fibers</i>)	TWA-TLV	najwyższe dopuszczane stężenie; wartość średnia stężenia ważona czasem (ang. <i>threshold limit value – time weighted average</i>)
RR	ryzyko względne (ang. <i>relative risk</i>)	VC	pojemność życiowa (ang. <i>vital capacity</i>)
SCOEL	Komitety Naukowy ds. Dopuszczalnych Wartości Narażenia Zawodowego (ang. Scientific Committee on Occupational Exposure Limit Values)	WHO	Światowa Organizacja Zdrowia (ang. World Health Organization)
SIR	standaryzowany wskaźnik zapadalności (ang. <i>standardised incidence ratio</i>)	wł.	włókna
SMR	standaryzowany wskaźnik umieralności (ang. <i>standardised mortality ratio</i>)	wł. WHO	włókna respirabilne o stosunku długości do średnicy 3: 1, średnicy <3 μm i długości >5 μm
		WT _{1/2}	biologiczny okres półtrwania określony przez masę (ang. <i>weight time</i>) włókna

PIŚMIENNICTWO

ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (2001). Synthetic vitreous fibers. Supplement to documentation of the threshold limit values and biological exposure indices. Cincinnati, OH.

ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (2022). Threshold limit values for chemical substances in the work environment. Adapted by ACGIH with intended changes.

Adachi S., Takemoto K., Kimura K. (1991). Tumorigenicity of fine man-made fibers after intratracheal administrations to hamsters. Environ. Res. 54(1), 52–73 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].

AIOH, Australian Institute of Occupational Hygienists (2018). Synthetic mineral fibres (SMF) and occupational health issues. Association number: A0017462L.

Albin M., Engholm G., Hallin N. i in. (1998). Impact of exposure to insulation wool on lung function and cough in Swedish construction workers. Occup. Environ. Med. 55, 661–667 [cyt. za: Kupczewska-Dobacka i in. 2019; Toxicological profile... 2004].

Bernstein D.M. (2007). Synthetic vitreous fibers: a review toxicology, epidemiology and regulations. Crit. Rev. Toxicol. 37, 839–886.

Bernstein D.M., Riego Sintes J.M., Ersboell B.K. i in. (2001a). Biopersistence of synthetic mineral fibers as a predictor of chronic inhalation toxicity in rats. Inhal. Toxicol. 13(10), 823–849.

Bernstein D.M., Riego Sintes J.M., Ersboell B.K. i in. (2001b). Biopersistence of synthetic mineral fibers as a predictor of chronic intraperitoneal injection tumor response in rats. Inhal. Toxicol. 13(10), 851–875.

Björnberg A. (1985). Glass fiber dermatitis. Am. J. Ind. Med. 8, 395–400.

Boffetta P., Saracci R., Andersen A. i in. (1992). Lung cancer mortality among workers in the European production of man-made mineral fibers: a poisson regression analysis. Scand. J. Work Environ. Health 18(5), 279–286.

Boffetta P., Saracci R., Andersen A. i in. (1997). Cancer mortality among man-made vitreous fibre production workers. Epidemiology 8(3), 259–268.

Boffetta P., Andersen A., Hansen J. i in. (1999). Cancer incidence among European man-made vitreous fiber production workers. Scand. J. Work Environ. Health 25(3), 222–226.

Boffetta P., Donaldson K., Moolgavkar S. i in. (2014). A systematic review of occupational exposure to synthetic vitreous fibers and mesothelioma. Crit. Rev. Toxicol. 44, 436–449.

Brown R.C., Chamberlain M., Davies R. i in. (1979). In vitro biological effects of glass fibers. J. Environ. Pathol. Toxicol. 2(6), 1369–1383 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].

Brown N., Peat J., Mellis C. i in. (1996). Respiratory health of workers in the Australian glass wool and rock wool manufacturing industry. J. Occup. Health Saf. Aust. NZ 12, 319–325 [cyt. za: IARC 2002].

Bruchajzer E., Szymańska J., Frydrych B. (2024). Sztuczne włókna mineralne, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – włókna respirabilne. Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego. Podst. Met. Oceny Środow. Pr. 2(120), 5–74.

Carel R., Olsson A.C., Zaridze D. i in. (2007). Occupational exposure to asbestos and man-made vitreous fibres and risk of lung cancer: a multicentre case-control study in Europe. Occup. Environ. Med. 64(8), 502–508.

CIOP-PIB, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (2018). Przemysł sztucznych włókien mineralnych, <http://www.ciop.pl/25882.html> [dostęp: 15.01.2019], [cyt. za: Kupczewska-Dobacka i in. 2019].

Claude J., Frentzel-Beyme R.R. (1986). Mortality of workers in a German rock-wool factory: a second look with extended follow-up. Scand. J. Work Environ. Health 12(Suppl. 1), 53–60.

- Clausen J., Netterstrøm B., Wolff C. (1993). Lung function in insulation workers. *Br. J. Ind. Med.* 50, 252–256 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Dai Y.T., Yu C.P. (1998). Alveolar deposition of fibers in rodents and humans. *J. Aerosol. Med.* 11(4), 247–258 [cyt. za: Hartwig, MAK Commission 2019; IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- De Vuyst P., Dumortier P., Swaen G.M.H. i in. (1995). Respiratory health effects of man-made vitreous (mineral) fibres. *Eur. Respir. J.* 8(12), 2149–2173 [cyt. za: Kupczewska-Dobecka i in. 2019].
- DECOS, Dutch Expert Committee on Occupational Standards (1995). Man made mineral fibers. Health-based recommended Occupational Exposure Limits. Publ. No. 1995/O2WGD. The Hague: Health Council of the Netherlands [cyt. za: SCOEL 2012].
- Dopp E., Schiffmann D. (1998). Analysis of chromosomal alteration induced by asbestos and ceramic fibers. *Toxicol. Lett.* 96, 155–162 [cyt. za: Hartwig, MAK Commission 2019; IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Driscoll K.E. (1996). Effects of fibres on cell proliferation, cell activation and gene expression. *IARC Sci. Publ.* 140, 73–96 [cyt. za: IARC 2002].
- Eastes W., Potter R.M., Hadley J.G. (2000). Estimating in vitro glass fiber dissolution rate from composition. *Inhal. Toxicol.* 12(4), 269–280.
- EHC (1988). Environmental Health Criteria 77. Man-made mineral fibres. IPCS (International Programme on Chemical Safety), World Health Organization, Geneva, 1988.
- Engholm G., Englund A., Fletcher T. i in. (1987). Respiratory cancer incidence in Swedish construction workers exposed to man-made mineral fibres and asbestos. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 663–675.
- Enterline P.E., Henderson V. (1975). The health of retired fibrous glass workers. *Arch. Environ. Health* 30, 113–116 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Enterline P.E., Marsh G.M., Esmen N.A. (1983). Respiratory disease among workers exposed to man-made mineral fibers. *Am. Rev. Respir. Dis.* 128(1), 1–7.
- Enterline P.E., Marsh G.M., Henderson V. i in. (1987). Mortality update of a cohort of U.S. man-made mineral fibre workers. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 625–656.
- Ernst P., Shapiro S., Dales R.E. i in. (1987). Determinants of respiratory symptoms in insulation workers exposed to asbestos and synthetic mineral fibres. *Br. J. Ind. Med.* 44, 90–95 [cyt. za: EHC 1988].
- Esmen N., Corn M., Hammad Y. i in. (1979a). Summary of measurements of employee exposure to airborne dust and fiber in sixteen facilities producing man-made mineral fibers. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 40, 108–117.
- Esmen N.A., Corn M., Hammad Y.Y. i in. (1979b). Exposure of employees to man-made mineral fibers: ceramic fiber production. *Environ. Res.* 19, 265–278 [cyt. za: Kupczewska-Dobecka i in. 2019; Toxicological profile... 2004].
- Esmen N.A., Erdal S. (1990). Human occupational and nonoccupational exposure to fibers. *Environ. Health Perspect.* 88, 277–286 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Finnegan M.J., Pickering C.A.C., Burge P.S. i in. (1985). Occupational asthma in a fibre glass works. *J. Soc. Occup. Med.* 35, 121–127 [cyt. za: EHC 1988].
- Fireman E. (2014). Man-made mineral fibers and interstitial lung diseases. *Curr. Opin. Pulm. Med.* 20, 194–198.
- Fisher A.A. (1982). Fiberglass vs mineral wool (rockwool) dermatitis. *Cutis* 29, 412–513 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Fisher B.K., Warkentin J.D. (1969). Fiber glass dermatitis. *Arch. Dermatol.* 99, 717–719.
- Gao H.G., Whong W.Z., Jones W.G. i in. (1995). Morphological transformation induced by glass fibers in BALB/c-3T3 cells. *Teratog. Carcinog. Mutagen.* 15(2), 63–71 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Gardner J.M., Magnani C., Pannett B. i in. (1988). Lung cancer among glass fibre production workers: a case-control study. *Br. J. Ind. Med.* 45(9), 613–618.
- Gross P., Stanton M.F. (1973). Tumors of the pleura induced with asbestos and fibrous glass. *J. Natl. Cancer Inst.* 51(1), 315–319 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Guida F., Paget-Bailly S., Lamkarkach F. i in. (2013). Risk of lung cancer associated with occupational exposure to mineral wools: updating knowledge from a French population-based case-control study, the ICARE study. *J. Occup. Environ. Med.* 55(7), 786–795.
- Gustavsson P., Plato N., Axelsson O. i in. (1992). Lung cancer risk among workers exposed to man-made mineral fibers (MMMF) in the Swedish prefabricated house industry. *Am. J. Ind. Med.* 21(6), 825–834.
- Hallin N. (1981). Mineral wool dust in construction sites (Report 1981-09-01), Stockholm, Bygghälsan [The Construction Industry's Organization for Working Environment, Safety and Health] [cyt. za: IARC 2002].
- Hansen E.F., Rasmussen F.V., Hardt F. i in. (1999). Lung function and respiratory health of long-term fiber-exposed stonewool factory workers. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 160, 466–472.
- Hartwig A., MAK Commission (2019). Fibrous dusts, inorganic. MAK value documentation. *MAK Coll. Occup. Health Saf.* 4(4), 2054–2107.
- Head I.W.H., Wagg R.M. (1980). A survey of occupational exposure to man-made mineral fibre dust. *Ann. Occup. Hyg.* 23, 235–258 [cyt. za: IARC 2002].
- Hesterberg T.W., Barrett J.C. (1984). Dependence of asbestos- and mineral dust-induced transformation of mammalian cells in culture on fiber dimension. *Cancer Res.* 44, 2170–2180 [cyt. za: EHC 1988; IARC 2002; RoC 2016; Toxicological profile... 2004].
- Hesterberg T.W., Hart G.A. (1994). A comparison of human exposures to fiberglass with those used in a recent rat chronic inhalation study. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 20(3 Pt 2), S35–S46 (abstract).

- Hesterberg T.W., Hart G.A. (2001). Synthetic vitreous fibers: a review of toxicology research and its impact on hazard classification. *Crit. Rev. Toxicol* 31(1), 1–53.
- Hesterberg T.W., Oshimura M., Barrett J.C. (1985). [W:] In vitro effects of mineral dusts: Third International Workshop. [Red.] E.G. Beck, J. Bignon Berlin: Springer-Verlag, 185–196 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Hesterberg T.W., Müller W.C., McConnell E.E. i in. (1993). Chronic inhalation toxicity of size-separated glass fibers in Fischer 344 rats. *Fundam. Appl. Toxicol.* 20, 464–476.
- Hesterberg T.W., Müller W.C., Mast R. i in. (1994). Relationship between lung biopersistence and biological effects of man-made vitreous fibers after chronic inhalation in rats. *Environ. Health Perspect.* 102 (Suppl. 5), 133–137.
- Hesterberg T.W., McConnell E.E., Müller W.C. i in. (1996a). Use of lung toxicity and lung particle clearance to estimate the maximum tolerated dose (MTD) for a fibre glass chronic inhalation study in the rat. *Fundam. Appl. Toxicol.* 32, 31–44.
- Hesterberg T.W., Müller W.C., Musselman R.P. i in. (1996b). Biopersistence of man-made vitreous fibers and crocidolite asbestos in the rat lung following inhalation. *Fundam. Appl. Toxicol.* 29, 267–279 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Hesterberg T.W., Axten C., McConnell E.E. i in. (1997). Chronic inhalation study of fiber glass and amosite asbestos in hamsters: twelve-month preliminary results. *Environ. Health Perspect.* 105(Suppl. 5), 1223–1229.
- Hesterberg T.W., Hart G.A., Chevalier J. i in. (1998). The importance of fiber biopersistence and lung dose in determining the chronic inhalation effects of X607, RCF1, and chrysotile asbestos in rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 153, 68–82 [cyt. za: IARC 2002; SCOEL 2012; Toxicological profile... 2004].
- Hesterberg T.W., Axten C., McConnell E.E. i in. (1999). Studies on the inhalation toxicology of two fiber-glasses and amosite asbestos in the Syrian golden hamster: Part I. Results of a subchronic study and dose selection for a chronic study. *Inhal. Toxicol.* 11(9), 747–784.
- Hill J.W., Whitehead W.S., Cameron J.D. i in. (1973). Glass fibres: absence of pulmonary hazard in production workers. *Br. J. Ind. Med.* 30, 174–179 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Hours M., Févotte J., Lafont S. i in. (2007). Cancer mortality in a synthetic spinning plant in Besançon, France. *Occup. Environ. Med.* 64, 575–581.
- Hughes J.M., Jones R.N., Glindmeyer H.W. i in. (1993). Follow up study of workers exposed to man made mineral fibres. *Br. J. Ind. Med.* 50, 658–667 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- IARC, International Agency for Research on Cancer (1988). Man-made mineral fibres and radon. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 43. WHO.
- IARC, International Agency for Research on Cancer (2002). Man-made vitreous fibres. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 81, WHO.
- IARC Expert Panel (1996). Congress report. [W:] Mechanisms of fibre carcinogenesis. [Red.] A.B. Kane, P. Boffetta, R. Saracci i in. *IARC Sci. Publ.* 140, 1–9.
- Jaffrey T.S.A.M., Rood A.P., Llewellyn J.W. i in. (1990). Levels of airborne man-made mineral fibres in UK dwellings: II. Fibre levels during and after some disturbance of loft insulation. *Atmosph. Environ.* 24A, 143–146.
- Jones A.D. (1993). Respirable industrial fibres: deposition, clearance and dissolution in animal models. *Ann. Occup. Hyg.* 37(2), 211–226.
- Kamstrup O., Davis J.M.G., Ellehaug A., Guldberg M. (1998). The biopersistence and pathogenicity of man-made vitreous fibers after short- and long-term inhalation. *Ann. Occup. Hyg.* 42(3), 191–199.
- Kamstrup O., Ellehaug A., Chevalier J. i in. (2001). Chronic inhalation studies of two types of stone wool fibres in rats. *Inhal. Toxicol.* 13, 603–621.
- Kane A.B. (1996). Mechanisms of mineral fibre carcinogenesis. [W:] Mechanisms of fibre carcinogenesis. [Red.] A.B. Kane, P. Boffetta, R. Saracci i in. *IARC Sci. Publ.* 11–34 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Kieć-Świerczyńska M., Szymczak W. (1995). The effect of the working environment on occupational skin disease development in workers processing rockwool. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 8(1), 17–22 [cyt. za: IARC 2002; Kupczewska-Dobacka i in. 2019; Toxicological profile... 2004].
- Koh D., Aw T.C., Foulds I.S. (1992). Fiberglass dermatitis from printed circuit boards. *Am. J. Ind. Med.* 21, 193–198.
- Koshi K., Kohyama N., K. Myojo T. i in. (1991). Cell toxicity, hemolytic action and clastogenic activity of asbestos and its substitutes. *Ind. Health* 29(2), 37–56 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Krajewski J., Tarkowski S. (2002). Materiały izolacyjne zawierające sztuczne włókna mineralne – zagrożenia. *Bezp. Pr.* 3, 16–20 [cyt. za: Kupczewska-Dobacka i in. 2020].
- Kupczewska-Dobacka M., Czerczak S., Konieczko K. (2019). Włókna mineralne. Zagrożenia dla użytkowników, stan prawny i zasady bezpiecznego postępowania. IMP, Łódź.
- Kupczewska-Dobacka M., Konieczko K., Czerczak S. (2020). Occupational risk resulting from exposure to mineral wool when installing insulation in buildings. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 33(6), 757–769.
- Leanderson P., Söderkvist P., Tagesson C. i in. (1988). Formation of 8-hydroxydeoxyguanosine by asbestos and man made mineral fibres. *Br. J. Ind. Med.* 45, 309–311 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Lecomte C., Andujar P., Renier A. i in. (2005). Similar tumor suppressor gene alteration profiles in asbestos-induced murine and human mesothelioma. *Cell Cycle* 4, 1862–1869.
- LeBouffant L., Henin J.P., Martin J.C. i in. (1984). Distribution of inhaled MMMF in the rat lung–long-term effects. In: Biological effects of man-made mineral fibres (Proceedings of a WHO/IARC Conference), Vol. 2, Copenhagen, World Health Organization, pp. 143–167 [cyt. za: EHC 1988; IARC 2002].

- Lee K.P., Barras C.E., Griffith F.D. i in. (1979). Pulmonary response to glass fiber by inhalation exposure. *Lab. Invest.* 40(2), 123–133 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Less P.S.J., Breyse P.N., McArthur B.R. i in. (1993). End user exposures to man-made vitreous fibers: I. Installations of residential insulation products. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 8, 1022–1030 [cyt. za: Kupczewska-Dobecka i in. 2019].
- Lippmann M. (1990). Effects of fiber characteristics on lung deposition, retention, and disease. *Environ. Health Perspect.* 88, 311–317.
- Lipworth L., La Vecchia C., Bosetti C. i in. (2009). Occupational exposure to rock wool and glass wool and risk of cancers of the lung and the head and neck: a systematic review and meta-analysis. *J. Occup. Environ. Med.* 51(9), 1075–1087.
- Lundgren L., Moberg C., Lidén C. (2014). Do insulation products of man-made vitreous fibres still cause skin discomfort? *Contact Dermatitis* 70, 351–360.
- Maltoni C., Minardi F. (1989). Recent results of carcinogenicity bioassays of fibers and other particulate materials. [W:] Non-occupational exposure to mineral fibres. [Red.] J. Bignon, J. Peto, R. Saracci. IARC Sci. Publ. 90, Lyon, 46–53 [cyt. za: IARC 2002].
- Marchant G.E., Amen M.A., Bullock C.H. i in. (2002). A synthetic vitreous fiber (SVF) occupational exposure database: implementing the SVF health and Safety Partnership Program. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 17, 276–285 [cyt. za: Kupczewska-Dobecka i in. 2019; Toxicological profile... 2004].
- Margineanu M., Danulescu E., Gradinariu F. i in. (2012). Irritative respiratory symptoms and ventilatory function to workers exposed to man made mineral fibres. European Respiratory Society Annual Congress, 1-5 September 2012, Vienna, Austria.
- Marsh G.M., Enterline P.E., Stone R.A. i in. (1990). Mortality among a cohort of US man-made mineral fiber workers: 1985 follow-up. *J. Occup. Environ. Med.* 32, 594–604 [cyt. za: Bernstein 2007; Fireman 2014; IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Marsh G.M., Youk A.O., Stone R.A. i in. (2001a). Historical cohort study of US man-made vitreous fiber production workers: I. 1992 fiberglass cohort follow-up: initial findings. *J. Occup. Environ. Med.* 43(9), 741–756.
- Marsh G.M., Gula M.J., Youk A.O. i in. (2001b). Historical cohort study of US man-made vitreous fiber production workers: II. Mortality from mesothelioma. *J. Occup. Environ. Med.* 43(9), 757–766.
- Marsh G.M., Buchanich J.M., Youk A.O. (2001c). Historical cohort study of US man-made vitreous fiber production workers: VI. Respiratory system cancer standardized mortality ratios adjusted for the confounding effect of cigarette smoking. *J. Occup. Environ. Med.* 43(9), 803–808.
- Marsh G.M., Buchanich J.M., Youk A.O. (2011). Fiber glass exposure and human respiratory system cancer risk: lack of evidence persists since 2001 IARC re-evaluation. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 60(1), 84–92.
- Maxim L.D., Mast R.W., Utell M.J. i in. (1999). Hazard assessment and risk analysis of two new synthetic vitreous fibers. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 30, 54–74.
- Mazurkiewicz P. (2014). Regulacje w sprawie materiałów ogniotrwałych z włókien ceramicznych i przyszłość wysokotemperaturowych włókien izolacyjnych [The regulation of RCF and future options for high temperature insulating fibre]. *Inż. Mat. Piece Przem. Kotły* 5–6, 28–32.
- McConnell E.E., Kamstrup O., Musselman R. i in. (1994). Chronic inhalation study of size-separated rock and slag wool insulation fibers in Fischer 344/N rats. *Inhal. Toxicol.* 6, 571–614 [cyt. za: IARC 2002; SCOEL 2012; Toxicological profile... 2004].
- McConnell E.E., Axten C., Hesterberg T.W. i in. (1999). Studies on the inhalation toxicology of two fiberglasses and amosite asbestos in the Syrian golden hamster: II. Results of chronic exposure. *Inhal. Toxicol.* 11(9), 785–835.
- Milby T.H., Wolf C.R. (1969). Respiratory tract irritation from fibrous glass inhalation. *J. Occup. Med.* 11(8), 409–410 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Miller B.G., Searl A., Davis J.M. i in. (1999). Influence of fibre length, dissolution and biopersistence on the production of mesothelioma in the rat peritoneal cavity. *Ann. Occup. Hyg.* 43(3), 155–166 [cyt. za: IARC 2002; RoC 2016; Toxicological profile... 2004].
- Mineral wools (glass, stone/slag, HT), (2013). Evaluation of health hazard and proposal of health-based quality criterion for ambient air. Environmental project No. 1515, Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.
- Morgan A., Holmes A., Davison W. (1982). Clearance of sized glass fibres from the rat lung and their solubility in vivo. *Ann. Occup. Hyg.* 25(3), 317–331 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Morgan A., Collier C.G., Morris K.J. i in. (1993). A radioactive tracer technique to determine in vivo the number of fibers in the lungs of rats following their administration by intratracheal instillation. *Environ. Res.* 63(2), 182–190 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Moulin J.J., Mur J.M., Wild P. i in. (1986). Oral cavity and laryngeal cancers among man-made mineral fiber production workers. *Scand. J. Work Environ. Health* 12(1), 27–31.
- Moulin J.J., Pham Q.T., Mur J.M. i in. (1987). [Epidemiological study in two factories producing artificial mineral fibres: II. Respiratory symptoms and lung function.] *Arch. Mal. Prof.* 48, 7–16 [cyt. za: EHC 1988; IARC 2002; Kupczewska-Dobecka i in. 2019].
- Moulin J.J., Wild P., Mur J.M. i in. (1988). Respiratory health assessment by questionnaire of 2024 workers involved in man-made mineral fiber production. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 61, 171–178 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Nasr A.N.M., Ditchenk T., Scholtens P.A. (1971). The prevalence of radiographic abnormalities in chests of fiber glass workers. *J. Occup. Med.* 13(8), 371–376 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].

- Oberdörster G. (1994). Respiratory tract dosimetry of particles: implications for setting of exposure concentrations and extrapolation modeling. *Proceedings of an International Symposium: IPCS Joint Series No. 18*, 83–110 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Oberdörster G. (2000). Determinants of the pathogenicity of man-made vitreous fibres (MMVF). *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 73(Suppl.), S60–S68 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Ong T., Lui Y., Zhong B.Z. i in. (1997). Induction of micronucleated and multinucleated cells by man-made fibers in vitro in mammalian cells. *J. Toxicol. Environ. Health* 50(4), 409–414 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration (2017). 1915.1000 - Air contaminants. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1915/1915.1000> [dostęp: 30.03.2022].
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration (2021). Occupational Chemical Database. Mineral wool fiber. <https://www.osha.gov/chemicaldata/791> [dostęp: 30.03.2022].
- Peraud A., Riebe-Imre M. (1994). Toxic and chromosomal-damaging effects of natural and man-made mineral fibers in epithelial lung cells in vitro. [W:] *Toxic and carcinogenic effects of solid particles in the respiratory tract*. [Red.] D.L. Dungworth, J.L. Mauderly, G. Oberdorster. Washington, DC: ILSI Press, 569–574 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Petersen R., Sabroe S. (1991). Irritative symptoms and exposure to mineral wool. *Am. J. Ind. Med.* 20(1), 113–122 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Pickrell J.A., Hill J.O., Carpenter R.L. i in. (1983). In vitro and in vivo response after exposure to man-made mineral and asbestos insulation fibers. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 44(8), 557–561 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Plato N., Krantz S., Gustavsson P. i in. (1995a). Fiber exposure assessment in the Swedish rock wool and slag wool production industry in 1938–1990. *Scand. J. Work Environ. Health* 21, 345–352.
- Plato N., Westerholm P., Gustavsson P. i in. (1995b). Cancer incidence, mortality and exposure-response among Swedish man-made vitreous fiber production workers. *Scand. J. Work Environ. Health* 21, 353–361.
- Possick P.A., Gellin G.A., Key M.M. (1970). Fibrous glass dermatitis. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 31, 12–15 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Pott F. (1995). Detection of mineral fibre carcinogenicity with the intraperitoneal test: recent results and their validity. *Ann. Occup. Hyg.* 39(5), 771–779 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- Pott F., Friedrichs K.H., Huth F. (1976). [Results of animal experiments concerning the carcinogenic effect of fibrous dusts and their interpretation with regard to the carcinogenesis in humans]. *Zentralbl. Bakteriell. Orig. B* 162(5–6), 467–505 [cyt. za: IARC 2002; RoC 2016; Toxicological profile... 2004].
- Pott F., Ziem U., Reiffer F.J. i in. (1987). Carcinogenicity studies on fibres, metal compounds, and some other dusts in rats. *Exp. Pathol.* 32(3), 129–152 [cyt. za: ARC 2002; EHC 1988; RoC 2016; Toxicological profile... 2004].
- Pott F., Roller M., Althoff G.H. i in. (1993). [Estimation of the carcinogenicity of inhaled fibres]. *VDI Berichte* 1075, 17–77 [cyt. za: IARC 2002].
- Pott F., Dungworth D.L., Heinrich U. i in. (1994). Lung tumours in rats after intratracheal instillation of dusts. *Ann. Occup. Hyg.* 38, 357–363 [cyt. za: IARC 2002; Toxicological profile... 2004].
- RoC, Report on Carcinogens (2016). Certain glass wool fibers (inhalable), 14th ed. <http://ntp.niehs.nih.gov/go/roc> [dostęp: 23.06.2021].
- Roller M., Pott F., Kamino K. i in. (1996). Results of current intraperitoneal carcinogenicity studies with mineral and vitreous fibres. *Exp. Toxicol. Pathol.* 48(1), 3–12.
- Roller M., Pott F. (1998). Carcinogenicity of man-made fibres in experimental animals and its relevance for classification of insulation wools. *Eur. J. Oncol.* 3, 231–239 [cyt. za: IARC 2002].
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *DzU* 2018, poz. 1286 ze zm. *Dz.U.* 2020, poz. 61; *DzU* 2021, poz. 325.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniające i uchylające dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1907/2006. *Dz. Urz. UE L* 353 z dnia 31.12.2008 r.
- Sali D., Boffetta P., Andersen A. i in. (1999). Non-neoplastic mortality of European workers who produce man made vitreous fibers. *Occup. Environ. Med.* 56, 612–617.
- Saracci R., Simonato L., Acheson E.D. i in. (1984). Mortality and incidence of cancer of workers in the man made vitreous fibres producing industry: an international investigation at 13 European plants. *Br. J. Ind. Med.* 41, 425–436.
- Schneider T. (1984). Review of surveys in industries that use MMMF. [W:] *Biological effects of man-made mineral fibres (Proceedings of a WHO/IARC Conference)*, Vol. 1, Copenhagen, World Health Organization, 178–190 [cyt. za: IARC 2002].
- Schneider T. (1987). Mass concentration of airborne man-made mineral fibres. *Ann. Occup. Hyg.* 31(2), 211–217.
- Schneider T., Stokholm J. (1981). Accumulation of fibers in the eyes of workers handling man-made mineral fiber products. *Scan. J. Work Environ. Health* 7, 271–276.
- Schneider T., Breum N.O. (1987). Screening man-made vitreous fibre exposures by gravimetric dust measurements. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 547–555.
- Schwartz L., Botvinick (1943). Skin hazards in the manufacture of glass wool and tread. *Ind. Med. Surg.* 12, 142–145 [cyt. za: Fisher, Warkentin 1969].

- SCOEL (2012). Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for man-made-mineral fibres (MMMF) with no indication for carcinogenicity and not specified elsewhere. SCOEL/SUM/88, March 2012.
- Shannon H.S., Hayes M., Julian J.A. i in. (1984). Mortality experience of glass fibre workers. *Br. J. Ind. Med.* 41, 35–38.
- Shannon H.S., Jamieson E., Julian J.A. i in. (1987). Mortality experience of Ontario glass fibre workers: extended follow-up. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 657–662.
- Shannon H.S., Jamieson E., Julian J.A. i in. (1990). Mortality of glass filament (textile) workers. *Br. J. Ind. Med.* 47(8), 533–536.
- Shannon H., Muir A., Haines T. i in. (2005). Mortality and cancer incidence in Ontario glass fiber workers. *Occup. Med. (Lond.)* 55(7), 528–534.
- Shepers G.W.H. (1955). The biological action of glass wool: studies on experimental pulmonary histopathology. *AMA Arch. Ind. Health* 12, 280–287 [cyt. za: EHC 1988].
- Shepers G.W.H., Delahant A.B. (1955). An experimental study of the effects of glass wool on animal lungs. *AMA Arch. Ind. Health* 12, 276–279 [cyt. za: EHC 1988].
- Simonato L., Fletcher A.C., Cherrie J. i in. (1986). Updating lung cancer mortality among a cohort of man-made mineral fibre production workers in seven European countries. *Cancer Lett.* 30(2), 189–200.
- Simonato L., Fletcher A.C., Cherrie J. i in. (1987). The International Agency for Research on Cancer historical cohort study of MMMF production workers in seven European countries: extension of the follow-up. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 603–623.
- Sincock A.M., Delhanty J.D.A., Casey G. (1982). A comparison of the cytogenetic response to asbestos and glass fibre in Chinese hamster and human cell lines: demonstration of growth inhibition in primary human fibroblasts. *Mutat. Res.* 101(3), 257–268 [cyt. za: Toxicological profile... 2004].
- Smith D.M., Ortiz L.W., Archuleta R.F. (1984). Long-term exposure of Syrian hamsters and Osborne-Kendel rats to aerosolized 0.45 µm mean diameter fibrous glass. [W:] Biological effects of man-made mineral fibres. Proceedings of a WHO/IARC Conference, Copenhagen, Denmark, 20–22 April 1982, Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, Vol. 2, 253–272 [cyt. za: EHC 1988].
- Smith D., Ortiz L.W., Archuleta R.F. i in. (1987). Long-term health effects in hamsters and rats exposed chronically to man-made vitreous fibres. *Ann. Occup. Hyg.* 31(4B), 731–754.
- Sprawozdanie z badań (2018). Pobór i analiza próbek powietrza w środowisku pracy. Laboratorium Badań Środowiskowych EmiPro Sp. z o.o., Kraków, nr 18/P/18 z 7.12.2018 r. [cyt. za: Kupczewska-Dobecka i in. 2019].
- Stokholm J., Norn M., Schneider T. (1982). Ophthalmologic effects of man-made mineral fibers. *Scand. J. Work Environ. Health* 8, 185–190.
- Stone R.A., Youk A.O., Marsh G.M. i in. (2001). Historical cohort study of US man-made vitreous fiber production workers: IV. Quantitative exposure-response analysis of the nested case-control study of respiratory system cancer. *J. Occup. Environ. Med.* 43, 779–792.
- Stone R.A., Youk A.O., Marsh G.M. i in. (2004). Historical cohort study of U.S. man-made vitreous fiber production workers IX: summary of 1992 mortality follow up and analysis of respiratory system cancer among female workers. *J. Occup. Environ. Med.* 46, 55–67.
- Suder Egnot N., Benson S.M., Vater M.F. i in. (2020). Systematic review and meta-analysis of epidemiological literature evaluating the association between exposure to man-made vitreous fibers and respiratory tract cancers. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 112, 104585.
- Sulzberger M.B., Baer R.L. (1942). The effects of fiberglass on animal and human skin. *Ind. Med. Surg.* 11, 482–484 [cyt. za: Fisher, Warkentin 1969].
- SWA (2020). Safety Work Australia. Synthetic mineral fibres.
- Tarkowski S., Więcek E., Woźniak H. i in. (2001). Środowiskowe zagrożenia zdrowia. Sztuczne włókna mineralne występujące w materiałach izolacyjnych stosowanych w budownictwie. IMP, Łódź.
- Toxicological profile for synthetic vitreous fibers (2004). U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).
- Utidiyan H., Cooper W.C. (1976). Human epidemiologic studies with emphasis on chronic pulmonary effects. [W:] Occupational exposure to fibrous glass. Proceedings of a Symposium, College Park, Maryland, 26–27 June 1974, Washington DC, US Department of Health, Education and Welfare, 223–224 [cyt. za: EHC 1988].
- Wagner J.C., Berry G.B., Hill R.J. i in. (1984). Animal experiments with MMM(V)F: effects of inhalation and intrapleural inoculation in rats. [W:] Biological effects of man-made mineral fibres (Proceedings of a WHO/IARC Conference), Vol. 2, Copenhagen, World Health Organization, 209–233 [cyt. za: EHC 1988; IARC 2002; RoC 2016; SCOEL 2012].
- Wang Q.E., Han C.H., Yang Y.P. i in. (1999). Biological effects of man-made mineral fibers (II): their genetic damages examined by in vitro assay. *Ind. Health* 37(3), 342–347.
- WHO, World Health Organization (1997). Determination of airborne fibre number concentrations. A recommended method, by phase contrast optical microscopy. WHO, Geneva.
- Więcek E. (2011). Kryteria zdrowotne pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy. *Podst. Met. Oceny Środow. Pr.* 2(68), 5–21.
- Wright G.W. (1968). Airborne fibrous glass particles: chest roentgenograms of persons with prolonged exposure. *Arch. Environ. Health* 16, 175–181 [cyt. za: EHC 1988; Toxicological profile... 2004].
- Yano E., Karita K. (1998). Prevalence of respiratory abnormalities of workers in rock/slag wool producing industries in Japan. *Advances in the Prevention of Occupational Respiratory Diseases: Proceedings of the 9th International Conference on Occupational Respiratory Diseases*, Kyoto, 13–16 October

1997. [Red.] C. Keizo, H. Yutaka, A. Yoshiharu. Amsterdam, Elsevier, pp. 337–341 [cyt. za: IARC 2002].

Youk A.O., Marsh G.M., Stone R.A. i in. (2001). Historical cohort study of US man-made vitreous fiber production workers: III. Analysis of exposure-weighted measures of respirable fibers and formaldehyde in the nested case-control study of respiratory system cancer. *J. Occup. Environ. Med.* 43(9), 767–778.

Zhong B.Z., Ong T., Whong W.Z. (1997). Studies on the relationship between treatment condition and micronucleus induction in V79 cells exposed to silica and glass fibers. *Mutat. Res.* 39, 111–116 [cyt. za: *Hartwig*, MAK Commission 2019; Toxicological profile... 2004].

ZAKRES BADAŃ WSTĘPNYCH I OKRESOWYCH, NARZĄDY (UKŁADY) KRYTYCZNE,
PRZECIWWSKAZANIA LEKARSKIE DO ZATRUDNIENIA W NARAŻENIU NA SZTUCZNE WŁÓKNA
MINERALNE, Z WYJĄTKIEM OGNIOTRWAŁYCH WŁÓKIEN CERAMICZNYCH –
FRAKCJA WDYCHALNA

dr. n. med. Marcin Rybacki
Instytut Medycyny Pracy
im. prof. dr. med. Jerzego Nofera
91-348 Łódź
ul. św. Teresy od Dzieciątka Jezus 8

Zakres badania wstępnego

Ogólne badanie lekarskie.
Badania pomocnicze: spirometria, rtg klatki piersiowej.

Zakres badania okresowego

Ogólne badanie lekarskie.
Badania pomocnicze: spirometria, rtg klatki piersiowej.
Częstotliwość badań okresowych: co 4 lata, po 15 latach narażenia co rok.

U w a g a

Lekarz przeprowadzający badanie profilaktyczne może poszerzyć jego zakres o dodatkowe specjalistyczne badania lekarskie oraz badania pomocnicze, a także wyznaczyć krótszy termin następnego badania, jeżeli stwierdzi, że jest to niezbędne do prawidłowej oceny stanu zdrowia osoby przyjmowanej do pracy lub pracownika.

Narządy (układy) krytyczne

Narządem (układem) krytycznym podczas pracy w narażeniu na sztuczne włókna mineralne, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – frakcję wdychalną jest układ oddechowy.

Przeciwwskazania lekarskie do zatrudnienia

Przeciwwskazaniami lekarskimi do zatrudnienia w narażeniu na sztuczne włókna mineralne, z wyjątkiem ogniotrwałych włókien ceramicznych – frakcję wdychalną są ciężkie choroby układu oddechowego przebiegające ze zniszczeniem struktury płuc i zmniejszeniem powierzchni oddechowej (np. rozedma płuc, choroby śródmiąższowe, POChP).

U w a g a

Wymienione przeciwwskazania dotyczą kandydatów do pracy.

O przeciwwskazaniach w przebiegu zatrudnienia powinien decydować lekarz sprawujący opiekę profilaktyczną, biorąc pod uwagę wielkość i okres trwania narażenia zawodowego oraz ocenę stopnia zaawansowania i dynamikę zmian chorobowych.

