

Alena Boriková, Marie Nakládalová, Ladislav Štěpánek

Azbest v pracovním prostředí a jeho zdravotní účinky





Alena Boriková, Marie Nakládalová, Ladislav Štěpánek

Azbest v pracovním prostředí a jeho zdravotní účinky

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Automatizovaná analýza textů nebo dat ve smyslu čl. 4 směrnice 2019/790/EU a použití této knihy k trénování AI jsou **bez souhlasu nositele práv zakázány**.

MUDr. Alena Boriková, Ph.D.; doc. MUDr. Marie Nakládalová, Ph.D.;
doc. MUDr. Ladislav Štěpánek, Ph.D.

Azbest v pracovním prostředí a jeho zdravotní účinky

Autoři:

MUDr. Alena Boriková, Ph.D. (editorka)

Klinika pracovního lékařství Lékařské fakulty Univerzity Palackého v Olomouci
a Fakultní nemocnice Olomouc

doc. MUDr. Marie Nakládalová, Ph.D.

Klinika pracovního lékařství Lékařské fakulty Univerzity Palackého v Olomouci
a Fakultní nemocnice Olomouc

doc. MUDr. Ladislav Štěpánek, Ph.D.

Klinika pracovního lékařství Lékařské fakulty Univerzity Palackého v Olomouci
a Fakultní nemocnice Olomouc

Recenzentka:

prof. MUDr. Daniela Pelclová, CSc.

Klinika pracovního lékařství 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a Všeobecné
fakultní nemocnice v Praze

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

Obrázky a fotografie dodali autoři.

Cover Photo © iStock.com, 2026

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2026

© Grada Publishing, a.s., 2026

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 10 657. publikaci

Šéfredaktorka lékařské literatury MUDr. Michaela Lízlerová

Odpovědná redaktorka BcA. Radka Jančová, DiS.

Jazyková korektura a redakce Jitka Štěrbová

Sazba a zlom Zdeněk Staňka

Počet stran 140

1. vydání, Praha 2026

Vytiskla TISKÁRNA V RÁJI, s.r.o., Pardubice

Podpořeno MZ ČR – RVO (FNOL, 00098892); IGA UP: LF_2026_001.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění však pro autory ani pro nakladatelství nevyplývají žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-271-8575-7 (ePub)

ISBN 978-80-271-8574-0 (pdf)

ISBN 978-80-271-5850-8 (print)



Obsah

O knize...	2
Předmluva	3
1 Historie užití azbestu	4
2 Azbest a jeho druhy	8
2.1 Skupina serpentínů (hadcové azbesty)	8
2.1.1 Krystalická struktura a polytypy	8
2.1.2 Fyzikální a chemické vlastnosti	9
2.1.3 Geologický výskyt a těžba	9
2.1.4 Průmyslové využití a produkty	9
2.1.5 Zdravotní rizika a regulace	10
2.2 Skupina amfibolů (amfibolové azbesty)	10
2.2.1 Krystalická struktura a chemické složení	10
2.2.2 Společné morfologické a fyzikální vlastnosti	11
2.2.3 Přehled hlavních zástupců amfibolové skupiny	12
2.2.4 Zdravotní rizika a bioperzistence	12
2.3 Krocidolit (modrý azbest)	13
2.3.1 Krystalická struktura	13
2.3.2 Fyzikální a chemické vlastnosti	13
2.3.3 Geologický výskyt a těžba	13
2.3.4 Průmyslové využití a produkty	14
2.3.5 Zdravotní rizika a regulace	14
2.4 Amosit (hnědý azbest)	15
2.4.1 Krystalická struktura	15
2.4.2 Fyzikální a chemické vlastnosti	15
2.4.3 Geologický výskyt a těžba	15
2.4.4 Průmyslové využití a produkty	16
2.4.5 Zdravotní rizika a regulace	16
2.5 Tremolit a aktinolit	16
2.5.1 Krystalická struktura	16
2.5.2 Fyzikální a chemické vlastnosti	17
2.5.3 Geologický výskyt a těžba	17
2.5.4 Průmyslové využití a produkty	17
2.5.5 Zdravotní rizika a regulace	17
2.6 Antofylit	18
2.6.1 Krystalická struktura	18
2.6.2 Fyzikální a chemické vlastnosti	18
2.6.3 Geologický výskyt a těžba	19

2.6.4	Průmyslové využití a produkty	19
2.6.5	Zdravotní rizika	19
3	Působení azbestu na organismus	21
3.1	Chronický zánět	22
3.2	Schopnost azbestových vláken migrovat	23
3.3	Genetická predispozice a individuální citlivost	24
3.4	Synergie azbestu a kouření tabáku	25
3.5	Diagnostické biomarkery a detekce v těle	26
3.5.1	Přímá detekce expozice (biomarkery expozice)	26
3.5.2	Zobrazovací a funkční diagnostika (biomarkery účinku)	27
3.5.3	Molekulární a biochemické markery	27
4	Nenádorová onemocnění způsobená expozicí azbestu	29
4.1	Azbestóza	29
4.1.1	Azbestové tělísko	30
4.2	Pleurální hyalinoza	34
4.3	Akutní pleuritida	37
5	Nádorová onemocnění způsobená expozicí azbestu	40
5.1	Maligní mezoteliom	40
5.2	Bronchogenní karcinom	47
5.3	Karcinom hrtanu	53
5.4	Karcinom ovaria	56
5.5	Karcinom žaludku	59
5.6	Kolorektální karcinom	63
6	Měření a limitní hodnoty azbestu v pracovním prostředí	70
6.1	Expoziční limity a nové definice vláken	70
6.2	Analytické metody a jejich limity	71
6.2.1	Fázová kontrastní mikroskopie	71
6.2.2	Skenovací elektronová mikroskopie	71
6.2.3	Transmisní elektronová mikroskopie	72
6.2.4	Strategie měření v pracovním prostředí	72
6.2.5	Problémy interpretace a zajištění kvality	72
6.2.6	Technické limity a subjektivita v optické mikroskopii	72
6.2.7	Problém analytických interferencí	73
6.2.8	Konverzní faktory: PCM versus elektronová mikroskopie	73
6.2.9	Praktické aspekty měření při sanaci a odpadovém hospodářství	73
7	Ochrana zdraví při práci s azbestem v legislativě	76
7.1	Klíčová ustanovení EU a jejich transpozice v českých předpisech	76
7.1.1	Povinnost oznamovat práce s azbestem	76

7.1.2	Plán prací před odstraňováním azbestu, technická opatření	77
7.1.3	Expoziční limity a pravidla měření	77
7.1.4	Zákaz uvádění do oběhu a používání azbestu, klasifikace azbestu	77
7.1.5	Nakládání s odpady obsahujícími azbest	77
7.1.6	Zdravotní dohled a evidenční povinnosti	78
7.2	České hygienické legislativní předpisy týkající se ochrany zdraví při práci s azbestem	78
7.3	Zdravotní dohled	85
7.3.1	Pracovnílékařské služby	85
7.4	Kontrolní činnost	95
8	Strategie eliminace onemocnění z azbestu ve světě	99
8.1	Příklady opatření k eliminaci onemocnění způsobených azbestem v zemích mimo Evropskou unii	100
8.2	Příklady opatření k eliminaci onemocnění způsobených azbestem v zemích Evropské unie	101
8.3	Vize a strategie v oblasti eliminace onemocnění z azbestu v ČR – příspěvek	105
	Obrazová příloha	113
	Zkratky	121
	Souhrn	126
	Summary	127
	Rejstřík	128

*Monografie je vydána u příležitosti 50. výročí založení
Kliniky pracovního lékařství v Olomouci*

O knize...

Autoři se pustili do velmi náročného díla – popisují a vysvětlují nejen geologicky složité téma azbestu a jemu velmi blízkých minerálů se stejným chemickým složením, ale ne-sktečně rozdílných svými účinky na člověka. Seznamují své čtenáře s historií použití azbestu od antiky i dříve, s jeho skvělými technickými vlastnostmi a použitím, ale posléze i s těžkými následky, které jeho zpracovávání lidstvu přineslo.

Téma azbestu je vysoce aktuální. Azbest, původně skvělý nehořlavý, odolný, vláknitý materiál s možností sprádkání do ochranného textilu a řadou technicky vynikajících vlastností, se s odstupem let stal zákeřnou hrozbou, zabíjející své oběti často velmi ne-čekaně a zpočátku nenápadně. Mezoteliom, nádor vznikající téměř výhradně v souvislosti s kontaktem s azbestem, může své oběti usmrctvat až do vysokého věku, nejspíše i do 100 a více let.

Autoři pečlivě popsali fyzikální a chemické vlastnosti jednotlivých typů azbestu a názorně vysvětlili, proč mají vlákna chryzotilu strukturu podobnou mikroskopickému svitku papíru, naproti tomu vlákna amfibolových azbestů tvar ostrých jehliček. Povedlo se jim odborně popsat, proč a jak azbest působí na makrofágy, buňky, které s ním chtějí bojovat a z těla jej odstranit.

Detailně také popsali, jak světová legislativa proti používání azbestu již řadu let zasahuje – například v EU je zpracování a používání azbestu zakázáno od roku 2005. Zákeřnost azbestu spočívá v tom, že všechna onemocnění z azbestu – od zhoubného mezoteliomu přes karcinom hrtanu a plic, vaječníků i trávicího traktu po relativně nejlehčí onemocnění, hyalinózu pohrudnice – vznikají po podstatně nižší expozici. Významným zdrojem expozice je zejména likvidace starých izolací, eternitových střeš i dalších stavebních materiálů v současných podmínkách.

Téma likvidace azbestu je nanejvýš aktuální a týká se téměř každého z nás. Ještě v 70. a 80. letech se azbest ve stavbách běžně používal ve městech i na vesnici a při přestavbách se na něj může narazit. Monografie podrobně popisuje příznaky a diagnostické a léčebné postupy všech onemocnění z azbestu a pečlivě shromažďuje předpisy, jak s ním správně zacházet. Důležitou roli zde hraje čas – všechny nádory z azbestu lze vyléčit, pokud se na ně přijde včas.

Cenný je rovněž přehled preventivních aktivit WHO, ILO, Collegium Ramazzini i vybraných evropských států. Monografie přináší čtenářům velmi komplexní pohled na problematiku azbestu, včetně doporučení a přehledu předpisů, jak správně azbest likvidovat.

Tuto vysoce odbornou, ale i praktickou monografii doporučuji ke čtení všem, kteří se o azbestu chtějí něco dozvědět a vyhnout se rizikům, která z něj mohou plynout pro nás všechny.

(z recenzního posudku)

prof. MUDr. Daniela Pelclová, CSc.

Předmluva

Azbest – nerost, jehož název je odvozen z řeckého slova *asbestos*, tedy „neuhasitelný“ či „nezničitelný“ – provází lidskou civilizaci po tisíciletí. Po dlouhou dobu byl považován za téměř ideální surovinu pro svou mimořádnou odolnost a pevnost. Teprve zkušenost 20. století však ukázala, že právě tyto vlastnosti představují závažné zdravotní riziko, a azbest je dnes řazen mezi nejvýznamnější lidské karcinogeny.

Cílem této publikace je přehledně a srozumitelně shrnout základní poznatky o historii využívání azbestu, jeho mineralogii a mechanismech jeho působení na lidský organismus. Součástí je rovněž systematické zpracování onemocnění souvisejících s expozicí, postupů hodnocení koncentrací vláken, stanovených limitních hodnot, legislativního rámce i dlouhodobých opatření k regulaci rizik.

Text je určen lékařům pracovního lékařství, praktickým lékařům, pneumologům, onkologům a odborníkům v oblasti hygieny práce, stejně jako studentům medicíny a dalším odborníkům, kteří se ve své praxi setkávají s následky dřívější či současné expozice azbestu. Přínosný však může být i pro širší veřejnost, která se chce o azbestu dozvědět více a lépe porozumět rizikům, která z něj mohou plynout.

Azbest není pouze kapitolou minulosti. Vzhledem k dlouhé latenci onemocnění souvisejících s jeho expozicí zůstává trvale aktuální medicínskou i společenskou výzvou.

Věříme, že tato monografie se stane užitečným zdrojem odborných informací a přispěje k prevenci, včasné diagnostice i odpovědnému rozhodování v oblasti ochrany zdraví.

Autoři

1 Historie užití azbestu

Alena Boriková

Historie používání azbestu sahá až do starověku, kdy byl tento přírodní minerál obdivován pro svou nehořlavost, mechanickou pevnost a mimořádnou odolnost vůči vysokým teplotám. Již v antickém světě, zejména u Řeků, Egypťanů a Peršanů, byl azbest využíván k výrobě knotů do lamp, ohniodolných textilií, ubrusů a pohřebních rouch určených pro společenské elity. Jeho název je odvozen z řeckého slova *asbestos* („neuhasitelný“, „nezničitelný“) a systematický popis jeho vlastností se objevuje v encyklopedickém díle *Historia naturalis* autora jménem Plinius starší [1,2].

Praktické využití azbestu je doloženo i ve středověku, například z doby Karla Velikého, který měl vlastnit oděv obsahující azbestová vlákna. Nejstarší známé použití azbestu ve stavebnictví pochází z 1. století n. l., kdy byl přidáván do stavebních materiálů zejména pro zvýšení jejich požární odolnosti. Ještě výrazně starší jsou však archeologické doklady použití azbestu v keramice – v oblasti dnešního jihovýchodního Finska byly nalezeny fragmenty nádob s příměsí antofylitového azbestu, datované až do 4. tisíciletí př. n. l., což představuje nejstarší známý doklad technologického využití azbestu člověkem [3–5].

Již antické civilizace si zároveň začaly všimnout zdravotních rizik spojených s expozicí azbestu. Strabón (64 př. n. l. až 24 n. l.) ve svých spisech popisoval špatný zdravotní stav otroků pracujících v azbestových dolech a při zpracování azbestu, zejména častý výskyt plicních onemocnění a dechových obtíží. Uváděl, že tito otroci byli prakticky neprodejní, neboť umírali v mladém věku. Již v této době se objevují i první úvahy o ochraně pracovníků, například návrh používat primitivní respirátory z rybích měchýřů k omezení vdechování azbestového prachu [1,6].

Skutečně průmyslové využití azbestu nastalo s nástupem průmyslové revoluce v 19. století. V první polovině 19. století se azbest začal používat zejména jako tepelná izolace v parních strojích, kotlích a potrubí, přičemž jeho nehořlavé a izolační vlastnosti byly ceněny v rychle se industrializujících odvětvích. Na severu Itálie se v této době těžily amfibolové azbestové minerály pro průmyslové účely. Velkým milníkem bylo zavedení azbestocementové směsi, kterou kolem roku 1900 vyvinul rakouský průmyslník Ludwig Hatschek (rodák z Těšetic u Olomouce). Smísl přibližně 90 % portlandského cementu s 10 % azbestových vláken a výslednou směs zpracoval na lisované desky, které byly lehké, nehořlavé a odolné vůči povětrnostním vlivům. Tento výrobní postup si v roce 1900 patentoval jako „výroba desek z umělého kamene s hydraulickými pojivky“ a v roce 1903 dal novému materiálu obchodní jméno „Eternit“ (latinsky *aeternus* – věčný). Eternit se brzy stal globálně úspěšným stavebním materiálem a licence na jeho výrobu byly prodány do řady zemí v Evropě i mimo ni již během prvního desetiletí 20. století. V Československu se výroba azbestocementových výrobků rozběhla v roce 1921, kdy byly zřízeny první továrny na jejich produkci, zejména pro střechy, fasády a další stavební komponenty [3,7,8].

Masové rozšíření použití azbestu ve stavebních materiálech v Československu nastalo koncem 60. let 20. století a kulminovalo v 70.–80. letech 20. století. V této době se azbest díky svým izolačním, protipožárním a mechanickým vlastnostem začal intenzivně uplatňovat v řadě stavebních produktů, zejména v azbestocementových střešních krytinách, deskách, trubkách pro kanalizace a vodovodní přípojky, v sendvičových prvcích, podhledových deskách a protipožárních prvcích. Podle odborných průzkumů a historických dat bylo v letech 1975–1990 do tehdejší ČSSR dovezeno až 40–50 000 tun čistého azbestu ročně (převážně chrysotilu), především z bývalého SSSR, ale i z dalších zemí. Tento objem dovozu a spotřeby odpovídal období největšího rozmachu výroby a použití azbestocementových výrobků ve stavebním sektoru, kdy se azbest stal běžnou složkou konstrukčních materiálů v rezidenční i průmyslové výstavbě [8].

Na území Československa se azbest ve významném průmyslovém měřítku netěžil, s výjimkou lokálního ložiska v oblasti Dobšíně na Slovensku, kde se historicky vyskytoval převážně chrysotil. Z tohoto důvodu byla expozice azbestu v Československu spojena především s jeho dovozem a následným zpracováním, zejména v azbestocementovém průmyslu, stavebnictví, při montážních a izolačních pracích a při údržbě a demolcích staveb. Nejvyšší profesní expozice se týkala pracovníků výrobních závodů, stavebních profesí a údržbářských činností, zatímco expozice v obecné populaci byla převážně environmentální a sekundární [2–4,9].

Obrázek 1.1 ukazuje místa v České republice s největším objemem výroby produktů s obsahem azbestu v minulosti.

Zdravotní rizika spojená s expozicí azbestu začala být odborně popisována již na konci 19. století. V roce 1898 byla v britském parlamentu zveřejněna zpráva hlavního inspektora továren upozorňující na závažné poškození zdraví pracovníků vystavených azbestovému prachu. Již v roce 1899 byla v lékařské literatuře popsána plicní fibróza u pracovníků zpracovávajících azbest, později označovaná jako azbestóza. V průběhu první poloviny 20. století se postupně hromadily důkazy o souvislosti mezi expozicí azbestu a vznikem zhoubných nádorů, zejména karcinomu plic a maligního mezoteliomu, přičemž kauzální vztah byl jednoznačně potvrzen v 50. a 60. letech 20. století. Zásadní význam měla práce Selikoffa a spolupracovníků z roku 1964, která poskytla přesvědčivé epidemiologické důkazy vztahu mezi profesní expozicí azbestu a vznikem nádorových onemocnění [10–14].

Navzdory jednoznačně prokázané karcinogenitě pro člověka není azbest celosvětově eliminován ani v současnosti. Jeho produkce kulminovala v 70. letech 20. století, kdy přesahovala 4,5 milionu tun ročně, avšak v důsledku legislativních zákazů a restriktivních opatření zavedených v Evropě, Severní Americe a dalších vyspělých regionech postupně poklesla na přibližně 1,1–1,3 milionu tun ročně. Těžba a využívání azbestu však nadále přetrvávají v řadě zemí, přičemž významná část současné světové produkce pochází z Ruské federace a spotřeba zůstává patrná zejména v některých státech Asie, Afriky a Jižní Ameriky [15–17].

Ani v zemích, kde je používání azbestu již dlouhodobě zakázáno, nedošlo k odstranění jeho zdravotních dopadů. Ty jsou podmíněny jak dlouhou latencí azbestem indukovaných onemocnění, tak dědictvím z minulosti – přítomností tzv. *legacy asbestos*,

tedy azbestových materiálů historicky zabudovaných ve stavbách, průmyslových objektech a infrastruktuře. Tyto materiály představují přetrvávající zdroj expozice, který se uplatňuje zejména při rekonstrukčních pracích, údržbě a demolicích objektů [18–19].

Podle údajů Státního zdravotního ústavu zůstávají i v České republice ve stavbách a infrastruktuře miliony tun azbestových materiálů, které nadále představují významné zdravotní riziko, zejména v případech stavebních zásahů prováděných bez odpovídajících technických a organizačních ochranných opatření [17,20].

Současné epidemiologické analýzy navíc ukazují, že i přes zákaz používání a pokles spotřeby bude globální zátěž azbestem podmíněných onemocnění přetrvávat ještě po několik desetiletí. Odhaduje se, že expozice azbestu každoročně přispívá k více než 200 000 úmrtím celosvětově, přičemž značná část těchto případů zůstává nediagnostikována nebo není zachycena v oficiálních statistikách [17,21,22]. Azbest tak představuje i ve 21. století trvalou výzvu pro pracovní lékařství, ochranu veřejného zdraví i oblast environmentální regulace.

Literatura

1. Bianchi C, Bianchi T. Asbestos and disease: a review of the literature. *Med Lav* 2014;105:249–256.
2. Pliny the Elder. *Naturalis Historia*. Book XIX. ca. 77 AD.
3. Tweedale G. *Magic Mineral to Killer Dust: Turner & Newall and the Asbestos Hazard*. Oxford: Oxford University Press; 2000.
4. Stayner L, Welch LS, Lemen R. The worldwide pandemic of asbestos-related diseases. *Annu Rev Public Health* 2013;34:205–216.
5. Oikarinen A, Rantala O. Asbestos ceramics of prehistoric Finland. *Ann Chir Gynaecol Fenn* 1977;66:87–94.
6. Kůsová L. Azbest a jeho zdravotní důsledky v historickém kontextu. Praha: Karolinum; 2016.
7. International Agency for Research on Cancer (IARC). Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite and anthophyllite). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 100C. Lyon: IARC; 2012. Updated evidence 2022.
8. Vít M. Azbest – historie využití a zdravotní rizika. Praha: Grada Publishing; 2012.
9. Virta RL. Worldwide asbestos supply and consumption trends from 1900 through 2003. *U.S. Geological Survey Circular* 2006;1298.
10. Murray HM. Report of the Chief Inspector of Factories for the Year 1898. London: HMSO; 1899.
11. Murray HM. Pulmonary fibrosis in asbestos workers. *Br Med J* 1906;2:689–694.
12. Doll R. Mortality from lung cancer in asbestos workers. *Br J Ind Med* 1955;12:81–86.
13. Wagner JC, Sleggs CA, Marchand P. Diffuse pleural mesothelioma and asbestos exposure in the north western Cape Province. *Br J Ind Med* 1960;17:260–271.
14. Selikoff IJ, Churg J, Hammond EC. Asbestos exposure and neoplasia. *JAMA* 1964;188:22–26.

15. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024: Asbestos. Reston (VA): USGS; 2024.
16. Thives LP, Ghisi E, Thives Júnior JJ, Vieira AS. Is asbestos still a problem in the world? A current review. *J Environ Manage* 2022;319:115716.
17. World Health Organization. Asbestos and health. WHO Fact Sheet. Geneva: WHO; updated 2023.
18. Frangioudakis Khatib G, Collins J, Otness P, Goode J, Tomley S, Franklin P, Ross J. Australia's on-going challenge of legacy asbestos in the built environment: a review of contemporary asbestos exposure risks. *Sustainability* 2023;15:12071.
19. U.S. Environmental Protection Agency. TSCA Risk Evaluation for Asbestos Part 2: Supplemental Evaluation Including Legacy Uses and Associated Disposals of Asbestos. Washington (DC): EPA; 2024.
20. Státní zdravotní ústav. Azbest – přehled zdravotních rizik [online]. Praha: SZÚ; 2022–2024.
21. GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 2020;396:1223–1249.
22. Franklin PJ, Reid A, Olsen N, de Klerk N, Brims F, Musk AW. The long-term burden of asbestos-related disease among Australian workers. *Occup Environ Med* 2022;79:1–7.

2 Azbest a jeho druhy

Ladislav Štěpánek

Úvod

Termín azbest je generické označení pro skupinu šesti různých vláknitých silikátových minerálů, které se přirozeně vyskytují v prostředí. Tyto minerály vznikají krystalizací roztavené horniny, která po ochlazení vytváří různé typy vláknitých křemičitanů. Azbest je definován jako minerál s asbestiformním habitem, což znamená, že se nachází ve svazcích vláken, která lze snadno oddělit od matečné horniny nebo štěpit na tenčí vlákna. Zdravotnické a regulační orgány definují azbestové vlákno jako částici, která má délku větší než 5 mikrometrů (μm) a poměr délky k šířce (tzv. aspektní poměr) alespoň 3 : 1. Některé definice upřesňují, že šířka vlákna musí být menší než 3 μm , aby bylo považováno za respirabilní, tedy schopné proniknout hluboko do plic. Azbestové minerály se dělí do dvou hlavních skupin na základě jejich krystalické struktury a fyzikálních vlastností: hadcové (hadcovité/serpentinní) a amfibolové [1,2].

2.1 Skupina serpentínů (hadcové azbesty)

Tato skupina zahrnuje pouze jeden, v minulosti komerčně využívaný druh, kterým je chryzotil. Chryzotil bývá v průmyslu běžně označován jako bílý azbest. Na rozdíl od amfibolových azbestů, které tvoří přímé jehlicovité krystaly, chryzotil se vyznačuje dlouhými, ohebnými a zakřivenými vlákny, která lze díky jejich textuře sprádat do textilií. Chemicky se jedná o hydratovaný křemičitan hořečnatý s ideálním vzorcem $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Chryzotil představuje přibližně 90–95 % veškerého azbestu historicky použitého v průmyslových výrobcích [1,2].

2.1.1 Krystalická struktura a polytypy

Základem chryzotilu je vrstevnatá struktura, složená z listů křemičitanových tetraedrů a oktaedrické vrstvy brucitu (hydroxidu hořečnatého). Protože rozměry těchto dvou vrstev nejsou identické, vzniká v krystalové mřížce pnutí, které způsobuje, že se tyto listy stáčejí do dutých trubiček, podobných mikroskopickým svitkům. Tyto trubičky, nazývané fibrily, mají průměr pouze kolem 20–50 nanometrů. Podle způsobu vrstvení těchto listů rozlišujeme tři hlavní strukturní polytypy: clino-chryzotil (nejběžnější forma), ortho-chryzotil a nejvzácnější para-chryzotil. Pro lepší představu si lze strukturu chryzotilu připodobnit k mikroskopickému svitku papíru. Je to v pod-

statě minerální deska, která se kvůli vnitřnímu napětí srolovala do nekonečně tenké a ohebné duté trubičky.

2.1.2 Fyzikální a chemické vlastnosti

Chryzotil disponuje výjimečnými technickými parametry, které z něj v minulosti učinily ideální průmyslový materiál:

- **Pevnost v tahu:** Jeho vlákna jsou extrémně silná, přičemž v přepočtu na hmotnost vykazují vyšší pevnost než ocel.
- **Tepelná odolnost:** Minerál je nehořlavý a vykazuje vysokou tepelnou stabilitu až do teploty přibližně 550 °C, kdy začíná uvolňovat strukturní vodu (dehydroxylační reakce), což je spojeno s rozkladem struktury minerálu. Bod tání chryzotilu se pohybuje kolem 1 500 °C.
- **Elektrické vlastnosti:** Je vynikajícím elektrickým izolantem s nízkou vodivostí.
- **Povrchový náboj:** Ve vodném prostředí vykazuje chryzotil na rozdíl od amfibolů kladný elektrostatický náboj (izoelektrický bod je při pH 11,8), což ovlivňuje jeho schopnost adsorpce jiných látek.
- **Chemická reaktivita:** Je vysoce odolný vůči zásaditým látkám, ale na rozdíl od amfibolových azbestů je citlivý na kyseliny, které z jeho struktury postupně vyplavují ionty hořčíku, čímž vlákna ztrácejí svou mechanickou pevnost.

2.1.3 Geologický výskyt a těžba

Chryzotil vzniká hydrotermální alterací a metamorfózou bazických vyvřelin bohatých na hořčík. Vyskytuje se buď v žilách, kde vlákna rostou kolmo ke stěnám puklin (cross-vein), nebo jako masivní ložiska krátkých vláken. Historicky patřily mezi největší světové producenty Rusko (přibližně 39 % světové produkce), Kanada, Čína, Brazílie, Kazachstán a Zimbabwe. Těžba probíhala převážně v otevřených lomech benchovými metodami. Vytěžená ruda se drtila a vlákna se oddělovala od matečné horniny pomocí pneumatické aspirace (odsávání vzduchem) a následného třídění v cyklonech [3].

2.1.4 Průmyslové využití a produkty

Díky své všestrannosti byl chryzotil použit v tisících aplikacích. Nejvýznamnější oblasti zahrnují:

- **Azbestocement:** Představoval zdaleka největší podíl na trhu (přes 80 %). Chryzotilová vlákna (obvykle 10–15 %) sloužila jako výztuž v cementové matici pro výrobu střešních desek (eternit), rour a panelů.
- **Třecí materiály:** Výroba brzdových obložení, spojkových lamel a převodových komponentů pro automobily a stroje.