

Přehledný referát

ŽÁROVZDORNÁ SILIKÁTOVÁ VLÁKNA

JAN LEHNER

*Státní výzkumný ústav sklářský, Hradec Králové,
pracoviště: Dělnická 27, 170 04 Praha 7*

1. ÚVOD

Žárovzdorná vlákna byla donedávna strategickým materiálem; chyběly veškeré informace a známá byla jen strohá data hlavních fyzikálních vlastností. Materiál s tak výbornými izolačními vlastnostmi při vysokých teplotách, s tak výbornými chemickými, mechanickými i optickými vlastnostmi se používal výlučně v oboru kosmonautiky, řízených střel, raket a ve vojenské, speciální a vysoce náročné technice.

Stále stoupající ceny a světový nedostatek všech druhů energií a intenzifikace všech zdrojů a zařízení se staly hybnou pákou k hromadnému průmyslovému využívání tohoto progresivního materiálu. Nejnaléhavější potřeba je v intenzivně se rozvíjejících a v energeticky i materiálově náročných oborech, jako jsou hutě, strojírenství, elektrotechnika, chemie a výroba stavebních hmot.

Tepelně odolné vláknité materiály zahrnují široký obor vláken do teplot 4000 °C. V následujícím pojednání uvádíme nejrozšířenější oblast, tj. obor žárovzdorných vláknitých materiálů odolných do 1500 °C, do dalšího připravovaného zpracování zahrneme vysoce žárovzdorné (super žárovzdorné) vláknité materiály (např. vlákna s vysokým obsahem Al_2O_3 , vlákna zirkoničitá, vlákna uhlíkatá, whiskry atd.).

2. ROZDĚLENÍ VLÁKEN

Vláknité materiály jsou suroviny, jejichž společným znakem monofilu je velká délka v poměru k jejich tloušťce, dále dostatečná pevnost a ohebnost. U nekonečných vláken se poměr blíží teoreticky nekonečnu, u stříže (konečných vláken) by měl být $> 10^2$.

Žárovzdorností vláknitých materiálů rozumíme schopnost vzdorovat vysokým teplotám, aniž by nastaly podstatné změny jejich užitných vlastností.

Od žárovzdorných materiálů se kromě žárovzdornosti vyžadují i další vlastnosti: objemová stálost při provozních teplotách, odolnost proti náhlým změnám teploty, částečná žáropevnost, tj. musí odolávat určitým zatížením za vysokých teplot, dostatečná chemická odolnost.

Rozsah žárovzdornosti u vláknitých materiálů je značný a je proto vhodné podle stupně žárovzdornosti rozdělit vláknité materiály na:

Žárovzdorné vláknité materiály s použitelností do 1500 °C

Vysoce žárovzdorné vláknité materiály s použitelností nad 1500 °C

Nejužívanější je třídění, ve kterém se bere za základ výchozí materiál, z něhož bylo vlákno vyrobeno.

Rozdělení není v zásadě správné, neboť v názvu přenášíme na vláknitý materiál určité stavy surovin, které se v mnoha případech ve vláknitém materiálu již nevyskytují. V naší i zahraniční odborné literatuře je však toto názvosloví běžné. V našem případě Keramická vlákna, Keramičeskoje volokno, Keramikkfaser, Ceramic Fiber, Fibre Ceramique, Fibra Céramica, Fibra die Ceramica.

Z tohoto hlediska rozdělujeme žárovzdorná vlákna do 4 hlavních skupin:

- | | | |
|--|---|--------------|
| 1. kovová | 2. křemenná | 3. křemičitá |
| | 4. keramická | |
| s odolností
do 1260 °C | s odolností
do 1500 °C | |
| a) kaolínová | a) hlinitokřemičitá
s vyšším obsahem Al_2O_3 | |
| b) hlinitokřemičitá se synt.
směsí | b) hlinitokřemičitá
s obsahem Cr_2O_3 | |
| c) bauxitová | c) hlinitokřemičitá
s obsahem ZrO_2 nad 5 % | |
| d) kyanitová | d) ostatní | |
| e) hlinitokřemičitá s vyšším
obsahem TiO_2 | | |
| f) hlinitokřemičitá s obsa-
hem ZrO_2 do 5 % | | |
| g) ostatní | | |

Vyloučíme-li vlákna kovová, můžeme považovat zbývající materiály za silikátové.

Všechna žárovzdorná vlákna jsou vlákna umělá, neboť jediný přirozený vláknitý materiál osinek nelze zařadit mezi žárovzdorné materiály, neboť jej lze trvale použít nejvýše do teploty 800 °C.

3. KŘEMENNÁ VLÁKNA

První křemenná vlákna vyrobená z taveniny SiO_2 předvedl M. Gaudin již v roce 1838, ale o vlákna nebyl vůbec zájem. Teprve v roce 1889 věnoval výrobě křemenných vláken pozornost prof. C. V. Boyes a potom i Sir Richard Threlfall. Oba jmenovaní se nevěnovali jen výrobě, ale hlavně aplikacím. Vlákna používali v přesných měřicích přístrojích. Zde využívali jejich vysoké pevnosti v tahu a v torzi, výbornou tvarovou relaxaci a chemickou odolnost [1].

O průmyslovou výrobu a hlavně zavedení hromadného využívání mají největší zásluhu H. C. Lacell a W. A. Shenton, kteří vynalezli a uskutečnili výrobu tenkých tyčinek z křemenného skla [2]. Pro výrobu tyčinek použili brazilského horského křišťálu. Pečlivě vybrané části křišťálu byly nejprve zahřívány asi 1 h do bílého žáru a potom ponořeny do destilované vody. Popraskané drobné vybrané kousky byly srovnány těsně vedle sebe a kyslíkovodíkovým plamenem nataveny do tyčinek. Tyto tyčinky potom sloužily jako polotovary pro výrobu nekonečných vláken nebo křemenné stříže. V Rusku se křemenným sklem i křemennými vlákny zabýval již M. V. Lomonosov a D. I. Vinogradov [3].

Po první světové válce i během druhé světové války vznikl v průmyslově vyspělých státech nový výrobní obor, zabývající se výrobou křemenných vláken z taveniny. Zde je možné jmenovat firmu Heraeus v Německu, Quartz Silice ve Francii, Thermal Syndicate v Anglii a v Americe firmy Glass Fibers Inc., Imperial Chemical Industries Ltd, Johns Manville, Owens-Corning, E. I. du Pont de Nemours, General Electric Co.

Renesanci křemenných vláken přinesla poválečná léta. Křemenná vlákna upoutala pozornost nejen svými mechanickými a žárovzdornými vlastnostmi a i vynikajícími optickými vlastnostmi.

3.1. Technologie výroby

Klasickou výrobní technologií, která se používá již téměř 150 let a která je stále aktuální, je metoda mechanického tažení z vhodného poloproduktu, např. tyčinky nebo trubičky. Metoda dvojího tažení se používá pro výrobu stříží a mikrovláknitých materiálů [4], [5].

Další základní způsob řešící výrobu kontinuálního vlákna z práškové směsi místo z poloproduktu je založen na jednoduchém technologickém postupu. Zařízení je řešeno tak, že vhodně určená prášková surovina přichází v uzavřeném prostoru do styku s destičkou zahřívanou odporově na vysokou teplotu. V destičce může být jeden nebo více otvorů náprstkovitého tvaru. Pod destičkou je ještě kyslíkovodíkový hořák, který zahřívá destičku zespodu a vytváří i vhodnou atmosféru pro tažení vláken. Vlákna jsou navíjena na otáčející se buben, umístěný pod tavicím zařízením.

Pro křemennou stříž se používá i další běžná metoda výroby vláken — odstředivá metoda. Křemenné trubičky průměru 6—4 mm jsou upnuty vertikálně do rotačních hlav. Trubičky se rychle otáčejí a zespodu na ně působí kyslíkovodíkový plamen; z roztavených konců trubiček odletují jemná křemenná vlákna [6]. Profesor Silverman a další patentovali celou řadu technologií a zařízení k výrobě křemenných i jiných žárovzdorných vláken a stříže [7], [8], [9].

Kromě uvedených klasických výrobních metod vznikly s vývojem optických vláken další speciální výrobní aplikace, z nichž alespoň dvě uvádíme. Fa Standard Telephones et Cables Ltd [10] patentovala optické vlákno vyráběné tím způsobem, že se práškovým SiO_2 s ionty alkalického kovu a stabilizátory naplní vertikálně umístěná trubice z taveného SiO_2 a ta vytvoří obal optického vlákna. Práškový materiál se roztaví a vytvoří jádro. Trubice se vytahuje vertikálně ve vlákno. K tavení práškového SiO_2 se užívá indukčního ohřevu. Tavení tyčinkového poloproduktu se provádí plazmovým hořákem. Optická křemenná vlákna s odstupňovaným indexem lomu je možné vyrábět modifikovaným ukládáním par. Materiál jádra z SiO_2 dopovaného např. germaniem je ukládán v mnoha vrstvách. Index lomu je odstupňován změnou složení vrstev předepsaným způsobem během ukládání. Struktura tohoto nánosu je sledována jak v tyčinkovém poloproduktu, tak i v taženém vlákne optickou mikroskopií a ve vlákne ještě impulsovým disperzním měřením. Podmínkou výsledného odstupňování indexu lomu ve vláknech je přesné rozdělení dopující látky v poloproduktu (preformě) (11).

3.2 Fyzikálně chemické vlastnosti

Křemenná vlákna patří mezi vláknité materiály s vysokou tepelnou a chemickou odolností, s velmi dobrými mechanickými a izolačními vlastnostmi a výbornými optickými vlastnostmi.

Jako vláknité materiály z jednosložkového skla našly bohaté a důležité uplatnění v technice. Určitou nevýhodou používání v běžné technické praxi je jejich vysoká cena, která je ovlivněna náročnou výrobní technologií.

Křemenné vláknité materiály je možné používat pro dlouhodobé střídavé tepelné namáhání až do teploty 1100 °C, krátkodobě až do teploty 1200 °C. Můžeme je použít trvale i pro teploty 1300 °C, nesmí však být potom ochlazeny pod teplotu 300 °C. Vlákná zahřátá až do teploty 850 °C snesou okamžité ochlazení na 0 °C. Křemenná vlákná lze aplikovat i pro velmi nízké teploty —200 °C. Křemenná vlákná odolávají téměř všem kyselinám, vyjma kyseliny fluorovodíkové, koncentrované kyseliny fosforečné, kyseliny chromsírové a silným louhům. Křemenné vláknité materiály vynikají vysokou pružností, vysokou pevností v tahu a torzi, malou tepelnou roztažností a velkou stabilitou. Tažnost křemenných vláken je nepatrná.

Velmi dobré jsou jejich elektroizolační vlastnosti při všech běžných frekvencích a napětích až do teplot 1000 °C. Pro teploty 700—1100 °C jsou materiály z křemenných vláken dobrým tepelně i zvukově izolačním i výborným filtračním materiálem. Křemenná optická vlákná s přísně dodržovanými vysokými parametry čistoty mají vynikající optické vlastnosti. Křemenné vláknité materiály mají vynikající světelný průstup, protože jak absorpce světelné energie, tak vnitřní rozptyl jsou velmi nízké. Rozptyl světla ve vláknách je způsoben hlavně přítomností nečistot. Tyčinky z křemenného skla o délce 1 m přenášejí v podélném směru 90 % viditelného záření, zatímco nejlepší optická skla jen 30 %. Velmi dobrý je i průstup křemenných vláken v oblasti ultrafialového a infračerveného záření a vlákná se průchoodem tohoto záření nezahřívají. Křemenná vlákná mají ze všech silikátových vláknitých materiálů nejnižší index lomu.

Informativní hodnoty fyzikálně chemických vlastností křemenných vláken udává tabulka I.

Tabulka I

Přehled informativních fyzikálně chemických vlastností křemenných vláken

Měrná hmotnost ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2,21
Tavicí teplota (°C)	nad 1750
Bod měknutí (softening point) (°C)	1660
Horní chladicí teplota (Annealing point) (°C)	1140
Dolní chladicí teplota (Strain point) (°C)	1070
Tepelná odolnost (trvalá) (°C)	max 1100
Střední měrné teplo (20—1000 °C) ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,96
Měrné teplo při 200 °C ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,83
400 °C	0,92
600 °C	0,96
800 °C	1,00
1000 °C	1,04
Součinitel tepelné vodivosti plstí ze submikronových vláken a objem. hmotnosti 50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při středních teplotách 20 °C	0,046
400 °C	0,191
700 °C	0,343
Youngův modul pružnosti (MPa)	$66,680 \cdot 10^3$
Tvrdost dle Mohsovy stupnice	7
Pevnost v tlaku (MPa)	$3,45 \cdot 10^3$
Průměrná pevnost v tahu	
10 μm vlákna při 20 °C (MPa)	$2,45 \cdot 10^3$
při 900 °C (MPa)	$1,96 \cdot 10^3$
Střední lineární souč. teplotní roztažnosti (20—1000 °C)	$0,58 \cdot 10^{-6}$
(20—200 °C)	$0,54 \cdot 10^{-6}$
Dielektrická konstanta	3,80

Měrný elektrický odpor při 20 °C (MΩ cm)	5 · 10 ¹²		
Index lomu pro draslíkovou čáru	1,458		
Střední disperze C—F	0,00674		
Tažnost (%)	0,7		
Chemické složení v % hmotnosti:			
SiO ₂	99,9780	CaO	0,0032
Fe ₂ O ₃	0,0010	K ₂ O	0,0007
TiO ₂	0,0001	Na ₂ O	0,0022
Al ₂ O ₃	0,0150	Li ₂ O	0,0003

4. KŘEMIČITÁ VLÁKNA S VYSOKÝM OBSAHEM SiO₂ PŘIPRAVENÁ VYLUHOVÁNÍM

Dalším typem vláken s vysokou tepelnou odolností jsou křemičitá vlákna s vysokým obsahem SiO₂ pohybujícím se přibližně na 95–98 % hmotnosti. Vláknité materiály se získávají vyluhováním vláken vyrobených obvykle ze skloviny soustavy R₂O—B₂O₃—SiO₂, tzv. vycorového typu (12).

Křemičitá vlákna s vysokým obsahem SiO₂ jsou svými vlastnostmi velmi podobná křemenným vláknům. Křemičitá vlákna se začala vyrábět během druhé světové války v souvislosti s vývojem proudových motorů. Za normálních podmínek dosahuje teplota spalín 700–1100 °C. Máloměrý materiál mohl tyto podmínky vydržet. Křemičitá vlákna s obsahem 95–98 % SiO₂ s dostatečnou bezpečností splnila těžké podmínky a prodejní cena a výrobní náklady jsou nižší než u vláken křemenných. Hlavními světovými výrobci křemičitých vláken je ve Velké Británii firma British Refrasil Company, Shillington a v USA firma H. J. Thompson Fiber Glass Company, Los Angeles.

4.1. Suroviny a výroba

Vláknité výrobky z křemičitých vláken s vysokým obsahem SiO₂ získáme tím, že nejprve ze sklovin vycorového typu vytáhneme vhodnou vláknářskou technologií příslušný typ vláken. Vlákna dále zpracujeme na příslušné výrobky, např. příze, tkaniny, plstě, vatu standardní, popř. z mikronových a submikronových vláken. Vlákna popř. výrobky se dále vyluhují. Ve sklech uvedeného typu vznikají při loužení objemové změny, které jsou závislé na složení skla a hlavně na obsahu alkálií. Vyluhováním jsou odstraněny ze skla alkalické boritany a do struktury skla vstupuje voda za vzniku pevného gelu. Vysušením se odstraní vázaná voda, nastává další objemové smrštění a v konečném stadiu vzniká křemičité sklo s 95 až 98 % kyslíčnicku křemičitého.

Současné zkušenosti s vyluhovacím procesem vláken, jehož základní princip zůstává nezměněn, jsou uvedeny v literatuře. [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

4.2. Vlastnosti, výrobky a jejich použití

Typické sklo používané k průmyslové výrobě křemičitých vláken s vysokým obsahem SiO₂ připravené vyluhováním má chemické složení v % hmot.

SiO ₂	53,1	CaO	15,4
Al ₂ O ₃	15,6	MgO	4,5
Fe ₂ O ₃	0,4	B ₂ O ₃	10,0

Po konečné úpravě mají křemičitá vláknité materiály následující chemické složení v % hmot.:

SiO ₂	98,5	CaO	0,04
Al ₂ O ₃	1,04	MgO	0,09
Fe ₂ O ₃	0,03	B ₂ O ₃	0,04

zbývajících 0,26 je vázaná voda.

Následkem chemického působení na strukturu vláken při vyluhování je pevnost v tahu vyluhovaných vláken nižší proti vláknům před vyluhováním. Vlákná ztrácejí 1/3 až 2/3 své původní pevnosti. Pro určité použití je tato pevnost dostačující, v případě že jsou vyžadovány vyšší pevnosti, je vhodná kombinace se speciálními žárovzdornými vlákny kovovými. Jedny z nejlepších slitin, které slouží k tomuto účelu, jsou vytvořeny na bázi Cr—Si—Mg nebo Cr—Cu. Obě slitiny jsou odolné proti korozi a mohou být vystaveny stejným teplotám jako křemičitá vlákna. Utvořenou silikáto-kovovou přízi je možno zpracovávat i vyluhováním.

Křemičitá vlákna mají barvu bílou, tkané výrobky jsou ohebné a jsou vzhledem velmi podobné tkaninám ze skleněné příze. Průměrná tloušťka nekonečných vláken i stříže se pohybuje od 5 do 10 μm . Jsou-li vláknité materiály trvale vystaveny teplotám nad 980 °C, dochází k částečné rekrytalizaci. Tato přeměna má za následek

Tabulka II

Měrný elektrický odpor tkanin z křemičitých vláken

Tloušťka tkaniny mm	Plošná hmotnost tkaniny g . m ⁻²	Teplota °C	Měrný elektrický odpor ohm . cm
1,0	560	20	5×10^8
1,0	560	200	2×10^{13}
1,0	560	500	5×10^9
1,0	560	900	5×10^7
0,5	280	20	3×10^7
0,5	280	200	5×10^{12}
0,5	280	500	2×10^9
0,5	280	900	2×10^7

Tabulka III

Měrná tepelná vodivost plsti z křemičitých vláken
o objemové hmotnosti 60 kg . m⁻³ a 100 kg . m⁻³

Měrná tepelná vodivost v W . m ⁻¹ . K ⁻¹	Teplota v °C			
	200	400	600	800
pro obj. hmotnost 60 kg m ⁻³	0,055	0,110	0,180	0,260
100 kg m ⁻³	0,050	0,098	0,135	0,190

částečné ztvrdnutí, avšak ostatní fyzikální vlastnosti se zásadně nemění. Odolnost vůči tepelným změnám je velmi dobrá. Materiál zahřátý na teplotu cca 1000 °C lze ihned ochladit. Nízký je koeficient tepelné roztažnosti. Křemičitá vlákna s vysokým obsahem SiO₂ jsou velmi dobrým elektrickým izolantem. Je to jediný ohebný textilně zpracovaný materiál, který může sloužit k elektrické izolaci až do teploty 1000 °C. Elektrický odpor tkanin z křemičitých vláken je uveden v tabulce II.

Dobré jsou i tepelně izolační vlastnosti, zvláště u sendvičových vrstvených kombinovaných izolací, ve kterých vrstva plsti z křemičitých vláken se doplňuje aluminovou fólií na studené straně. Tepelnou vodivost udává tabulka III.

Křemenná i křemičitá vlákna mají značné použití v současném fyzikálním výzkumu a v přístrojové technice, v oboru rentgenového, neutronového i kosmického záření. Křemičitých vláken vyrobených ze skel vycorového typu se používá i při výrobě vláknitých vlnovodů.

Z křemičitých vláken se dnes běžně vyrábí volné vlákno (vata), plsti, příze, tkaniny, tkanice, kordy a bužírky (punčošky).

5. KERAMICKÁ VLÁKNA

Obě skupiny žárovzdorných vláken, jak vlákna křemenná tak vlákna křemičitá s vysokým obsahem SiO_2 připravená vyluhováním, se dobře uplatňují v současné výrobě i průmyslové praxi. Nedosáhly však dosud masového průmyslového využití, a to hlavně pro svou vysokou cenu. Zájem se soustředil na výrobu vláken, která by měla přibližně stejné vynikající vlastnosti, avšak byla by cenově přístupnější. Těmto podmínkám nejlépe vyhovují vlákna tažená z roztavených keramických surovin. Jak již bylo uvedeno, keramická vlákna dle teploty použití zařazujeme do dvou hlavních skupin: vláknité materiály do 1260°C a do 1500°C .

5.1. Vlastnosti surovin pro výrobu keramických vláken

Na suroviny pro výrobu keramických vláken jsou kladeny vysoké nároky. Suroviny musí být dostupnými technickými prostředky dobře tavitelné, v roztaveném stavu musí mít poměrně malou viskozitu, tavenina musí mít vhodné vlastnosti k rozvláknění, vyrobená vlákna musí být žárovzdorná, poměrně dlouhá, málo křehká a nesmí obsahovat mnoho nevláknitých příměsí (granálí). S ohledem na tyto podmínky se hlavní pozornost obrátila k materiálům na bázi čistého kyslíčnicku křemičitého a hlinitokřemičitanů. K základním surovinám se někdy přidávají další složky, které usnadňují tavení a rozvláknění nebo dávají vláknům odlišné vlastnosti. Tyto složky jsou však často přítomny v základních surovinách jako doprovodné nečistoty. Pro informaci uvádíme vliv některých kyslíčnicků na vlastnosti taveniny a vláken.

Kyslíčnick křemičitý SiO_2

je hlavní sklotvornou složkou, taje při teplotě 1710°C , tvoří taveninu s vysokou viskozitou. Za vysokých teplot se snadno redukuje na SiO , který z taveniny těká. Má dobrou odolnost vůči vodě i chemickým činidlům s výjimkou kyseliny fluorovodíkové a fosforečné. Má poměrně malou tepelnou roztažnost a z toho vyplývá odolnost ke změnám teploty. Vlákna jsou poměrně dlouhá a mají větší průměrnou tloušťku. Granálie jsou větších rozměrů. Tavenina vyžaduje větší energii k rozvláknění.

Kyslíčnick hlinitý Al_2O_3

taví se při teplotě 2050°C . Zvyšuje mechanickou pevnost, zmenšuje tepelnou roztažnost, zlepšuje tepelnou odolnost. Zvyšuje modul pružnosti a odolnost vůči chemikáliím. Při náhradě za kyslíčnick křemičitý zvyšuje viskozitu taveniny. Vlákna

jsou kratší a s menší průměrnou mikronáží. Vláknité materiály obsahují velké množství granulí menších průměrů.

Kysličník boritý B_2O_3

Kysličník boritý je další sklotvornou složkou a z části může nahradit kysličník křemičitý. Snižuje povrchové napětí taveniny, čímž usnadňuje tvarování, zlepšuje mechanické vlastnosti. Výborný kysličník pro výrobu vláken působí téměř na všechny vláknotvorné vlastnosti taveniny. Pro výrobu žárovzdorných vláken lze ho použít jako taviva max. do 2—3 % hmot.

Kysličníky alkalických kovů Na_2O , K_2O , Li_2O

působí jako silná taviva. Podstatně snižují viskozitu taveniny, zvětšují tepelnou roztažnost a zhoršují chemickou i tepelnou odolnost. Snižují elektrické izolační schopnosti a v tavenině jsou hlavními nositeli elektrické vodivosti.

Kysličníky žíraných zemin CaO , MgO , BaO

Malý obsah CaO zlepšuje mechanické vlastnosti a do jisté míry i tavitelnost. Za vyšších teplot jsou však taveniny s obsahem CaO rychle řídce tekuté, velmi „krátké“, silně náchylné k odskelnění a po zchladnutí křehké.

Kysličník hořečnatý při náhradě za CaO do 5 % zlepšuje tavitelnost a činí taveninu „delší“, snižuje nebezpečí odskelnění a zlepšuje mechanickou, tepelnou i chemickou odolnost.

Kysličník barnatý tvoří „delší“ taveninu, již při malém množství usnadňuje tavení i tvarování, zhoršuje tepelnou odolnost. Je dražší surovinou než CaO nebo MgO .

Kysličníky železa FeO , Fe_2O_3

Vzájemný poměr kysličníku železnatého a železitého je závislý na podmínkách při tavení. Fe_2O_3 silně zesiluje zabarvení taveniny zvláště za přítomnosti TiO_2 , neboť se tvoří intenzivně barvicí skupina $Fe—O—Ti$. Jinak působí kysličníky železa jako tavivo, snižující viskozitu taveniny.

Kysličník titaničitý TiO_2

Stejně jako kysličník železa zlepšuje tavitelnost a snižuje viskozitu taveniny. Za redukčních podmínek způsobuje intenzivní šedomodré zabarvení. Na účinek v přítomnosti Fe_2O_3 bylo upozorněno v předešlém odstavci.

Kysličník zirkoničitý ZrO_2

Z kysličníku zirkoničitého taveného za vysokých teplot lze získat průhledné sklo. Kysličník zirkoničitý zvyšuje odolnost vláknitých materiálů proti náhlým změnám teploty a zvyšuje jejich chemickou odolnost. Zvyšuje elektrickou vodivost taveniny. Přídavek do 5 % hmot. k základním kysličníkům (SiO_2 , Al_2O_3) prodlužuje vlákna a zvětšuje jejich průměrnou tloušťku. Přídavek ZrO_2 7,5 až 15,0 % hmot. k základním kysličníkům zvyšuje tepelnou odolnost.

Kysličník chromitý Cr_2O_3

ve dvousložkových taveninách pro výrobu žárovzdorných vláken působí kysličník chromitý při vysokých teplotách jako tavivo, snižuje tavicí teplotu a prodlužuje interval zpracování. Při vhodném poměru SiO_2 , Al_2O_3 a s přídavkem 3—5 % hmot. Cr_2O_3 zvyšuje teplotní použitelnost vláknitých materiálů.

5.2 Keramická vlákna do 1260 °C

5.21. Kaolínová vlákna

Nejrozšířenější surovinou k výrobě žárovzdorných keramických vláken je kaolín. Americké firmy, např. Morganite Ceramic Fibres a další používají kaolínů z Georgie, které mají následující průměrné chemické složení v % hmotnosti (20)

SiO ₂	45,30	MgO	0,04
Al ₂ O ₃	39,10	K ₂ O	0,15
TiO ₂	1,50	Na ₂ O	0,10
Fe ₂ O ₃	0,30	H ₂ O váz.	13,70
CaO	0,15		

Firma Morganite Ceramic Fibres udává pro svá kaolínová vlákna Triton Kaowool chemické složení v % hmotnosti:

SiO ₂	50—54	CaO	0,1—1,0
Al ₂ O ₃	43—47	MgO	stopy
Fe ₂ O ₃	0,8—1,8	Na ₂ O	0,2—2,0
TiO ₂	1,2—3,5	B ₂ O ₃	0,06—0,1

Chemickým rozбором (21) bylo zjištěno následující chemické složení v % hmotnosti: SiO = 51,92, Al₂O₃ = 44,09, TiO₂ = 1,65, Fe₂O₃ = 0,55, MgO = 0,04, Na₂O = 1,16, K₂O = 0,51.

Uvedený typ vláken má tyto fyzikální vlastnosti (22):

průměrná tloušťka vláken	2,8 μm
délka vlákna max.	250 mm
délka vláken prům.	100 mm
obsah granálí (velikost neudána)	8 % hmot.
měrná hmotnost	2,56 g . cm ⁻³
pevnost v tahu	1,37 . 10 ³ MPa
Youngův modul pružnosti	125,44 . 10 ³ MPa
maximální teplota použití	1260 °C
tavicí teplota	1760 °C
tvrdost podle Mohsovy stupnice	6

Další výrobce, např. firma Cape Insulation, uvádí pro vlákna CAPOFLEX vyráběná z kaolínů následující chemické složení v % hmot.: SiO₂ = 45,8, Al₂O₃ = 51,70, Fe₂O₃ = 0,86, TiO = 0,23, Na₂O + K₂O = 1,18.

Ostatní fyzikální vlastnosti jsou přibližně stejné jako u předcházejícího typu TRITON KAOWOOL.

Pro kaolínová vlákna vyráběná v SSSR pod názvem „Vata kaolinovo costava“ uvádí Caenko (23) chemické složení v % hmot.:

SiO ₂	48,16	CaO	0,14
Al ₂ O ₃	50,33	MgO	0,04
Fe ₂ O ₃	0,13	Na ₂ O	0,32

Dále jsou v technických podmínkách uvedeny následující technické hodnoty: (24)

střední průměr vláken max. do	4 μm
obsah granálí větších 0,5 mm max. do 5 % hmot.	
objemová hmotnost v nestlačeném stavu ihned po	

rozvláknění max. do	30 kg . m ⁻³
teplota tavení min.	1750 °C
trvalé použití až do mezních hodnot	—60 °C + 1100 °C
koefficient tepelné vodivosti při objemové hmotnosti 100 kg/m ³	
při střední teplotě +100 °C max.	0,053 W . m ⁻¹ . K ⁻¹
při střední teplotě +400 °C max.	0,163 W . m ⁻¹ . K ⁻¹
garantované chemické složení v % hmot.	SiO ₂ 45—55
	Al ₂ O ₃ 55—54
	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ min. 96

Chemickým rozbořem kaolínového vlákna SSSR byly zjištěny tyto hodnoty [21]: SiO₂ = 49,19, Al₂O₃ = 48,16, Fe₂O₃ = 0,07, MgO = 0,04, Na₂O = 1,81, K₂O = 54 % hmotnosti.

V Československu byl ověřen pro výrobu vlákna kaolínového typu hlavně pálený kaolín z Horní Břízy a novostrašecký pálený lupek NP Extra. Chemické složení je uvedeno na další tabulce IV.

Tabulka IV
Chemické složení čs. surovin pro vlákna kaolínového typu
v % hmotnosti:

	Lupek NP Extra	Kaolín HB nepálený	Kaolín HB pálený
SiO ₂	53,0	50,9	56,6
Al ₂ O ₃	42,0	34,2	38,2
Fe ₂ O ₃	1,7	0,7	0,8
TiO ₂	1,2	0,9	1,1
MgO	≅ 1,1	0,2	0,3
CaO		0,3	0,4
Na ₂ O			
K ₂ O	≅ 1,0	≥ 1,3 zbytek H ₂ O váz.	≥ 1,5

Kromě shora uvedených dvou základních surovin byly ověřeny ještě další kombinace novostrašeckého lupku s dolomitem a magnezitem atd. Rezistex LD byl utaven ze směsi 85 hmot. dílů lupku a 30 hmot. dílů nepáleného dolomitu, Rezistex LM byl utaven z kmence, který obsahoval 93 hmot. dílů lupku a 7 hmot. dílů magnezitu.

Tabulka V
Chemické složení vláken Rezistex v % hmotnosti:

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
Rezistex L	48,7	46,2	2,57	1,20	0,28	0,13	0,75
Rezistex LD	41,8	39,9	2,12	2,33	8,17	4,29	0,92
Rezistex LM	44,4	46,4	0,70	1,35	0,40	3,45	3,30
Rezistex K	48,7	46,2	0,30	1,20	0,70	0,45	2,40

Všechny suroviny pro žárovzdorné vláknité materiály kaolínového typu byly taveny v elektrické obloukové peci a rozfukovány parní dyšnou o tlaku 0,6—0,9 MPa. Chemické složení vyrobených vláken je uvedeno na tabulce V.

Vyrobená vlákna měla průměrnou mikronáž 3—4 μm , podíl granálií větších 0,5 mm nepřevyšoval 5 % hmotnosti. Vláknitý materiál byl našedivělý. Důležitá je tepelná odolnost vláken. Nejnižší odolnost měla vlákna vyrobená ze směsi lupku a dolomitu (LD). U těchto vláken dochází již při teplotě 850 °C k povrchovému natavení vláken, nelze je tedy zařadit do žárovzdorných vláken. Vláknina LM vyrobená z 93 % lupku a 7 % MgCO_3 mají tepelnou odolnost cca do 1100 °C. Nejvyšší tepelnou odolnost (~ 1260) mají vlákna vyrobená z lupku (L) a kaolínu (K) bez přísad.

5.22. Hlinitokřemičitá vlákna ze syntetických směsí

Dlouholetý vývoj v oblasti hlinitokřemičitých vláknitých materiálů na bázi syntetických směsí se ustálil celosvětově na vláknitých materiálech, jejichž hlavní složkou jsou vysoce čistý SiO_2 a Al_2O_3 . Ostatní složky, které se ve vláknech objevují, jsou pouze nežádoucí nečistoty v použitých surovinách. V tabulce VI uvádíme chemické složení vláken různých výrobců.

Tabulka VI

Chemické složení hlinitokřemičitých vláken ze syntetických směsí v % hmotnosti

výrobek	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	B_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
1 Rezistex AS	54	44	0,10		stopy	0,35	0,05	0,65
2 Fiberfrax 1	51,3	47,7	0,02	0,15				0,3
3 Kerlane 1	48—50	46—48	0,2—0,3		0,05—0,1	0,1—0,3		0,3—0,5
4 Kerlane 2	52	46	0,1		0,1	0,3		0,5
5 Fiberfrax 2	51,3	47,2		0,5				0,3—0,5
6 Fiberfrax	51,2	47,4		0,7				0,7
krátká vl.								
7 Fiberfrax 3	53,3	45,3	0,1	0,4	0,1	0,5		0,5

Fiberfrax 1 — výrobek fy The Carborundum Comp. Ltd., St. Helens, Anglie

Kerlane 2—3 — výrobek fy Société Européenne des Produits Réfractaires, Neuilly, Francie

Fiberfrax 2 — výrobek by Carborundum Werke GmbH, Düsseldorf, NSR

Fiberfrax 3 — výrobek fy Carborundum Company of Niagara Falls

Hlinitokřemičitá vlákna vyráběná ze syntetických směsí mají fyzikálně chemické vlastnosti velmi blízké, a proto uvádíme dále souhrnné jejich průměrné hodnoty.

Barva vláknitého materiálu je bílá, některá vlákna mají šedivý odstín. Výrazně se to projevuje v barvě granálií, které mají podstatně tmavší šedivou až šedivě-černou barvu. Průměrná tloušťka vláken se pohybuje od 2 do 4 μm .

Průměrná délka vláken je 20—30 mm. Někteří výrobci rozlišují krátkovláknitou stříž (např. Fiberfrax) do 38 mm a dlouhovláknitou stříž od 12 do 250 mm. Měření délky žárovzdorných vláken na základě dosud používaných metod je nereprodukovatelné a nepřesvědčivé a uvedená data nutno brát jako informativní. Měrná hmotnost hlinitokřemičitých vláken se pohybuje od 2,55 do 2,65 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Obsah granálií větších 0,5 mm v nečistěném vlákně je 5—8 % hmotnosti. Obsah všech granálií nad 0,2 mm se pohybuje od 20 do 30 % hmotnosti. V čistěném volném

vlákně (vatě) je obsah granálíí $> 0,2$ mm podstatně menší a pohybuje se od 2 do 5 % hmotnosti.

Měrná pevnost v tahu monofilu (MPa) $1,40 \cdot 10^3$

Youngův modul pružnosti (MPa) $125 \cdot 10^3$

Tvrdoost podle Mohsovy stupnice 6

Měrné teplo pro vláknitý materiál o průměrné mikronáži $3 \mu\text{m}$ a objemové hmotnosti $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ udává tabulka VII.

Tabulka VII

Měrné teplo hlinitokřemičitých vláknitých materiálů v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	20	100	200	300	400	500
Měrné teplo	0,83	0,87	0,92	0,96	1,00	1,04
Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	600	700	800	900	1000	
Měrné teplo	1,08	1,13	1,13	1,13	1,13	

Tepelná vodivost je uvedena na tabulce VIII. Na součinitele tepelné vodivosti nemá podstatný vliv zpracování vláken, takže izolační schopnosti volných vláken (vaty), plstí, desek, tvarových kusů jsou při stejných objemových hmotnostech

Tabulka VIII

Měrná tepelná vodivost hlinitokřemičitých vláknitých materiálů

Objem hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Měrná tepelná vodivost v $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při středních teplotách				
	200	400	600	800	1000
50	0,062	0,110	0,182	0,265	0,395
75	0,060	0,098	0,156	0,220	0,328
100	0,058	0,082	0,126	0,190	0,290
125	0,055	0,076	0,114	0,166	0,242
150	0,053	0,072	0,106	0,151	0,215
200	0,049	0,070	0,100	0,140	0,198
300	0,046	0,065	0,089	0,119	0,151
400	0,043	0,063	0,084	0,108	0,130

Tabulka IX

Délková smrštivost keramických vláken v % při teplotě 1260°C :

Doba zahřívání v min	obj. hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$		
	64	96	128
5	3,6	4,5	3,7
10	4,3	4,9	3,6
15	5,0	4,1	4,5
30	5,1	7,4	4,2
60	5,7	6,1	5,2

a teplotách přibližně stejné. Tepelná odolnost pro trvalý provoz je uváděna pro většinu hlinitokřemičitých vláken 1260 °C. Tyto hodnoty nutno brát rezervovaně. Doporučujeme použití do max. teploty 1200 °C. Odolnost vůči teplotním změnám je velmi dobrá. Materiály lze zahřát na teplotu 850 °C a prudce ochladit na teplotu 20 °C.

Hlinitokřemičité vláknité materiály vykazují délkovou smrštitivost. Smrštitivost se objevuje po vychladnutí na určitou teplotu poprvé zahřátého materiálu a hodnoty jsou uvedeny v tabulce IX.

5.23. Bauxitová vlákna

V Americe a dalších zemích se používá k výrobě žárovzdorných vláken bauxitu. Využívá se jednak vlastní produkce bauxitu, jednak dovoz hlavně z Guiney. V Anglii byl podán první patent na výrobu bauxitových vláken (25). Typické chemické složení bauxitu je následující:

Al ₂ O ₃	58—60 %	Fe ₂ O ₃	1,5—2,0 %
SiO ₂	1,5—5,0 %	zbytek H ₂ O váz.	
Měrná hmotnost	2,3—2,5 g . cm ⁻³ .		

Čistý surový bauxit nelze použít pro výrobu vláken. Nejprve je nutné jej přetavit v elektrické peci a potom přidat určité množství SiO_2 . Takto vzniklá tavenina je celkem dobře tekutá, aby se dala v tenkém praménku dávkovat a rozvláknovat. Vlákná obsahují 30 až 40 % SiO_2 , zbytek tvoří Al_2O_3 a nečistoty. Část nečistot se dá odstranit redukčním tavením v elektrické peci, v každém případě snižují nečistoty tepelnou odolnost. Bauxitová vlákna jsou velmi krátká a obsahují značné množství malých granálií. Používají se do teploty 1100 °C. Bauxit se dále používá ve směsi s kalcinovaným šamotovým jílem a kaolínem (26).

Obvyklá je směs v % hmotnosti	
Kalcinovaný bauxit	56,7
Kalcinovaný šamotový jíl	32,0
Kaolín	20,3

Po utavení a rozvláknění získáme poměrně dlouhé vlákno dobré kvality s následujícím chemickým složením v % hmotnosti

Al_2O_3	68,1
SiO_2	26,5
Fe_2O_3	2,1
TiO_2	2,7

Vláknité materiály mají šedivou barvu a vzhledem k značnému obsahu nečistot se dají trvale použít jen do 1100 °C.

5.24. Kyanitová vlákna

Hlinitokřemičité materiály jako kyanit, sillimanit a andalusit používané hojně v hutných žárovzdorných materiálech dávají svým chemickým složením dobré předpoklady pro výrobu žárovzdorných vláken. V průmyslové výrobě bylo hlavně využito kyanitu ($3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$), jehož bohatá ložiska jsou v Anglii a v Africe. Chemické složení kolísá podle naleziště [27], jak je uvedeno na tabulce X.

Měrná hmotnost kyanitové suroviny se pohybuje od 3,5 do 3,7 g . cm⁻³, tvrdost přibližně 4,7 Mohsovy stupnice, teplota tavení přibližně 1800 °C.

Suroviny vhodné granulace se taví v elektrické peci, a to tak, že se ke 100 dílům přírodního minerálu přidává 5 až 12 dílů SiO_2 (28).

Tabulka X
Chemické složení kyanitů v % hmotnosti :

	Indie I	Indie II	Kenya
SiO ₂	36,00	33,02	40,45
Al ₂ O ₃	60,40	59,12	56,90
TiO ₂	1,70	5,70	0,90
Fe ₂ O ₃	0,28	0,28	0,20
CaO	0,20	0,54	0,12
MgO	0,21	0,30	0,35
ztráta žháním	1,00	0,80	0,84

Firma Johns Manville označuje výrobky z kyanitových surovin Thermoflex. Chemické složení v % hmotnosti vláken Thermoflex je následující:

Al ₂ O ₃	42—44
SiO ₂	50
TiO ₂	4—6
Fe ₂ O ₃	0,3
Na ₂ O + K ₂ O	1,6

Vlákna mají průměrnou tloušťku 2—5 μm , vata v nestlačeném stavu hmotnost 60—70 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a max. trvalou použitelnost do 1100 °C.

Firma Johns Manville používá pro rozvláknování odstředivou metodu s několika rozvláknovacími kotouči a horizontální rotační osou [6].

5.25. Vlákna z titaničitých strusek

Značné množství titanové strusky, která byla prakticky odpadem, vedla k výrobě tříšlžkových žárovzdorných vláken s obsahem TiO₂. Používané titanové strusky mají průměrné chemické složení v % hmotnosti.

Al ₂ O ₃	73—75
TiO ₂	22—24
FeO	1,0—1,5
SiO ₂	0,10—0,20
ZrO ₂	0,05—0,10

Vsázka je složena z 50ti hmotnostních dílů rozenleté titanové strusky, 50ti hmotnostních dílů SiO₂ (sklářského písku) a 1 1/2 dílu rozenletého boraxového skla (Na₂B₄O₇). Vsázka se taví v elektrické obloukové peci a tavenina je rozvláknována přehřátou parou. Vyrobená vlákna mají šedivou barvu s tmavými granáliemi a následujícím chemickým složením v % hmotnosti:

SiO ₂	46,99	Fe ₂ O ₃	0,43
Al ₂ O ₃	43,19	Na ₂ O	0,56
TiO ₂	7,55	B ₂ O ₃	1,28

Vláknitý materiál má tepelnou odolnost 1100 °C, povrch vláken se začíná natavovat při teplotě 1600—1680 °C, má dobrou chemickou odolnost. Patentová literatura (29) uvádí rovněž, že vysoce kvalitních vláken lze docílit použitím vyššího obsahu TiO₂, např. SiO₂ = 40 % hmot., Al₂O₃ = 20 % hmot., TiO₂ = 40 % hmot.

5.26. Hlinito-křemičitá vlákna s obsahem ZrO_2 do 5 %

Vlákna hlinitokřemičitozirkoničitá mají dvojí použití; jednak jako materiály dlouhovláknité, jednak jako materiály s vyšší tepelnou odolností.

Výroba delších vláken je zpravidla prováděna odstředivým způsobem jako u vláken kyanitových. Všeobecně můžeme konstatovat, že tříšložkové vláknité materiály s obsahem ZrO_2 vhodné k rozvláknování jak odstředivým způsobem, tak i dyšnou, se pohybují v rozsahu:

- 40—60 % hmot. SiO_2 ,
- 20—45 % hmot. Al_2O_3 ,
- 3—20 % hmot. ZrO_2

Firma Carborundum (30) vyrábí hlinitokřemičitá vláknité materiály s obsahem ZrO_2 3—5,0 % hmot., a to dva druhy materiálů — jemný a hrubý. Materiály se rozlišují jedinež průměrnou tloušťkou vláken. Z prospektového materiálu i z našeho rozboru jsme zjistili, že firma stále laboruje v chemickém složení a hledá optimální variantu.

Např. chemické složení vláken „Fiberfrax — dlouhá vlákna“ v % hmotnosti činí:

	dle [31]	dle [30]	dle našeho rozboru
Al_2O_3	51,3	43,9	44,43
SiO_2	45,3	50,1	51,20
ZrO_2	3,4	5,1	3,36
Fe_2O_3			0,08
TiO_2			0,05
CaO			0,36
MgO			st.
Na_2O			0,31
B_2O_3		0,15	

Jmenovaná firma dále uvádí fyzikální vlastnosti:

barva vláken	1 bílá
délka vláken	4 2,0—254 mm, $\varnothing$ 50—75 mm
dodávaná obj. hmotnost	8 k g . m ⁻³
teplota použití	1 260 °C
teplota tavení	cca 1760 °C
tloušťka vláken	
jemná rozptyl	1—10 μ m, průměr 8 μ m
hrubá rozptyl	3—25 μ m, průměr 18 μ m
měrná hmotnost	2,62 g . cm ⁻³

5.3. Keramická vlákna do 1500 °C

5.31. Hlinitokřemičitá vlákna s vyšším obsahem Al_2O_3

Hlinitokřemičitá vlákna ze syntetických směsí použitelná do teplot 1260 °C se ve svém chemickém složení vyznačují tím, že poměr nosných kyslíčků (SiO_2 , Al_2O_3) je omezen v rozsahu 1,0—1,20. Zvýšíme-li obsah SiO_2 (60—65 % hmotnosti), tvoří se dlouhovláknitá plst a o poměrně malé objemové hmotnosti. Vlákna mají větší průměrnou tloušťku. Tavení vsázky je méně příznivé a zpracovatelské pod-

nínky taveniny jsou podstatně horší. Pružné materiály z těchto vláken zhotovené mají při teplotách 1200 °C prakticky nulovou relaxaci. Tento typ vláken se nedá použít při vyšších teplotách než 1100 °C.

Mnohem příznivěji působí na fyzikální vlastnosti zvýšený obsah Al_2O_3 (60–75 % hmotnosti). Vlákná s vyšším obsahem Al_2O_3 tvoří plst o větších objemových hmotnostech. Vlákná jsou kratší a obsahují obvykle větší množství granálí. Materiály vyráběné z vláken s vyšším obsahem Al_2O_3 mají lepší relaxační vlastnosti při vysokých teplotách ve srovnání s materiály zhotovenými z vláken s vyšším obsahem SiO_2 [32]. Typickým představitelem vláken tohoto typu je výrobek firmy Carborundum, specifikovaný jako Fiberfrax H. Zvýšeným obsahem Al_2O_3 stoupla teplota použití asi o 160 °C proti standardním vláknům Fiberfrax.

Vlákná Fiberfrax H mají tyto typické hlavní fyzikální vlastnosti:

barva	bílá
délka láken	do 25 mm
průměrná tloušťka	2–4 μm
měrná hmotnost	2,6 g · cm ⁻³
teplota použití max.	1425 °C
teplota tavení asi	1930 °C
hlavní kysličníky	
Al_2O_3	62 % hmot.
SiO_2	38 % hmot.

Ostatní fyzikálně chemické vlastnosti jsou přibližně stejné jako u standardního Fiberfraxu [33].

5.32. Hlinitokřemičitá vlákna s Cr_2O_3

Dobře zpracovatelné na vláknité hmoty jsou materiály s třemi hlavními komponenty Al_2O_3 — SiO_2 — Cr_2O_3 , kde obsah Cr_2O_3 se pohybuje od 2 do 10 % hmot. a oba hlavní kysličníky SiO_2 : Al_2O_3 jsou v poměru 1,0 až 1,5. Materiály s kyslíčkem chromitým mají malou stlačitelnost a dobrou tepelnou stálost. Se zvyšujícím se obsahem Cr_2O_3 (5–8 %) snižuje se kvalita vláken, vlákna ztrácejí pevnost a jsou křehčí a tvrdší. Vlákná mají menší délku a rychle vzrůstá obsah granálí, jejichž zvětšující se množství je ještě nápadnější tím, že se temně zabarvují. Velmi kvalitní jsou vláknité materiály s obsahem Cr_2O_3 v rozmezí 2,5–3,5 % hmot. při použití velmi čistých základních surovin. Tato vlákna lze použít pro teploty až o 200 °C vyšší než vláknité materiály jen ze základních kysličníků. Vsázka s Cr_2O_3 se dobře taví, vyžaduje na elektrické peci nižší proudové napětí. Vlákná tvoří měkkou vláchnou plst s dobrou relaxací až do teplot 1400 °C (34).

Firma Johns Manville International Corp. vyrábí vláknité materiály s přídavkem Cr_2O_3 , jejichž průměrné chemické složení hlavních komponentů je: SiO_2 —54,5 % hmot., Al_2O_3 —42,3 % hmot., Cr_2O_3 —3,2 % hmot. Maximální teplota použití je 1500 °C.

Teplota tavení je nad 1650 °C. Materiály vyráběné z těchto vláken mají délkovou smršťivost při 1430 °C—2,4 % a při 1500 °C—2,8 %. Ostatní fyzikálně chemické vlastnosti odpovídají standardnímu výrobku Cera, který obsahuje 52,2 % hmot. SiO_2 a 47,8 % hmot. Al_2O_3 a je odolný do 1260 °C.

Vláknité materiály obsahující Cr_2O_3 jsou uváděny na trh pod obchodní značkou Fiberechrom (35).

5.33. Hlinitokřemičitá vlákna s obsahem ZrO_2 nad 5 % hmotnosti

Hlinitokřemičité vláknité materiály s obsahem $\text{ZrO}_2 < 5$ % hmot. jsou materiály dlouhovláknité a byly již uvedeny. Hlinitokřemičitá vlákna lze však vyrábět i s vyšším obsahem ZrO_2 . Tyto materiály vynikají vyšší tepelnou odolností. Maximální hranice použití ZrO_2 se pohybuje do 20 % hmotnosti.

Hlinitokřemičité taveniny s obsahem ZrO_2 vyšším než 20 % mají i při vysokých teplotách značnou viskozitu a lze je špatně rozvláknovat [36].

Uvádíme dále několik vhodných kompozic pro hlinitokřemičitá vlákna s obsahem $\text{ZrO}_2 > 5$ % hmot.

1. Zakládka obsahující:

Al_2O_3	42,75 hmot. dílů
SiO_2	49,75 hmot. dílů
ZrO_2	7,50 hmot. dílů

utavená v elektrické obloukové peci nám dává vhodnou taveninu pro zvláknování. Získáváme dlouhá vlákna ($\varnothing$ délka 15 cm) o průměrné tloušťce 4 μm .

Vyrobená vlákna mají chemické složení v % hmotnosti:

Al_2O_3	42,65
SiO_2	52,25
ZrO_2	5,00

Vláknitý materiál může být použit trvale do teplot 1400 °C [37].

2. Vsázka obsahující:

Al_2O_3	45,0 hmot. dílů
SiO_2	45,0 hmot. dílů
ZrO_2	10,0 hmot. dílů
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	2,0 hmot. dílů

Vlákneno vyrobené z této taveniny má větší průměrnou tloušťku (6 μm) a obsahuje vysoké procento vláken délky 15 cm. Vláknitého materiálu lze použít až do teploty 1450 °C.

6. ZÁVĚR

V současné literatuře není publikace, která by se komplexně zabývala problematikou žárovzdorných vláken. Uvedený přehledný referát encyklopedicky objasňuje a seznamuje čtenáře s jejich vývojem, používanými výrobními technologiemi, kvalitativním rozdělením a technickými parametry žárovzdorných keramických vláken.

Obor žárovzdorných vláknitých materiálů je jedním z nejmladších vláknařských oborů. Je na počátku svého bouřlivého vývoje a v nedaleké budoucnosti budeme svědky podstatného vzrůstu nejen výroby a průmyslové aplikace, ale i dalších vynikajících technických vlastností.

Literatura

- [1] Stephenson G. E.: J. Soc. Glass. Techn., 89, 87 (1955).
- [2] Vickers A. E. J.: J. Soc. Glass. Techn., 89, 136 (1955).
- [3] Botvinkin O. K.: *Kvarcevoe steklo*. Izd. liter. po strojitelstvu, Moskva 1965.
- [4] Porczynski C.: *Advanced Materials*. Astex Publishing Comp. Ltd., Guilford 1952.

- [5] U.S. Patent; 2, 736.141
- [6] Lehner J., Surý L.: *Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví*. SNTL, Praha 1975.
- [7] U. S. Patent; 2,822579.
- [8] U. S. Patent; 2,838882.
- [9] U. S. Patent; 3,028.214.
- [10] Brit. Patent; 1,340,849.
- [11] O'Connor. P. B. a spol.: Amer. Cer. Soc. Bull., 55, 513 (1976).
- [12] Turner, W. E. S.: J. Soc. Glass: Tech. 10, 102 (1962).
- [13] Porczynski C.: *Inorganic Fibre*: London National Trade Press Ltd. 1958.
- [14] U. S. Patent; 2,461.841.
- [15] U. S. Patent; 2,491.761.
- [16] U. S. Patent; 2,624.688.
- [17] U. S. Patent; 2,643.487.
- [18] U. S. Patent; 2,718.461.
- [19] Sísr O.: *Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví*. Sborník domu techniky ČVTS, Praha 1974.
- [20] U. S. Patent; 2,674.539,
- [21] SVÚS Hradec Králové: Protokol č. 110/Ch-1973.
- [22] Anonym: Morganite Ceramick Fibres, firemní prospekty a literatura.
- [23] Caenko E. P.: Ogneupory, [5], 18—21, (1975).
- [24] Anonym: Goskomitet Soveta Ministrov SSSR po chimii, MRTU 6-05-850-68
- [25] Brit. Patent; 495.654.
- [26] U. S. Patent; 2,674.559.
- [27] Dixon D.: Refract. J., 32 598, (1956).
- [28] U. S. Patent; 2,699.397.
- [29] Něm. Patent; 1,008.883.
- [30] Carborundum Werke: *Fiberfrax Keramikfaser-Langfaser*, firemní prospekt, 1976.
- [31] Carborundum Co: *Fiberfrax-Ceramic Fibre*, firemní prospekt, 1972.
- [32] Fryatt J.: Energy World, 24, [2] 7. (1976).
- [33] Carborundum Werke: Fiberfrax H, firemní prospekt, 1976.
- [34] Galuškin A. P. a spol.: Ogneupory 75 [5], 55 (1975).
- [35] Johns-Manville: *Fiberchrom*, firemní prospekt, 1975.
- [36] U. S. Patent; 2 686 821.
- [37] U. S. Patent; 2873197.

CEMENTS RESEARCH PROGRESS 1977 (Pokroky ve výzkumu cementu 1977). Red. J. F. Young. Cements Division. American Ceramic Society. Columbus, Ohio 1978. 384 str.

Publikace je čtvrtým svazkem přehledů literatury týkající se vědy o cementech, jehož vydávání se ujala před několika lety Americká keramická společnost a v němž úspěšně dodnes pokračuje.

Patnáct kapitol přináší zpracované informace uveřejněné ve více než 1400 publikacích excerptovaných pro tento přehled. Podobně jako v předchozím svazku se literární údaje týkají těchto tematických okruhů: Výroba konstrukčních cementů, složení cementových materiálů, hydratace portlandského cementu, speciální reakce portlandského cementu, vlastnosti hydratačních produktů, přísady, vlastnosti čerstvých kaší, vlastnosti ztvrdlých kaší, trvanlivost, sádra, stavební vápna, jiné anorganické cementy, výzkum cementu v Německu. Na závěr je připojena přehledná stať o reaktivnosti popílků s cementem.

V tomto svazku je co do počtu citovaných prací nejrozsáhlejší kapitola o přísadách (235 citací), za níž následuje část věnovaná dalšímu velmi aktuálnímu problému — trvanlivosti (185 citací). Značné množství publikací je rovněž shrnuto v kapitole o vlastnostech hydratačních produktů (135 citací).

Rozsáhlost citací v jednotlivých kapitolách, jejich přehledné zpracování činí i z tohoto svazku odice Pokroky ve výzkumu cementu publikaci, kterou lze doporučit všem pracovníkům, kteří chtějí rychle získat přehled ve svém oboru.

S. Modrý