

# Fényvezető szálak, száloptikás rendszerek

Kutasi Csaba

*Kulcsszavak: Üvegszál, Optikai szál, Fényvezetés, Teljes visszaverődés, Optikai kábel, Telekommunikáció, Természetes üvegszál*

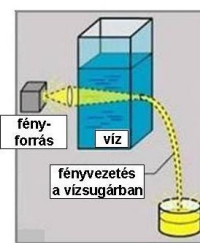
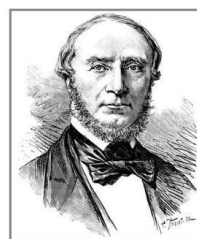
A fényvezető üvegszálak rendszerek nélkül nem diagnosztizálhatna az orvos az emberi test felnyitása nélkül a belső üregekben és a kulcslyuk-sebészeti beavatkozásokra sem nyílna lehetőség. Nem lenne internet hozzáférés, a hangtechnikában nem érték volna el sokkal tisztább hatást. A fényvezetés segítségével a mérési pontok a térben eltolhatók, a távoli mérőhelyekről könnyen eljut az információ az azokat feldolgozó és kiértékelő műszerekkel felszerelt laboratóriumokba. Az 1990-es évektől Magyarországon a postai telefon gerincvonalakat is optikai kábellel építik. Napjainkban szinte mindenütt megtalálhatók környezetünkben a fényvezető – üvegszálakból felépülő –, az információk gyors továbbítására alkalmas jeltovábbító rendszerek.

Az emberiség ősidők óta alkalmazza a fényjeleket, hiszen a nap sugarait visszaverő bronz-tükrökkel, a különböző fényforrású világítótornyokkal már régen is történt információtovábbítás. Később a jeltovábbító tornyok láncolatát létrehozva, a jeladó-karos technikát alkalmazva létrejött az ún. optikai telegráf. Jean Daniel Colladon (1802–1893) svájci fizikus az 1840-es évek elején az optikai szál alapjait mutatta be egyik kísérletével. A vízzel telt szögletes üvegedénybe fénysugarat vezetett be az egyik oldalról, a fénysugár vonalában a szemközti oldalon pedig egy kör alakú kifolyónyíláson távozó víz-sugárban továbbhaladt a fény. A víz-sugárban belüli visszaverődés eredményeként a fény eljutott a felfogó edénybe (1. ábra). Ehhez a kísérlethez Jacques Babinet (1794–1872) francia fizikus, matematikus és csillagász is jelentősen hozzájárult.

1880-ban Alexander Graham Bell (1847–1922) skót születésű amerikai fizikus Charles Summer Tainter (1854–1940) amerikai mérnökkel feltalálta a fotofont, amely az emberi hangot fénysugár segítségével továbbítja.

A 20. században már kezdettől fogva nagy erővel dolgoztak és kísérleteztek olyan átviteltechnikai rendszer kidolgozásán és megvalósításán, amellyel nagyobb sebességű, megbízható jelátvitelt lehet elérni. 1954-ben fél rugalmas száloptikás gasztroszkópot (gyomortükröző eszközt) fejlesztettek ki. 1966-ban a Nobel-díjas Charles Kuen Kao (1933–) és George Alfred Hockham kidolgozta a fényvezető szálak átvitel elvét. 1970 körül sikerült az elképzelést a gyakorlatban is megvalósítaniuk, 1975-ben már 20 dB/km alatti csillapítás értéket tudtak elérni. Ezt ún. multimodusú szállal és 850 nm-en sugárzó LED-eket tartalmazó jeladóval biztosították. A szálanyagok és szerkezetek továbbfejlesztésével, valamint lézerdiodák alkalmazásával az átviteli kapacitást megsokszorozták. Az 1990-es évek elején az optikai erősítők bevezetésével néhányszor  $10^4$  Gbit/(s·km)-re sikerült növelni az átviteli kapacitást.

Az 1990-es évektől többek között hazánkban a postai telefon gerincvonalakat is optikai kábellel építik. Napjainkban pedig számos helyen, széleskörű alkalmazással szinte mindenütt megtalálhatók környezetünkben a különböző információk gyors továbbítására al-



Jean Daniel Colladon és „fénykútja”

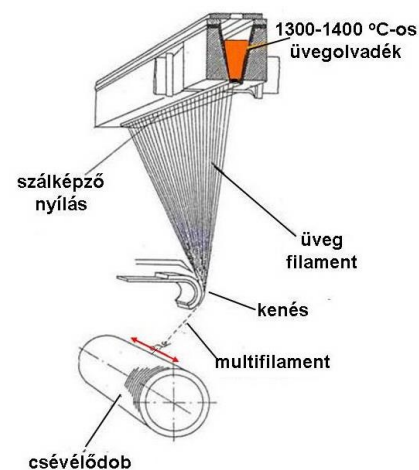
1. ábra

kalmak, fényvezető üvegszálból felépülő jeltovábbító rendszerek. A meghatározó, funkcionális főszerepet betöltő mag-köpeny felépítésű üvegszál mellett textiles anyagokat ölelnek fel többek között a szálvédelmet ellátó külső burkolatok is.

Az első egyszerű (nem speciális fényvezető képesű) üvegszálak a 19. század végén kuriózumként már megjelentek, azonban ipari méretű előállításuk később kezdődött. 1893-ban Edward Drummond Libbey (1854–1925), az amerikai üvegipar megteremtője a columbiai világkiállításon bemutatott egy olyan ruhát, amely olyan finomságú üvegszálakból készült, mint a valódi selyem. Ezt először az Egyesült Államok népszerű színésznője, Georgia Eva Cayvan viselte. Az üvegyapotot, mint az üvegszálak termékek egyikét 1932–1933-ban Russell Games Slayter (1896–1964) amerikai mérnök-feltaláló állította elő. Kis sűrűségű építészeti változatát ma is használják hőszigetelő anyagként, amelyben speciális adalékkal kis légbuborékokat alakítanak ki. Az üvegszálak elterjedését a kiváló hőállóság (éghetetlenség), a kedvező hőszigetelő képesség, ill. a rendkívüli elektromos szigetelőhatás segítette elő. További alkalmazási területeket jelentett a nagy szilárdság, a jó vegyszerállóság, a kimagasló hangszigetelő képesség is.

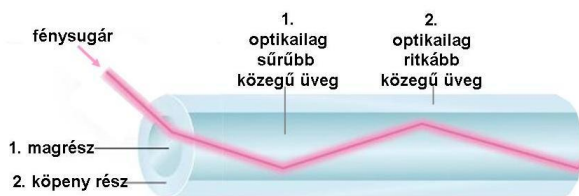
Az üvegszál a szerves mesterseges szálak csoportjába tartozik, mint túlhevített folyadék. Míg a természetes és a mesterséges szálak mind láncmolekulából felépülő polimerek, addig az üvegszálakat a folytonos térhálós szerkezet jellemzi.

A szálgyártás során (2. ábra) a húzott üvegszál sokszerszerűen hűl le, így benne belső



A hagyományos üvegszál előállítása

2. ábra



Az optikai szál felépítése

3. ábra

feszültségek hal-mozódnak fel és hibahely-mentes felület alakul ki. Ezzel magyarázható, hogy a tömbüveghez képest az üvegszálak rendkívül nagy szilárdsággal rendelkeznek (a nagy szakítóerejű szerves polimer szálaknál kétszer erősebbek). A különböző tulajdonságú üvegszálak képzésénél a felhasználásra kerülő üveg összetételének minőségi és mennyiségi változtatásával érik el a rendeltetésnek megfelelő tulajdonságokat.

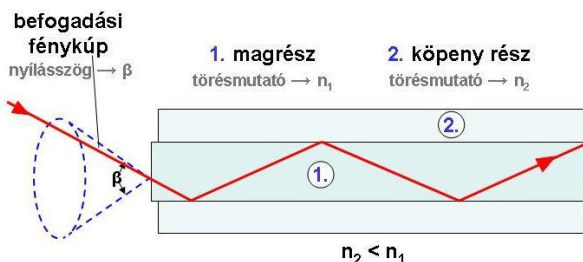
## A fényvezetés lényege

Az optikai száznál a jelátvitel nem elektromos úton, hanem a fény modulálásával (pl. monokromatikus fény, infravörös sugárzás) létrejött hullámvezetéssel történik, ezt nevezik fényvezetésnek. Ennek során az optikailag különböző közeg határán kialakuló visszaverődés, ill. az irányt változtatva történő behatolás játssza a fő szerepet.

Az optikai szál egy kis sűrűségkülönbségű mag és köpeny felépítésű üvegszál-szerkezetből épül fel. A mag-rész az optikailag valamivel sűrűbb közegű, a határoló köpenyüveg ritkább optikai jellemzőkkel rendelkezik. A fényvezetést a magvezetékben lejátszódó folytonos visszaverődés hozza létre (3. ábra). Lényeges fizikai jellemző a *modus*, amely a magátmérő és a benne futó fény hullámhosszána viszonyát fejezi ki.

A teljes visszaverődés akkor valósul meg, ha a két közeg határfelületén úgy verődik vissza a fénysugár, hogy a másik közegbe egyáltalán nem jut át. Ennek érdekében egyrészt a fény a sűrűbb átlátszó anyagból érkezik a ritkább közeg határfelületéhez, másrészt feltétel, hogy a beesési szög az ún. határszögnél nagyobb legyen. A teljes visszaverődés érdekében fontos, hogy a fény meghatározott küpon belül érkezzék a szálba. A burkolat és a mag törésmutatójának viszonya határozza meg a befogadási fénykúp nyílásszögét (4. ábra).

Az optikai szálon/kábelen a jelátvitelt nemcsak a modulált fény, ill. infravörös sugárzás szolgáltatja, elterjedt a lézerdiódás sugárzás alkalmazása is, pl. gallium-arsenid (GaAs), valamint gallium-arsén-indium-foszfid (GaAsInP) sugarforrásokkal. A nagyteljesítményű gáz- és szilárdtest-lézerekkel 100 km-es távolságok is áthidalhatók erősítés nélkül, egy adó-vevő párral.



A törésmutatók viszonyától függ a befogadási fénykúp nyílásszöge

4. ábra

## Fényvezető-szál szerkezetek

Az alapanyagul szolgáló kvarcüveget nagy tisztaságban mesterségesen hozzák létre. Az amorf szerkezetű szilícium-dioxid olvadék nagy viszkozitású, ennek gázfázisú leválasztásával állítható elő a nagy tisztaságú kvarcüveg. A kvarchomokból, egyes szilikát-ásványokból kiindulva redukálás, majd klórozás (a vas szennyeződések eltávolítására) után desztilláció következik. A keletkező szilícium-tetrakloridból oxidáció útján jön létre a gázfázisú hidrolízissel leválasztható értékes kvarcüveg-alapanyag.

A kvarcüveg-szálgártás során először általában ún. előformát kell elkészíteni. Ez a szálhúzás alapját jelentő, de még rendkívül durva vastagságviszonyokkal rendelkező mag-köpeny felépítésű üveggépződmény. A későbbi fázisokban az előforma szerkezet keresztmetszete akár háromezer-szorosára csökkenhet, miközben az eredetileg kialakított mag-héj geometria mindvégig megmarad.

Az előforma készítésére több módszer ismert, aszerint, hogy a leendő mag-köpeny szerkezetnek megfelelő felépítményt miként alakítják ki.

Az **üvegolvasztás** eljárásoknál a két önálló szerkezeti részt egyesítik:

- A „csőben rúd” technológia során a nagyobb törésmutatójú mag-részt üvegcsőbe helyezik (tehát két szilárd előforma a kiindulási anyag), melegítés, ill. húzás hatására alakul ki a köpennyel körülvett üvegszál (5. ábra). Ennél a módszerrel jelentős a határfelületi hibák előfordulása, emiatt túl magas az így készült optikai kábel csillapítási értéke.

- A kéttengelyes technikánál nem alkalmaznak szilárd előformákat, hanem az olvadt mag és héjanyagot olvadéokban koncentrikusan összevezetve extrudálással alakul ki a továbbfeldolgozásra alkalmas, összetett szerkezetű anyag (5. ábra). Ennek az eljárásnak az előnye a folytonos törésmutatójú szálgártás lehetősége, hátránya a tömeggyártás nehézsége.

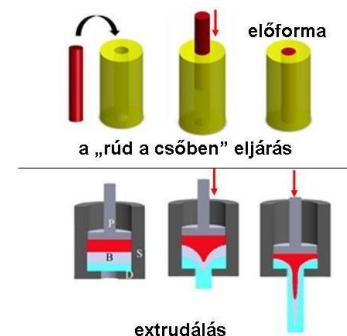
A **gázfázisú leválasztás** elvén alapuló eljárások több fajtája ismert, közös elvként a forgó üvegrúd, ill. a cső különböző felületein történő rétegezést alkalmazzák:

- A forgó üvegrúd külső felületére történő leválasztásnál a rotációs mozgást végző üvegrudat transzlációs mozgást végző égővel melegítik (ennek megfelelően rétegelt nyers előforma jön létre). Újabb lépésként szakaszos, teljes hosszúságú felmelegítést végeznek, így alakul ki a belsejében zárt, hólyagmentes táblás üvegrúd.

- A forgó üvegrúd homlokfelületén végbemenő leválasztás során a kezdő rúd egyenletesen forog és emelkedik (eszerint gyarapszik a készülő előforma).

- A forgó üvegcső határfelületére történő leválasztásos eljárásnál a kiindulásként megjelenő kvarccső belső falára kerül a szükséges réteg.

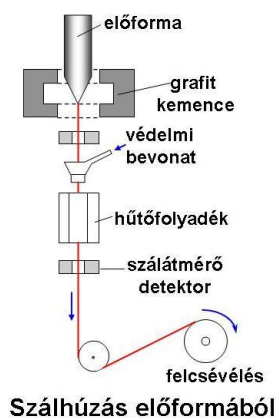
Az egyes eljárások valamelyikével előállí-



Előformás és anélküli üvegolvasztásos szálelőállítás

5. ábra





6. ábra

megmarad.

A szilícium-dioxid alapanyag mellett pl. fluoro-circonátot, fluoro-aluminátot is használnak, főként a nagyobb hullámhosszú, infravörös tartományban használt eszközöknél. Műanyag optikai szál is ismert, 1 mm-es vagy nagyobb magátmérővel. Ezek nagyobb csillapítást okoznak (pl. 1 dB/m, vagy ennél több), ezért alkalmazhatóságuk korlátozott.

Az üvegszálak különböző törésmutatókkal készülhetnek (7. ábra):

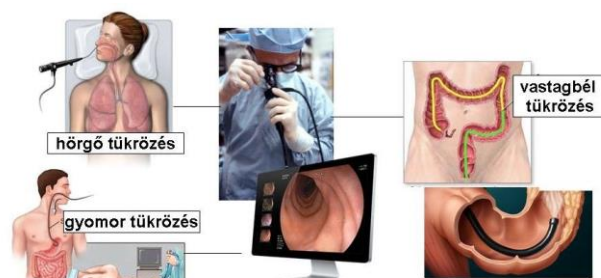
- a multimodusú szálak a legrégebbi technológiával készültek, ezért rájuk nagy elvesztésesség volt jellemző;
- a lépcsős (folytonosan változó) indexű típusoknál a mag törésmutatója a tengely és a héj között folyamatosan csökken (a hosszabb utat bejáró sugarak gyorsabban haladnak, így a megérkezés egy időben történik);
- az egy modulusú szálak kis magátmérővel készülnek, esetenként elliptikus vagy téglalap keresztmetszettel.

## A fényvezető üvegszálak alkalmazásai

Az optikai szálakat napjainkban rendkívül széles körben alkalmazzák.

- A rövid- és nagytávolságú telekommunikációban a korábban alkalmazott, hagyományos rézvezetőjű, csavart érpályás kábeleknél kb. 2 km-enként szükségessé vált a jel erősítése jelgenerátor közbeiktatásával. Az optikai kábellel akár 100 km-es távolságokat is át lehet hidalni jelfrissítés nélkül. Az ilyen hálózatok átviteli képességét jellemzi a sávszélesség és a távolság figyelembe vételével képzett mutató, amely pl. rézvezetőnél a 100 MHz/km, optikai kábelnél a 100

tott előformából **szálhúzással** alakítják ki az optikai kábel funkcionális erét, a mag-köpeny felépítésű kvarcüveget (6. ábra). Ennek érdekében az előformát 2000 °C-ra felmelegítve kialakul a folyékony állapot, és mintegy 300 m/min sebességgel történik a szálképzés. Az előforma és az optikai kábel alapját képező összetett-szálképzés között több százszoros keresztmetszetcsökkenés ellenére a kívánt geometriai felépítmény mindvégig



Példák a száloptikás orvosi alkalmazásokra

8. ábra

GHz/km a jellemző érték. Külön előny az üvegszálak telefonkábelek esetén, hogy a lehallgatási veszély minimális, miután az illegális beavatkozásnál a detektorra érkező fényenergia csökken (árulkodó jel észlelhető). Egyúttal az egységnyi sávszélességre eső fajlagos költségek is alacsonyabbak.

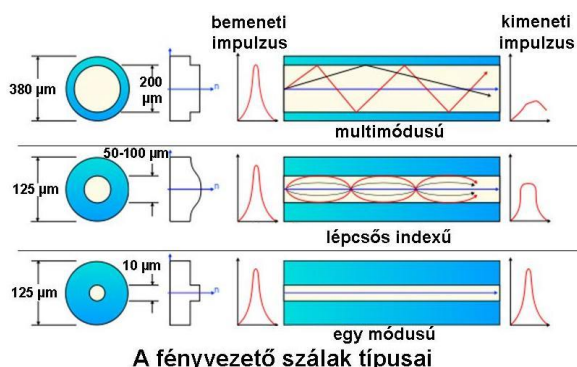
- A cég telephelyei közötti információs hálózatokat szintén optikai kábelekkel építik ki.

- A mérési pont térben eltolható, távoli mérőhelyekről juttatható el a fényvezető technikával információ (pl. erő, hőmérséklet, nyomás stb.).

- Az orvostudomány a diagnosztikában és a hagyományos műtéti eljárásokat mellőző beavatkozásoknál (ún. kulcslyuk-sebészet) alkalmazza az endoszkópiát (8. ábra). Az ilyen szerkezeteknél a fényvezető üvegszálak több funkciót látnak el, így egy részük akár a megvilágító fény bevezetéséről gondoskodik, az önálló optikai kábel a képvezetés feladatát látja el. A másik különálló üvegszál ugyanakkor a beavatkozásokat biztosító lézersugár bevezetését teszi lehetővé. (Közismert, hogy a lézersugár hőhatásaként a hajszálerek végei azonnal beforrnak, elmarad a műtéttechnikai okból és egyéb miatt bekövetkező vérzés.) Az infravörös (nem látható tartományba eső) sugárzással működő műszerekkel pl. szemműtéteket végeznek. A száloptikás mikroszkóp – az endoszkópos vizsgálatok mellett – várhatóan a műtőkben, terjed el. Ez a technikai kiegészítő nem képes a végső diagnózis felállítására, de segítséget jelent a műtéti eljárás irányításában (9. ábra).

- A dekorációs hasznosítások széles körben ismertek, az üvegszálak lámpa hétköznapi kellékként is előfordul, az optikai szál a mennyezeten és a padlón egyaránt megjelenik a különleges effektusokat igénylő terekben.

- A hangtechnikában is egyre jobban előtérbe kerül az optikai kábel alkalmazása, hiszen az optikai csatlakozókkal nagyobb jeltisztaság és tisztább hangzás ér-

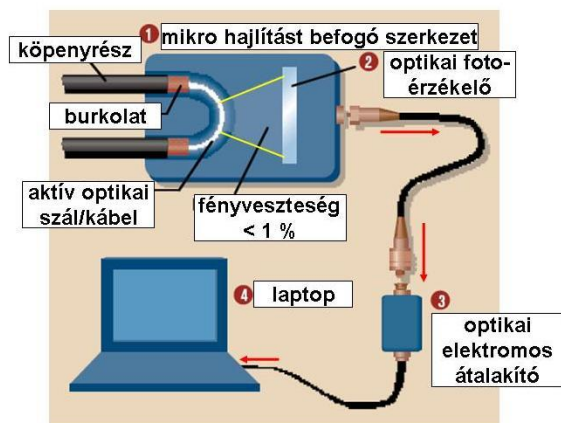


7. ábra



Száloptikás mikroszkóp alkalmazására példa

9. ábra



**Az optikai kábel/szálat érintő hackertámadás érzékelése**

10. ábra

hető el.

- Jelzőfények (pl. repülőgépeken) tényleges működéséről korábban fényvezető-szálas technikával adtak információt a műszerfalon, az irányítást végzőknek (pl. pilótáknak). A korszerű elektronikával megbízható a közvetett jeladás

- Az egyéb felhasználási területeket tekintve tovább szélesedik az alkalmazási skála, többek között riasztóhálózatoknál, térfigyelő rendszereknél, katonai rendeltetéseknel, speciális mérés technikáknál (pl. részecske-meghatározás) egyaránt jellemző az optikai szál/kábel. Optikai szálat használnak a víz alatti mikrofonoknál, a szonár (visszhangszonda) rendszereknél is.

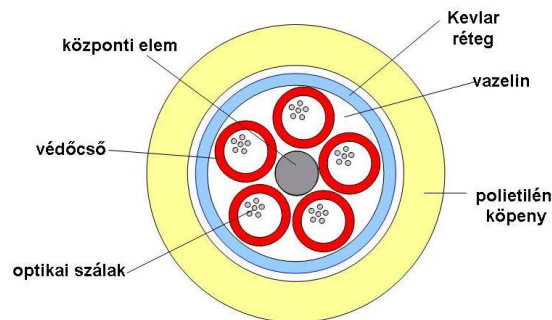
- A riasztási lehetőségekre jellemző, hogy az optikai kábel érintő hackertámadás esetén, a kábel hajlítása a legegyszerűbb és legkevesbé érzékelhető módszer. A mikro-hajlítást befogó készülék az árulkodó kis fényjel érzékelésével és az illesztett optikai-elektromos átalakító segítségével értesít az illetéktelen beavatkozásról és annak következményéről (10. ábra).

## Az optikai kábel felépítése

A különleges kialakítású üvegszál kis átmérőjű és fokozottan törékeny. A kábellel alakításakor a szálvédelem kiterjed a mechanikai, hőmérsékleti, vegyi igénybevételekre és a légnedvességgel kapcsolatos hatásokra.

A védelem jellege attól függ, hogy kültéri (ún. légvezeték, továbbá föld ill. tenger alatti), vagy beltéri alkalmazásra kerül-e sor, továbbá attól, hogy milyen különleges helyi hatásokkal kell számolni. A mechanikai védelemmel a kábelszereléssel, ill. használatával összefüggő káros igénybevételektől kell óvni a kábelt (tengelyirányú húzóerő, hajlító igénybevétel, sűrűdörös kölcsönhatások stb.). A hőmérsékleti hatások elleni védekezésnél a különböző túlzott hőigénybevételektől, ill. a drasztikus hőmérsékletváltozásoktól kell megkímélni az üvegszál-szerkezetet. A vegyi hatások kivédése során alapvetően a maró hatású savak, lúgok és egyéb agresszív vegyi anyagok, ill. az olaj okozta káros hatások elleni hatékony védelem fontos. Párás légtérben a szálfelületen kialakuló parányi repedéseken keresztül behatolhat a károsító víz, ezért ezt meg kell akadályozni. Az optimális védekezés hatékony köpenyezéssel, továbbá megfelelő erősítőelemekkel valósul meg.

A mechanikai védelmet biztosító köpenybevonat lehet, ún. szoros (a primer réteghez szorosan tapadó), ill. laza (nincs tapadás a két felület között). Az erősítő



**Példa egy optikai behúzó kábel keresztmetszetére**

11. ábra

elemek az említett bevonatos szerkezet speciális védőköpennyel történő ellátásánál meghatározók. A védelmi képesség szempontjából előnyös nagy rugalmassági modulusú anyagok viszont általában merevek, ezért a hajlékonyság javítására kisebb keresztmetszeti egységeket alkalmaznak sodrott vagy kötegelt alakban. Elsősorban a nagyteljesítményű harmadik generációs szálanyagok, pl. aromás poliamid (aramid), szupererős polietilén, szénszálak alkalmazása jellemző. Ezeken felül az üzemen kívüli üvegszálakat (nem a fényvezetésben, hanem erősítőelemként működnek közre) és ritkábban a hagyományos poliamid és poliészterszálakat is alkalmaznak. Az acélhuzal-páncélozás főként a hosszanti megerősítést fokozza.

Az optikai kábel védőköpenyeinek kialakítása a használat helyszínétől függően változik (11. ábra).

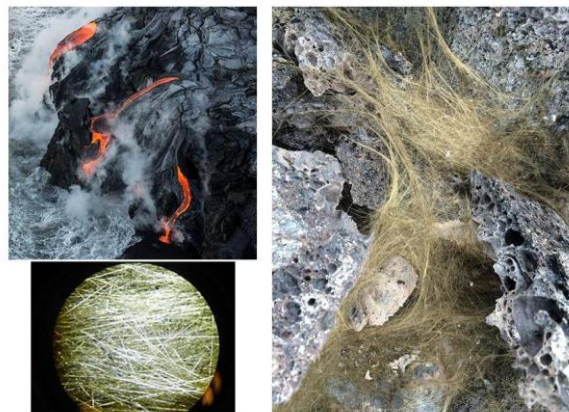
- A kültéri kábeleknél főként a szupererős – nagy molekulatömegű – polietilén alkalmazása terjedt el, esetenként alumínium zárórétteggel, vagy anélkül. Hasonlóan ilyen funkciót látnak el a kis és közepes sűrűségű polietilének.

- A beltéri alkalmazásoknál a helyi igénybevételek határozzák meg a védőköpeny anyagát. Lángálló képesű PVC-burkolat, a fluor alapú műanyagköpeny 100 °C feletti hőhatásnak is ellenáll.

A **fotonikus kristályok** felhasználásával 1991-ben sikerült fotonikus kristályszálat előállítani, amely nem a teljes visszaverődés elvén vezeti a fényt. Ezekkel nagyobb teljesítmény érhető el, miután a hullámhosszfüggő tulajdonságok manipulálhatók a teljesítményfokozás érdekében.

## A természetben is fellelhető az üvegszál

A természetben is előfordul üvegszál, amely „Pele

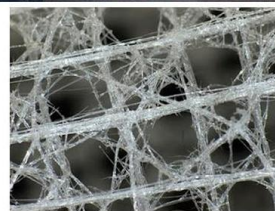


**A „Pele haja”, mint természetes üvegszál**

12. ábra

haja” elnevezéssel ismert (Pele a tűz és a vulkánok hawaii istennője). Ez a vulkáni kitörések során az olvadt bazalt lávából természetes nyúlás hatására, főleg a vizes hűtés hatására képződő vékony üvegszál-halmaz (12. ábra). A forró láva hatására a víz forrni kezd, a táguló gőzbuborékok mérete egyre nő. A láva gyorsan lehűl, a vulkáni üveg buborékainak kipukkanása és a szél hatására pehelyszerű üveg képződik. *Takashi Katsura* 1966-os felfedezése szerint a magmában előforduló plagioklászok (tektoszilikátok, mint a földpátok csoportjába tartozó ásványok) kristályosodni kezdenek 1160 °C hőmérsékleten, mint a természetes üvegszál elő-anyaga. A Pele haja képződmény kis sűrűségű, a szél gyakran továbbviszi, akár több kilométerre is. Így fordulnak elő fák tetjén, oszlopokon és egyéb magas tárgyakon egyaránt. A természetes üvegszál a világon több helyen előfordul. hawaii vulkánokon kívül Nicaraguában (Masaya), Olaszországban (Etna) és Etiópiában (Erta Ale) szintén megtalálható az üvegszálás képződmény.

Az óceán mélyének sötétjében él egy olyan tengeri szivacs (*Euplectella aspergillum* Owen), amely vékony üvegszálakat növeszt (13. ábra). Ezek legalább annyira képesek a fény továbbítására, mint a telekommunikációban alkalmazott optikai szálak. Ugyanakkor a természetes üvegszál sokkal rugalmasabb, mint azaz ipari módon előállított mesterséges változat, amely eltörik, ha túlságosan meghajlítják. Erre akár csomót is lehet kötni. Ezt az üveges szivacsot „Vénusz kosárnak” nevezik, amely természetes anyagokból, alacsony hőmérsékleten állítja elő hajlékony szálait. A szálak 5–17 cm hosszúságúak, vastagságuk nagyjából az emberi hajszáléval egyező. A szivacs még arra is képes, hogy nátriumot adjon a szálakhoz, amivel növeli annak fényvezető képes-



Az *Euplectella* szivacs és üvegszál hálózata

13. ábra

séget. A szivacs a trópusok mély vizeiben fordul elő, körülbelül 45 cm magas, tekervényes szilícium-dioxid hálós vázat alkotva, ami az apró rákoknak nyújt menedéket. Az üvegszálakból egy korona formálódik a szivacs alsó részén, ez segít egyhelyben maradásban. Ezek a nem látó állatok elképesztő optikai tulajdonságokat hordoznak. Az *Euplectella* által létrehozott optikai szál tulajdonságai jobbak, mint a mesterségesen előállított, magas minőségi színvonalú terméké.

#### Felhasznált irodalom

- [1] Gerencsér András: Elektronikus kommunikáció, 2005.
- [2] Kutasi Csaba: Az optikai szál és kábel, Magyar Textiltechnika, 2009/2
- [3] Wikipédia szócikkek