

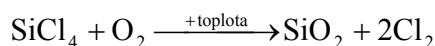
11. Tehnologija izdelave optičnega vlakna

Optično vlakno je telo z obliko valja s premerom 125 μm in tipično dolžino 100 km. Dolžina je približno 1.000.000-krat večja od širine geometrijskega telesa. Izdelava tovrstnega telesa je tehnološko precej zahteven primer, ki ga rešujemo na več načinov.

Načini izdelave optičnega vlakna se v grobem delijo na enostopenjski in dvostopenjski proces. Pri enostopenjskemu procesu se vlakno vleče direktno iz utekočinjenega stekla, medtem ko se v dvostopenjskem procesu najprej izdelava zelo čist palico surovca (angl. preform), ki se jo nato iz taline izvleče v tanko stekleno optično vlakno. Čeprav je enostopenjski proces tehnološko preprostejši in hitrejši ter nam omogoča izdelavo vlaken z neomejeno dolžino, se mnogo pogosteje uporablja dvostopenjski proces, ki omogoča proizvodnjo vlakna z nizkim slabljenjem.

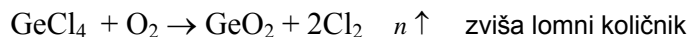
Ena od osnovnih zahtev pri izdelavi optičnega vlakna z majhnim slabljenjem je čistoča. Za primer povejmo, da metalurgi zahtevajo 1% čistosti. Polprevodniška industrija ima opravka z 10^{-10} % nečistoč. Najčistejše surovine so plini ali tekočine, zato so osnovne surovine pri izdelavi optičnega vlakna v teh stanjih. Prva zahteva je izbira kemikalij, ki omogočajo izdelavo optičnega vlakna in omogočajo zviševanje, ter zniževanje lomnega količnika.

Osnovna surovina za proizvodnjo stekla je tekočina silicijev tetraklorid (SiCl_4), ki ga imenujemo tudi silan. Le-ta je v proizvodnji najpogosteje uporabljen kot steklotvorni reagent. Kilogram te tekočine dosega ceno 100 evrov.



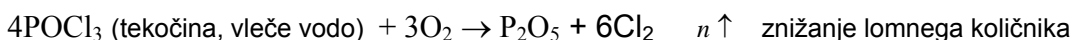
Silan in kisik O_2 v plinski obliki tvorita kremenovo steklo SiO_2 , v amorfni in ne kristalni obliki ter plin klor Cl_2 .

Steklu moramo dodajati dodatke (dopante), ki spremenijo optične lastnosti tako, da se svetloba lahko razširja vzdolž vlakna ne da bi ušla skozi steno. Kot dopand, ki povečuje lomni količnik, se največkrat uporablja germanijev dioksid, ki nastane iz tekočine germanjevga tetraklorida



Poleg povečanja lomnega količnika ima steklo dopirano germanijevim dioksidom pozitivni temperaturni raztezek.

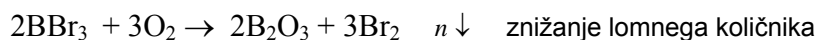
Lomni količnik lahko povečamo tudi z dodajanjem fosforja, kar tudi spreminja viskoznost kremenčevega stekla. fosforjev oksitriklorid



Dodajanje žveplovega heksafluorida znižuje lomni količnik.

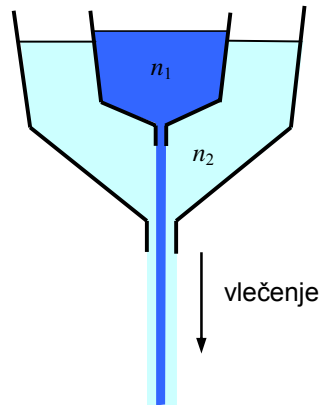


Bor se kot dopant uporablja predvsem za povečanje foto občutljivosti ali za povečanje mehanskih napetosti v vlaknu (visok koeficient linearnega raztezka), a tudi za znižanje lomnega količnika:



11.1. Izdelave optičnega vlakna z enostopenjskim procesom

Prva poznana tehnološka rešitev, ki se danes zelo poredko uporablja, za izdelavo optičnega vlakna, je s pomočjo enostopenjskega procesa. Za izdelavo se uporabljata dve posodi, kot prikazuje slika 1. Vsaka od posod je napolnjena s steklom s svojim lomnim količnikom ($n_1 > n_2$), ki izhajata na dnu posode, kjer se ohladi in predstavlja optično vlakno.



Slika 1: Prvotni način izdelave optičnega vlakna.

Tovrstni enostopenjski proces je tehnološko zelo enostaven in hiter. Njegova bistvena prednost je v tem, da omogoča izdelavo vlaken z neomejeno dolžino v enem kosu.

Zaradi počasnega raztapljanja posod, med procesom izdelave vlakna, v le-to prihajajo nečistoče, kar je nedvomno velika slabost enostopenjskega procesa. Na ta način se torej ne da izdelati vlakna z tako želenim nizkim slabljenjem.

11.2. Izdelave optičnega vlakna z dvostopenjskim procesom

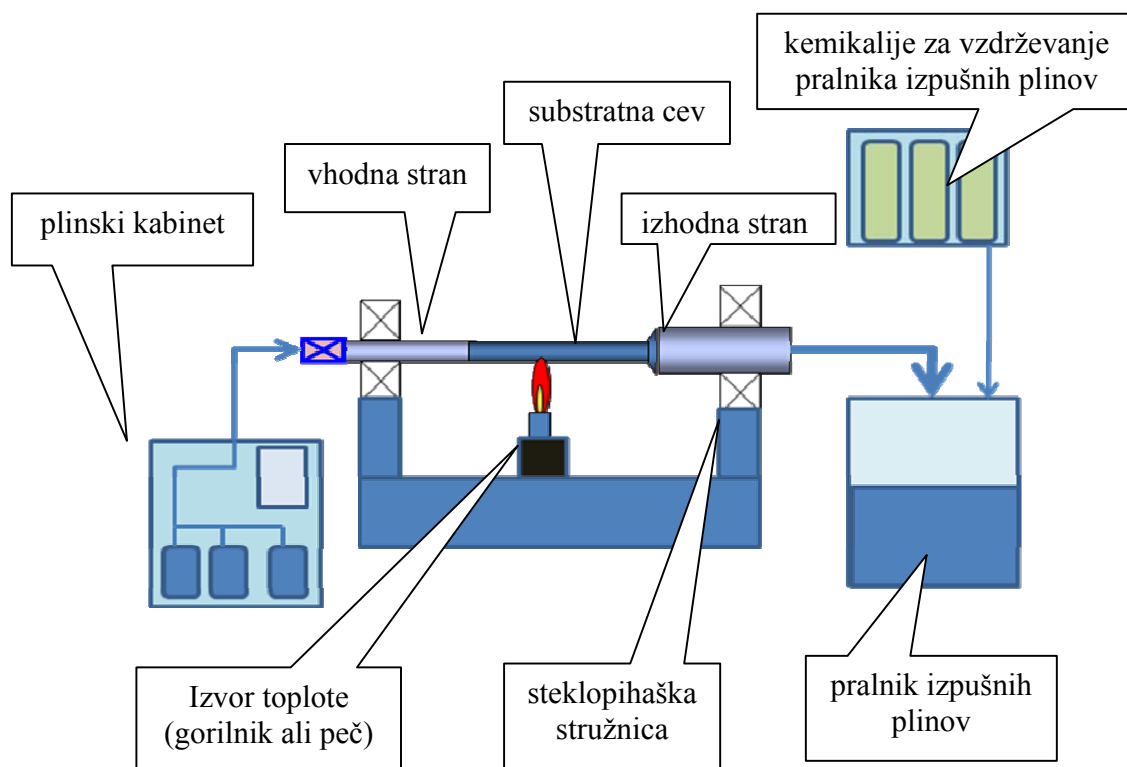
Pri dvostopenjskem procesu v prvem koraku izdelamo surovec (angl. perform), ki je običajno dolžine 1 m in premera 25 mm. V drugem koraku iz surovca izvlečemo vlakno s premerom 125 μm . Pri tolikšnem zmanjšanju premera in ohranjanju volumna dobimo vlakno z dolžino približno 40 km.

11.2.1. Izdelave surovca

Surovec je steklena palica, sestavljena iz plašča in jedra s premerom od 12 do 25 mm, dolžine do 400 mm. Iz surovca se kasneje izdelava optično vlakno. Za izdelavo surovcev se v svetu uporablja več postopkov. Poglavitna razlika med njimi je v tem, kje poteka kemična reakcija, ki iz izhodnih reagentov ustvari delce kremenčevega stekla.

11.2.1.1. MCVD (angl. modified chemical vapor deposition)

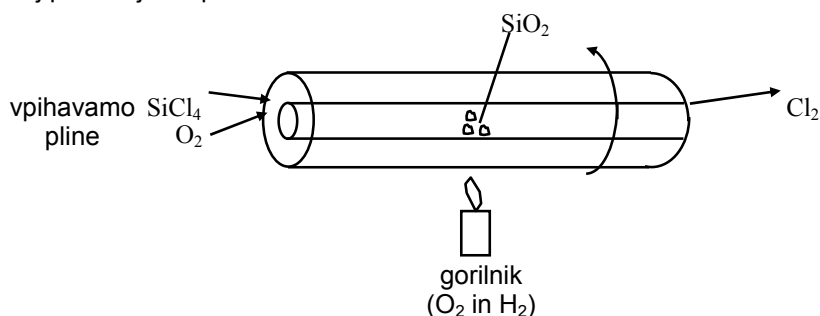
Pri MCVD postopku gre za nanašanje hlapov kemikalij. Prednost MCVD postopka je enostavnost skaliranja za različne velikosti surovca, kar omogoča lahek prenos iz laboratorijskega okolja v industrijo. V tem primeru nimamo velikih zahtev za čistočo okolja, ker se celoten proces nanašanja plasti vrši v notranjosti cevi, kot prikazuje slika 2.



Slika 2: MCVD sistem za izdelavo surovca.

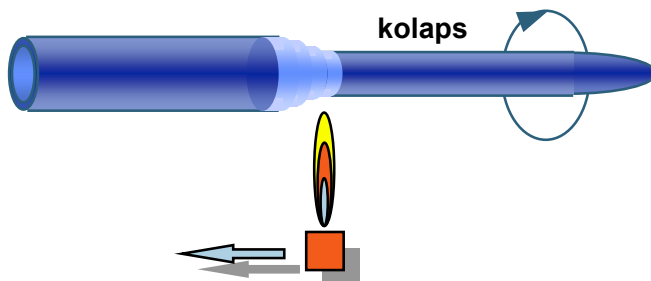
Postopek izdelave surovca se prične s trdno substratno cevjo, za katero ni nujno, da je zelo čista. Pred pričetkom izdelave namreč cev zatesnimo in v njo s pomočjo kisika vpihujemo silan. Na zunanji strani cevi je potujoči gorilnik na vodik, ki ga običajno kar v sami tovarni pridobivamo s pomočjo elektrolize. Na delu, kjer gorilnik segreje plin nastane reakcija, katere produkt so zrnca stekla, ki se usedejo na stene cevi, kot prikazuje slika 3.

Cev se vrti s hitrostjo 2 do 4 vrtljaje na sekundo zato, da se nanos prime enakomerno. Gorilnik se premika od začetka proti koncu cevi in za en prehod potrebuje od 3 do 5 minut. Ob segrevanju cevi se segrejejo zrnca, ki tvorijo nanešeno plast. V palico je potrebno nanesti od 40 do 70 plasti. Vsaka plast je lahko narejena iz drugih snovi (drug lomni količnik). Za celoten postopek nanosa plasti torej potrebujemo približno 6 ur.



Slika 3: Izdelave optičnega vlakna po metodi MCVD.

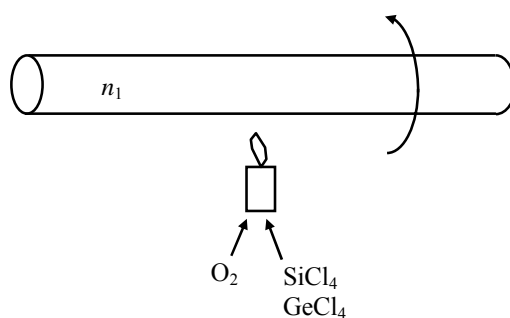
Ko so nanešene vse plasti se iz cevi izčrpajo plini in se poveča moč gorilnika na temperaturo, ki povzroči kolaps cevi v palico brez osrednje luknje, kar prikazuje slika 4.



Slika 4: Kolaps cevi pri metodi MCVD.

11.2.1.2. OCVD (angl. outside chemical vapor deposition)

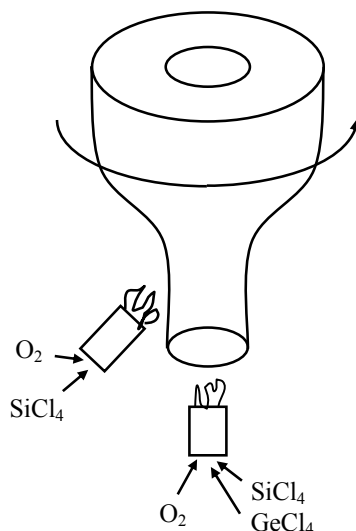
Prednost OCVD postopka je možnost izdelave daljših surovcev, kar pomeni, da lahko iz njih povlečemo daljša vlakna. Pri tem postopku je potrebno zelo čisto okolje in tudi začetna palica mora biti iz čistega SiO_2 . S postopkom OCVD nanašamo plasti, ki bodo predstavljale oblogo vlakna, kot prikazuje slika 5. Na zunanosti nanošene plasti stekla imajo nižji lomni količnik kot začetna palica.



Slika 5: Izdelave optičnega vlakna po metodi OCVD.

11.2.1.3. VAD (angl. vapor axial deposition)

Pri tem gre za nanašanje hlapov iz osi. Tudi tovrstni postopek zahteva zelo čisto okolje.



Slika 6: Izdelave optičnega vlakna po metodi VAD.

11.2.1. Vlečenje surovca v optično vlakno

V drugem koraku dvostopenjskega postopka iz predhodno izdelanega surovca izvlečemo optično vlakno, na katerega nanesemo sloj primarne zaščite kar med procesom izdelave. Proces vlečenja surovca, ki se dogaja v vlečnem stolpu, je prikazan na sliki 7. Na vrhu stolpa najprej grafitni uporabni grelci, ki dosežejo temperaturo do 2200°C stalijo surovec. Kremenčevo steklo se s segrevanjem stali in steče v obliki kaplje oz. solze (ang. drop) proti tlom. Za solzo se steklo potegne v tanjšo in tanjšo vlakno. Solzo odrežemo in vlečemo za vlakno med podajanjem surovca v peč. Tako lahko iz staljenega dela surovca v peči kontinuirano vlečemo stekleno vlakno. Hitrost vlečenja, hitrost podajanja in temperatura v vroči coni določajo, kakšen bo končni premer izvlečenega vlakna, ki se meri v mikrometrih (μm). Vlakno pade skozi merilnik debeline, nanašalnik in utrjevalec primarne zaščite, ter se s pomočjo motorja navije na kolut. Hitrost motorja in hitrost podajanja surovca je neposredno krmiljena iz merilnika debeline.

Tako izdelano stekleno vlakno je zelo krhko in občutljivo. Poškodbe steklene površine ali tujki lahko povzročijo pretrg, zato je potrebno površino vlakna zaščititi. Le-to opravimo kar med vlečenjem vlakna na mestu kjer je vlakno dovolj ohlajeno (na sobno temperaturo), na površino s sistemom šob nanesemo primarno zaščito. Zaščitna plast je lahko izdelana na osnovi silikona ali akrilatnih materialov. Materiali se nanašajo v tekoči obliki. Utrjeni (polimerizirani) so s toplotno obdelavo (proces termične polimerizacije) ali kratkovalovno UV (ultravijolično) svetlobo (proces fotopolimerizacije). Proces polimerizacije poteka v infra rdeči peči (ang. IR heater) ali ultravijolični peči (ang. UV lamp).

Vlečenje surovca v optično vlakno je postopek, ki traja od 2 do 3 ure. Ker je postopek izdelave surovca trikrat daljši, bi za tekočo proizvodnjo v tovarni potrebovali tri stružnice za izdelavo surovca na en stolp.

Današnja proizvodnja optičnega vlakna omogoča vlečenje surovca z hitrostjo 1000 m/s (16,7 m/s) in pričakuje se povečanje hitrosti na 2000 m/s.

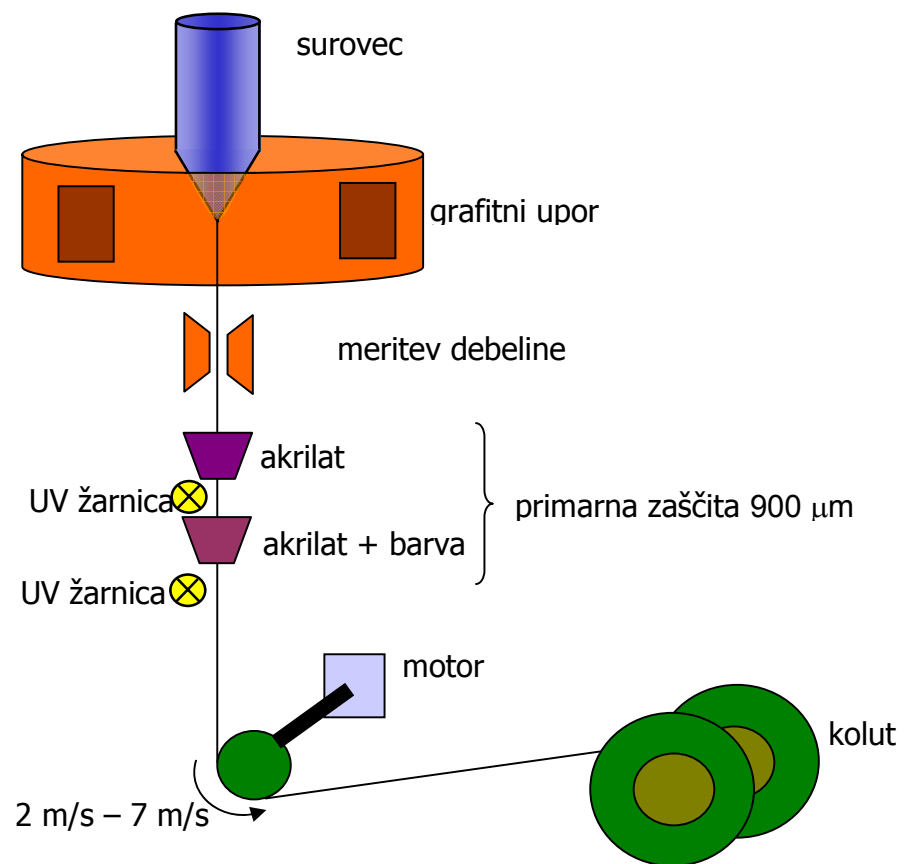
Z namenom zniževanja PMD pojava se vlakno med vlečenjem suka, tako da povzroča 7 zasukov/m.

Primer:

V proizvodnji vlečemo surovec s 1000 m/min (16,7 m/s).

Standardni premer optičnih vlaken znaša 125 μm , premer primarne zaščite (običajno v dveh plasteh) pa 245 μm . Zaščiteno vlakno navijamo med procesom na stiroporne kolute na navijalnem stroju. Po vlečenju se vlakna preizkusijo na nateznem preizkusu (ang. proof test ali screen test), kjer odstranimo mehansko šibke točke (vlakno se zlomi). Preizkus opravimo tako, da vlakno odvijamo s stalno hitrostjo s koluta preko merilne celice, ki meri natezno silo. Vlakno navijamo z večjo hitrostjo od odvijalne, tako da je vsa dolžina vlakna med previjanjem izpostavljena določeni natezni sili.

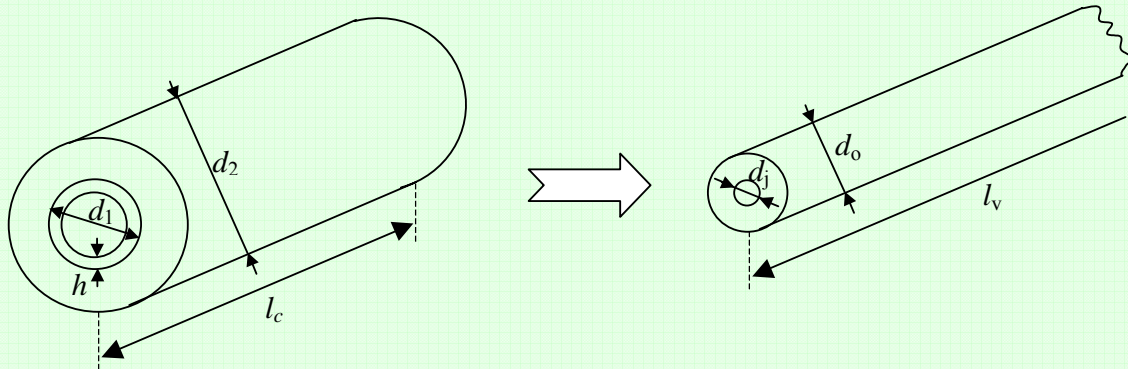
Nateznemu preizkusu sledijo meritve optičnih in geometrijskih lastnosti, nato pa vlakna barvamo na barvalnih strojih. Tak stroj deluje na enak način, kot nanos primarne zaščite. Vlakno vodimo skozi z barvilom (akrilatna baza) omočeno šobo. Debelina nanosa znaša le nekaj mikronov (do 10 μm). Izmerjeno in po potrebi pobarvano vlakno se skladišči, dokler ga ne potrebujemo za izdelavo kablov z optičnimi vlakni. Skladiščenje vlaken mora biti v čistih, suhih prostorih, brez direktne sončne ali druge UV svetlobe.



Slika 5: Vlečenje surovca v stolpu.

Primer:

Optično vlakno izdelamo s tehnologijo MCVD tako, da postopek začnemo s cevjo iz čistega kremenčevega stekla z notranjim premerom $d_1=15$ mm in zunanjim premerom $d_2=25$ mm. Kako debelo h oblogo z dodatkom germanijevega oksida moramo nanesti na notranjo stran cevi, da bo končni izdelek enorodovno vlakno s premerom jedra $d_j=10$ μm in zunanjim premerom obloge $d_o=125$ μm ? Koliko kilometrov vlakna l_v dobimo iz cevi dolžine $l_c=1$ m?



Velja ohranitev razmerje površin preseka jedra in obloge, ki znaša:

$$\frac{A_j}{A_o} = \frac{d_j^2}{d_o^2 - d_j^2} = \frac{d_1^2 - (d_1 - 2h)^2}{d_2^2 - d_1^2} = \frac{4d_1h - 4h^2}{d_2^2 - d_1^2}$$

$$4h^2 - 4d_1h + \frac{d_j^2}{d_o^2 - d_j^2} \cdot (d_2^2 - d_1^2) = 0$$

$$4h^2 - 60h + \frac{100}{15625 - 100} \cdot (625 - 225) = 0$$

$$4h^2 - 60h + 2,576 = 0$$

$$h = \frac{60 - \sqrt{3600 - 41,22}}{8} \text{ mm} = \underline{\underline{0,044 \text{ mm}}}$$

Dolžino dobljenega vlakna dobimo tako, da izenačimo jedra ali obloge.

$$V_o = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) l_c = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_j^2) l_v$$

$$l_v = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_o^2 - d_j^2} \cdot l_c = \frac{625 - 225}{0,015625 - 0,0001} \cdot 1 \text{ m} = \underline{\underline{25765 \text{ m} = 25,8 \text{ km}}}$$

11.3. Varjenje optičnega vlakna

Ker se optična vlakna izdelujejo v nekaj deset kilometrskih dolžinah, jih je za daljše razdalje potrebno spajati. V primeru razstavljenih spojk se poslužujemo konektorjev, v primeru trajnih spojev pa je najprimernejše varjenje. Tipična slabljenja zvara v povprečju znašajo 0,02 dB za standardno enorodovno vlakno in 0,01 dB za mnogorodovno vlakno.

11.4. Življenjska doba optičnega vlakna

Kabli z optičnimi vlakni so od vseh sestavnih delov telekomunikacijskega omrežja elementi z najdaljšo življenjsko dobo. K tako dobrim lastnostim pripomore njihova kemijska in mehanska konstrukcija. Če izvzamemo živalske napadalce na optične kable (podgane in drugi glodalci) ter človeške dejavnike napake, so optični kabli zelo obstojni izdelki. Za umetne mase, ki tvorijo optični kabel, se predvideva življenjska doba 40.000 let.

Življenjska doba kabla z optičnimi vlakni je odvisna od krivinskega radija in vsakršnih silovitih premikov. Naslednja sporna ravnanja, ki znižujejo življenjsko dobo optičnega vlakna, so temperaturni šoki. Vsi naštetih omejitveni parametri so bili izračunani in vpeljani s strani Telcordia. Po Telcordia priporočilu GR 20 (Generic Requirements for Optical Fiber and Optical Fiber Cable; May 2008) se zahteva preizkušanje se minimalno življenjsko dobo tridesetih let. Testiranje je osnovano na natezni trdnosti optičnega vlakna. Po modelu, ki je bil razvit v okviru projekta COST 218 je predvidena življenjska doba vlakna 10^7 let.

Priporočljivo je, da so vsi poteki vlakenskih tras načrtovani, tako da je vlakno izpostavljeno čim manjšemu krivinskemu radiju. Čim manjša izpostavljenost krivinskim radijem pa je pomembna tudi pri novejših visoko zmogljivih optičnih sistemih, kjer prihaja do izraza polarizacijska rodovna disperzija. Znano je namreč, da polarizacijske nepravilnosti nastajajo v vlaknu tudi pri krivljenju.

Za kable z optičnimi vlakni, ki niso izpostavljeni velikim temperaturnim šokom in so položeni na ravnih trasah brez majhnih krivinskih radijev, je pričakovati, da bo življenjska doba vlakna tudi za nekajkrat preseglja zahtevano minimalno življenjsko dobo tridesetih let.