

VLAKNA, tanke, savitljive niti kojima je duljina mnogo veća od poprečne izmjere, osnovni strukturni sastojci tekstilnih proizvoda i papira. U tekstilnoj se industriji upotrebljava više od stotinu vrsta vlakana, koja se međusobno razlikuju po podrijetlu, kemijskom sastavu, gradi i svojstvima, pa imaju i različito područje primjene. Vlakno je osnova cjelokupne tekstilne proizvodnje i sirovina za proizvodnju prede (v. *Predenje*, TE11, str. 38), koja se industrijskom preradom oblikuje u plošne i konfekcijske tekstilne proizvode (v. *Tekstil*, TE12, str. 560).

Vlakna i njihova primjena poznati su čovjeku od davne. Neolitski dokazi iz Judeje svjedoče da se u toj regiji lan uzgajao i prerađivao u vlakna već u razdoblju ← 7160–6150. godine, a dokazi, datirani razdoblje između ← 6000. i ← 5500, nađeni su i na području sjeverne Afrike (Egipt, Sirija), zapadne Azije i jugoistočne Europe. Materijalni dokazi o primjeni lana u neolitsko doba nađeni su i u sojeničkom naselju u okolici Ljubljane. I u srednjoeuropskom prostoru bio je lan tisućima prva i jedina biljka za dobivanje vlakana.

I svila se ubraja među najstarije vlakna. U Kini pronađeni i sačuvani ostaci svinjenog basket-tkanja datirani su u razdoblje između ← 2850. i ← 2650. godine. Kinezzi su sve do IX. st. bili jedini proizvođači svile, a svilarsko je umijeće držano u strogoj tajnosti. Zatim su tržište preuzeuli Arapi, a u srednjoj Europi od XIV. st. Talijani. Početci primjene vune vežu se uz doba u kojem su pripitomljene ovce kao domaće životinje. Postoje podatci da su ovce i koze na području današnjeg sjevernog Iraka pripitomljene u ←IX. tisućleću, a na području sjeverozapadnog Irana, u Palestini i u Turskoj u razdoblju od ←VII. do ←VI. tisućleća. Uzgojem ovaca radi dobivanja vune osobito su se bavili Sumerani (oko ←3500.), a o izvozu vune iz Babilona govori se i u Hamurabijevu zakoniku (←1800.). Upotreba vune bila je raširena i u starom Egiptu, Grčkoj i Rimu, a poslije u Španjolskoj i drugim europskim zemljama. Godine 1788. uvezeno je u Australiju prvih 29 merino-ovaca, od kojih potječe današnji gotovo 200 milijuna ovaca, tako da se vunom iz Australije opskrbuje polovica svijeta.

proizvodnji već spomenutih vlakana od poli(vinil-klorida), taj se događaj smatra početkom proizvodnje tzv. II. generacije kemijskih vlakana, tj. vlakana od sintetskih polimera. Pošto su time riješeni temeljni procesni i tehnološki problemi, u sljedećim se godinama, jedno za drugim, pojavljuju nova sintetska vlakna, kako od polimera dobivenih stupnjevitom, tako i lancanom polimerizacijom.

Godine 1939. započela je pokusna proizvodnja poliamidnih vlakana od kaprolaktama (PA 6, patent P. Schlack, Njemačka) te poliuretanskih vlakana (patent O. Bayer, H. Rinke i sur.). Za proizvodnju danas najzastupljenijih poliesterskih vlakana patent je prijavljen 1941. (J. R. Whinfield, J. T. Dickson, V. Britanija). Međutim, pokusna je proizvodnja ostvarena tek 1947. a komercijalna 1953. (vlakno pod nazivom Terylene). Proizvodnja poliakrilonitrilnih vlakana započela je u SAD 1942. (patent R. C. Houtz) te u Njemačkoj 1943. (patent H. Rein). U razdoblju 1942–1950. Japan ovladava tehnologijom proizvodnje u vodi netopljivih vlakana od poli(vinil-alkohola) (vinilalna vlakna), a u razdoblju 1955.–1958. svladavaju se procesi industrijske sinteze linearnog polietilena i izotaktičkog polipropilena za vlakna (patent G. Natta i sur., Italija), pa industrijska proizvodnja polipropilenskog vlakna započinje 1959. godine. Pokusna proizvodnja termootpornih aramidnih vlakana počinje 1962. (patent tvrtke DuPont), te šezdesete i sedamdesete godine karakteriziraju njihov dalji razvoj (p-aramidi, Kevlar).

Od 1971. razvija se proizvodnja niza vlakana poboljšanih svojstava za tekstilne namjene, ali i vlakana velike čvrstoće i velikog modula elastičnosti te drugih specijalnih svojstava, uglavnom za primjenu u vršnim tehničkim materijalima i za posebne namjene (vojna industrija i tehnika, zaštita od vrućine, zračenja, kemikalija, mikroorganizama i dr.), koja se općenito svrstavaju u tzv. III. generaciju kemijskih vlakana, a mnoga od njih i u skupinu visokokvalitetnih vlakana. Kraj osamdesetih i početak devedesetih godina obilježavaju razvoj proizvodnje mikrovlakana.

Vrste vlakana. Za izradbu tekstila upotrebljava se veoma mnogo vrsta vlakana različita podrijetla, kemijskog sastava, strukture i svojstava. Vlakna se mogu grubo svrstati u prirodna i u kemijska vlakna (tabl. 1).

Tablica 1
VAŽNIJE VRSTE TEKSTILNIH VLAKANA

| Prirodna vlakna | | | Kemijska vlakna | | |
|--|--|-----------|--|---|--|
| celulozna | proteinska | mineralna | od prirodnih polimera | od sintetskih polimera | od anorganskih tvari |
| Sjemenska: pamučno kapok Stabljična vlakna: laneno kudjelja juteno ramijino kenafovo Tvrda (vlakna od lista i usploda): sisal abaka kokosovo | vuna moher kašmir kašgora kostrijet devina dlaka alpaka vikunjino vlakno kuničovo vlakno jakovo vlakno konjska struna svila tussah-svila | azbest | Celulozna: viskozna (CV) modalna (CMD) bakrena (CUP) liocelna Od celuloznih derivata: acetatna (CA) triacetatna (CT) Proteinska (PROT) | poliesterska (PES) poliamidna (PA) aramidna (AR) poliakrilonitrilna (PAN) modakrilna (MAC) polipropilenska (PP) polietilenika (PE) fluorna (PTFE) klorna (CLF) vinilalna (PVAL) elastanska (EL) elastodienska (ED) | uglična (CF) staklena (GF) kremena bazaltna polikristalasta monokristalna metalna (MF) |

Konopljna potječe iz sjevernih predjela središnje Azije, a u Europi se sadila već u ←V. st.

Pamuk potječe iz Indije, a prvi se put spominje u sanskrtskim spisima oko ←1400. godine. I Ašteci u Americi poznavali su ga mnogo prije nego što su ga Arapi u XIII. st., preko Španjolske i Sicilije, prenijeli u Europu.

Prvi praktični korak u smjeru proizvodnje *kemijskih vlakana od prirodnih polimera* bilo je nitriranje pamučne celuloze, što je 1846. uspješno C. F. Schönbeinu iz Basela. On je pronašao i kolodij, otopinu celulozognitratu u smjesi alkohola i etera, što je bila osnova za razvijetak kemijske eksplozivne, ali i za proizvodnju lakova i filmova. P. Schützenberger je 1864. acetilirao celulozu u laboratorijskom mjerilu. Industrijsku proizvodnju kemijskih vlakana na bazi celulozognitratu započeo je H. de Chardonnet u Francuskoj 1891. godine (umjetna svila). Iste su godine C. F. Cross, E. J. Bevan i C. Beadle u Engleskoj otkrili tzv. viskozni postupak za prevodenje celuloze u otopinu, a 1904. objavljena je u Njemačkoj mogućnost proizvodnje acetatne svile, što je ostvareno tek nakon dvadesetak godina. Oko 1930. razvijen je i viskozni filament velike čvrstoće, koji se mnogo upotrebljavao u proizvodnji automobilskih guma.

Prvo kemijsko vlakno od sintetskih polimera proizvedeno je 1931. od poli(vinil-klorida) (patent F. Klatte, Njemačka), a u razdoblju 1932.–1934. u SAD započinje industrijska proizvodnja kopolimernih vlakana od vinil-klorida i vinil-acetata. Međutim, za razvitak industrije kemijskih vlakana od sintetskih polimera posebno su važna istraživanja kojima se početkom XX. st. vlaknate polimere nastojalo proizvesti stupnjevitom polimerizacijom (polikondenzacijom). Prvi bitni radovi iz tog područja potječu od H. Staudinger i E. Fischera, a nastavlja ih W. H. Carothers, koji se danas smatra najzaslužnijim za razjašnjenje mehanizma i brzine tih reakcija, ovisnosti između veličine makromolekula i stupnja iskoristenja reakcije te utjecaja nečistoća na rast lanca. Ta su saznanja omogućila i praktično provođenje sinteze polimera za vlakna.

W. H. Carothers, koji je radio u tvrtki DuPont, prijavio je 1931. patent za sintezu poliamida iz heksametilendiamina i adipinske kiseline (PA 6,6). Međutim, trebalo je nekoliko godina intenzivnog rada mnogih stručnjaka (kemičari, fizičari, inženjeri, tehničari) da bi se laboratorijska sinteza polimera i ispredanje vlakana prenijeli u industriju. Tako su se industrijski ta vlakna počela proizvoditi tek krajem 1939., a početkom 1940. našla su se na tržištu pod nazivom Nylon. Unatoč ranijoj

Prirodna vlakna proizvod su prirodnih procesa žive prirode (biljni i životinjski svijet) i nežive prirode (minerali). U prirodi se nalaze u obliku u kojem se mogu izravno upotrijebiti kao tekstilna sirovina ili u takvu stanju da im je upotreba moguća nakon nekih fizikalno-mehaničkih operacija.

Razlikuju se tri glavne skupine prirodnih vlakana: 1) *celulozna vlakna* dobivena od sjemenaka, stabljike, plodova i lišća; 2) *proteinska vlakna*, tj. dlaka različitih životinja, te svila, tj. proizvodi dudova svilca i drugih svilenih prelaca; 3) *mineralna vlakna*, s azbestom kao jedinim predstavnikom (v. *Azbest*, TE1. str. 633), za kojeg je Svjetska zdravstvena organizacija preporučila da se zbog štetnosti za zdravlje što manje upotrebljava.

Kemijska vlakna nastaju industrijskom proizvodnjom. Prikładnim fizikalno-kemijskim modifikacijama i preradom neki se *prirodni polimeri* (npr. drvna celuloza, bjelančevine biljnog i životinjskog podrijetla, alginati) mogu prevesti u vlaknast oblik i postupcima kemijskog ispredanja ekstrudirati u vlakna. Tako se, npr., dobivaju vlakna od regenerirane celuloze i celuloznih derivata, proteinska i alginatna vlakna. Drugu skupinu kemijskih vlakana čine vlakna od *sintetskih polimera*. Polimeri se sintetiziraju od monomernih spojeva sposobnih da u pogodnim uvjetima polymeriziraju u dovoljno dugačke lancaste makromolekule. Dobiveni se polimer zatim ekstrudira u vlakna. Među mnoštvom različitih vrsta vlakana te skupine istaknuto mjesto zauzimaju i najviše se upotrebljavaju poliesterska, poliamidna, poliakrilonitrilna i polipropilenska vlakna. Posebno se izdvaja skupina kemijskih vlakana od *anorganskih tvari*.

Svojstva vlakana. Vlakna se odlikuju mnogim karakterističnim svojstvima (tabl. 2). To je u prvom redu njihov izduljeni oblik, koji se ogleda u vrlo velikom omjeru duljine prema poprečnoj izmjeri. Da bi vlakna mogla služiti kao tekstilna sirovina, taj omjer mora biti najmanje 100. Međutim, osim za neka gruba tehnička vlakna, taj je omjer za sva komercijalna vlakna mnogo veći, npr. za pamučna vlakna iznosi prosječno 1400, vunu 3 000, svilu $> 33 \cdot 10^6$.

Vlakna mogu biti ravna (ispružena) ili kovrčava. Od prirodnih su vlakana kovrčavi vuna i druga proteinska vlakna, dok pamuk pokazuje uvojitoš, uvijanje vlakna oko vlastite osi. Kovrčavost kemijskih vlakana najčešće se postiže toplinsko-mehaničkom obradom (teksturiranjem). Kovrčava se vlakna lakše predu, predu je voluminoznija, a materijali su toplij.

Sjajnost ili zagasitost površine tekstilnih proizvoda, što je posljedica veće ili manje refleksije svjetlosti, ovisi o strukturi površine vlakana. Pod mikroskopom se na vunenom vlaknu opažaju ljske, na lanenom i ostalim stabiljičnim vlknima gusta prugavost, dok je površina većine kemijskih vlakana glatka, pa su ona uglavnom sjajna. Na nekim se vlknima može primijetiti prugavost, kao posljedica nepravilna oblika poprečnog presjeka, i točkice od sredstava za matiranje, ili su bez ikakvih posebnih morfoloških značajki.

Finoča je mjera za površinu poprečnog presjeka. Što je ta površina manja, vlakno je finije, tanje, a to utječe na savitljivost i jednoličnost prede i opip tekstilnog materijala. Površina presjeka može se jednostavno odrediti na temelju promjera ako su vlakna kružnog presjeka (mnoga kemijska vlakna) ili približno kružnog, eliptičnog presjeka (vuna). Tako promjeri običnih tekstilnih vlakana iznose $10\cdots70 \mu\text{m}$, grubih, tehničkih vlakana i $> 150 \mu\text{m}$, a ultrafinih ili mikrovlakana $< 10 \mu\text{m}$. Kako određivanje površine presjeka, zbog često nepravilna oblika vlakna, nije jednostavno, to se finoča iskazuje *duljinskom masom*, tj. omjerom mase prema duljini. Što je vlakno finije, duljinska mu je masa manja. Jedinica je duljinske mase *teks* (znak: tex), što je naziv za gram na 1000 m duljine vlakna. Dakle, finoča izražena kao duljinska masa pokazuje koliku masu, u gramima, ima vlakno duljine 1000 m. Prosječna je finoča tekstilnih vlakana 0,1 \cdots 3 tex.

Vlačna čvrstoća iskazuje se omjerom vlačne prekidne sile i duljinske mase neistegnutog vlakna. Veću vlačnu čvrstoću imaju kemijska vlakna od sintetskih polimera, srednje su čvrstoće svila i prirodna celulozna vlakna, a najmanje su čvrsti vuna i kemijska vlakna od prirodnih polimera (tabl. 2). Prirodnim celuloznim vlknima povećava se čvrstoća u mokrom stanju, dok se mokro vuni, dlakama i viskozi čvrstoća smanjuje. Pojava je povrativa, pa osušena vlakna ponovno dobivaju početne vrijednosti čvrstoće.

Tablica 2
FIZIKALNA SVOJSTVA VLAKANA*

| Vlakna | Gustoča g/cm ³ | Upijanje vlage** | Temperatura omekšanja °C | Talište (temperatura raspada) °C | Vlačna čvrstoća cN/tex | Prekidno produljenje % | Modul elastičnosti cN/tex | Relativna čvrstoća u petlji % | Relativna čvrstoća u čvoru % | Granični udio kisika*** (LOI) % |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Pamučna | 1,55 | 7 \cdots 8 | | | 29 \cdots 42 | 5,6 \cdots 6,8 | 300 \cdots 600 | | | |
| Vuna | 1,30 | 14 | 240 | | 11 \cdots 12 | 30 \cdots 42 | 150 \cdots 300 | | | |
| Svila | 1,34 | 10 | | | 38 | 25 | 700 \cdots 1000 | | | |
| Viskozna | 1,52 | 12 \cdots 13 | 120 | (175 \cdots 190) | 16 \cdots 30 | 10 \cdots 30 | 200 \cdots 300 | 25 \cdots 65 | 25 \cdots 60 | 19 \cdots 20 |
| Acetatna | 1,29 \cdots 1,33 | 6 \cdots 7 | 120 | 255 \cdots 260 | 10 \cdots 15 | 20 \cdots 45 | 200 \cdots 350 | 70 \cdots 95 | 70 \cdots 95 | 18 \cdots 19 |
| Triacetatna | 1,29 \cdots 1,33 | 2 \cdots 5 | 130 | 290 \cdots 300 | 10 \cdots 15 | 20 \cdots 45 | 200 \cdots 350 | 80 \cdots 90 | 80 \cdots 90 | 18 \cdots 19 |
| Poliesterska | 1,36 \cdots 1,41 | 0,2 \cdots 0,5 | 230 \cdots 240 | 250 \cdots 260 | 40 \cdots 60 | 20 \cdots 30 | 700 \cdots 1500 | 70 \cdots 98 | 70 \cdots 80 | 20 \cdots 22 |
| Poliamidna (PA 6) | 1,14 | 3,5 \cdots 4,5 | 180 \cdots 200 | 215 \cdots 220 | 40 \cdots 60 | 20 \cdots 45 | 50 \cdots 300 | 70 \cdots 95 | 80 \cdots 90 | 20 \cdots 21 |
| – tip velike čvrstoće | 1,14 | 3,5 \cdots 4,1 | | 215 \cdots 220 | 60 \cdots 90 | 15 \cdots 20 | 400 \cdots 500 | 70 \cdots 90 | 60 \cdots 70 | 20 \cdots 21 |
| Poliamidna (PA 6,6) | 1,14 | 3,5 \cdots 4,5 | 220 \cdots 235 | 255 \cdots 260 | 40 \cdots 60 | 20 \cdots 40 | 50 \cdots 300 | 70 \cdots 95 | 80 \cdots 90 | 20 \cdots 21 |
| – tip velike čvrstoće | 1,14 | 3,0 \cdots 4,0 | 220 \cdots 250 | 255 \cdots 260 | 60 \cdots 90 | 15 \cdots 20 | 400 \cdots 500 | 70 \cdots 90 | 60 \cdots 70 | |
| Aramidna (Kevlar) | 1,44 \cdots 1,47 | ~1,5 | ~400 | (~550) | 140 \cdots 250 | 1 \cdots 4 | 4100 \cdots 10 000 | 45 \cdots 60 | 30 \cdots 50 | 29 \cdots 31 |
| Poliakrilonitrilna | 1,17 \cdots 1,19 | 1 \cdots 1,5 | | (~300) | 35 \cdots 45 | 15 \cdots 40 | 950 \cdots 1000 | 30 \cdots 80 | ~70 | 18 |
| Polipropilenska | 0,90 \cdots 0,92 | 0 | 150 \cdots 160 | 160 \cdots 175 | 25 \cdots 60 | 15 \cdots 50 | 50 \cdots 500 | 85 \cdots 90 | 70 \cdots 90 | 19 \cdots 20 |
| Polietylenska | 0,95 \cdots 0,96 | 0 | 105 \cdots 120 | 124 \cdots 138 | 30 \cdots 70 | 10 \cdots 45 | 20 \cdots 500 | 60 \cdots 90 | 70 \cdots 90 | |
| Fluorina | 2,1 \cdots 2,3 | 0 | 180 \cdots 200 | (327 \cdots 342) | 8 \cdots 18 | 13 \cdots 42 | 35 \cdots 200 | 60 \cdots 90 | 75 \cdots 90 | 40 \cdots 95 |
| Klorina | 1,40 | 0 | 65 \cdots 75 | (160 \cdots 200) | 24 \cdots 27 | 10 \cdots 25 | 200 \cdots 400 | | 35 \cdots 70 | 37 \cdots 46 |
| Vinilalna | 1,26 \cdots 1,31 | 3,5 \cdots 5 | 75 \cdots 130 | (240 \cdots 260) | 55 \cdots 77 | 9 \cdots 22 | 300 \cdots 450 | 35 \cdots 40 | 55 \cdots 65 | 20 |
| Elastanska | 1,1 \cdots 1,3 | 0,5 \cdots 1,5 | 170 \cdots 230 | 230 \cdots 290 | 5 \cdots 12 | 400 \cdots 700 | 0,5 \cdots 1 | | | |
| Staklena | 2,5 \cdots 2,6 | 0,1 | 600 \cdots 700 | | 40 \cdots 140 | 2 \cdots 5 | 2 800 \cdots 3 400 | | | |
| Ugljična | 1,8 \cdots 2,0 | | >2 400 | | 100 \cdots 170 | <1 | 11 000 \cdots 22 000 | | | |
| Metalna | 7,9 | | ~900 | 1400 \cdots 1450 | 22 \cdots 29 | 1 \cdots 2 | 1900 \cdots 2 500 | | | |
| Borna | 2,7 | | | 2 300 | 100 \cdots 130 | 0,5 \cdots 0,9 | ~15 000 | | | |

*Fizikalna svojstva kemijskih vlakana od anorganskih tvari opisana su u tablici 4.

**Upijanje vlage pri 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka 65%, izraženo kao postotak na apsolutno suhu masu.

***Najmanji obujamni udio kisika u zraku pri kojem vlakno još može gorjeti.

Duljina. Prema duljini razlikuje se vlasasto i filamentno vlakno. *Vlasasto vlakno (vlasak)* ograničene je duljine, koja se iskazuje u milimetrima. Takve su duljine sva prirodna vlakna osim svile (pamučno vlakno 10 \cdots 65 mm, vuna 60 \cdots 300 mm, stabiljčna vlakna 600 \cdots 3 000 mm). Vlasasta se vlakna prednjem prerađuju u predu, za što je potrebno da su dulja od 12,5 mm. *Filamentno vlakno (filament)* neograničene je duljine, a ona se iskazuje u metrima ili kilometrima. Od prirodnih vlakana takve je duljine samo svila. Kemijska vlakna mogu se proizvoditi kao filamentna i kao vlasasta. Duljina vlasastih vlakana prilagođuje se duljinu prirodnih vlakana radi mogućnosti preradbe na strojevima za prednje. Izradba predu od filamentnih je vlakana jednostavnija jer nije potrebno paraleliziranje i uvijanje.

Čvrstoća se može mijenjati i za vrijeme preradbe ili upotrebe. Sunčev zračenje, posebno ultraljubičasto, zatim toplina, različite kemikalije i mehanička naprezanja smanjuju čvrstoću vlakana. Za preradbu u većinu tekstilnih proizvoda potrebno je da vlačna čvrstoća vlakana bude najmanje 25 cN/tex. Na trajnost proizvoda u primjeni bitno utječe sposobnost elastičnog oporavka, što se vidi iz vrijednosti *modula elastičnosti*, jer on određuje područje u kojem se vlakna trajno ne deformiraju, nego se nakon prestanka djelovanja sile vraćaju u prvobitno stanje.

Od ostalih mehaničkih svojstava važni su i *savitljivost* (sposobnost da se vlakno djelovanjem sile savija, ali ne lomi), zatim otpornost na uvijanje, tlak i trenje te otpornost na dinamička opterećenja, tj. na djelovanje sile promjenljiva iznosa i smjera.

Gustoća vlakana utječe na opip i težinu tekstilnih proizvoda. Većini je vlakana gustoća $1\cdots2 \text{ g/cm}^3$ (tabl. 2), a samo su polipropilenska i polietilenска vlakna lakša od vode.

Higroskopnost ovisi o prisutnosti slobodnih polarnih skupina u makromolekulama od kojih su vlakna građena. Izražava se količinom vlage koju vlakno upije do uspostave ravnotežnog stanja s tzv. standardnom atmosferom, tj. prostorom relativne vlažnosti zraka 65% i temperature 20 °C. Ta se ravnotežna vlaga u vlaknu (tekstilnom materijalu) iskazuje kao postotak prema apsolutno suhoj masi vlakna i naziva se *repreza*. Razne vrste vlakana uspostavljaju ravnotežno stanje sa standardnom atmosferom pri različitim, karakterističnim razinama upijene vlage (tabl. 2), tj. različito su apsorptivna, što se odražava i na uporabna svojstva tekstilnih proizvoda, u prvom redu na osjećaj ugodnosti pri nošenju odjeće. Stoga se pri razmatranju svojstava pojedinih vlakana, osim ostalih karakteristika, redovito iskazuje i podatak o reprizi. Prirodna vlakna i viskoza upijaju vlagu s tijela mnogo bolje od kemijskih vlakana, pa su ugodnija za nošenje. Apsorpcijom molekula vode povećava se masa i obujam vlakana (bubreženje lanenog i jutenog vlakna te kudjelje), prirodnim se celuloznim vlknima čvrstoća povećava, vuni i viskozi smanjuje, dok se većini kemijskih vlakana gotovo ne mijenja.

Toplinska svojstva. Osjetljivost na povišenu temperaturu važno je svojstvo vlakana, jer ograničava niz procesa dorade tekstilnih materijala, ali i neke postupke pri održavanju, kao što su pranje i glaćanje. Toplinsko rastezanje ili skupljanje česta je pojava koja može uzrokovati poteškoće u preradbi, ali se može i iskoristiti za postizanje posebnih učinaka, npr. pri izradbi mješavine u kojoj se skuplja samo jedno vlakno. Međutim, promjena izmjera gotovog tekstilnog proizvoda ne ovisi toliko o vrsti vlakna, nego mnogo više o konstrukciji proizvoda. Talište je karakteristika polimera i može poslužiti za identifikaciju vlakana, dok se pri temperaturi omekšanja vlakna termički obrađuju različitim postupcima dorade. Toplinska provodnost i specifična toplina vlakana nisu posebno važni, jer toplinska provodnost plošnih tekstilnih proizvoda mnogo više ovisi o građi proizvoda i količini zraka zadržanoj među vlknima nego o vrsti vlakana.

Električna svojstva. Osim metalnih i grafitnih vlakana, vlakna općenito pokazuju vrlo malu električnu provodnost pa se međusobnim trenjem često nabijaju pozitivnim ili negativnim statičkim elektricitetom. To je posebno izraženo za kemijska vlakna od sintetskih polimera u suhoj atmosferi i razlogom je što slojevi različitih tekstilnih materijala prianjaju jedan uz drugi (raznovrsni naboji) ili se odbijaju (istovrsni naboji). Ta pojava uzrokuje mnoge poteškoće u preradbi i primjeni, a sprečava se povećanjem vlažnosti zraka ili električne provodnosti vlakana (ugradnjom polarnih skupina u makromolekule, dodatkom antistatika pri ispredanju kemijskih vlakana i dr.).

R. Čunko D. Raffaelli

STRUKTURA VLAKNA

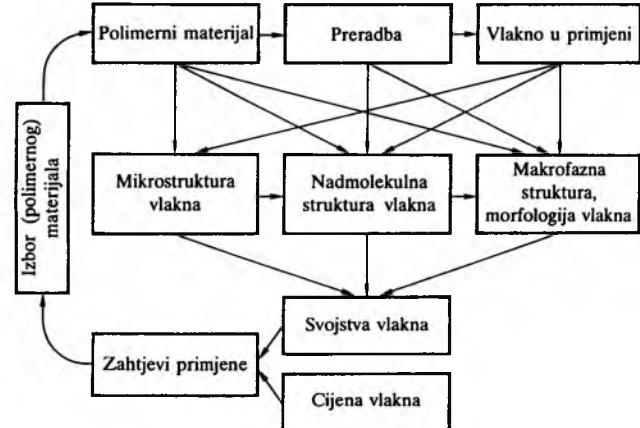
Struktura je vlakna definirana statičkim (geometrijskim) i dinamičkim značajkama osnovnih strukturalnih elemenata (strukturalnih jedinica) svih strukturalnih razina, od mera makromolekule (općenito: atoma i molekula) do okom vidljive građe vlakna. Osnovne strukturalne značajke kojima se vlakno razlikuje od ostalih izotropnih i anizotropnih tvorevinu proistječe iz njegove jednoosne orientacije. Takvom se orientacijom stvara strukturalna anizotropnost, kako osnovnih gradivnih elemenata u vlaknu (ponavljanju strukturalnih jedinica makromolekule, makromolekule, kristalita, amorfita, mikrofibrila, fibrila), tako i energija veza unutar tih strukturalnih elemenata i među njima (energijska anizotropnost, poznata kao strukturalna heterodinamičnost). Primjerice, heterodinamičnost makromolekula (razlike vrijednosti energija veza unutar makromolekula i među njima dosežu i dva reda veličine) upravo omogućuje izvlačenje i istezanje vlakna, a strukturalna anizotropnost utječe na nastajanje anizotropnosti svojstava vlakna.

Struktura se vlakna može promatrati na različitim razinama, te otuda različite podjele strukture vlakana i podjele vlakana prema strukturi. Najčešće strukturalne temeljnica podjela jesu kemijska

građa makromolekula, strukturne razine, te strukturalna sredost izvornog polimera ili nastalog vlakna.

Prema kemijskom sastavu makromolekula nastala je opća podjela vlakana na anorganska i organska. S obzirom na broj kemijskih (polimernih) komponenata u vlaknu razlikuju se jednokomponentna, dvokomponentna i višekomponentna vlakna.

Vlakna se međusobno razlikuju prema svojoj strukturalnoj sredosti (kristalna, kristalasta, mezomorfna ili amorfna vlakna). Na temelju hijerarhije strukturalnih elemenata, odnosno strukturalnih razina u vlaknu, razlikuje se mikrostruktura, nadmolekulna struktura i makrofazna struktura, odnosno morfološka građa vlakna. Nadmolekulne strukture pojedinih komponenata u dvo-komponentnim i višekomponentnim vlaknima mogu izgraditi višu strukturalnu razinu nadmolekulne strukture koja se odnosi na faznu strukturu cijelokupnog vlakna, tj. mikrofaznu strukturu vlakna.



Sl. 1. Međuvisnost strukture i svojstava pri preradbi polimera u vlakno

Promjene strukturalnih značajki mogu se pratiti tijekom prirode ili kemijske sinteze polimera, a i samog vlakna, u procesu oblikovanja vlakna te tijekom primjene. Važan je utjecaj strukture ne samo na svojstva vlakana nego i na svojstva polimera. Strukturalne značajke polimera i vlakna kojima se utječe na svojstva vlakana određuju njihovu primjenu, a zahtjevi glede uporabnih svojstava vlakna utječu na izbor izvornoga polimernog materijala (sl. 1).

Mikrostruktura vlakna

Mikrostruktura vlakna odnosi se na građu, raspored i međudjelovanje osnovnih gradivnih jedinica: atoma i molekula u rijetkim niskomolekulnim vlknima (metali, oksidi, karbidi), te mera makromolekula u polimernim vlknima, tj. na blisku i daleku sredost tih strukturalnih jedinica. Budući da su vlakna pretežito polimernog podrijetla, za razumijevanje njihove mikrostrukture potrebno je definirati građu makromolekule (njezinu mikrostrukturu, tj. lokalnu građu) i slaganje makromolekula u područja veličine do granice između bliske i daleke sredosti (10 nm), jer je daleka sredost samo ponavljanje tih područja.

Mikrostruktura makromolekule obuhvaća njezinu lokalnu građu s pripadnim primarnim i sekundarnim strukturalnim značajkama. Lokalna je građa makromolekule određena brojem, vrstom i strukturalom ponavljanjem konstitucijske, konfiguracijske i konformacijske jedinice. Primarna lokalna građa, pravilno ili statički ponavljana duž cijele makromolekule (primarna struktura), utječe na prostornu pojavnost makromolekule (sekundarna i tercijarna struktura) te na međusobni raspored makromolekula u kondenziranom stanju vlakna po načelu ostvarivanja najgušćeg mogućeg slaganja. Geometrijske, termodinamičke i kinetičke strukturalne značajke makromolekula određuju pri njihovoj kondenzaciji u vlaknu ne samo način slaganja, nego i makrokonformaciju makromolekula te građu nekih elemenata nadmolekulne strukture.

Budući da građa makromolekule (općenito struktura polimera) utječe na svojstva polimera (deformabilnost, preradivost) i vlakna, to se radi sposobnosti preradivosti polimernog materijala

u vlakno i postizanja potrebnih svojstava vlakana postavljaju određeni zahtjevi glede građe makromolekula polimera, i to u vezi s linearnosti, s pravilnosti građe, kontroliranom gipkosti i zadovoljavajućom polarnosti.

Linearost makromolekula omogućuje njihovo proklizavanje pri izvlačenju i istezanju, gusto slaganje u kristalno stanje i ostvarivanje interakcije makromolekula. Općenito postoji međuodnos između linearnosti makromolekule, gipkosti makromolekule i elastične deformabilnosti polimera. Potrebna je minimalna duljina makromolekule od 100 nm, te što uža raspodjela molekulnih masa. Veliki bočni supstituenti smanjuju mogućnost gustog slaganja i klizanja makromolekula, a krute aromatske jedinice u glavnom lancu smanjuju gipkost. Iznimka od linearnosti makromolekula su, među inim, slojevita heksagonska struktura ugljičnih vlakana i trodimenzijska oksidna i silikatna vlakna.

Pravilnost građe makromolekule (linearna simetrija) pretpostavlja pravilno ponavljanje konstitucijskih jedinica, mera (taktilnost) i komonomera u kopolimeru. Stereoregularne strukture lanca omogućuju njihovo slaganje i kristalizaciju i kada ima više bočnih supstituenti. Njihovo statističko ponavljanje smanjuje sredenost strukture i međudjelovanje makromolekula te pogoršava svojstva vlakna. Iznimka je izomorfna zamjena u lancu s komonomerom iste duljine, a manjega poprečnog presjeka, čime se smanjuje krutost makromolekule (npr. zamjena tereftalne adipinskog kiselinom u poliesterima).

Kontrolirana gipkost makromolekule. Dok je za preradbu potrebna što veća gipkost (fleksibilnost) i gibljivost makromolekula, oblikovano vlakno treba biti što žilavije (što jača interakcija makromolekula, čak i njihovo umrežavanje). Odatle proizlazi potreba za kontrolom gipkosti makromolekule, tj. za postizanjem optimalne gipkosti. Jedno od mjerila za gipkost makromolekula jest termodinamički ili Kuhnov segment (odgovara najmanjoj duljini lanca koji pokazuje gibljivost), prema kome su makromolekule gipke ako je segment < 3 nm, srednje gipke ($3 \cdots 10$ nm) i krute (> 10 nm). Gipkost se makromolekula smanjuje ograničavanjem rotacije mera zbog cikličkih, posebice aromatičnih struktura u lancu, steričkih smetnji od bočnih ili funkcionalnih skupina, te intramolekulnih i intermolekulnih interakcija. Smanjenjem gipkosti makromolekule povećava se staklište i talište. Iznimna konformacijska krutost mezofaznih aromatskih poliesterova (zbog velikog stupnja aromatičnosti mezogenih jedinica u glavnom lancu) povisuje talište toliko (do 600°C) da postaju nepreradivi. Zato se u takvim slučajevima u glavni lanc ugraduju različiti komonomeri (simetrične i asimetrične aromatske i alifatske jedinice, te gipki produživači lanci s neparnim brojem ugljikovih atoma) koji znatno snizuju talište poliarylata. Krutolančani aromatski poliamidi i poliesteri zanimljivi su za primjenu zbog velike čvrstoće, koju imaju zahvaljujući ne samo većoj čvrstoći makromolekula nego i većoj krutolančnosti, većem broju ispruženih veznih lanaca u vlaknu i njihovoj većoj orientaciji.

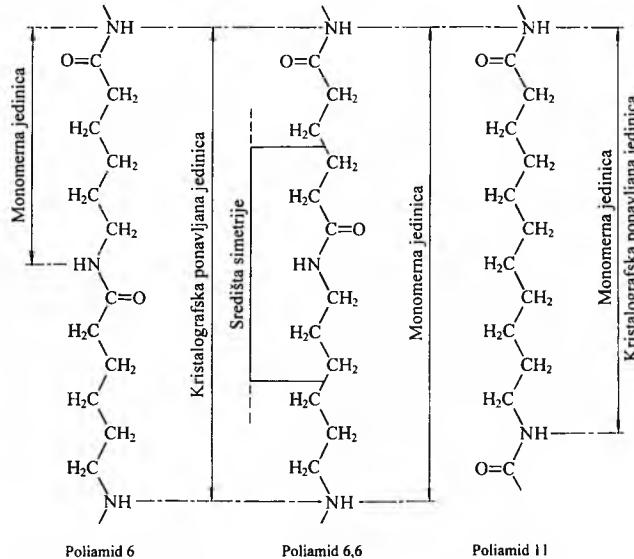
Zadovoljavajuća polarnost makromolekule, odnosno stupanj energijske anizotropije (odnos gustoća energija intramolekulnih i intermolekulnih veza) također je jedan od uvjeta za postizanje odgovarajućih deformacijskih svojstava polimera (s polarnošću se smanjuje gipkost makromolekula), te optimalne elastičnosti, čvrstoće i žilavosti vlakna. Polarnošću se može povećati interaktivnost i niskomolekulnim tvarima, što je posebno važno za mogućnost provedbe raznovrsnih fizikalno-kemijskih doradbenih procesa te bojadisanja i tiska vlakana. Međumolekulna interakcija nije značajka samo sintetskih (poliamidi, poliesteri, akrilna vlakna), nego i prirodnih vlakana, npr. vodikove veze u celulozi i vlaknastim bjelančevinama.

Slaganje makromolekula. Različit stupanj pravilnosti slaganja makromolekula vodi do različitih vrsta i stupnjeva srednosti kondenziranog stanja vlakna, pa se prema tome razlikuju kristalno, mezofazno i amorfno fazno stanje.

Kristalna struktura ima daleku trodimenzijsku sredenost (na razmacima većim od 10 nm) koja se očituje u ponavljanju jedinčine celije kao osnovnoga mikrostrukturnog elementa. Strukturne jedinice tipičnih sintetskih vlakana, poliamida, prikazane su na slici 2. O gradi makromolekule, odnosno o elementima simetrije makromolekule i jedinčine celije, ovisi hoće li se podudariti izmjere ponavljanih jedinica: konstitucijske (mer), konfiguracij-

ske, konformacijske, zavojnične i kristalografske jedinice (sl. 2). Pri preradbi polimera u kemijsko vlakno u pravilu se jedinčina celija ne mijenja, tj. konačna kristalna struktura vlakna odgovara nekoj od kristalnih modifikacija izvornoga izotropnog polymernog polimera. Primjerice, gotovo vlakno poli(etilen-terefatalata) kristalizira s jednakom triklinском jedinčinom celijom kao i kristalizirani izotropni poli(etilen-terefatalat). Za razliku od poli(etilen-terefatalata), poliamidi se, zbog anizotropnosti lančane građe i posljedične anizotropne interakcije makromolekula, odlikuju polimernosću kristalnih modifikacija. Dok dipolna esterska interakcija među makromolekulama poli(etilen-terefatalata) postoji u određenom simetrijskom položaju, anizotropne se vodikove veze $-\text{CO} \cdots \text{HN}-$ u alifatskim poliamidima mogu ostvariti paralelnim i antiparalelnim slaganjem lanaca (PA 6 i PA 11). Ostvarivanje vodikovih veza u ravninama okomitim na os makromolekula koje se sastoje od mera različitih duljina (PA 6, PA 6,6 i PA 11, sl. 2), s različitim ponavljanjem i orijentacijom skupina $-\text{CO}$ i $-\text{NH}$ određuje način slaganja poliamidnih makromolekula. Zato vlakno PA 6 i izotropni poliamid-6 mogu sadržavati tri monoklinske kristalne modifikacije:

1. α -modifikaciju, kojoj su paralelno slagani lanci, upravo zbog uvjeta ostvarivanja vodikovih veza, kontrahirane konfiguracije s obzirom na antiparalelne lance, što uzrokuje gušće slaganje i veću faznu stabilnost,
2. β -modifikaciju s antiparalelnim slaganjem makromolekula i
3. γ -modifikaciju (pseudoheksagonsku) s heksagonskim slaganjem ravnina makromolekula.

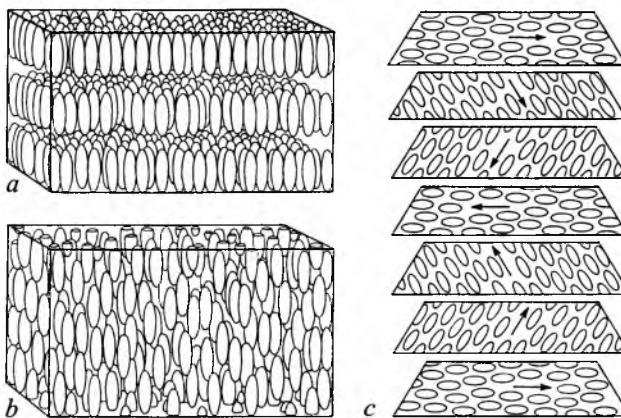


Sl. 2. Usporedba nekih strukturnih jedinica poliamida PA 6, PA 6,6 i PA 11

Zbog gušćeg slaganja i bolje interakcije makromolekula nego u amorfnim područjima, kristalna se područja odlikuju većom tvrdićom, čvrstoćom i žilavošću. Jake međumolekulne interakcije povećavaju žilavost vlakana. Zato su žilavi kristalasti plastiomeri s posebnim svojstvima plastičnosti i elastičnosti, poput poliamida i poli(etilen-terefatalata), pogodni za vlakna.

Mezofazna struktura odlikuje se dalekom jednodimenzijskom ili dvodimenzijskom sredenošću kakva se sreće u tekućim, plastičnim i konformacijski nesređenim kristalima. Longitudinalna sredenost strukturnih elemenata (mezogenih jedinica) naziva se *smeštičkom*, lateralna (bočna) sredenost *nematičkom*, a spiralna sredenost *kolesteričkom mezofaznom strukturoom* (sl. 3). Mezofazna se struktura može promatrati polazeći od kristalne strukture kojoj se reduciranjem dimenzija sredenosti gubi neki element simetrije. Reduciranje simetrije pokazuju polimorfne strukture vlakna poli(*p*-fenilen-terefalamida) (komercijalno poznat kao Kevlar 49 i Kevlar 29) dobivenog ispredanjem iz otopina pod različitim uvjetima. Pri ispredanju iz koncentriranih anizotropnih otopina nastaje monoklinska kristalna struktura vlakna, dok se pri ispredanju iz razrijedjenih otopina, zbog pomaka makromolekula i reorientacije ravnina fenilenskih skupina, simetrija reducira na mezostrukturnu razinu. Kemijska se vlakna od mezo-

faznih *tekućih kristalnih polimera* (engl. liquid crystalline polymer, LCP) dobivaju uobičajenim postupcima preradbe iz otopina (liotropna LCP-vlakna) i taline (termotropna LCP-vlakna).



Sl. 3. Smeštička (a), nematička (b) i kolesterolička mezoafazna struktura (c)

U liotropna LCP-vlakna ubrajaju se sljedeći polimerni materijali:

- aromatski poliamidi (aramidi) s tipičnim predstavnikom poli(*p*-fenilen-tereftalamidom),
- heterociklički poliarileni poput poli(*n*-fenil-benzo-bis-oksazola) i poli(*n*-fenil-benzo-bis-tiazola),
- uglična vlakna dobivena od poliakrilonitrila u kojima je dislokacijom mrežnih ravnina kristalna grafita struktura transformirana u mezoafaznu strukturu.

Termotropna LCP-vlakna aromatski su kopoliesteri (poliarilati) na osnovi *p*-hidroksibenzojeve kiseline (HBA), 2,6-dihidroksinaftalena (DHN), tereftalne kiseline (TPA) i poli(etilen-tereftalata) (PETP). Tipični su LCP-poliarilati poli(HBA/DHN), poli(HBA/PETP) i poli(HBA/DHN/TPA). Među ostalim termotropnim LCP-vlaknima zanimljivi su poliazometini dobiveni polikondenzacijom aromatskih diamina s dialdehidima.

Mezoafaznu strukturu ima i niz prirodnih vlakana, posebice na osnovi bjelančevina u mišićnim (aktin i miozin) i koštanim tkivima (hitin, keratin).

Amorfna struktura odlikuje se bliskom sredenošću, tj. sredenošću na razmacima manjim od 10 nm. Vrsta i stupanj sredenosti te stupanj orientacije strukturalnih elemenata (kratkih lančanih segmenta) u amorfnim područjima kristalastih polimernih vlakana određuje se spektroskopskim i relaksacijskim metodama. Određivanjem vrste i udjela konformerata dobiva se uvid u građu amorfnih slojeva (amorfita) mikrofibrila (petlje, pregibi, krajevi lanaca, ispruženi vezni lanci) tijekom pojedinih faza preradbe. Radi postizanja polimerne plastičnosti i žilavosti vlakana primjenjuju se samo neki kristalasti plastomeri za vlakna. Za vlakna se rabi i mali broj polimera (PAN, PVC, neki kopolimeri) koji variranjem udjela komonomera ili stupnja taktičnosti mijenjaju sredenost od potpuno amorfnih do djelomice kristaliziranih polimera (do kristalastih polimera malog stupnja kristalnosti). Strukturna zanimljivost amorfnih vlakana, za razliku od amorfnih slojeva u kristalastim vlaknima, jest srednja orientacija molekula i stupanj njihove fizikalne ili kemijske umreženosti kojom se postiže elastičnost vlakna. Čak se i za elastomerne vlakna (elastomeri su uglavnom amorfni) rabe elastomeri segmentirani poliuretani, koji su, zbog kristaliziranih tvrdih segmenta, kristalasti elastomeri malog stupnja kristalnosti. Potpuno su amorfna vlakna npr. staklena vlakna. Amorfnost mogu pokazivati i neka kristalizabilna vlakna u određenoj fazi preradbe. Konačno, i strukturno-reološko ponašanje amorfne polimerne taline može utjecati na makroafaznu strukturu i svojstva vlakana.

Nadmolekulna struktura vlakna

Nadmolekulna struktura vlakna obuhvaća gradu i organizaciju nadmolekulnih strukturalnih elemenata (makromolekula, kristala, amorfita, kristalita, protofibrila, mikrofibrila, fibrila, vlakna) kojima je barem jedna izmjera veća od granice između bliske idaleke sredenosti (10 nm). Prema vrsti nadmolekulne sredenosti

vlakna se dijele na kristalna, kristalasta, mezofazna i amorfna. Strukturalna se sredenost može znatno mijenjati pri preradbi polimera u vlakno (orientacija i popuštanje) i pri naknadnoj obradbi. Za sve nadmolekulne elemente vlakna karakteristična je polidisperznost njihovih izmjera.

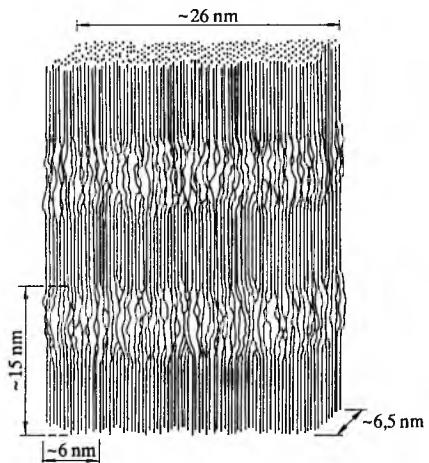
Kristalna vlakna. Dugačke makromolekule, za razliku od niskomolekulnih tvari, teško potpuno kristaliziraju, te su rijetka potpuno sredena, kristalna polimerna vlakna. Prema strukturalnim značajkama osnovnoga strukturalnog elementa, kristala, kristalna se vlakna dijele na monokristalna i polikristalna.

Monokristalno vlakno ili vlknasti (fibrilni) monokristal jest igličasto vlakno sastavljeno od jednog monokristala promjera od 0,1 ··· 100 µm i duljine 1 ··· 50 mm. Polimerni se vlknasti monokristal sastoji od ispruženih makromolekula paralelnih s osi vlakna. Vlknasti kristal naziv je ne samo za samostalni monokristal nego i za teksturni radikalni element sferolita vlknastog habitusa kojeg čini vlknasti kristal (pa i vrpčasta habitusa kojeg čini lamelni kristal). Za razliku od rijetkih polimernih vlknastih kristala bez neke veće komercijalne važnosti, npr. polioksimetilena, neki niskomolekulni anorganski spojevi tvore monokristalna vlakna posebnih svojstava, zvana viskeri, npr. grafitni, korundni, kremen i silicijskokarbidi viskeri.

Polikristalna vlakna sastoje se od mnoštva mozaičnih kristala (kristalita). Zbog otežane kristalizacije organskih makromolekula teško se stvaraju monokristali, a pogotovo potpuno polikristalni polimer u masi; ipak, maksimalnom orientacijom istezanjem kristalastih polimera velikog stupnja kristalnosti može nastati polikristalno vlakno, jer se orientacijom smanjuju razlike u gustoći kristalita i amorfita na vrijednost manju od eksperimentalno razlučive granice. Za razliku od organskih polimera, poznata su anorganska polikristalna vlakna: silikatna, borna i cirkonijskodioksidna.

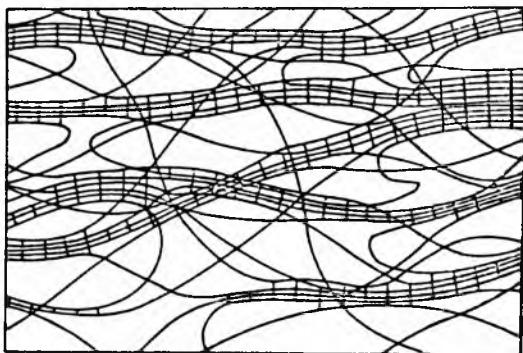
Kristalasta vlakna. Kristalasta ili djelomice kristalna vlakna najbrojnija su među prirodnim i kemijskim vlaknima. Za opis nadmolekulne strukture kristalastih vlakana potreban je opis strukture ne samo kristalita i amorfita nego i relativno autonomnih strukturalnih elemenata: protofibrila, mikrofibrila, fibrila i vlakna, koji se izvode jedni iz drugih na hijerarhijski način.

Mikrofibril (vlakance) osnovni je i najautonomniji nadmolekulni element u kristalastom vlaknu. U složenim makromolekulama prirodnih polimera može se sastojati od još manjih elemenata, *protofibrila* (promjer ~2 nm). Obično je elipsastog ili pravokutnog poprečnog presjeka veličine 5 ··· 100 nm (za većinu sintetskih polimera 10 ··· 50 nm), a opaža se elektronskim mikroskopom nakon kemijske i mehaničke dezintegracije vlakna. Uzduž osi mikrofibrila izmjenjuju se kristalni i amorfni slojevi (kristaliti i amorfiti), kojima prosječna zajednička debljina (tj. prosječna periodičnost kristalnih središta) iznosi 10 ··· 50 nm. U polimernim vlaknima velikog stupnja kristalnosti ta je prosječna zajednička debljina samo nešto veća od prosječne debljine lamelног kristala, jer su amorfni međuslojevi (amorfiti) relativno tanki (<5 nm).



Sl. 4. Mikrofibrilni model celuloze po K. Hessu i H. Kiessigu

Mnoštvo predodžbi o strukturi mikrofibrila zajedničke su opće konformacije makromolekula, od potpuno ispruženih do presavijenih. U prvim strukturalnim modelima uzimale su se u ob-



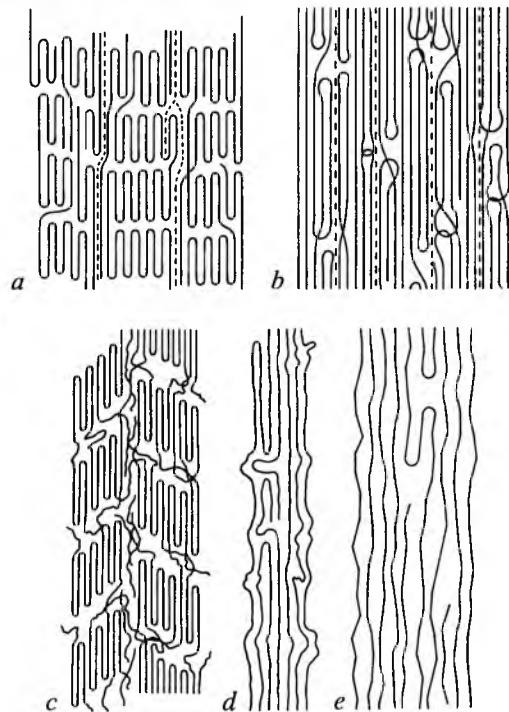
Sl. 5. Hearleov model resastog mikrofibrila

zir samo ispružene konformacije makromolekula: Staudingerov model paralelno orijentiranih makromolekula, Hess-Kiesigov eksperimentalni model mikrofibrila celuloze (sl. 4), Hearleov



Sl. 6. Stattonov model mikrofibrila od uzice

model resastog mikrofibrila (sl. 5) i Stattonov model mikrofibrila od uzice (sl. 6). Nakon otkrića mogućnosti presavijanja makro-



Sl. 7. Kombinirani mikrofibrilni modeli A. Peterlina (a), E. W. Fischer (b), J. W. S. Hearlea i R. Greera (c), R. Bonarta i R. Hosemanna (d) te P. F. Dismoreia i W. O. Stattona (e)

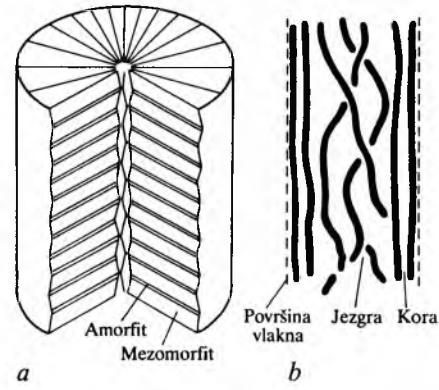
molekula u polimerima (1957) svi se strukturalni modeli mikrofibrila predstavljaju kao kombinacije ispruženih i presavijenih

makromolekula, odnosno njihovih prijelaznih konformacija: djelomice ispruženih makromolekula. Od niza predodžbi izdvojila su se dva polarizirana motrišta o broju presavijenih i ispruženih, veznih makromolekula u mikrofibrili. Jedno pretpostavlja relativno velik broj pregiba makromolekula, tj. broj veznih molekula manji je od polovice ukupnog broja lančanih debala u kristalu (sl. 7 a, b, c, d), dok je po drugome motrištu broj veznih lanaca gotovo jednak broju lanaca u kristalu (sl. 7 e, te Hessovi i Hearleovi modeli nastali modifikacijom modela prikazanih na slikama 4 i 5). Iako se kristaliti kao kruti i čvrsti strukturni elementi smatraju nositeljima čvrstoće izotropnih polimera, za čvrstoću vlakna odlučujući je broj veznih molekula, odnosno broj prenapregnutih lančanih segmenata u amorfitima, koji je proporcionalan udjelu amorfne faze. Tako nastaje paradoks da je za čvrstoću polimernih vlakana odgovornija amorfna od kristalne faze.

Fibril (makrofibril) prijelazni je nadmolekulni element između mikrofibrila i vlakna, a čini ga snop mikrofibrilâ promjera od 50–1000 nm. S obzirom na manju kompaktnost i autonomnost fibrila, te na činjenicu da se može opaziti samo nakon dezintegracije nekih vlakana, taj je nadmolekulni strukturni element upitan. Fibril je nazivak preopterećena značenja, jer se fibrilom naziva i mikrofibril i fibril, pa i samo vlakno, te vlaknasti (od ispruženih makromolekula) i vrpčasti (od presavijenih makromolekula) radikalni element sferolita.

Vlakno. Pod globalnom strukturu vlakna razumije se struktorno organiziranje svih nadmolekulnih strukturnih elemenata (kristalita, amorfita, protofibrila, mikrofibrila i fibrila) i njihova orijentacija u vlaknu, fazna tekstura višekomponentnih sustava te morfološka nadmolekulna građa presjeka i površine vlakna, što je opisano u poglavljima o orijentaciji te mikrofaznoj i makrofaznoj strukturi vlakna.

Mezofazna vlakna. Osnovni nadmolekulni strukturni element mezofaznih poliamida, poliester, poliaminohidrazida i polihidrazida jest štapičasti mikrofibril (promjera 600 nm) s osovinastom jezgrom i radikalnim lamelnim slojevima (sl. 8 a). Time se mikrofibril Kevlara, analogno kristalastim mikrofibrilima, sastoji od veznih molekula (djelomice ispruženih makromolekula), presavijenih i potpuno ispruženih makromolekula koje prolaze kroz slojeve mezomorfita (analogon kristalitu) i amorfita. Organizacija i orijentacija mikrofibrila u vlaknu analogna je kristalastom vlaknu (sl. 8 b). Ugljično vlakno na osnovi poliakrilonitrila sastoji se od različito orijentiranih mezofaznih lamelnih slojeva kao osnovnih nadmolekulnih strukturnih elemenata.



Sl. 8. Mezofazna struktura poli-p-fenilenterefタルамида. a grada mikrofibrila, b orijentacija mikrofibrila u vlaknu

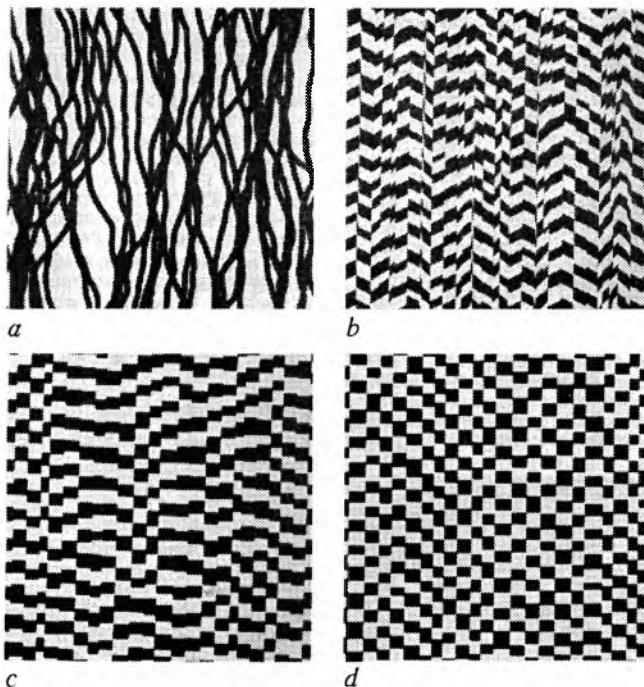
Amorfna vlakna. Amorfna vlakna obično nemaju izdiferencirane nadmolekulne strukturne elemente, te im se struktura prostrata na razini mikrostrukture (opisano u poglavljiju o amorfnoj strukturi) ili orijentacije makromolekula.

Orijentacija vlakna. Pod orijentacijom vlakna razumije se orijentacija svih strukturnih razina, od lančastih segmenata do vlakna u predi. Primjena istraživačkih metoda za orijentacijsku karakterizaciju vlakna ovisi o strukturnoj sredjenosti vlakna. Dok za kristalasta i mezofazna vlakna rentgenska difrakcija pri malom kutu daje podatke o periodičnosti i orijentaciji kristalita s obzirom na os vlakna, dotele su za amorfna vlakna primjenjive samo spektroskopske metode i mjerjenje indeksa loma. Obično je orijentacija svih nadmolekulnih elemenata veća u površinskom sloju, u

kori vlakna. Tako je gustoća i orijentacija mikrofibrila u kristalastim i posebice u mezofaznim vlaknima veća u kori nego u jezgri vlakna. Uzrok takve diferencirane orijentacije leži u intenzivnijoj orijentaciji mikrofibrila i samih makromolekula zbog nekompenziranih posmičnih i vlačnih naprezanja površine na kojoj počinje hlađenje i kristalizacija tankoga transkristalnog ili sferolitnog sloja (efekt poznat kod ekstrudiranih folija). Hermannsov orijentacijski faktor f ($f = -1/2 \dots 1$) mjeri je za stupanj orijentacije kristalita mikrofibrila prema osi vlakna za kut ϕ :

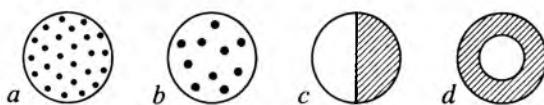
$$f = 1 - \frac{3}{2} \langle \sin^2 \phi \rangle. \quad (1)$$

Strukturalni elementi daju orijentacijsku raspodjelu u određenom području orijentacijskog faktora: od $f = -1/2$ za okomitu orijentaciju, preko $f = 0$ za statističku, do $f = 1$ za paralelnu orijentaciju s osi vlakna. Mikrofibrili pokazuju različite stupnjeve orijentacije, od vrlo malih, kakvi su obično u jezgri vlakna, do paraleliziranja mikrofibrila s bočnom nematičkom, linearnom i šahovskom korelacijom (sl. 9). Stupanj orijentacije i bočne korelacije mijenja se tijekom preradbenih procesa, posebice tijekom naizmjeničnog popuštanja i istezanja. Maksimalna orijentacija nekih kristalastih vlakana može smanjiti razliku gustoća kristalne i amorfne faze na vrijednost manju od eksperimentalno odredive granice od 15%, te se takva vlakna mogu uvjetno smatrati kristalnim vlaknima. Maksimalnim istezanjem amorfnih polimera može paralelizacija makromolekula uzrokovati slaganje lanaca u djelomice kristalnu građu samo ako postoji određeni minimum stereoregularnosti makromolekula.



Sl. 9. Orientacija mikrofibrila u vlaknu. a) divergentni, slabo orijentirani mikrofibrili, b) nematička bočna korelacija, c) linearna bočna korelacija i d) šahovska korelacija paraleliziranih mikrofibrila

Mikrofazna struktura vlakna. U dvokomponentnim i višekomponentnim vlaknima usložnjuje se nadmolekulna struktura faznom teksturom, tj. uvodi se mikrofazna strukturalna razina vlakna. Primjerice, dvokomponentna vlakna mogu imati različite fazne teksture, već prema tome je li vlakno od mješljive smjese polimera ili od nemješljivih polimera (sl. 10).



Sl. 10. Fazna tekstura dvokomponentnih vlakana od nemješljivih polimera. a) kontinuirana disperzija jedne komponente u drugoj, b) matrično-fibrilni sustav, c) struktura postraničnog tipa, d) struktura jezgrastog tipa

Makrofazna struktura vlakna

Makrofazna struktura vlakna odnosi se na morfološku građu površine i unutrašnjosti vlakna na presjeku, tj. na vanjsku, okom ili mikroskopom vidljivu građu vlakna. Morfološka građa vlakna ovisi o rastu (organska prirodna vlakna), o uvjetima postanka i prerađbe u nizu: sinteza polimera-ispredanje-istezanje-fiksiranje (kemijska vlakna).

U organskim prirodnim vlaknima specifičnosti razdoblja rasta i različiti kemizmi uzrok su slojevite građe s mnogo pora i šupljina, te se često sreće i rastresiti, porozni središnji sloj od protoplazme. Pri ispredanju kemijskih vlakana iz otopine ili taline u prvoj se fazi najčešće stvara opna, zatim se stvara gusti sloj kore, a na kraju kristalizira jezgra. Tako nastaje slojevita struktura različitih gustoća omotača i jezgre, u kojoj se očituje i različitost stupnjeva orijentiranosti mikrofibrila između omotača i jezgre. Na površini gusto orijentiranih mikrofibrila u kori pojavljuje se u nekim sintetskim vlaknima tanki transkristalni ili sferolitni sloj. Oblik presjeka (profil vlakna) u pravilu ovisi o obliku presjeka mlaznice; obično je kružan, ali sve češće i raznovrsnih drugih oblika (trokutast, pravokutan, petotorukutan, bubrežast i dr.).

Vlakna su makroskopski gлатke površine. Posebice to vrijedi za sintetske filamente i svilu. Na mikroskopskoj razini površina vlakna pokazuje određeni stupanj hrapavosti i poroznosti. Najhrapavija su životinjska vlakna, a zatim biljna i celulozna kemijska (posebice viskozna) vlakna. Kemijska vlakna ispredena iz otopine imaju grublje strukturiranu reljefnu površinu nego gлатki filamenti ispredeni iz taline s karakterističnim širokim uzdužnim brazdama dubokim do 1 μm. Takvo očitovanje fibrilne nadmolekulne strukture u reljefnosti površine imaju i neka prirodna vlakna tijekom rasta ili u konačnom obliku (lanena, celulozna, pamučna). Kemijska vlakna ispredena iz taline, posebice poliamidna i poliesterska vlakna s kompaktnom korom, imaju tek finu izbrzdanost dubine desetak nanometara, koja se pripisuje mikrofibrilnom karakteru. Reljefna strukturiranost površine mijenja se, kao i oblik presjeka, u fazama preradbe vlakana. Tako neka vlakna ispredena iz otopine ili taline, npr. poliakrilonitrilna, dobivaju za vrijeme toplinskog istezanja poprečne pruge na razmacima od 1–3 μm, koje se toplinskim popuštanjem smanjuju. Površinska struktura takvih vlakana sliči ražnjičastoj strukturi fibrilnih tvorenina dobivenih od mješanih otopina. Od anorganskih vlakana imaju monokristalna vlakna i amorfna staklena vlakna gлатku površinu, dok je površina polikristalnih bornih i cirkonijskih vlakana različito strukturirana. Osim ispitivanja različite defektne površine, od posebne je tehničke važnosti određivanje stupnja poroznosti vlakna. Ta strukturalna karakteristika može smanjivati čvrstoću vlakna, ali može i poboljšavati neka druga svojstva. Struktura i svojstva površine vlakana mogu se mijenjati naknadnom, pa i kemijskom obradom površine. Primjer za to su vrlo tanka epitropna vlakna, uglavnom na osnovi poliamida i poliestera, kojima se velika površina s obzirom na masu može modificirati i time im se mogu kontrolirati antistatička svojstva, odnosno električna provodnost.

I. Šmit

PRIRODNA CELULOZNA VLAKNA

Prirodna celulozna vlakna nazivaju se i *biljnim vlaknima*, jer celuloza čini gotovo polovicu tvari od koje su građene stijenke stanica u drveću i jednogodišnjim biljkama. Celuloza je u prirodi najrasprostranjeniji ugljikov spoj. To je ugljikohidrat s velikom relativnom molekulnom masom (v. *Ugljikohidrati*). U prirodi nastaje fotosintezom i većinom se nalazi u obliku vlakana koja su vrlo čvrsta, netopljiva u vodi, slabim kiselinama i lužinama te u organskim otapalima. O sastavu, građi, fizikalnim i kemijskim svojstvima celuloze v. *Celuloza*, TE 2, str. 564.

Celuloza se u biljkama nalazi u sjemenkama, stabljici, lišću i plodinama, pa svi ti dijelovi biljaka mogu biti sirovine za dobivanje celuloznih vlakana (tabl. 1).

Sjemenska celulozna vlakna

Na sjemenkama nekih biljaka izrastaju vlakna koja su obično kratka, tanka i slaba. Ipak, najvažnije i najraširenije prirodno vlakno, pamučno, dobiva se od sjemenaka.

Pamučno vlakno. Pamučno se vlakno dobiva od različitih vrsta pamučike (*Gossypium*), biljnog roda iz porodice sljezova. Do danas je utvrđeno 39 različitih vrsta te biljke. Međutim, samo su četiri vrste važne kao izvor vlakana. Te su četiri uzgojene vrste: *Gossypium barbadense*, *Gossypium hirsutum*, *Gossypium herbaceum* i *Gossypium arboreum*. Ūnutar tih vrsta uzgojeni su tipovi koji daju veće prinose vlakana, odnosno vlakna boljih karakteristika (Sea Island, Upland i dr.). *Gossypium hirsutum* posljednjih je godina najčešće uzgajana vrsta pamuka, tako da se više od 90% svjetske proizvodnje pamučnih vlakana dobiva od te vrste. Biljka je relativno otporna i daje velik prinos vlakana srednje kvalitete. Najveći su proizvođači SAD, Kina, neke zemlje bivšeg SSSR, Indija i Meksiko.

Biljka za svoj rast zahtijeva dugo razdoblje toplih dana (najmanje 200), uz obilje vode, pa se zato uzgaja uz velike rijeke gdje je moguće navodnjavanje zemljišta. Do kraja rasta dosegnje visinu od 1–2 m. Nakon cvatnje zaostaju čahure sa sjemenkama na kojima izrastaju vlakna. Povećanjem obujma zbog rasta vlakana čahura se raspunkne. U svakoj čahuri ima 7 do 8 sjemenaka, a na svakoj sjemenici izraste ~20 000 vlakana.

Pamuk je prema drugim tekstilnim biljkama u prednosti jer odmah daje gotovo vlakno, koje treba samo odvojiti od sjemenaka. Stroj za branje pamuka kombinirani je stroj, nazvan *egrenaljka*, koji bere čahure i odvaja vlakna od sjemenaka. Prvo se skida dugo vlakno, koje se kao vrlo voluminozno preša u bale, zamata u juteno ili pamučno platno, povezuje željeznim vrpcama i otprema u predionice. Na sjemenkama zaostaju kratka vlakna nazvana *linters*. Ona se naknadno skidaju sa sjemenaka i važan su izvor kvalitetne celuloze za izradbu kemijskih vlakana i papira, dok sjemenke služe za dobivanje ulja i kao stočna hrana.

Izgled i građa pamučnih vlakana. Pamučna se vlakna sastoje uglavnom od celuloze, koje u različitim vrstama pamuka ima 88–96%. Od ostalih se tvari u pamuku nalaze još peptini, voskovi, organske kiseline (limunska i maleinska), pepeo, drugi organski spojevi (šećeri, vitamin B, biotin) i mineralni sastojci.

Pamučno je vlakno vrlo fino, pravilno jednostanično vlakno s uvojima koji se lako prepoznaju pod mikroskopom, a posljedica su sušenja vlakna nakon prestanka rasta. Od početka svojega rasta stanica pamučnog vlakna ima kružni presjek konačnog promjera. Držeći se sjemenke, stanica najprije raste u duljinu te nakon 25–35 dana vlakno postiže svoju konačnu duljinu. Rast se potom nastavlja zrenjem, tj. s unutrašnje se strane primarne stijenke razvija sekundarna stijenka od celuloznih slojeva. Taj se rast završava nakon daljih 35–50 dana. Karakteristično je da zrenje pojedinih vlakanaca, čak na istoj sjemenici, ne napreduje jednakom brzinom, tj. sva vlakna ne postižu jednaku zrelost. Kako se upravo tim procesom stvara celuloza, stupanj zrelosti jedna je od osnovnih karakteristika pamučnog vlakna o kojoj ovise brojna druga svojstva (preradivost, čvrstoća, elastičnost, sposobnost primanja bojila i dr.). U trenutku kad se rast završi i otvori čahura, isušuje se protoplazma u lumenu, posljedica čega je stvaranje podtlaka u unutrašnjoj šupljini te se vlakno spljošti u vrpčast oblik i uvije oko svoje osi. Poprečni presjek pamučnog vlakna kakvo se bere i dolazi u tekstilnu primjenu stoga više nije kružan. Njegov oblik bitno ovisi o stupnju razvijenosti sekundarne stijenke, tj. o zrelosti pamuka, pa varira od potkovasta oblike nezrelog pamuka do bubrežasta oblike zrelog pamuka, a samo je iznimno približno kružnog oblika. I broj uvoja na vlaknu iz istih razloga ovisi o zrelosti vlakna. Obradom lužinama (mercerizacija) pamučno vlakno bubri, odvija se i opet dobiva kružni poprečni presjek (v. *Apretura*, TE1, str. 316). Mercerizirane tkanine većeg su sjaja i čvrstoće te bolje apsorptivnosti.

U pamučnom se vlaknu razlikuju dva osnovna sloja oko središnje šupljine (lumen). Vanjski, zaštitni sloj, kutikula, sastoji se pretežno od voska. Pranjem, iskuhanjem i bijeljenjem pamučnog materijala taj se sloj oštećuje i skida, a nakon dugotrajne upotrebe i pranja potpuno se uklanja, pa se kao posljedica opaža brža apsorpцијa vlage i bojila. Ispod kutikule je stijenka koja se sastoji od niza koncentričnih slojeva celuloze. Slojevi su građeni od celuloznih fibrila, koji se spiralno slažu u smjeru rasta vlakna. Debljina stijenke mjerilo je zrelosti vlakna.

Svojstva pamučnih vlakana. Duljina je pamučnih vlakana od 10–65 mm, što ovisi o vrsti i kvaliteti vlakana. U jednom se

uzorku pamučnih vlakana istodobno nalaze i duga i kratka vlakna.

Po finoći se pamučna vlakna ubraju u najtanja vlakna koja se upotrebljavaju u proizvodnji uobičajenih tkanina (promjer od 11–22 µm). Omjer duljine prema poprečnoj izmjeri iznosi 6 000 za fine, a 350 za grube vrste pamučnih vlakana.

Boja je pamučnih vlakana bijela do slabo žučkasta, a ovisi o vrsti, tlu i uvjetima uzgoja. Sjaj im je malen, ali se mercerizacijom može povećati.

Pamučna su vlakna otporna na alkalijske, pa se tkanine mogu prati u lužnatim otopinama i pri višim temperaturama. Kiseline oslabljuju i razaraju pamučna vlakna. Zbog lagane obojenosti pamučne tkanine treba bijeliti, što se oprezno provodi oksidacijskim i reduksijskim sredstvima. Bojenje se provodi relativno lagano jer brojne hidroksilne skupine čvrsto vežu polarne skupine bojila. Pamučno je vlakno otporno prema moljcima, ali je podložno oštećenjima od gljivica, posebno u vlažnim i toplim uvjetima, kada na vlaknima nastaju smeđaste mrlje koje se ne mogu lako ukloniti.

Pamučna se vlakna svrstavaju u srednje čvrsta vlakna, ali nisu elastična, pa se pamučne tkanine lako gužvaju. U mokrom stanju vlakna postaju nešto čvršća.

Sposobnost upijanja vlage u pamučnih je vlakana dosta velika, mnogo veća od sposobnosti upijanja kemijskih vlakana, no upola manja od vune.

Pamuk se uzgaja u velikim količinama, pa su pamučne tkanine relativno jeftine i namijenjene svakodnevnoj upotrebi, a njihova dobra svojstva čine ih pogodnim za odjeću, posebno onu koja se nosi uz tijelo. Najčešće vrste tkanina u kojima su dominantna pamučna vlakna jesu batist, platno, flanel, frotir, denim (traper) i samt (v. *Tkanje*). Jednako kvalitetno pamučne se prede prerađuju u raznovrsna pletiva te je to vlakno glavna sirovina za izradbu donjeg rublja, ali i laganih pletenih gornjih odjevnih predmeta. U velikim se količinama od pamuka izrađuje kućanski (ručnici, stolnjaci, posteljno rublje i sl.) i sanitetski tekstil (gaze, zavojni materijali i sl.). Za mnoge od tih proizvoda ne postoji jednako kvalitetna zamjena drugim vlaknem.

Važna je i primjena pamuka u mješavinama s kemijskim vlasastim vlaknima (poliesterskim, poliamidnim, celuloznim), većinom radi povećanja termofiziološke udobnosti proizvoda.

Unatoč snažnom širenju kemijskih vlakana, svjetska se potrošnja pamuka stalno povećava tako da se već niz godina njegov udio u ukupnoj svjetskoj potrošnji vlakana zadržava na visokoj razini (~43%). Time je pamuk nedvojbeno najzastupljenije tekstilno vlakno, a takav se trend predviđa i za buduće, unatoč sve naglašenijim zahtjevima za ekološki povoljniji uzgoj pamuka (smanjenje gnojidbe umjetnim gnojivima te upotrebe pesticida i defolijanata), što bi moglo smanjiti proizvodnju. Međutim, takvi su zahtjevi u najnovije doba rezultirali razvitkom genetski promjenjenih vrsta pamuka koje daju obojena vlakna (zelene i smeđe boje), kako se vlakna ne bi trebala kemijski dorađivati i bojiti, a uvodi se i potpuno prirodni uzgoj. Zasada su to skupa i ekskluzivna vlakna, ali pokazuju prilagodljivost omiljene tekstilne sirovine novim zahtjevima.

Kapok. Kapok je sjemensko vlakno koje se na Javi, u Indiji, Filipinima, Australiji, zapadnoj Africi i Meksiku dobiva od tropskog, do 50 m visokog drveta kapok (*Ceiba pentandra*) iz porodice *Bombacaceae*. Plodovi u obliku čahure sadrže sjemenke obrasle vlaknima. Vlakna su fina, tanka i sjajna, ali slaba. Upotrebljavaju se uglavnom za punjenje namještaja, a kako mogu upiti i 30 puta veću masu vode od vlastite mase, služe u medicini kao apsorpcionski materijal.

Stabljična celulozna vlakna

Stabljična (likova) celulozna vlakna sadrže uz celulozu i manji udio lignina i pektina. Vlakna, koja su dugačka kao i stabljika, leže u stabljici u uzdužnim snopovima i daju joj čvrstoću i savitljivost. Uzgoj tih biljaka moguć je u umjerenom i tropskom klimatskom području i poznat je odavna. Sve do pojave kemijskih vlakana, njihova je proizvodnja, poglavito za izradbu grubljih tkanina, bila vrlo važna. Zagadivanje okoliša, dugotrajnost procesa izdvajanja vlakna iz stabljike te velik udio ručnog rada,

uzrokovali su pad proizvodnje, pa su se ta vlakna u većem opsegu zadržala danas uglavnom u nerazvijenim zemljama.

Laneno vlakno. Laneno se vlakno dobiva od jednogodišnjih zeljastih biljaka iz roda *Linum*, koji obuhvaća više od 200 vrsta. Biljke se uzgajaju u umjerrenom klimatskom pojasu u čitavu svjetu radi dobivanja vlakana i ulja (vlaknate i uljne vrste).

Za dobivanje vlakna najkorisniji je običan ili pravi lan (*Linum usitatissimum*). Udio je vlakana u stabljici od 20–30%. U kori je smješteno do četrdesetak svežnjeva vlakana, koji se protežu uzduž cijele stabljike i s njom su ljepljivim tvarima, tzv. vanjskim pektinima, čvrsto vezani. Svaki se svežanj sastoji od ~2000 elementarnih vlakana koja se po duljini, jedna na druga nadovezuju, a slijepljena su unutrašnjim pektinima. Svežanj slijepljenih elementarnih vlakana naziva se i tehničko vlakno.

Za izdvajanje vlakna iz stabljike potrebno je razgraditi vanjski pektin, što se može provesti biološkim, kemijskim topilinsko-mehaničkim postupkom. Proces se provodi u mokroj sredini, pa se naziva močenje ili maceracija. Već prema uvjetima provedbe (temperatura, voda, rosa, dodatak kemikalija, enzima i dr.) maceracija može trajati od 3 dana do nekoliko tjedana, a i svojstva vlakana su različita.

Nakon močenja stabljike se suše, a zatim lome propuštanjem između rebrastih valjaka. Drvenasti se dio stabljike lako uklanja vijanjem i grebenanjem. Grebenanjem se vlakna i paraleliziraju, pa se istodobno odvajaju dugačka (*povjesmo*) od kratkih, zamršenih vlakana (*kućina*). Dugačka se vlakna vežu u svežnje, od kojih se načine pletenice i slažu u bale.

Dobivena su vlakna nešto kraća od stabljike i dosežu duljinu do 900 mm. Produljenim se močenjem ona mogu dijeliti i cijepati u finija vlakna. Duljina tako stanjenevlakana treba biti pogodna za prednje i najčešće iznosi 300–600 mm. Takva su redovito komercijalna lanena vlakna. Dalja razgradnja do elementarnog vlakna naziva se *kotonizacija*, a proizvod *kotonin* (prema engl. *cotton*, pamuk), jer su ta vlakna po građi i duljini slična pamuku. Ona su kratka i glatka, teško se upredaju, pa se najčešće preraduju u mješavinama s pamukom.

Lanena se vlakna ubrajaju među najčvršća prirodna vlakna (čvrstoća > 60 CN/tex, uz istezljivost od samo 2%). Dugotrajanom upotrebotom vlakna se i dalje stanjuju, tako da lanene tkanine postaju prozirne, zadržavajući još uvijek dovoljnu čvrstoću. Glatkoča lanenih vlakana daje proizvodima ugodno hladan opip, a odlikuju se i dobrim upijanjem vlage. Međutim, velika krutost i sklonost gužvanju ograničava njihovu prikladnost za odjevne predmete, ali se mnogo upotrebljavaju za izradbu posteljnog platna, stolnjaka, ubrusa i krpa za brisanje.

Kudjelja. Kudjeljom se naziva vlakno konoplje, jednogodišnje dvodomne biljke iz porodice konoplja (*Cannabis sativa*), koja može dosegnuti visinu i do 2 m. Najveći su proizvođači kudjelje neke zemalja bivšeg SSSR, Italija, Indija, Rumunjska i Kina. Dobivanje vlakana iz stabljike slično je kao i za lan, a močenje traje 7–10 dana. Odvajanje vlakana nešto je lakše, pa se katkad provodi i mehaničkim struganjem. Tako se dobivaju vlakna koja su na tržištu poznata pod nazivom zelena kudjelja.

Kudjelja je po građi slična lanenom vlaknu, ali sadrži više lignina, kruća je i jače se gužva. Smede je boje (boja špage), teško se izbjeljuje i često se upotrebljava u prirodnjoj boji. Njezina je duljina od nekoliko decimetara do više od 1,5 m. Svaka se nit kudjelje sastoji od više pojedinih vlakanaca koja su međusobno povezana u snopice. Međutim, kudjelja se ne kotonizira, nego se za potrebe predionica reže na duljinu od ~600 mm.

Kudjelja se ubraja među najčvršća prirodna vlakna. Od nje se izrađuju čvrsta užad, vreće i tehničke tkanine, a rjeđe se bijeli za izradbu posteljnog platna, stolnjaka i narodnih nošnji. Kratka otpadna vlakna, kudjeljna kućina, upotrebljavaju se za čišćenje strojeva te za brtvljenje, jer jako bubre u mokrom stanju.

Juteno vlakno. Juteno se vlakno dobiva od desetak vrsta jute (*Corchorus*), tropskih jednogodišnjih biljaka iz porodice lipa. Najveći su proizvođači Indija, Pakistan i Bangladeš. Iako je juteno vlakno slabo, proizvodi se u velikim količinama u siromašnim krajevima.

Juta zahtijeva vruću i vlažnu klimu i doseže visinu do 4,5 m, pa i više. Dobivanje vlakna slično je kao za lan. I vlakna su građena poput lanenih, no elementarna su vlakna veoma kratka, u

prosjeku su duga ~3 mm. Jutena vlakna sadrže mnogo lignina (do 20%), pretežno su gruba, krtka i nesavitljiva. Među svim celuloznim vlaknima najbolje upijaju vlagu (13,75%). Najčešće se primjenjuju za proizvodnju vreća za transport sirkog tereta, ali ne hrane, jer se vlakna lako lome i ulaze u hranu. Osim za vreće, jutena se tkanina upotrebljava i kao podložna tkanina za izradbu naslojenih jestinih materijala kao što su linoleum i jestini sagovi. Užad od jutenih vlakana nije tako čvrsta kao od ostalih vlakana. Od finijih se vlakana u malim količinama izrađuju tkanine za kućanstvo.

Ramijino vlakno. Ramijino se vlakno dobiva od ramije (*Boehmeria nivea*), biljke iz porodice kopriva koja raste pretežno u krajevima s toplijom klimom. Biljka vjerojatno potječe iz Kine i Tajvana, a u azijskim se krajevima ramijino vlakno zove kineska trava. Ono što je lan za umjereni klimatski pojas i zapadnu polutku, to je ramija za istočnu polutku.

Dobivanje vlakana naziva se dekortifikacija. Jednostavno se provodi mehaničkim struganjem ili tučenjem suhih stabljika, a napredniji je postupak obradba u otopini sode.

Tehnička ramijina vlakna duga su ~2 m. U toj se duljini prerađaju na prelačkim strojevima za svilu, no češće se preraduju kao kraća vlakna na strojevima za preradu lanenog vlakna, vune, pa i pamučnog vlakna. Vlakna se skraćuju rezanjem ili grebenanjem i iščešljavanjem. Ramijina su vlakna bijela, sjajna, lako preradiva, male elastičnosti. Smatraju se najčvršćim prirodnim vlaknima, u prosjeku nešto čvršćima od lanenih. Zbog velike čvrstoće i trajnosti ramijina se vlakna upotrebljavaju za izradbu teške industrijske tkanine za namještaj i radnu odjeću, a od njih se izrađuju i ribarske mreže i čvrsti šivači konac.

Kenafovo vlakno. Od biljke kenaf (*Hibiscus cannabinus*) iz porodice sljezova, koja izraste i do 3 m, dobiva se lagano, smedasto vlakno, slabije od jutenoga. Potječe iz Afrike, gdje ga nazi vaju i gvinejska konoplja, a u Europi je poznato zadnja dva stoljeća. Kenafovo se vlakno upotrebljava za izradbu užadi i grubih tkanina za vreće, a samo se male količine boljeg vlakna kada užimaju kao podloga za jestine prostirače.

Tvrda celulozna vlakna

U velikom lišču i u usplodu nekih biljaka nalaze se vlakna koja ga drže, oblikuju i učvršćuju. To su gruba vlakna koja uz celulozu sadrže i velike količine lignina, pa se često nazivaju i *tvrdva vlakna*, premda neka i nisu tvrda od jutenih ili nekih drugih stabljičnih vlakana. Takva su vlakna građena poput stabljičnih vlakana, tj. sastoje se od mnoštva elementarnih vlakana slijepljenih u tehničko vlakno. Dobivaju se također slično, premda najčešće mehaničkim struganjem. Neka od njih imaju veliko značenje za supropske i tropске krajeve, i ondje gdje pretežno živi siromašnije stanovništvo, a upotrebljavaju se za izradbu užadi, konopa, grubih tkanina i četaka.

Agava je najčešći izvor vlakana od lišća. Od njezinih se listova dobivaju vlakno sisal i neka manje poznata vlakna koja se uzgajaju u Južnoj Americi i Africi. Od bananina lišća dobiva se vlakno abaka, od palmova lišća vlakno piasava, rafijino i druga palmova vlakna.

Sisal je naziv za vlakno biljnog roda agava iz porodice *Agavaceae*. Najpoznatije je vlakno od biljke *Agave sisalana*. Iz središta biljke, gotovo pri tlu, izrastaju veliki listovi očvršćeni vlaknima, koji se režu s biljaka starih oko 4 godine. Vlakna se izdvajaju iz lišća mehaničkim struganjem mesnatog dijela. Vlakna su visokog sjaja i čvrstoće, svjetložute boje. Od njih se izrađuju grube tehničke tkanine, ljetni šeširi, užad za industriju i poljoprivredu, ali ne brodska užad, jer ih morska voda razgraduje.

Abaka. Vlakna pod nazivom abaka (musa, vlakna manilskih konoplje) dobivaju se od peteljki listova jedne vrste banana (*Musa textilis*). Po građi su, poput svih vlakana od lišća i stabljika, sastavljena od elementarnih vlakana. Najčešće služe za izradbu užadi. Posebno su bila cijenjena za brodsku užad, ribarske mreže i sl., jer su otporna na morsku vodu i zadržavaju dobru savitljivost. Na suncu izbjele, ali ne gube na čvrstoći. Lokalno se upotrebljavaju za tvorbu laganih, čvrstih tkanina od kojih se izrađuje odjeća, šeširi i cipele.

Kokosovo vlakno. Usplode kokosova oraha, ploda kokosove palme (*Cocos nucifera*), obavijaju smeda, tvrda i gruba vlakna.

Upotrebljavaju se za izradbu veoma grubih tkanina, npr. za otriće, kao podloga za naslojavanje i izradbu sagova, te za izradbu četaka.

PRIRODNA PROTEINSKA VLAKNA

Prirodna proteinska vlakna nazivaju se i *životinjskim vlaknima*, jer su proteini (bjelančevine) glavna građa protoplazme žive stanice, a najviše ih ima u životinjskim organizmima i njihovim tvorbama i izlučinama kao što su životinske dlake i svila. Bjelančevine su makromolekulni spojevi, biopolimeri, sastavljeni od aminokiselina koje su međusobno povezane peptidnim vezama. Bjelančevine pokazuju neke zajedničke kemijske reakcije i podudaraju se u osnovnim oblicima strukture, ali se znatno razlikuju svojom funkcijom u organizmu. Kao izvori prirodnih proteinskih vlakana (tabl. 1) služe životinske dlake, koje izgrajuje bjelančevina keratin, i životinska izlučina svila, koja se sastoji od bjelančevine fibroina (v. *Bjelančevine*, TE 2, str. 50).

Vuna. Vuna je životinsko vlakno koje se dobiva od raznih pasmina ovaca. Ovce se uspješno uzgajaju u svim krajevima umjereno-klimatskog područja. Vuna zauzima vrlo cijenjeno mjesto među vlknima koja služe za izradbu odjevnih predmeta u prvom redu stoga što su vunene tkanine savitljive i porozne, punе zraka, pa su idealna zaštita od hladnoće.

Dobivanje vlakana. Vuna raste na ovci kao dlačni pokrivač (runo), a na njoj se nakupljaju masnoće, znoj, zemlja i druge nečistoće. Jedanput godišnje, a u iznimno toplim klimatskim uvjetima i dvaput, ovce se šisaju, ručno ili strojno. Ošišana, masna vuna drži se u jednom komadu, runu. Kako vlakna na različitim dijelovima tijela nisu iste kvalitete, ona se razdvajaju i sortiraju.

Vuna dobivena nakon šisanja naziva se *runska vuna*, čista runska vuna, nova vuna, a katkada i djevičanska vuna, čime se, za razliku od *regenerirane vune*, želi naglasiti da vlakna nisu još bila upotrijebljena niti ugrađena u neki tekstilni proizvod.

Nakon šisanja vuna se pere u slabo lužnatoj otopini sapuna i sode. Nečistoće padaju na dno, a u vodenoj otopini zaostaju emulgirane masnoće i znoj. To je tzv. *prana vuna*. Vunena masnoća sadrži uz ostalo i *lanolin*, koji se mnogo upotrebljava u kozmetičkoj industriji za izradbu krema i sapuna. Kako lanolin ima i svojstva pjenjenja i pranja, razrađeni su postupci po kojima se vuna pere u vlastitoj otpadnoj vodi u uređaju koji se naziva *levijatan*. Zaostali komadići biljnih nečistoća uklanjanju se češljanjem i grebenanjem te *karboniziranjem*, obrad bom vune na visokoj temperaturi u razrijeđenoj sumpornoj kiselini, koja razara biljne nečistoće, a ne oštećeje vlakna.

Osim šisanjem, vuna se može dobiti i skidanjem s koža zalkanih ili uginulih ovaca (*tabačka ili kožarska vuna*). Skida se pomoću lužina i biološkim postupkom s mikroorganizmima (*vuna mazamet*). Vuna dobivena s koža uginulih ovaca naziva se i *mrtva vuna*.

Klasifikacija i označivanje vune. Vuna se klasira i stupnjuje na temelju općeg stanja, prosječnog promjera, duljine, boje i udjela nečistoća. Najrašireniji je engleski (bradfordski) sustav klasifikacije, koji se, iako neprikidan, zadržao i danas jer je dug u upotrebi u Australiji, najvećem svjetskom proizvođaču vune. Prema tom se sustavu kvaliteta označuje brojkama, a ocjenjuje prema broju vitica pređe duljine 560 jardi (512 m) koja se može ispresti od jedne libre (0,454 kg) vlakna.

U trgovini vune posebno je poznata oznaka *vuneni znak*. To je znak kvalitete, koji je 1964. uspostavio Međunarodni sekretarijat za vunu. Vuneni znak mogu nositi samo proizvodi onih tvornica koje su pod kontrolom te organizacije, a jamstvo je da je za dotični proizvod upotrijebljena čista runska vuna (sama ili u mješavini s drugim vlknima) i da vlakna prilikom preradbe nisu oštećena.

Kemijska građa i struktura. Vuna je, kao i sve životinske dlake, strukturno vrlo heterogena i složena. Njezine su keratinske molekule helikoidno zavijene, a sadrže mnoge aktivne atomne skupine: polarne peptidne skupine –CONH– u lancu te skupine u bočnim lancima kao što su karboksilna, hidroksilna i amino-skupina. Te skupine stvaraju slabe međumolekulne veze. Posebnu ulogu ima tzv. cistinska veza, koja stvaranjem disulfida povezuje dva dijela molekule ili dvije keratinske molekule i umrežuje ih.

Mnogo različitih kemijskih skupina i mnogo veza među molekulama čine vunu vrlo osjetljivom prema kemikalijama, vodi i toplini.

Vuna je fino, kovrčavo i pravilno vlakno ljuškave površine. Sastoji se od vanjskog omotača (kutikule) i staničnog dijela (korteksa), a gruba vlakna mogu imati i srž. Kutikula je sloj ljuškavih epitelnih stanica koje obavijaju vunu. Ljuške su prekrivene tankim slojem voštanih stanica, pa su nova vlakna, kojima taj sloj nije oštećen pranjem ili kemikalijama, vodooodbojna. Zbog malih pora taj je sloj propustan za vodenu paru, pa vuna dobro upija vlagu i znoj i prenosi ih u okolinu.

Korteks tvori 90% vune, a sastoji se od vrtenastih stanica. Svaka je stanica korteksa izgrađena od dugačkih, sredenih elemenata, keratinskih makrofibrila, koji su uloženi u amorfni, nesredi dio, matricu, što je također proteinska tvar. Makrofibrili se sastoje od nekoliko desetaka manjih, sredenih elemenata, mikrofibrila koji su u novije vrijeme nazvani *intermedijarni filamenti* (IF), a svaki od njih sadrži osam manjih elemenata, protofibrila. Svaki se protofibril sastoji od dvije spiralno uvijene dvostrukе uzvojnici, tj. od jedinice koja se sastoji od četiri makromolekule keratina (spiralno uvijena dva dimera).

Svojstva vune. Duljina vune iznosi u prosjeku 5–35 cm, a samo grube vune dosežu duljinu veću od 20 cm. Promjer ovise uglavnom o pasmini i može biti od 14–45 µm.

Kovrčavost također ovise o pasmini. Merino-vune su jako kovrčave (do 10 kovrča na 1 cm), grube vune imaju manje kovrča, a naša ovca pramenka gotovo da i nema kovrča. Kovrčavost je trodimensionalna i trajna, a privremeno se može ukloniti vlaženjem. Ona je glavni uzrok što su vunene tkanine tople, jer vunena preda sadrži zbog toga mnogo zraka, koji je odličan toplinski izolator.

Prirodna je boja vune slabо žučkasta do bijela, no ima i obojenih vuna, najčešće crnih i smeđih. Požućenje prilikom glačanja ili izlaganja izravnoj Sunčevoj svjetlosti kroz dulje vrijeme trajno je, jer je posljedica degradacije polimerne molekule.

Cvrstoća je vune u usporedbi s ostalim vlknima malena, a u mokrom se stanju još više smanjuje, pa je vuna među najslabijim prirodnim tekstilnim vlknima. Ipak, vunene tkanine i pređa ne smatraju se slabima, jer su to redovito dosta debele pređe s mnogo vlakana, a i trenje je među vlaknima zbog ljuškave površine veliko. Vunene su tkanine otporne na gužvanje, ali pri ponovljenim naprezanjima nastaje trajna deformacija, što se primjećuje na dugo nošenim vunenim predmetima. Vuna je vrlo osjetljiva na lužine, a mnogo otporna na kiseline, što se primjenjuje i u već spomenutom procesu karbonizacije. U jakim se lužinama djelomično otapa. Redukcijska i oksidacijska sredstva mogu se u kontroliranim uvjetima upotrijebiti za obradbu vune. Vuna dobro podnosi i organska otapa koja služe u kemijskom čišćenju.

Vuna je sklona pustenju, što je nepoželjna pojava, a očituje se kao nepovratno skupljanje po duljini i širini uz istodobno povećanje debljine tkanine (v. *Pust*, TE 11, str. 339). Pustenje je karakteristično za sve vrste dlaka i lako nastaje prilikom pranja (trljanje, voda, alkalijske, površena temperatura), što je razlog da se vuneni proizvodi teško održavaju pranjem, odnosno moraju se kemijski čistiti organskim otapalima. Da bi se smanjila sklonost pustenju, vuna se doraduje vrućom parom i laganim hladenjem, kemijskim uklanjanjem površine ljušaka ili nanošenjem vrlo tankoga polimernog filma.

Upotreba. Vuna je vrlo prikladna za izradbu tople odjeće, pokrivača i prostiraća te se prerađuje u tkanine, pletiva i razne vrste netkanih tekstilija. Izgled i namjena vunenog proizvoda ovise o kvaliteti vlakana, ali i o stupnju i načinu prerađbe vlakana u tekstilni proizvod, što se postiže pripremom vune za prednje (grebenana i češljana vuna), doradom pređe i doradom plošnog proizvoda. Grebenane se pređe izrađuju od grubljih vlakana s malo uvoja i prerađuju u voluminozne, dlakave i mekane tkanine za kapute i kostime, debele pulovere, pokrivače, podne prostirачe i sl. Češljane se pređe izrađuju od finijih kovrčavih vlakana, zbijenije su i glatke i daju tanke, čvrste tkanine za odjela i kostime.

Vuna se često miješa s poliesterskim vlknima u omjeru 55 : 45 da bi proizvod bio jeftiniji i čvršći. I s viskoznim i modalnim vlknima vuna se miješa radi niže cijene proizvoda. Mješavine s poliakrilonitrilom služe u trikotažnoj industriji. Međutim, danas se još uvijek najviše cijene proizvodi izrađeni od 100%-tne

vune. Premda je vuna vrlo cijenjeno i za neke tekstilne proizvode gotovo nezamjenjivo vlakno, njezin je udio (zajedno s drugim dlakama) u ukupnoj svjetskoj potrošnji vlakana malen (~4%) i nema pokazatelja da će se ubuduće bitnije promijeniti.

Moher. Moherom se naziva dugo, ravno, bijelo i sjajno vlakno angorske koze, koja je podrijetlom s Bliskog istoka, a danas se najviše uzgaja u Južnoafričkoj Republici i SAD. Duljina je vlakana $60\cdots300$ mm, što ovisi o vremenskom razdoblju između dvaju šišanja, a srednji je promjer vlakana $24\cdots40$ μm . Kemijski sastav, građa, izgled i svojstva mohera slični su svojstvima vune.

Moher služi u prvom redu za izradbu čupavih i dlakavih tkani na i pletiva. Prije pojave kemijskih vlakana takav se učinak mogao postići samo s moherom. Zbog otežane preradbe moher se uglavnom preradi u mješavinama s drugim vlaknima, najčešće s vunom. Vunenim proizvodima daje ljepši izgled, najčešće dlaku površinu, veću živost i veliku trajnost.

Kašmir. Pod imenom kašmir razumije se vlakno dobiveno od tibetanske ili kašmirske koze, koja je domaća životinja u mnogim dijelovima Kine, sjeverne Indije i Irana. Kašmir je jedno od najmekših, najfinijih i najluksuznijih životinjskih vlakana u komercijalnoj upotrebi.

Godišnji prinos vlakana po jednoj kozi iznosi prosječno samo ~250 g, jer su upotrebljiva samo fina, tzv. unutrašnja vlakna, koja su na tijelu koze prekrivena grubim, vanjskim dlakama. Poput drugih životinjskih vlakana, kašmir je po gradi sličan vuni. Građen je od keratina, pa su mu i svojstva slična svojstvima vune. Vlakno je najčešće sive, žučkastosmeđe ili bijele boje. Duljina vlakana iznosi $25\cdots90$ mm, a srednji promjer $15\cdots20$ μm , što ih čini finijim od najfinije vune. Tkanine od kašmira mekane su i podatne, s opipom i sjajem između vune i svile, a upotrebljavaju se za izradbu prvorazrednih odjevnih predmeta.

Kašgora. Kašgora je novo, sve cijenjenije i prisutnije vlakno na tržištu, a potječe od koze nastale križanjem mužjaka divlje angorske koze i ženke divlje tibetanske ili kašmirske koze. Uzgjeno je u Australiji, ima mekoću i finoću kašmira, a sjaj i trajnost mohera. Upotrebljava se za izradbu skupocjenih tkanina te vunica za strojno i ručno pletenje.

Kostrijet. Kostrijet je gruba kozja dlaka od različitih pasmina. Vlakna su duljine ~200 mm, a debljine i do 0,1 mm. Sjajna su i nesavitljiva i nisu prikladna za odjevne tkanine te služe za izradbu grubih tkanina za međupodstave, podne prostirače, vreće, užad i sl.

Devina dlaka. Jednom godišnje deve se linjaju, a njihova se otpala dlaka skuplja. Od svake se životinje može tada dobiti $2,5\cdots3$ kg dlaka. Njihova kvaliteta ovisi o pasmini; vlakna jednogrbe deve kratka su i slaba i upotrebljavaju se samo lokalno za izradbu sagova, užadi, košara i tkanina za šatore. Dvogrba deva daje prvorazredna vlakna karakteristične svijetlosmeđe do crven-kastosmeđe boje.

Devina dlaka dolazi u prodaju kao rastresita ili kao iščešljana. Rastresita se dlaka sastoji od dviju vrsta vlakana: od vanjskih, grubih, tvrdih i čekinjastih te od unutrašnjih, finih, sitnokrvčavih, mekanih i sjajnih vlakana. Iščešljana devina dlaka prerađena je grebenanjem, različite su vrste vlakana razdvojene i svaka se prodaje posebno. Vanjska vlakna dosežu duljinu do 250 mm, a unutrašnja do 120 mm. Unutrašnja su vlakna po finoći slična vuni (srednji promjer $10\cdots40$ μm).

Od devinih se dlaka dobivaju veoma fine, ugodne, podatne i tople tkanine, koje se upotrebljavaju za izradbu zimskih kaputa i drugih gornjih odjevnih predmeta. Gruba vlakna služe za izradbu prekrivača, užadi i industrijskog remenja.

Alpaka. Alpacom se naziva vlakno istoimene južnoameričke domaće životinje iz roda lama. Vlakna se dobivaju šišanjem, duljine su $200\cdots250$ mm i promjera $23\cdots30$ μm , što ovisi o starosti životinje. Prirodna obojenost (bijela, smeđa do crna boja s mnoštvom nijansi), ugodan sjaj te iznimna finoća i mekoća čine alpaku cijenjenom na tržištu. Upotrebljava se za izradbu finih tkanina dlakave površine za kostime i ogrtače, te u trikotažnoj industriji. Često se izrađuju mješavine s vunom.

Vikunjino vlakno. Vikunja je rijetka, divlja životinja iz roda lama, koja živi u teško pristupačnim predjelima Anda. Od davnine se lovi radi kvalitetnog mesa i vlakana, pa je gotovo izumrla i danas se nalazi pod zaštitom Svjetske organizacije za zaštitu

dvljih životinja. S tijela životinje može se skinuti samo 100 do 250 g vlakna. Vlakna su bijele ili blijeskavosmeđe boje, a najčešće se prerađaju neobojena. Duljine su do 50 mm, a promjera 13 do 14 μm , dakle upola tanja od fine vune. Ubrajaju se među najrjeđa, najljepša i najfinija vlakna na tržištu, dvostruko su skuplja od kašmira. Upotrebljavaju se za proizvodnju najmekših i najlakših tkanina za vrlo skupe odjevne predmete.

Kunićev vlakno. Dlaka kunića i zečeva također se može upotrijebiti kao vlakno. Najviše se cijeni dlaka angorskog kunića, koji se šiša svaka tri mjeseca i pritom godišnje daje $200\cdots400$ g finog vlakna. Vlakno se klasira prema duljini, finoći i čistoći, duljine je $25\cdots75$ mm, a promjera $10\cdots14$ μm . Vlakna su bijela, glatka i sjajna. U njihovim se međustaničnim prostorima nalazi mnogo zraka, pa su to najlakša prirodna vlakna (gustoća $1,23 \text{ g/cm}^3$) i odličnih su toplinskoizolacijskih svojstava.

Grada ljsaka na površini vlakana čini ih veoma sklonim pustenju, pa se mnogo upotrebljavaju za izradbu pusta za muške i ženske šeštire. Od njih se dobiva luksuzna pređa za izradbu laganih i mekanih pulovera i šalova. Kako su vlakna vrlo male čvrstoće, ti proizvodi nisu trajni.

Jakovo vlakno. U novije se doba na tržištu može naići i na vlakna jaka, grbava i kudrava goveda Tibeta i Pamira. Gruba, vanjska vlakna upotrebljavaju se u lokalnoj kućnoj radinosti, dok se od finih vlakana izraduju tekstilni proizvodi visoke kvalitete.

Konjska struna. To je čvrsta i izdržljiva dlaka od konjske grive i repa. U tekstilne se proizvode ugrađuje u potku debljih pamučnih, lanenih, pa i vunenih tkanina, koje služe kao međupodstava, za tapeciranje namještaja i sl.

Za izradbu tekstilnih tvorevina u lokalnoj kućnoj radinosti ponegdje se upotrebljavaju i vlakna dobivena od drugih domaćih životinja (neka goveda i ljama) i dvljih životinja (vjeverica, kuna, tvor, jazvac, dabar, guanako, pa čak i majmun).

Svila. Svilom se naziva tanko, sjajno vlakno koje proizvodi gusjenica dudova svilca. Gusjenica se izleže iz jajašca i hrani se dudovim lišćem, a nakon $3\cdots4$ tjedna prestane se hraniti i počinje se zamataći u čahuru. Čahura nastaje pomicanjem glave i ispuštanjem dviju ljepljivih bjelančevinastih niti, koje se na zraku odmah stvrdnu u jednu. Za tvorbu čahure potroši se nit duljine $3\ 000\cdots4\ 000$ m, od čega se samo $700\cdots1\ 000$ m dade odmršti u neprekinutu svilenu nit.

Za industrijske se svrhe dudov svilac kontrolirano uzgaja u posebnim uzgajalištima. Kako bi se spriječilo da se gusjenica razvije u leptira, koji bi pri izlasku iz čahure razorio niti, čahure se prije toga izlažu djelovanju vrućeg zraka ili vodene pare i gusjenice se usmrte. Zatim se čahure namaču u vrućoj vodi, skida se vanjski sloj i nađe se početak kontinuirane niti. Više se niti ujedinjuje i provlači kroz prikladnu napravu za odmatanje s čahura te namata na vitlo kao *sirova svila* (tzv. grež-svila).

Nit sirove svile sastoji se od dviju sviljenih niti građenih od fibroina, koje su spojene ljepljivom bjelančevinom sericinom. Sirova je svila stoga relativno debela, gruba opipa. Sericin se ostavlja na vlaknima za vrijeme predanja i tkanja kako bi se olakšala prerada i spriječilo oštećenje finih sviljenih niti. Nakon predanja ili tkanja sericin se uklanja kuhanjem u sapunskoj vodenoj otopini. Postupak se naziva *degumiranje*, a dobivena degumirana svila zadobiva svoj karakterističan ugodan opip, blagi sjaj i lepršavost.

Predanjem filamentnih sviljenih niti i razlikama u broju upredenih niti, načinu upredanja, broju uvoja i sl. postižu se učinci po kojima se svilene tkanine međusobno razlikuju. I niti s probušenim čahura iskorisćuju se i najčešće upredaju poput pamuka ili lana u nešto deblje prede, tzv. šap, buret i floret-svila.

Svojstva svile. Svila je vrlo tanko filamentno vlakno glatke površine, koje svilene proizvodima daje posebno ugodan i blag sjaj. To je vrlo čvrsto vlakno, koje i u mokrom stanju zadržava do 85% svoje čvrstoće, pa se ubraja među najčvršća prirodna vlakna. Gustoća je svile relativno malena, pa su tanke tkanine suviše lagane i lepršave i treba ih otežati. Upijanje je vlage dobro i brzo. Toplinskoizolacijska svojstva posljedica su zadržavanja zraka u prostorima među vlaknima. Zbog toga su punije svilene tkanine od predenih prede vrlo tople, a istodobno je svila pogodno vlakno i za ljetne vrućine, jer se od filamentne prede izrađuju uglavnom tanke tkanine, koje na koži stvaraju osjet hladnoće.

Otpornost je na prljanje dobra, jer se na površini glatkog vlakna ne zadržavaju sitne čestice prašine. Otpornost na lužnate vodene otopine bolja je nego u vune, pa se svilene tkanine mogu prati u slabo lužnatim otopinama. Svila se glača pri umjerenim temperaturama, do 140°C . Zahvaljujući otpornosti prema organskim otapalima, a posebno prema sredstvima za kemijsko čišćenje, svila se može čistiti u kemijskim čistionicama. Razrijedene kiseline svilu ne oštećuju, no nešto jače kiseline uzrokuju skupljanje i ukrućivanje vlakana, dok jake kiseline potpuno razgrađuju svileni fibroin.

Električnoizolacijska svojstva svile uzrokuju teškoće u pre-radbi zbog nabijanja statičkim elektricitetom, ali se mogu iskoristiti za elektroizolaciju.

Tussah-svila. Osim uzgojene prirodne svile dobivene od dudova svilca, svila se može dobiti i od nekih leptira koji se ne uzbijaju, nego žive slobodno, a njihove se čahure skupljaju po šumi. Te se svile nazivaju *divljom svilom*, a nose imena prema vrstama leptira.

Najpoznatija je i najčešća vrsta divlje svile *tussah-svila*. Dobiva se od nekoliko tipova gusjenica *Anthrea*, koje potječu iz Indije i Kine, a hrane se hrastovim lišćem. Te su gusjenice veće od gusjenica dudova svilca, pa su i čahure mnogo veće. Čahure se skupljaju dva puta godišnje, u proljeće i jesen, a preradba je vlakana slična preradbi vlakana od kultivirane prave svile. Vlakna nisu filamentna, jer se skupljaju već probušene čahure, nejednolične su debljine, zelene, žute, sive ili smeđe boje, a po gradi su slična vlaknima dudova svilca.

KEMIJSKA VLAKNA

Za razliku od prirodnih vlakana, koja u tom obliku postoje u tvarima koje se nalaze u prirodi, kemijskima se nazivaju vlakna (tabl. 1) koja se dobivaju od prirodnih vlaknatih tvari njihovom fizikalno-kemijskom obrad bom (kemijska vlakna od prirodnih polimera) ili od tvari proizvedenih kemijskom reakcijom (kemijska vlakna od sintetskih polimera i od anorganskih tvari).

Prva kemijska vlakna, koja se danas smatraju *I. generacijom kemijskih vlakana*, ispredala su se od kemijski modificiranih visokomolekulnih tvari koje se mogu naći u prirodi (celuloza, proteini, alginat, poliizopren). Ta se vlakna u starijim sistematisacijama nazivaju i *vlakna od regeneriranih prirodnih polimera, polusintetska vlakna i umjetna vlakna*.

Drugo razdoblje u proizvodnji kemijskih vlakana započelo je 1920-ih godina, usporedno s razvojem kemije makromolekulnih spojeva. Od mnoštva polimera sintetiziranih od jednostavnih organskih spojeva, petnaestak ih se upotrebljava za proizvodnju vlakana. Ta vlakna predstavljaju *II. generaciju kemijskih vlakana*, nazvanu i *sintetska vlakna*. Za razliku od prirodnih vlakana, odlikovala su se trajnošću, velikom čvrstoćom, dobrim zadržavanjem oblike i vrlo lakim pranjem. Ubrzo se na tržištu pojavilo mnogo proizvođača, kemijska su vlakna od sintetskih polimera postala vrlo popularna i proizvodila su se u velikim količinama. Međutim, loša svojstva kao što su slabo upijanje vlage i nabijanje statickim elektricitetom, što pri nošenju stvaraju neugodan osjećaj, bila su razlogom što je zanimanje za ta vlakna počelo postupno opadati. Proizvođači kemijskih vlakana odgovorili su novim istraživanjima i našli mnoga rješenja, poboljšanja i novine. Vodeće su tvornice započele s proizvodnjom vlakana poboljšanih svojstava, od kojih su mnoga nadmašila svojstva prirodnih vlakana. Ta su vlakna dobivena uglavnom modifikacijom postojećih polimera, ali i sintezom potpuno novih te primjenom tzv. višokih tehnologija, a smatraju se *III. generacijom kemijskih vlakana*.

Proizvodnja kemijskih vlakana

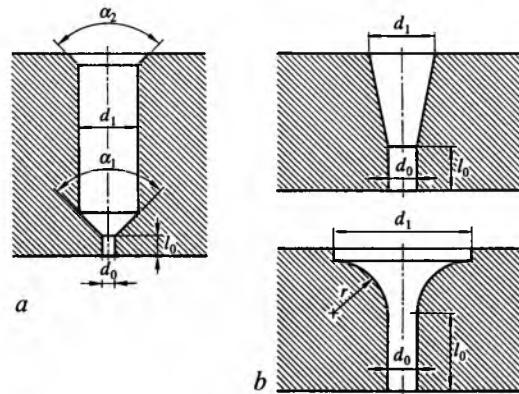
Proizvodnja većine kemijskih vlakana odvija se načelno po istoj shemi. Cvrsti polimerni materijal, građen od linearnih makromolekula zadovoljavajuće velike relativne molekulne mase, prevodi se u tekućinu pogodne viskoznosti i karakterističnih reoloških svojstava koja omogućuju ispredivost u niti primjenom prikladne tehnologije. Polimerna se tekućina protiskuje (*ekstruzija*) kroz uske otvore, mlažnice, u medij za skrućivanje, pri čemu se stvaraju tanke niti (vlakna). Taj se proces preoblikovanja polimerne tekućine u vlaknatu tvorevinu naziva *kemijsko ispredanje*. Skrnutne niti s jedne ili više mlažnica zatim se sjedinjuju u *filamentnu predu* (točan, unaprijed određen broj niti) ili u *kabel* (broj niti neodređen, više tisuća).

U takvim nitima dobivenim uz konvencionalne brzine ispredanja struktura je gotovo posve nesredena (makromolekule su samo neznatno orientirane), pa svježe ispredena vlakna većinom nemaju zadovoljavajuća upotrebljivost. Zbog toga se na tako završeno ispredanje nastavljaju *naknadne obradbe*, kojima se

postiže struktura potrebna za dalju preradbu vlakana u tekstilnoj industriji te prikladna svojstva za upotrebu tekstilnih proizvoda.

Polimer se u tekuću fazu većinom prevodi taljenjem ili otapanjem u pogodnom otapalu, te se na temelju toga razlikuju dva osnovna tehnička postupka ispredanja kemijskih vlakana: ispredanje iz taline i ispredanje iz otopine. Neki polimerni materijali koji nisu ni taljivi ni topljivi mogu se ispredati iz suspenzije pomoću posrednika, a za mnoga novija, visokokvalitetna vlakna razvijeni su specijalni postupci dobivanja koji ne uključuju ispredanje kroz mlaznicu.

Mehanizam tvorbe niti. Bez obzira na primjenjeni postupak ispredanja, mehanizam tvorbe niti bitno je određen karakteristikama strujanja (tečenja) polimera kroz mlaznicu i time njegovim specifičnim reološkim svojstvima. Za otopine i taline linearnih polimera velikih relativnih molekulnih masa karakterističan je pritom nenjutnovski tip ponašanja, što se u prvom redu očituje u činjenici da se viskoznost takva tekućeg polimera smanjuje s povećanjem posmičnog naprezanja, tipičnog za laminarno strujanje prisutno tijekom ispredanja. To smanjenje viskoznosti polimerne tekućine pri strujanju kroz mlaznicu pripisuje se promjeni sekundarne strukture makromolekula, pa se pojava naziva *strukturna ili posmična viskoznost*. Zbog posmične sile pri laminarnom strujanju kroz kapilaru mlaznice makromolekule prelaze iz relativno sklupčanoga (stacionarno stanje) u ispravljeni oblik, što rezultira prvim usmjeravanjem makromolekula prema uzdužnoj osi budućega vlakna. Istodobno tekući polimeri za vlakna pokazuju tipične oblike *viskoelasticnog* ponašanja, tj. relaksaciju i puzanje nakon djelovanja kratkotrajnih sila, koje su tipične za proces kemijskog ispredanja. Te se pojave većinom negativno odražavaju na orijentaciju makromolekula pri tvorbi vlakna, a u najužoj su vezi s molekulnom građom polimera i stoga su za različite polimere različito intenzivne.



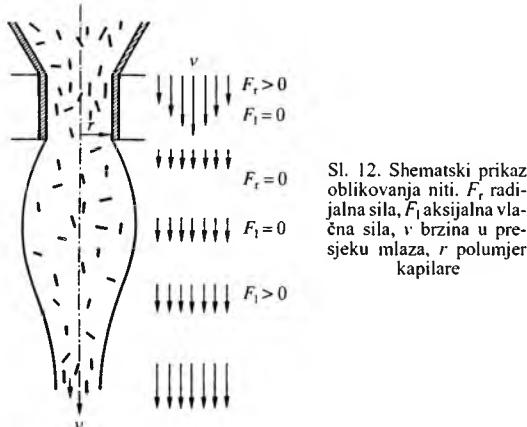
Sl. 11. Oblik kapilare otvora na mlaznici za ispredanje vlakana iz taline (a) i iz otopine (b). d_0 promjer kapilare, d_1 promjer kanala, l_0 duljina kapilare, α_1 kut konusa, α_2 kut iskošenja ulaznoga dijela kanala

Osim svojstava polimera, na ponašanje pri strujanju i time na mehanizam tvorbe niti bitno utječe i oblik otvora na mlaznici i njegove izmjere. Oblik otvora treba biti takav da se osigura laminarno strujanje, a izmjere kapilare takve da se postigne maksimalno dinamičko orijentiranje makromolekula. Zbog toga je osnovni oblik otvora na mlaznici i za različite tehnološke postupke ispredanja vrlo sličan (sl. 11). Ističu se tri dijela: kanal, konični dio i kapilara. U mlaznici za ispredanje iz otopine ulogu kanala ima ulazni dio cijele mlaznice. Osnovna je funkcija kanala osigurati laminarno strujanje i jednoličan dotok polimerne tekućine u kapilaru, a koničnim se dijelom sprečava turbulencija pri prijelazu tekućine iz širokoga kanala u usku kapilaru. Na ponašanje polimera pri strujanju kroz kapilaru jako utječe radikalna sila, određena promjerom kapilare i gradijentom brzine strujanja po presjeku kapilare ($F_r = dv/dr$). Upravo razlika u brzini strujanja u središtu kapilare (maksimalna) i pri stijenkama (minimalna) uzrokuje rotaciju makromolekula i njihovo dinamičko orijentiranje u smjer uzdužne osi budućega vlačnja. Promjer se kapilare u prvom redu određuje prema finoći vlačnja te se za ubočajeno područje finoča, $1,4 \cdots 15$ dtex, približno nalazi u granicama $0,05 \cdots 0,4$ mm prilikom ispredanja iz taline, odnosno $0,004 \cdots 0,1$ mm prilikom ispredanja iz otopine. Duljina kapilare ovisi o njezinu promjeru

te su uobičajeni omjeri duljine prema promjeru od 1:1 (ispredanje iz otopine) do 3:1 (ispredanje iz taline), a samo iznimno i veći (npr. za polipropilenska vlakna 7:1).

Optimalnim omjerom duljine i promjera kapilare valja što je moguće više smanjiti dezorientaciju makromolekula koja kratkotrajno nastaje zbog relaksacije i puzanja, neposredno po izlasku polimernog mlaza iz mlaznice (tzv. Barusov efekt, sl. 12). Prisilno ispravljene i usmjerene makromolekule nastoje po izlasku iz mlaznice ponovo zauzeti manje napregnute položaje pa nastaje određena dezorientacija i mlaz se proširuje. Pojava je nepoželjna, smanjuje se povećanjem omjera duljine i promjera kapilare, i za različite je polimere različito izražena. Iznimka su od takva ponašanja polimeri s aromatskim jezgrama povezanim u *para*-položaju. Zbog krutosti svojih molekula ti polimeri orientaciju postignutu u kapilari zadržavaju i po izlasku iz mlaznice.

Ubrzo po izlasku mlaza iz mlaznice, na oblikovanje niti počinje bitno utjecati *vlačna sila*, F_t , određena brzinom povlačenja, odnosno namatanja niti. Njezinim se djelovanjem polimerni mlaz stavlja (sl. 12) i skrućuje (povećanje tzv. *istezne viskoznosti*, što se pospješuje hlađenjem, odnosno uklanjanjem otapala), tako da se na udaljenosti od $\sim 20 \cdots 80$ cm od mlaznice, već prema polimeru, može govoriti o skrućenoj niti. U tom je dijelu tečenja brzina strujanja po presjeku mlaza konstantna, a povećava se s udaljenošću od mlaznice. Time se zbiva stabilna statička orientacija makromolekula, to veća što je brzina povlačenja niti veća.



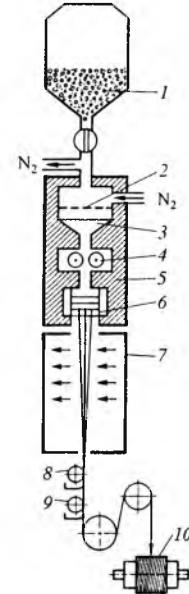
Sl. 12. Shematski prikaz oblikovanja niti. F_r radijalna sila, F_t akcijalna vlačna sila, v brzina u presjeku mlaza, r poljomer kapilare

Konačno oblikovanje niti i vlakna izvan mlaznice složen je proces koji ovisi o parametrima tehnološkog procesa. Uz brzinu ispredanja bitan utjecaj imaju i uvjeti hlađenja, odnosno koagulacija niti pri ispredanju iz otopine, stupanj istezanja i dr., pa se promjenom tih parametara može utjecati na svojstva vlakana. Oblikovanje nadmolekulne strukture te definiranje izmjera i oblikova vlakna u konvencionalnim se postupcima ispredanja završava u procesima naknadne obradbe, u tzv. liniji vlakana.

Ispredanje iz taline najjednostavniji je i najekonomičniji postupak ispredanja kemijskih vlakana pa se primjenjuje uviјek kada se iz polimera može prirediti termostabilna talina potrebnih reoloških svojstava da bi se proces ekstruzije taline kroz mlaznicu mogao provesti bez jače degradacije polimera te da bi se iz polimernog mlaza oblikovala vlakna. Tim se postupkom npr. proizvode poliesterska, poliamidna, polipropilenska, polietilenska i poli(vinil-kloridna) vlakna. Iz načelne sheme (sl. 13) vidi se da taj postupak obuhvaća više pojedinačnih procesa povezanih u cjelinu: pripremu taline, oblikovanje niti ekstruzijom taline kroz mlaznicu, skrućivanje niti hlađenjem zračnom strujom, navlaživanje i nanošenje preparacijskih sredstava te namatanje filamenata, odnosno odlaganje kabela.

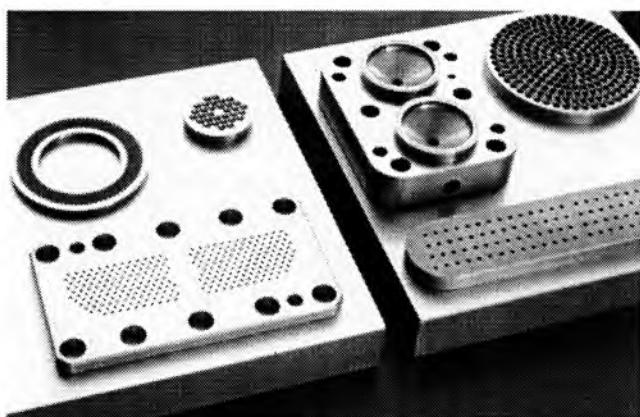
U kontinuiranim se procesima nakon sinteze polimera talina izravno dovodi na stroj za ispredanje vlakana, a u diskontinuiranim procesima polimerni se materijal (granulat) tali u talioniku, koji je sastavni dio postrojenja za ispredanje. Danas se pretežito upotrebljavaju talionici s pužnicom (ekstruder), u manjoj mjeri i vertikalni talionici. Primjenom ekstrudera polimer se tali uz kontroliranu temperaturu i miješanje kako bi se postigla potrebna viskoznost i jednoličnost taline, a sprječila toplinska degradacija

polimernih molekula. Istodobno se pogodnim omjerima promjera pužnice i poprečnih izmjera ekstrudera osigurava i tlak taline potreban za dovođenje taline u blok za ispredanje. Na izlaznom dijelu ekstrudera u talinu se prije ispredanja mogu dodati tvari za mijenjanje svojstava vlakana, npr. bojila, sredstva za smanjenje sjaja (titanov oksid, cinkov oksid), sredstva protiv nabijanja statičkim elektricitetom (kvaternarni amonijevi spojevi), aditivi za smanjenje gorivosti vlakana (fosforni, klorni i drugi spojevi), antibakterijske tvari i sl. Jednim se ekstrudерom može talinom opskrbljivati i do 16 proizvodnih linija.



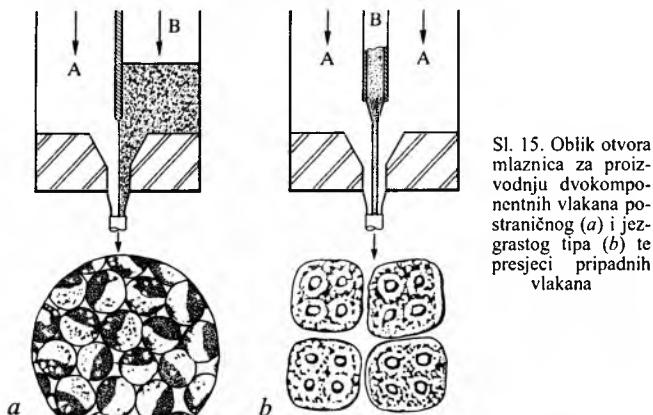
Sl. 13. Shema ispredanja iz taline. 1 granulat, 2 grijač, 3 talina, 4 zupčaste pumpe, 5 grijači plasti, 6 mlaznica, 7 komora za hlađenje, 8 navlaživanje, 9 preparacija, 10 namotak

Talina se prevodi u niti primjenom bloka za ispredanje, sa stavljenog od više elemenata koji osiguravaju jednoličan dotok i potreban tlak i doziranje taline (tlačna i mjerena zupčasta pumpa, filtri) te oblikovanje taline u niti (mlaznica). Mlaznica za ispredanje iz taline šupljikava je metalna pločica kružnog, eliptičnog ili pravokutnog oblika (sl. 14), različitih definiranih izmjera. Broj otvora na mlaznici može biti vrlo različit i u prvom redu ovisi o tipu vlakna koje se proizvodi. Relativno je malen za proizvodnju filamentnih vlakana (monofilamenti 1 ··· 6, multifilamenti do nekoliko desetaka otvora), a obično vrlo velik za proizvodnju vlasastih vlakana (od stotinjak do nekoliko tisuća). U jedan se blok za ispredanje može postaviti i više desetaka mlaznica, čime se dobiva vrlo veliki broj niti iz jednog bloka za ispredanje. Vrsta polimera i uvjeti skrućivanja dodatno određuju dopušteni broj otvora na mlaznici. Uz već opisani oblik otvora, danas se za proizvodnju profiliranih vlakana upotrebljavaju i mlaznice s kapilarama različita oblika, a za proizvodnju dvokomponentnih vlakana mlaznica treba osigurati odvojen dotok dvaju različitih polimera i potom njihovo sjedinjavanje na sasvim određeni način. Stoga mlaznice za ispredanje postraničnog i jezgrastog tipa dvokomponentnih vlakana nemaju jednak oblik (sl. 15).



Sl. 14. Mlaznice za ispredanje iz taline

Mlaznice se izrađuju od visokokvalitetnih čelika, uz iznimno veliku preciznost izmjera i kvalitetu stijenki, a sve eventualne nepravilnosti izravno se odražavaju na kvalitetu vlakana. S vremenom se mlaznice troše te se moraju brižno održavati, redovito kontrolirati i pravodobno zamijeniti novima.



Sl. 15. Oblik otvora mlaznica za proizvodnju dvokomponentnih vlakana postraničnog (a) i jezgrastog tipa (b) te presjeci pripadnih vlakana

Stvorene polimerne niti skrućuju se hlađenjem, što valja postići u što kraćem vremenu, ali na način koji osigurava jednoličnu strukturu po presjeku niti i ne uzrokuje međusobno sljepljivanje niti. To se postiže hlađenjem zračnom strujom uz kontrolirane uvjete (temperatura i vlažnost zraka, brzina i smjer strujanja). Na izlazu iz zračnog kanala niti se ohlađe na temperaturu manju od temperature staklišta, a na izlazu iz komore za ispredanje, na sobnu temperaturu. Tada se, uz istodobno navlaživanje, na vlakna nanose preparacijska sredstva, koja osiguravaju potrebnu glatkocu, klizivost, mekoću i kohezivnost niti, te sprečavaju njihovo nabijanje statickim elektricitetom u sljedećim procesima obrade. S jedne se mlaznice sjedinjene niti namataju, uz dodatak malog broja uvoja, kao filamentna preda na namotak, a za dobivanje vlasastih vlakana sjedinjuje se vrlo veliki broj niti s više mlaznica u kabel. Brzina namatanja filamenata zapravo je brzina ispredanja.

U konvencionalnim se postupcima vlakna ispredaju iz taline brzinama od $500\cdots 1500$ m/min. Međutim, u novije su doba brzine ispredanja sve veće, tako da nisu rijetkost ni brzine od $6000\cdots 7000$ m/min. Razlozi su tome povećanje proizvodnosti i pojednostavljenje procesa uz povećanje kvalitete vlakana. Povećanjem brzine ispredanja postiže se bolja aksijalna usmjerenošć makromolekula i strukture vlakna, tj. učinci koji se pri konvencionalnim postupcima ispredanja moraju osigurati naknadnim istezanjem vlakana. Pri dovoljno velikoj brzini ispredanja postiže se i potrebna kristalnost strukture, tako da nije potrebno naknadno istezanje. Svojstva vlakana ispredenih različitim brzinama bitno su različita pa se, već prema brzini ispredanja, vlakna označuju i posebnim oznakama (početna slova engleskih riječi kojima se opisuje stupanj urednosti strukture ovisan o brzini ispredanja): LOY (mala orientiranost, konvencionalni postupci), MOY (srednji stupanj orientiranosti, brzine 1800 do 3000 m/min), POY (velika orientiranost, neznatna kristalnost, brzine 3000 do 5000 m/min), FOY (gotovo potpuna orientiranost, brzine 6000 do 7000 m/min).

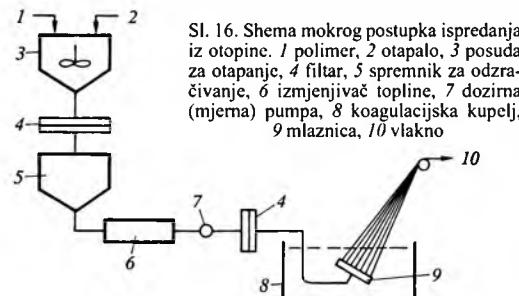
U suvremenim se tvornicama kemijska vlakna iz polimerne taline pretežito proizvode brzinama koje osiguravaju veliku orientaciju makromolekula (POY), a u proces ispredanja sve se češće uključuju i procesi istezanja i teksturiranja, čime se uz znatne ekonomske učinke dobivaju i vlakna mnogo bolje kvalitete.

Ispredanje iz otopine obično se primjenjuje ako se polimerni materijal ne može prevesti u termostabilnu talinu. Mnogi se linearni polimeri termički raspadaju prije taljenja (npr. celuloza, poliakrilonitril, poli(vinil-alkohol), aramidi) pa se od njih mogu dobiti vlakna jedino ispredanjem iz otopine. Preduvjet je za taj postupak postojanje prikladna otapala koje daje stabilnu, homogenu otopinu polimera, potrebnih reoloških svojstava za ispredanje i tvorbu niti. Da bi se postigla potrebna viskoznost, otopina za ispredanje relativno je velike koncentracije (maseni udio polimera najčešće $20\cdots 40\%$, a za gelno ispredanje i do 80%). Uz veliku moć otapanja pri što nižoj temperaturi za otapala se po-

stavljuju i drugi zahtjevi, posebice neotrovnost, mogućnost recikliranja i ekološka prihvatljivost. Otapanje ne smije uzrokovati veću degradaciju polimernih molekula.

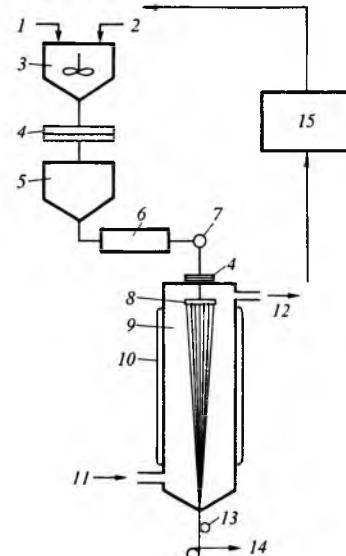
Ekstruzija polimerne otopine kroz mlaznicu, koja je nešto drukčijeg oblika, provodi se načelno na jednak način kao i iz taline. Skrućivanje polimernog mlaza i dalje oblikovanje vlakna moguće je na dva načina: izravnim ispredanjem u koagulacijsku kupelj (mokri postupak) i otparivanjem otapala strujom vrućeg zraka ili inertnog plina (suh postupak).

Za **mokri postupak ispredanja** (sl. 16) kemijski je sastav koagulacijske kupelji takav da uzrokuje skrućivanje niti taloženjem (neprikladno otapalo za polimerni materijal) ili kemijskom pretvorbom polimera u netopljiv oblik. Najčešće su to vodene otopine raznih anorganskih soli, kiselina i alkalija ili mješavine vode i otapala za dotočni polimer. Tijekom ispredanja koagulacijska se kupelj troši pa je valja neprestano obnavljati kako bi se održavao stalnim njezin kemijski sastav. Najvažniji proces koji određuje koagulaciju niti u kupelji te tvorbu potrebne strukture i morfološke vlakna jest difuzija. Ona se zbiva u dva smjera. Iz polimernog mlaza otapalo difundira u kupelj, čime se povećava koncentracija polimera i njegovo postupno skrućivanje. S druge strane, koagulacijske tvari iz kupelji difundiraju u polimer, djelomice istiskujući pritom otapalo, što dodatno pridonosi skrućivanju, ali istodobno stvara i promjene na površinskom sloju niti. Razlike brzina difuzije u ta dva smjera uzrok su različitim oblicima poprečnih presjeka vlakana (cvjetast, zvjezdast, bubrežast i dr.),



Sl. 16. Shema mokrog postupka ispredanja iz otopine. 1 polimer, 2 otapalo, 3 posuda za otapanje, 4 filter, 5 spremnik za odzračivanje, 6 izmjenjivač topline, 7 dozirna (mjerna) pumpa, 8 koagulacijska kupelj, 9 mlaznica, 10 vlakno

premda je presjek kapilare kružan. Sile površinske napetosti na graničnom sloju niti mogu bitno utjecati na oblik površine vlakana. Na površinsku se napetost, a time i na brzinu koagulacije, može utjecati raznim dodatcima u kupelj, što služi za mijenjanje svojstava vlakana (npr. bilateralna struktura, kovrčavost, različiti presjeci, šupljikavost i dr.). Brzine ispredanja pri tom su postupku male (10 \cdots 20 m/min, iznimno do 100 m/min), pa se potrebna proizvodnost postiže primjenom mlaznica koje omogućuju ispredanje vrlo velikog broja niti (primjena tzv. paketa s većim brojem mlaznica).



Za **suh postupak ispredanja** (sl. 17) mehanizam skrućivanja bitno je određen brzinom difuzije otapala iz polimernog mlaza na

površinu i dalje u sredstvo za zagrijavanje, te se na morfološke karakteristike vlakna može utjecati parametrima koji utječu na tu brzinu. To su u prvom redu brzina ispredanja (200 do 1000 m/min), vrsta medija za zagrijavanje i temperaturni profil u komori za ispredanje, odnosno tome prilagođene dimenzijske karakteristike komore za ispredanje. I tu se uz kružni presjek kapilare mogu dobiti profilirana vlakna različitih strukturalnih karakteristika, a time i različitih uporabnih svojstava.

I prilikom suhog i mokrog postupka ispredanja iz otopine valja rekuperirati otapalo i kemikalije i vratiti ih u proces ispredanja, kako radi ekonomskih učinaka, tako i zbog ekoloških zahtjeva. U tom su pogledu ti postupci mnogo zahtjevniji od ispredanja iz taline.

Naknadna obradba svježe ispredenog vlakna obuhvaća više procesa kojima se postižu konačna struktura i tražena uporabna svojstva. Prvi je proces *istezanje*, kojim se postiže orientacija molekulnih lanaca u smjeru osi vlakna i djelomična kristalizacija strukture, parametri bitni za čvrstoću vlakana. Uz različite stupnje istezanja (uobičajeno 1:3,6 do 1:4,5, za tipove povećane čvrstoće do 1:10) od istog se polimera mogu dobiti vlakna različite čvrstoće, rastezljivosti i modula elastičnosti. Stvorena je struktura termodinamički nestabilna (vlakno se pri povišenoj temperaturi intenzivno skuplja), pa se na proces istezanja nastavlja *termofiksiranje* (v. *Fiksacija tekstila*, TE 5, str. 395), tj. kratkotrajna toplinska obradba pri visokoj temperaturi i u napeatom stanju, radi uklanjanja unutrašnjih naprezanja i stabilizacije nastale strukture, oblika i izmjera vlakana. Po potrebi vlakna se zatim *krovčaju*, odnosno *teksturiraju* (v. *Tekstil*, TE 12, str. 562; v. *Predenje*, TE 11, str. 56), nakon čega se nanose *završna preparacijska sredstva* (u pravilu u masenom udjelu 0,5–1,5%) radi poboljšanja preradivosti i modifikacije uporabnih svojstava. Za filamentna je vlakna to završna obradba, a kabel se na kraju *reže*, čime se dobivaju *vlasasta vlakna* duljine slične duljinu prirodnih vlakana. Već prema duljini na koju se režu, razlikuju se tzv. pamučarski, vunarski i jutreni tipovi kemijskih vlakana, koji na tržište dolaze u rastresitu obliku ili sređeni u istegnuti pramen spremjan za predenje. Duljina vlastastih vlakana za netkanu tekstil prilagođuje se vrsti i tehnicu izradbe netkanog tekstila.

Kemijska vlakna od prirodnih polimera

Prirodni polimeri od kojih se izrađuju kemijska vlakna jesu celuloza, proteini, alginat i poliizopren. Najčešće se uzima celuloza izolirana iz drveta ili od nekih otpadnih vlakana. Kako je celuloza teško topljiva, a razgrađuje se na povišenoj temperaturi bez prethodnog taljenja, teško ju je izolirati i preraditi u vlakno. Prikladnim su se pokazala otapala na osnovi kompleksnih bakenih spojeva. Vlakna proizvedena pomoću tih otapala nazivaju se *bakrena vlakna*. U novije se doba za izravno otapanje celuloze primjenjuju otapala na bazi morfolin-oksida, a dobivena se vlakna nazivaju *liocelna vlakna*. U ostalim se postupcima celuloza prenosi kemijskom reakcijom u derivat, koji je lakše topljiv. Iz otopine se zatim ispredaju vlakna koja ostaju kao *celulozni derivati* (acetat i triacetat) ili se tijekom koagulacije, istodobno s uklanjanjem otapala, derivat ponovno prevodi (regenerira) u celulozu (*regenerirana celuloza*). U regeneriranoj je celulozi stupanj polimerizacije manji nego u kemijski neprerađenoj celulozi, a i nadmolekulna je grada različita. Vlakna od regenerirane celuloze bila su prva kemijska vlakna, a za njih su se prije upotrebljavala i neka danas narušena imena kao *rajon* (za filamentno vlakno), *cel-vlakno* (za vlastasto vlakno) i *umjetna vlakna*.

Viskozna vlakna. Najstarija kemijska vlakna od prirodnih polimera, viskozna vlakna (CV), proizvode se i danas. Dobivaju se djelovanjem ugljičnog disulfida na alkalnu celulozu (v. *Celulozni derivati*, TE 2, str. 583). Time nastaje celulozni ksant (celulozni derivat, ester), koji se lako otapa u natrijevoj lužini. Gusta, viskozna otopina ksantata (zvana *viskoza*) ekstrudira se kroz mlaznice u kupelj sa sumpornom kiselinom, koja neutralizira natrijevu lužinu i razgrađuje ksantatne skupine regenerirajući čistu celulozu. Kupelj sadrži i elektrolite natrijev sulfat i cinkov sulfat u različitim koncentracijama, čime se utječe na brzinu razgradnje ksantata, odnosno na brzinu skrućivanja niti, te time i na strukturu i morfološke karakteristike vlakana.

Viskozni je postupak dobivanja kemijskih celuloznih vlakana relativno jeftin, ali ekološki vrlo nepovoljan. Tako, npr., proizvodni pogon kapaciteta 100 t/dan oslobađa 20–24 t ugljičnog disulfida i 4–8 t sumporovodika. Radi se o otrovnim plinovima, a štetni sumporni i cinkovi spojevi zagadjuju i otpadne vode. Zbog toga se, u skladu sa sve strožim ekološkim zahtjevima i propisima, postrojenja preuređuju da bi se spriječilo zagadjenje okoliša i osigurala zdrava radna sredina. Mnogi se proizvodni pogoni diljem svijeta i zatvaraju, a za proizvodnju vlakana razvijaju se alternativni, ekološki povoljniji postupci.

Standardna viskozna vlakna karakterističnoga su poprečnog presjeka u obliku cvijeta. Kemijska, toplinska i bojadarska su im svojstva slična svojstvima prirodnih celuloznih vlakana, pa su i postupci bojenja i dorade slični. Male su čvrstoće, a velike istezljivosti, posebno u mokrom stanju, kada lako bubre. U pranju se često ukrute i lako kidaju. Tkanine od viskoznih vlakana sklene su deformacijama tijekom pranja. Ugodne su za nošenje, dobro upijaju znoj i ne nabijaju se statičkim elektricitetom. Viskozno se filamentno vlakno najčešće upotrebljava za izradbu tkanina za bluze, košulje, haljine i podstavu, zatim za izradbu dekorativnih tkanina, tkanina za namještaj te za tehničke svrhe. Vlasasta se vlakna miješaju s vunom, pamučnim i poliesterskim vlaknima da bi se snizila cijena proizvoda, ali i povećala ugodnost nošenja.

Modalna vlakna. Modalna su vlakna (CMD) poboljšana regenerirana celulozna vlakna. Dobivaju se također viskoznim postupkom, ali uz nešto drukčije procesne parametre, kojima se usporava proces razgradnje ksantata i koagulacija niti. U tu se svrhu otopini za ispredanje dodaju modifikatori (npr. polietilenenglikol, 1,5–2%), a taložna kupelj sadrži manju količinu sumporne kiseline i natrijeva sulfata, a više cinkova sulfata. Svježe ispredena vlakna istežu se u plastificirajućoj kupelji pri temperaturi od 95–100 °C na najmanje dvostruku duljinu, čime se postiže veliki stupanj kristalnosti i usmjerenostručne paralelne s osi vlakna. Time se povećava čvrstoća vlakna u suhom stanju (na razinu veću od čvrstoće pamuka) i u mokrom stanju (na razinu čvrstoće pamuka), te povećava modul elastičnosti mokrog vlakna (tzv. vlakno visokoga mokrog modula, znak HWM). Da bi se vlakna smatrала modalnima, njihova prekidna sila ne smije biti manja od 3,3 cN/dtex. U mokrom stanju vlakna trebaju pokazivati veću otpornost prema deformaciji. Produljenje pri sili od 0,5 cN/dtex ne smije biti veće od 5%.

Pod mikroskopom su modalna vlakna slična viskoznim, ali ih ima i s približno kružnim presjekom. Istoču se postojanoču obliku, čvrstoćom u mokrom stanju, a i lako se održavaju. Upotrebljavaju se za slične namjene kao i viskozna vlakna, ali i za izradbu športske i zimske odjeće, obično u smjesi s pamučnim i poliesterskim vlaknima.

Bakrena vlakna. Proizvodnja bakrenih vlakana (CUP) osniva se na otapanju celuloze u Schweitzerovu reagensu (kompleksni spoj bakar-hidroksida i amonijaka, Cu(NH₃)_m(OH)₂, m=4). Otopina celuloze protiskuje se kroz mlaznicu u komoru za ispredanje posebnoga ljevkasta oblika, tako da je tok niti vertikalni. Taložno je sredstvo u fazi ispredanja voda, koja strui istosmjerno s polimernim mlazom. Skrućivanje je pritom nepotpuno, pa se polimerne niti, tjerane vodenom strujom, intenzivno istežu (i do deveterostrukre duljine, što ovisi o izmjerama ljevka), posljedica čega je kružni presjek i velika finoća vlakna. Potpuno skrućivanje postiže se naknadnom obradbom vlakna u razrijeđenoj sumpornoj kiselini. Postupak je jednostavan, ali je otapalo skupo i može se samo djelomično regenerirati.

Svojstva su bakrenih vlakana, poglavito kemijska, bojadarska i mehanička, praktički jednaka svojstvima viskoznih vlakana. Bakrena su vlakna istoču većom finoćom i svilenkastim sjajem, što je posljedica drukčijih morfoloških karakteristika uvjetovanih specifičnim postupkom ispredanja.

Početkom XX. st. proizvodnja je bakrenih vlakana bila veća od proizvodnje viskoznih vlakana. Bakrena su vlakna bila cijenjena u prvom redu zbog velike finoće (tzv. bakrena svila). Međutim, krajem 1960-ih godina ta se vlakna gotovo prestaju proizvoditi jer ih istiskuju vlakna od sintetskih polimera. U novije doba oživljuje proizvodnja vrlo supljikavih bakrenih vlakana za primjenu u medicini (membrane za dijalizu).

Liocelna vlakna. To je skupni naziv za nova kemijska celulozna vlakna dobivena izravnim otapanjem celuloze u organskim

otopalima i ispredanjem mokrim postupkom. Tehnološki postupak na osnovi primjene N-metil-morfolin-oksida kao otapala prva je razvila tvrtka Courtaulds; 1989. počela je poluindustrijska, a 1993. industrijska proizvodnja vlakna pod nazivom Tencel. U međuvremenu industrijsku proizvodnju uvođe i drugi proizvođači, među njima i tvrtka Lenzing, inače najveći proizvođač viskoznih vlakana. Glavna je prednost novog postupka proizvodnje ekološka pogodnost proizvodnog procesa, kako glede radnog tako i vanjskog okoliša. Proizvodnja se odvija u potpuno zatvorenom kružnom procesu uz gotovo 90%-tnu regeneraciju otapala, uz mnogo manji broj proizvodnih faza, a kao taložno sredstvo upotrebljava se voda.

Dobiveno se vlakno bitno razlikuje od viskoznoga. Kružnoga je poprečnog presjeka, glatke površine, velike čvrstoće u suhom ($38\cdots42 \text{ cN/tex}$) i mokrom stanju ($34\cdots38 \text{ cN/tex}$), velikoga modula (200 cN/tex pri 5% istezanja), uz reprizu zadržanu na razini viskoznog vlakna (11,5%). Preradivost je vlakna uobičajenim postupcima također dobra. Nedostatak mu je sklonost fibriliranju, što se za viskozna vlakna ne zapaža.

Acetatna i triacetatna vlakna. Acetatna vlakna (CA) i triacetatna vlakna (CT) po kemijskoj su gradi celulozni esteri. Dobivaju se obrad bom celuloze s anhidridom octene kiseline. U prvom stupnju reakcije nastaje celulozni triacetat, a naknadnom hidrolitičkom obrad bom dobiva se sekundarni celulozni acetat,

najčešće kazein iz mlijeka, zein iz kukuruza i ardein iz kikirikija. Pojavom vlakana od sintetskih polimera njihova je proizvodnja izgubila na važnosti, pa se danas gotovo više ne proizvode.

Kemijska vlakna od sintetskih polimera

Od sintetskih se polimernih materijala danas proizvode mnoge vrste vlakana, a u industriji tekstilnih vlakana najvažnija su poliesterska, poliamidna, poliakrilonitrilna i polipropilenska vlakna. Ta su vlakna vrlo čvrsta i trajna, lako se peru i održavaju, mogu se trajno termofiksirati, a neka od njih su i relativno jeftina. Međutim, ne podnose visoke temperature pa se lako deformiraju i rastale, slabo upijaju vlagu i nabijaju se statičkim elektricitetom. Razvojem tehnologije ti su nedostaci u tzv. III. generaciji kemijskih vlakana dobrim dijelom uklonjeni.

Ostale se vrste kemijskih vlakana od sintetskih polimera upotrebljavaju u manjoj mjeri za izradbu proizvoda s posebnim svojstvima i za specijalnu namjenu. U nastavku je opisana proizvodnja, svojstva i upotreba najvažnijih vrsta kemijskih vlakana od sintetskih polimera, dok su kemijski sastav i građa polimera, od kojih se vlakna ispredaju, navedeni u tablici 3, a detaljnije opisani u člancima *Polimerni materijali* i *Kaučuk i guma*, na koje se u tablici upućuje.

Tablica 3
KEMIJSKA STRUKTURA VLAKANA OD SINTETSKIH POLIMERA

| Vlakna | Ime polimera | Struktura monomerne jedinice | Uputnica u druge članke |
|--------------------|-------------------------------------|--|-------------------------|
| Poliesterska | poli(etilen-tereftalat) | $ -\text{O}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- _n$ | TE10, str. 610 |
| | poli(butilen-tereftalat) | $ -\text{O}-(\text{CH}_2)_4-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- _n$ | |
| Poliamidna | polikaprolaktam | $ -\text{O}-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_{10}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- _n$ | TE10, str. 602 |
| | polimetilenadipamid | $ -\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}- _n$ | |
| Aramidna | poli- <i>m</i> -fenilenizoftalamid | $ -\text{NH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- _n$ | TE10, str. 602 |
| | poli- <i>p</i> -fenilentereftalamid | $ -\text{NH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- _n$ | |
| Poliakrilonitrilna | poliakrilonitril | $ -\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN})- _n$ | TE10, str. 606 |
| Polipropilenska | polipropilen | $ -\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)- _n$ | TE10, str. 590 |
| Policitilenska | policitilen | $ -\text{CH}_2-\text{CH}_2- _n$ | TE10, str. 586 |
| Fluorna | politetrafluoretilen | $ -\text{CF}_2-\text{CF}_2- _n$ | TE10, str. 600 |
| Klorna | poli(vinil-klorid) | $ -\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Cl})- _n$ | TE10, str. 596 |
| Vinilalna | poli(vinil-alkohol) | $ -\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})- _n$ | |
| Elastanska | poliuretan | $ -\text{O}-\text{CO}-\text{NH}-\text{R}_1-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-\text{R}_2- _n$ | TE10, str. 617 |
| Elastodienska | polidien | $ -\text{R}_1=\text{R}_2- _n$ | TE 6, str. 742 |

derivat s nižim stupnjem supstitucije hidroksilnih skupina. O jačini hidrolitičke razgradnje ovisit će svojstva proizvoda (v. *Celulozni derivati*, TE 2, str. 582). Tako su i definirana dva tipa vlakana: *acetatna vlakna*, u kojima ima više od 8% neacetiliranih hidroksilnih skupina (ali ne više od 26%), i *triacetatna vlakna*, u kojima neacetiliranih hidroksilnih skupina ima manje od 8%.

Vlakna se ispredaju suhim i mokrim postupkom iz otopine. Otapalo za acetat je smjesa acetona i alkohola, odnosno acetona i vode, a za triacetat diklorometan. Otapalo se uklanja isparivanjem u struji vrućeg zraka, regenerira i vraća u proces u suhom postupku, a u mokrom je postupku taložna kupelj razrijedena octena kiselina.

Mikroskopski je izgled acetatnih i triacetatnih vlakana sličan izgledu viskoznih vlakana. Čvrstoća im nije velika, a u mokrom stanju postaje još manja. Slabo upijaju vlagu, vrlo su otporna na kiseline i Sunčeve zračenje, a jakie ih lužine hidroliziraju na površini. Glavna im je odlika vrlo ugodan, mekan, lagano mastan opip i lijep pad. Za razliku od drugih celuloznih vlakana, mogu se termofiksirati. Najčešće se proizvode u filamentnom obliku i prerađuju u tkanine (*acetatna svila, umjetna svila*) za ženske haljine i bluze te kravate.

Regenerirana proteinska vlakna (PROT) po kemijskom su sastavu slična prirodnim proteinskim vlaknima, a nastala su kao pokušaj pronaalaženja njihove zamjene. Male su čvrstoće, pogotovo u mokrom stanju, osjetljiva na alkalije, rastezljiva, dobro drže toplinu. Mnogo su se proizvodila između dva svjetska rata pod trgovackim imenima Lanital, Merinova, Aralak i Ardil. Kao sirovine služile su različite biljne i životinjske bjelančevine,

Poliesterska vlakna (PES) definiraju se kao vlakna građena od linearnih poliesterskih makromolekula u kojima je maseni udio estera tereftalne kiseline i nekog diola najmanje 85%.

Laboratorijski su prva poliesterska vlakna od tereftalne kiseline i etilenglikola 1941. proizveli J. R. Whinfield i J. T. Dickson, vlakno su nazvali Terylene i postupak patentirali. Za razvoj industrijske proizvodnje patentna je prava dobila engleska tvrtka Imperial Chemical Industries (ICI) te je 1947. počela poluindustrijska, a 1953. komercijalna proizvodnja vlakana pod istim imenom. Na području SAD patentna su prava pripala tvrtki DuPont de Nemours, koja također 1953. počinje komercijalnu proizvodnju vlakna pod nazivom Dacron. Tijekom sljedećih godina poliesterska vlakna počinju proizvoditi i brojne druge tvrtke te 1960-ih godina ta vlakna osvajaju međunarodno tržište. Istodobno se neprestance i intenzivno razvijaju, pa tako nastaju i različiti tipovi vlakana specifičnih svojstava za raznovrsne namjene.

Pretežiti se dio poliesterskih vlakana proizvodi od poli(etilen-tereftalata) (PET) dobivenog polikondenzacijom tereftalne kiseline, odnosno dimetiltereftalata, s 1,2-etandiolom (glikolom). Već prema primjenjenim monomerima u industrijskoj su praksi dva postupka sinteze polimera za vlakna: izravna esterifikacija (tereftalna kiselina + glikol) i preesterifikacija (dimetiltereftalat + glikol). Za izravnu esterifikaciju potrebna je tereftalna kiselina iznimno velike čistoće (tzv. klasa za vlakno, čistoća $>99,99\%$), dopušteni udio monofunkcionalnih spojeva do 20 dijelova na milijun), što je razlogom početne dominacije preesterifikacije. Tek razvojem komercijalno povoljnijih postupaka dobivanja tereftalne kiseline potrebne čistoće povećava se zastupljenost po mnogo čemu komercijalno i tehnički povoljnije izravne esterifikacije.

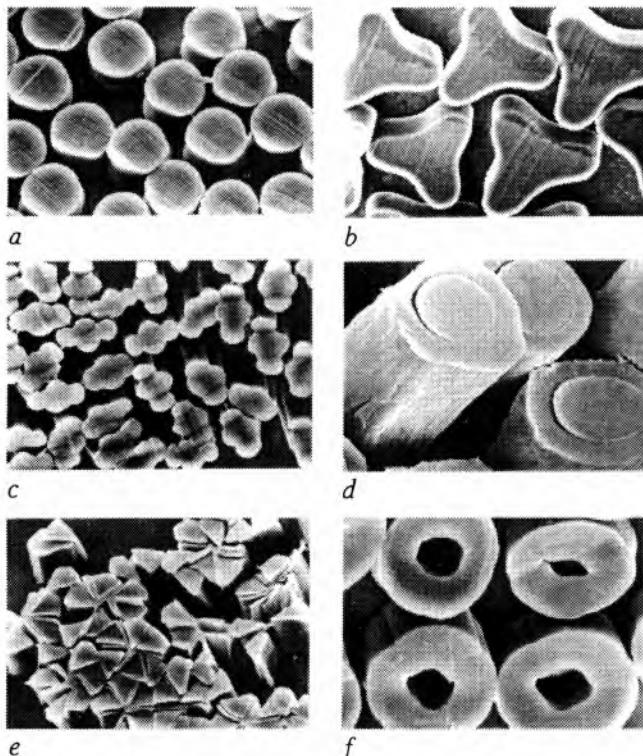
Od polimera se ispredaju vlakna iz taline. U primjeni su postupci različitog stupnja povezanosti pojedinih proizvodnih faza

i procesa te različitih brzina ispredanja ($1000\cdots7000\text{ m/min}$), koji se međusobno razlikuju i po brojnim procesnim parametrima. Zahvaljujući tome, danas se uz tzv. standardne tipove proizvodi i mnoštvo specijalnih tipova: vlakna slična pamuku, vuni i svili, mikrovlakna, vlakna smanjene sklonosti tzv. pilingu (stvaranje grudica od zamršenih vlakana na površini odjevnog predmeta), smanjene gorivosti, smanjene sklonosti nabijanju statičkim elektricitetom, poboljšane bojivosti, povećane hidrofilnosti, velike kovčavosti, velike čvrstoće i dr. To je rezultiralo čvrstim čelnim položajem koji ta vlakna imaju već niz godina u skupini kemijskih vlakana (udio ~55%) i vlakana od sintetskih polimera (udio ~63%).

Svojstva poliesterskih vlakana samo se u ograničenoj mjeri mogu razmatrati za skupinu kao cjelinu, jer su razlike između pojedinih tipova često vrlo velike. Svojstva uvelike ovise o procesnim parametrima sinteze polimera, ispredanja i naknadne obradbe vlakana te se prikladnim odabirom tih parametara prilagođuju zahtjevima primjene. Drugi temeljni čimbenik o kojem ovise svojstva jest kemijski sastav. Uz poli(etilen-tereftalat), poliesterska se vlakna u manjoj mjeri ispredaju i od poli(1,4-dimetilenci-kloheksan-tereftalata) (PDCHT) i u novije doba od poli(butilen-tereftalata) (PBT). Na razini kemijsma provode se i neke modifikacije svojstava (poboljšanje bojivosti, smanjenje sklonosti nabijanju statičkim elektricitetom, smanjenje sklonosti pilingu) dodatkom malih količina (0,1 \cdots 5%) komonomernih spojeva (izofitalna kiselina, trimetilolpropjan, sulfonatni spojevi, poliglikoli).

Za poliesterska je vlakna karakterističan relativno velik stupanj kristalnosti, osobito za vlakna od PET, a osnovna kristalna rešetka pripada triklinskemu sustavu. Gustoća vlakana od PET iznosi $1,36\cdots1,41\text{ g/cm}^3$, vlakana od PBT $1,36\text{ g/cm}^3$, a vlakana od PDCHT $1,22\cdots1,23\text{ g/cm}^3$.

Pod mikroskopom se na vlaknima ne opažaju neke posebnosti koje bi bile tipične samo za poliesterska vlakna, a poprečni presjeci mogu biti vrlo različiti (sl. 18), čime se postiže ugodniji sjaj, mekaniji opip, manja sklonost pilingu te bolje upijanje i transport vlage.



Sl. 18. Poliesterska vlakna različitih oblika poprečnog presjeka. a) kružni, b) trilobalni, c) poseban oblik presjeka za povećanje upijanja vlage, d) dvokomponentno vlakno jeczagrstog tipa, e) dvokomponentno vlakno matrično-fibrilnog tipa, f) šuplje vlakno

Mehanička su svojstva poliesterskih vlakana izvrsna, premda variraju u širokom rasponu, već prema namjeni. To se u prvom redu odnosi na vlačnu čvrstoću i prekidnu istezljivost, koje se za

vlasasta vlakna usklađuju s odgovarajućim karakteristikama prirodnih vlakana radi zajedničke preradivosti u mješavinama i sličnog ponašanja u primjeni proizvoda. Istdobro se time mijenja i otpornost na uvijanje. Vlasasta vlakna općenito imaju nešto manju čvrstoću ($25\cdots40\text{ cN/tex}$) i nešto veću prekidnu istezljivost ($25\cdots50\%$) s obzirom na filamentna vlakna (40 do 60 cN/tex , odnosno $20\cdots30\%$). Filamentna vlakna velike čvrstoće dosežu i vrijednosti do 90 cN/tex uz prekidno istezanje od $8\cdots20\%$. U usporedbi s poliamidnim vlaknima početni je modul elastičnosti veći, što poliesterska vlakna čini posebice prikladnim za proizvode s velikim zahtjevima glede postojanosti oblika tijekom primjene. Otpornost je na savijanje vrlo dobra, nešto slabija za profilirana vlakna. Na habanje su poliesterska vlakna otpornija od većine drugih prirodnih i kemijskih vlakana, što se odražava na njihovu trajnost u uporabi, ali ipak otpornost prema habanju ne doseže najveće vrijednosti poliamidnih vlakana.

Poliesterska vlakna izvrsno podnose povišene temperature, što je poglavito posljedica visoke temperature mekšanja ($>230^\circ\text{C}$). Toplinske konstante vlakana od različitih poliestera ponešto se razlikuju, što uglavnom ovisi o kemijsmu polimera. Tako je temperatura staklišta najniža za vlakna od PBT ($\sim40^\circ\text{C}$), za vlakna od PDCHT iznosi $\sim100^\circ\text{C}$, a za poli(etilen-tereftalat) dodatno ovisi o tipu vlakna (80 do 110°C). Najniže talište ima PBT (221°C), slijedi PET (250 do 260°C), pa PDCHT (285 do 295°C). Proizvodi od poliesterskih vlakana mogu se termofiksirati pri temperaturi od 210 do 220°C , a glačaju se pri 150°C . Ni trajnije djelovanje suhe topline ne mijenja bitno njihova svojstva (npr. nakon izlaganja temperaturi od 150°C u vremenu od 240 sati gubitak čvrstoće je $\sim35\%$), ali su znatno osjetljiviji na hidrotermičku obradbu zbog moguće hidrolitičke degradacije polimera. Ipak, tijekom proizvodnje mogu se bojiti i na temperaturama višim od 100°C , a u održavanju proizvodi se mogu prati u alkalmnom mediju temperature 60°C .

Sposobnost je upijanja vlage iz zraka i zadržavanja vode malena (repriza $0,2\cdots0,5\%$), što je s jedne strane nedostatak za termofiziološku udobnost pri nošenju odjeće, ali je prednost za održavanje; lako se pere i brzo suši. Žbog visoke kristalnosti i nedostatka aktivnih skupina vlakna se teško boje, pa su za bojenje razvijeni specijalni postupci uz primjenu nosača ili termosoliranja. Upotrebljavaju se pretežito disperzna bojila, a ugradnjom spojeva s prikladnim aktivnim skupinama može se postići i afinitet za druge vrste bojila.

Kemijska je otpornost poliesterskih vlakana vrlo dobra, posebice prema razrijeđenim kiselinama, a na sobnoj temperaturi i prema koncentriranima. Slabije su otporna prema lužinama, posebice koncentriranima i na povišenoj temperaturi. Takve lužine postupno otapaju vlakna počevši od površine, stanjujući ih pritom, pa se takvo djelovanje primjenjuje i za modifikaciju vlakana (dobivanje vlakana sličnih svili). Dobro podnose i uobičajena sredstva za bijeljenje, što je bitno ako se vlakna upotrebljavaju u mješavinama s pamukom i lanom. Odlično podnose i uobičajena otapala za kemijsko čišćenje, osim tetrakloretana i tetraklormetana. Otapaju ih kipuci fenol, *o*-diklorbenzen i tetrakloretan, pa se ta otapala upotrebljavaju u identifikaciji poliesterskih vlakana. Vlakna su vrlo otporna i na Sunčevu zračenje, na mikroorganizme i kukce.

Glavni su nedostaci poliesterskih vlakana sklonost prljjanju (posebice masnim prljavštinama), sklonost nabijanju statičkim elektricitetom, sklonost pilingu, vrlo malen afinitet za bojila, te slabo upijanje vlage. Međutim, modificiranjem su dobivena poliesterska vlakna u kojima su korigirani ti nedostatci, ali su vlakna i skuplja.

Područje upotrebe poliesterskih vlakana iznimno je široko. U tzv. tekstilnoj primjeni pretežito se upotrebljavaju vlasasta vlakna u mješavinama s pamukom, vunom i lanom. Izvrsno se prerađuju svim preradbenim postupcima, najvećim dijelom u tkanine za košulje, bluze, haljine, hlače, kostime, odijela, ogrtače, radnu odjeću, posteljinu, dekorativne materijale za kućanstvo i sl. Teksturirana se predstavlja široko primjenjuje u pletenju za izradbu športske odjeće, rublja, zavjesa, presvlaka automobilskih sjedala, podnih obloga i prostirača. Poliesterska mikrovlakna vrlo su cijenjen, noviji proizvod za odjeću visokih estetskih karakteristika, iznimno ugodna dodira i mekoće, a od ultrafinih vlakana (duljin-

ske mase manje od 0,4 dtex) izrađuju se vrlo uspješne imitacije kože.

Predvele čvrstoće primjenjuju se za tehničke svrhe (konac, kord za učvršćivanje gumarskih proizvoda, tehničke tkanine, jedrena platna, sigurnosne vrpce i pojasa, priveznicu za teret, užad i sl.). Posebni se tipovi visokokovrčavih vlakana upotrebljavaju kao punila u jastucima, pokrivačima, zimskoj odjeći, namještaju, a veliki dio poliesterskih vlakana odgovarajućih svojstava upotrebljava se i za izradbu netkanih tekstilija, posebice u iglanih pustova.

Najčešća su trgovačka imena poliesterskih vlakana: Terylene, Trevira, Diolen, Tergal, Terital, Dacron, Vestan i dr., a hrvatsko je vlakno Vartilen.

I za buduće se razdoblje predviđa povećanje potrošnje i proizvodnje poliesterskih vlakana uz sve veći udio kontinuiranih procesa izravnog ispredanja taline bez prethodne preradbe u granulat. Pritom velike brzine ispredanja (pokusno i do 10 000 m/min) već u fazi ispredanja mogu osigurati potrebnu kristalnost i usmjerenošću strukture bez naknadne obradbe, a i teksturiranje se uključuje u proces ispredanja. Uz veću proizvodnost i ekonomičnost takvim se procesima dobivaju i vlakna bolje kvalitete.

Poliamidna vlakna (PA) izgrađena su od linearnih poliamidnih makromolekula u kojima je najmanje 85% amidnih skupina ($-CO-NH-$) povezano s alifatskim ili alicikličkim segmentima. Od više vrsta poliamidnih vlakana najvažnija su ona koja se proizvode od polikaprolaktama (PA 6) i ona od poliheksametilenadipamida (PA 6,6). Vlakna od PA 6,6 razvijena su u tvrtki DuPont i početku su bila poznata pod imenom Nylon, što je poslije u svakodnevnom govoru (najlon) postalo sinonim za vlakna i neke proizvode od polimernih materijala.

Poliamidna se vlakna ispredaju iz taline, a proizvode se kao monofilamentna i multifilamentna, glatka ili teksturirana, ili se režu na duljinu od 25–125 mm za mješavine s drugim vlaknima. To su čvrsta vlakna istezljivosti prilagođene namjeni, velikog elastičnog oporavka (ne gužvaju se), dobre otpornosti na trenje, velike žilavosti i pomoćno oštra opipa. Nisu osobito pogodna za izradbu mješavina s prirodnim vlaknima jer ih mogu oštetiti, ali se u manjoj mjeri ipak upotrebljavaju i za takve namjene.

Gustoća poliamidnih vlakana iznosi $1,14 \text{ g/cm}^3$, a upijanje vlage u standardnoj atmosferi iznosi 4–4,5%, ne bubre i slabo upijaju znoj pa su neprikladna za ljetnu odjeću. Toplinska svojstva ovise o tipu poliamida. Tako talište poliamida 6 iznosi 215°C , a poliamida 6,6 250°C . Temperature do 150°C ne uzrokuju promjene vlakana. Termofiksiranje, kojim se postiže trajno zadržavanje oblika, nabora, kovrča i opipa, provodi se pri temperaturi od $190\cdots193^\circ\text{C}$ u vrućem zraku ili pri $105\cdots115^\circ\text{C}$ u vodenom paru. Zapaljivost im nije velika, ne podržavaju gorenje, no u plamenu gore. Njihova je kemijska otpornost dobra: otporna su na sapune i deterdžente, alkalije i razrijedjene kiseline, pa se mogu prati svim sredstvima za pranje pri temperaturi od $50\cdots60^\circ\text{C}$. Otporna su i na organska otapala te se tekstilni proizvodi koji sadrže poliamidna vlakna mogu i kemijski čistiti uobičajenim otapalima. Otporna su i prema kuckcima i mikroorganizmima.

Poliamidna se vlakna boje disperznim, kiselim i izravnim bojilima. Poliamid 6 ima veći afinitet za kisela bojila od poliamida 6,6, što omogućuje njihovo međusobno razlikovanje. Ultraljubičasto zračenje smanjuje im čvrstoću, pa ta vlakna nisu prikladna za izradbu brodskih jedara, zavjesa i sličnih predmeta. Upotrebljavaju se u proizvodnji čarapa, rublja, tkanina i trikotaže, a u tehničke svrhe za filterske tkanine, ribarske mreže, užad, kao električni izolacijski materijal itd. Najčešća trgovačka imena poliamidnih vlakana jesu Nylon, Perlon, Grilon, Enkalon, Lilion i dr.

Aramidna vlakna (AR) građena su od linearnih poliamidnih makromolekula u kojima je najmanje 85% amidnih ili imidnih skupina izravno povezano s dva aromatska prstena. Broj imidnih skupina, ako su prisutne, ne smije biti veći od broja amidnih skupina.

Prva aramidna vlakna Nomex (DuPont), Durette (Monsanto) i Conex (Teijin) bila su poli-*m*-fenilenizoftalamidi, a na tržištu su se pojavila u drugoj polovici 1960-ih i početkom 70-ih godina. Po čvrstoći ta su vlakna slična poliesterskim i poliamidnim vlak-

nima. Međutim, svoju čvrstoću zadržavaju i pri trajnim opterećenjima na temperaturama do 180°C , a pri 260°C gubitak čvrstoće iznosi ~35%, što je znatan pomak s obzirom na dotada poznata organska vlakna. Termički raspodjeljivanje vlakana počinje na temperaturi višoj od 370°C . To su razlozi što su se prve definicije aramidnih vlakana osnivale na otpornost prema toplini (npr. *termoaktivna vlakna*).

Krajem 1970-ih na tržište dolaze i vlakna od poli-*p*-fenilenterftalamida te *p*-aramidna vlakna gotovo postaju pojam visoko-kvalitetnih vlakana (engl. high performance fibres). To se posebice odnosi na veliku čvrstoću i veliki modul elastičnosti uz neznatnu deformaciju pri prekidu, te na otpornost prema naglim udarcima, koja omogućuje zaštitu od puščanih zrna i krhotina projektila. Posljedica je to iznimno krute, štapičaste strukture makromolekula (svi aromatski prstenovi povezani su u *para*-polozaju), tako da je i u tekućoj fazi u procesu ispredanja potkrepljivost makromolekula vrlo malena i stvaraju se čvrste poprečne veze (tekući kristali). To bitno otežava ispredanje vlakana pa je tvrtka DuPont razvila poseban postupak ispredanja u kojem kao otapalo za polimer služi koncentrirana sumporna kiselina, a kao taložno sredstvo razrijeđeno otapalo.

Zbog povećane krutosti makromolekula uzrokovanе povezivanjem u para-polozaju, uz već spomenuta bolja mehanička svojstva, i termički raspodjeljivanje vlakana počinje na mnogo višoj temperaturi s obzirom na Nomex (~ 550°C), a vlakna su otporna i na gorenje. Rentgenskom struktturnom analizom utvrđuje se jednofazna, kristalna struktura vlakna, s osnovnom kristalnom rešetkom u monoklinskom sustavu. Stupanj kristalnosti iznosi 71–73%, stupanj orientacije strukture prema uzdužnoj osi vlakna 91–92%, a gustoća je vlakna $1,48 \text{ g/cm}^3$. Vlakna se odlikuju i velikom otpornošću na kemikalije i mikroorganizme, ali su osjetljiva na djelovanje Sunčeva zračenja, što se ublažava naslojavanjem polimerom. Vlakna su i vrlo kruta i slabo savitljiva, što otežava tekstilnu preradbu, ali to nije nedostatak u izradbi kompozita.

Među aramidnim su vlaknima najpoznatija vlakna tvrtke DuPont, posebice *p*-aramidna vlakna osnovnog naziva *Kevlar*. Za njima po svojstvima ne zaostaju ni slična vlakna drugih proizvođača, npr. Twaron (AKZO) i Technora (Teijin). Kevlar je razvijen za potrebe ojačavanja u gumarskoj industriji te mu je to i glavna primjena. Ipak, najpoznatija je upotreba tih vlakana za izradbu tzv. antibalističkih materijala za zaštitu od metaka i krhotina granata. To se zaštitno djelovanje osniva na sposobnosti *p*-aramidnih vlakana da prihvate veliku količinu kinetičke energije projektila i pretvore je u rad koji se utroši za relativno malu deformaciju zaštitnog predmeta. U prsluke se ugrađuje 16–24 vlaknata sloja tkanine od *p*-aramidnih vlakana. Za učinkovitu zaštitu, tj. za preuzimanje energije projektila, vrlo je važna plošna gustoća višeslojne tkanine, te se potreban broj slojeva utvrđuje ispitivanjem posebno razvijenom tehnikom mikrofotografiranja pri udaru projektila brzinom od 650 m/s . Takva zaštitna odjeća upotrebljava se i u rizičnim poslovima i športovima.

Slična svojstva pokazuju i kompoziti ojačani tim vlaknima te se upotrebljavaju kao građevni i konstrukcijski elementi u vojnom i civilnom inženjerstvu i tehniči (zaštitni pribor, vojna vozila, zrakoplovi, športski pribor i sl.), pri čemu je često bitna i velika toplinska otpornost vlakana. Kad industrijski materijal vlakna se primjenjuju i kao zamjena za toksični azbest (npr. obloge za automobilske kočnice i kvačila), služe za izradbu filtera, britava, izolacija (napose u kemijskoj industriji) te za ojačavanje mnogih materijala, posebice u gumarskoj industriji i strojogradnjici.

Poliakrilonitrilna vlakna (PAN) građena su od linearnih makromolekula u kojima je maseni udio akrylonitrila u lancu najmanje 85%. Dobivanje poliakrilonitrila i njegovo ispredanje u vlakna bilo je riješeno još 1938. u Njemačkoj, no prva je vlakna dala na tržište tek 1950. tvrtka DuPont, pod imenom Orlon. Ta su vlakna najčešće heteropolimeri, tj. u molekuli sadrže do 15% kojeg drugog mera. Većina poliakrilonitrilnih vlakana trokomponentni su kopolimeri, tj. u makromolekulama sadrže 89–95% akrylonitrila, 4–10% nekog neionogenog komonomera, koji ima funkciju unutrašnjeg omekšivača strukture (najčešće metil-akrilat, metil-metakrilat, vinil-acetat), te 0,5–1% ionogenog komonomera koji sadrži kemijske skupine sposobne za vezanje bo-

jila (sulfo-skupina, sulfonatna, karboksilna). Jedino se tehnička vlakna velike čvrstoće proizvode od čistog akrylonitrila.

Vlakna se ispredaju suhim i mokrim postupkom, jer se poliakrylonitril termički raspada prije taljenja. Za suho ispredanje (zastupljenost ~20%) kao otapalo služi dimetilformamid, dok se otopine za ispredanje zastupljenijim, mokrim postupkom priređuju s otapalima: dimetilformamidom, dimetilsulfoksidom, vodenom otopinom natrijeva rodanida, vodenom otopinom natrijeva klorida i cinkova klorida, te 70%-trom dušičnom kiselinom. Koagulacijske kupelji sadrže vodom razrijeđena otapala. Procesni parametri pri skrućivanju niti (temperatura i brzina pri otparivanju, odnosno sastav koagulacijske kupelji, temperatura i brzina u mokrom postupku) bitno utječu na morfološke i strukturne karakteristike vlakana. To je razlogom da su poliakrylonitrilna vlakna vrlo raznolika poprečnog presjeka (kružni, cvjetast, u obliku kosti, bubrežast), premda se ispredaju kroz kapilare kružnog presjeka, što se odražava i na njihova svojstva.

Pretežito se proizvode vlasasta vlakna (pamučarski i vunarski tipovi te tipovi za podne obloge) u finoćama 0,6–20 dtex, a u mnogo manjoj mjeri i filamentna, pretežito velike čvrstoće. Od tipova posebnih svojstava ističe se visokoabsorptivno, šupljikavo vlakno Dunova i gotovo negativno vlakno tvrtke Courtaulds.

Karakteristična su svojstva poliakrylonitrilnih vlakana mala gustoća ($1,14\cdots1,19 \text{ g/cm}^3$), mekan i vunast opip vlasastih vlakana, a svilenkast opip filamentnih vlakana, velika i trajna voluminoznost (zbog čega izvrsno zadržavaju toplinu), izvrsna otpornost na Sunčevu zračenje, vrlo dobra otpornost prema kiselinama i organskim otapalima te nešto slabija prema alkalijama. I ta vlakna, poput većine sintetskih, slabo upijaju vlagu (u standardnoj atmosferi $1\cdots1,5\%$), a zbog istog je razloga i sposobnost primanja bojila slaba.

Po čvrstoći različiti se tipovi vlakana znatno razlikuju ($18\cdots58 \text{ cN/tex}$), što je poglavito u vezi s morfološkim i strukturnim karakteristikama uvjetovanim parametrima ispredanja. I otpornost na savijanje i uvijanje bitno ovisi o tim karakteristikama, a manja je za vlakna kojima je presjek u obliku kosti. Savitljivost i elastičnost vlakana poboljšava se ugradnjom neionogenih komonomera.

Vlakna su relativno slabo otporna na toplinu ($T_g = 85\cdots95^\circ\text{C}$, termički raspad $> 250^\circ\text{C}$), posebice na vruću mokru obradbu (T_g u mokrom stanju $50\cdots60^\circ\text{C}$). U takvoj se obradi nepovratno deformiraju, što otežava održavanje proizvoda u primjeni (dopuštena temperatura pranja 40°C , a glačanje $\sim 110^\circ\text{C}$).

Posebno blag opip i vuni sličan izgled te voluminoznost pređa od poliakrylonitrilnih vlakana određuju i njihovu namjenu. Poglavito su to trikotažni odjevni predmeti (majice, puloveri, veste), ali i ugodni i lagani pokrivači, umjetna krvna, dekorativni materijali, podni prostirači i sl. U tim proizvodima poliakrylonitrilna vlakna zamjenjuju vunu ili se s njom miješaju. Zbog otpornosti na ultraljubičasto zračenje od njih se izrađuju i zavjese, zastori i jedrena platna. Od tehničkih proizvoda ističu se filterske tkanine, cerade i zaštitna odjeća, koji su izrađeni od odgovarajućih tehničkih tipova vlakana. Poliakrylonitrilna vlakna velike čvrstoće služe kao sirovina u proizvodnji ugljičnih vlakana.

Najčešća su trgovačka imena Orlon, Dolan, Dralon, Acrilan, Leacril i dr.

Modakrilna vlakna (MAC) građena su od linearnih makromolekula u kojima je maseni udio akrylonitrila u lancu $35\cdots85\%$. To su modificirana poliakrylonitrilna vlakna koja sadrže veći udio komonomera, što je najčešće vinil-klorid i viniliden-klorid. Iako su vrlo slična poliakrylonitrilnim vlaknima, veći udio komonomera uzrokom je razlika u proizvodnom procesu, svojstvima i afinitetu prema bojilima. U usporedbi s poliakrylonitrilnim vlaknima, glavna je prednost modakrilnih vlakana njihova smanjena sposobnost gorenja.

Polipropilenska vlakna (PP) proizvode se ispredanjem izotaktičkog polipropilena. Prva je takva vlakna proizvela 1959. talijanska tvrtka Montecatini ispredanjem iz taline. Da bi se postigla potrebna uporabna svojstva, valja upotrijebiti polimer velike relativne molekulne mase ($100\,000\cdots250\,000$), posljedica čega je velika viskoznost taline, jer se radi o vrlo pokretljivim i savitljivim makromolekulama u tekućoj fazi. Zbog toga je ispredanje vlakana otežano. Da bi se smanjila viskoznost, talinu treba zagri-

jati na visoku temperaturu ($\sim 150\cdots180^\circ\text{C}$ višu od tališta, što je blizu početka termičke razgradnje polimera). Degradacija makromolekula pri takvim je uvjetima znatna. Zbog toga su se u početnom proizvodnom razdoblju iz viskoznijih talina niže temperature uglavnom ekstrudirali filmovi i prerađivali u vrpčasta vlakna (tzv. fibriliranje). Takva su se vlakna pretežito primjenjivala za ambalažu i kao veziva u vinogradarstvu, površtarstvu i sl.

Tek pošto su pronađeni dovoljno učinkoviti aditivi za sprečavanje toplinske degradacije makromolekula pri ispredanju (antioksidansi) i za smanjenje osjetljivosti vlakana na ultraljubičasto zračenje (ultraljubičasti stabilizatori) te pošto je riješen problem postizanja potrebne usmjerenoosti makromolekula tijekom ispredanja (nestandardne izmjere otvora na mlaznicama), započinje masovna proizvodnja polipropilenskih vlakana ispredanjem iz taline. U talinu polimera dodaju se i bojila jer ne postoji mogućnost bojenja gotovih vlakana.

Iz taline se ispredaju vlakna srednje do grube finoće, pretežito kao filamentna pređa. Veliki se dio takve prede teksturira (tzv. BCF-pređa, dvobojava i trobojava) i upotrebljava za proizvodnju podnih obloga i prostirača. Manji dio filamentne prede služi i za tehničke svrhe (konopci, ribarske mreže, priveznice, geotekstile). Vlasasta se vlakna uglavnom preraduju u netkani tehnički tekstil.

Fina i čvrsta polipropilenska vlakna u novije se doba proizvode od polimera veće relativne molekulne mase ($\sim 400\,000$ i više) ispredanjem iz otopine. Kao otapalo uglavnom služi dekalin (temperatura otapanja $100\cdots160^\circ\text{C}$), ali se mogu upotrijebiti i tetralin i kerozin. U primjeni je suhi (otparivanje otapala vrućom zračnom strujom) i mokri postupak (koagulacijska kupelj, otapalo razrijedeno vodom). Iz otopine se uglavnom proizvode vlasasta vlakna za odjevne predmete.

Posljednjih godina polipropilenska vlakna snažno osvajaju tržište te su danas po potrošnji na 3. mjestu u svijetu. Proizvodnja je relativno jeftina (jeftini monomer), a po nekim su svojstvima osobita, npr.: imaju najmanju gustoću ($0,91 \text{ g/cm}^3$), najmanju toplinsku provodnost (u skupini organskih vlakana), ne upijaju vlagu i ne zadržavaju vodu (0%), što je nedostatak, ali za neke namjene može biti i prednost, nisu skloni nabijanju statičkim elektricitetom i vrlo su otporna na kiseline i lužine. Slabije su otporna na organska otapala. Čvrstoća i istezljivost vlakana vrlo je dobra ($25\cdots60 \text{ cN/tex}$, prekidno istezanje $15\cdots50\%$) i ne smanjuju se u mokrom stanju. Premda ne upijaju vlagu i vodu, hidrofilne su površine i izvrsno provode vlagu po površini. Glavni su nedostaci polipropilenskih vlakana: osjetljivost na ultraljubičasto zračenje (uklanja se dodatkom stabilizatora pri sintezi polimera te dodatkom u talinu, odnosno otopinu za ispredanje), slaba mogućnost bojenja (može se djelomice poboljšati najepljivanjem spojeva s aktivnim kemijskim skupinama za vezanje bojila), osjetljivost na organska otapala za kemijsko čišćenje te osjetljivost na povišenu temperaturu (područje omekšanja 150 do 155°C , talište ~ 165 do 175°C), što otežava održavanje proizvoda u primjeni i ograničava ga na pranje u blagim termičkim uvjetima (dopuštena je temperatura pranja maksimalno 60°C , a glačanja 110°C).

Proizvodnja i potrošnja polipropilenskih vlakana povećava se jednom od najbržih stopa rasta, posebice u industrijski razvijenim zemljama. Najčešća su trgovačka imena Meraklon, Herculan, Asota, Elustra, Danaklon, Mitsubishi Pylen i dr.

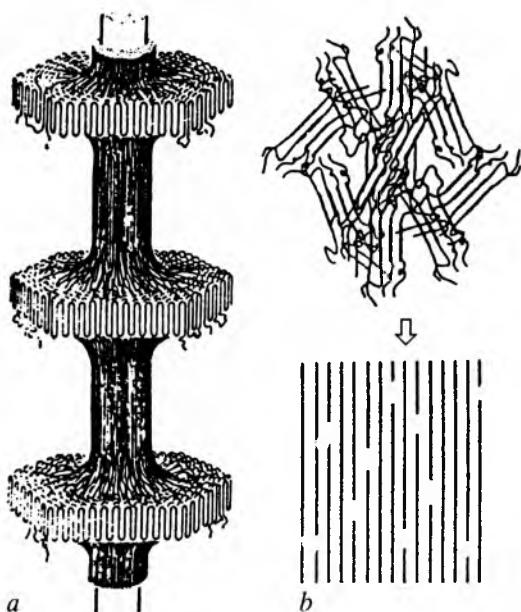
Polietilenika vlakna (PE) proizvode se ispredanjem polietilena niske gustoće i linearnih makromolekula (LLDPE) iz taline. S obzirom na polipropilen potrebna je još veća relativna molekulna masa polimera ($\sim 400\,000$), a i viskoznost je taline veća, pa su potrebne još više temperature ispredanja. Da bi se dobila vlakna potrebnih mehaničkih svojstava, omjeri istezanja i pri proizvodnji standardnih tipova vrlo su veliki (do 1 : 10). Unatoč tome, dobivena vlakna imaju manju čvrstoću od polipropilenskih ($18\cdots21 \text{ cN/tex}$) i još niže područje toplinskog omekšanja, odnosno taljenja ($85\cdots132^\circ\text{C}$). Kemijska otpornost im je vrlo dobra, a i ultraljubičasto zračenje, za razliku od polipropilenskih vlakana, podnose izvrsno. Međutim, pronalaskom dobrih ultraljubičastih stabilizatora za polipropilen, ta je prednost nestala, tako da polietilenska vlakna na području tekstilne primjene ne mogu konkurirati polipropilenskim.

Polietilenska vlakna pretežito se proizvode kao monofilamenti i vrpčasta vlakna za primjenu u području tehničkog tekstila (ambalaža, filtri, tkanine i mreže za zaštitu od ptica i tuče, geotekstilije za zaštitu tla u površtarstvu, ali i za sanaciju terena od erozije i sl.). U izradbi netkanog tekstila zbog niske temperature toplinskog omekšanja služe kao vezivna vlakna za učvršćivanje runa.

Godine 1982. tvrtka DSM (Dutch State Mines) patentirala je poseban postupak ispredanja iz otopine, primjenom kojega su proizvedena vlakna vrlo velike vlačne čvrstoće i vrlo velikog modula elastičnosti (UHMPE, trgovacko ime *Dyneema*). Načelno istim postupkom, ali uz vlastita tehnološka rješenja, tvrtka Allied Signal Corp. proizvela je UHMPE vlakno *Spectra*, a japanska tvrtka Mitsui vlakno *Tekmilon*. Početkom 1990-ih ta vlakna snažno osvajaju tržiste u području visokokvalitetnih tehničkih vlakana.

Ispredanje se osniva na tri temeljna elementa. To su: polazni polimer velike relativne molekulne mase ($1\cdots 5$ milijuna, otapa se u dekalinu ili tetralinu), specijalni postupak ispredanja niti, tijekom kojega one najprije pri hlađenju i skrućivanju postižu stanje gela, a potom kristalnu strukturu, tzv. strukturu šiškebap (sl. 19a) te na kraju tzv. ultraistezanje uz uklanjanje zaostalog otapala. Za provedbu ispredanja potrebna su vrlo zahtjevna i specifična tehničko-tehnološka rješenja.

Uz prva dva uvjeta, za postignuće iznimno velikog modula elastičnosti i čvrstoće ključnu ulogu ima istezanje, tijekom kojega lamelasti kristali od naboranih makromolekula prelaze u fibrilni iglasti oblik s gotovo potpuno ispravljenim molekulnim lancima (19b). Ta se pretvorba može zbiti samo pri vrlo intenzivnom istezanju, pa su omjeri istezanja vrlo veliki ($1:30$ do $1:100$), a povišena temperatura pogoduje oblikovanju strukture. Modul elastičnosti proporcionalan je omjeru istezanja.



Sl. 19. Tzv. struktura šiškebap polietilenskog vlakna tijekom ispredanja (a) i transformacija fibrilno-lamelaste strukture (obična polietilenska vlakna) u fibrilnu strukturu s ispravljenim makromolekulama (vlakna Dyneema, b)

Već prema molekulnoj masi polimera i primijenjenom stupnju istezanja dobivaju se vlakna vlačne čvrstoće $300\cdots 350$ cN/tex i modula elastičnosti $10\,000\cdots 17\,000$ cN/tex, uz produljenje pri prekidu od samo $\sim 3,5\%$, što su gotovo dvostruko veće vrijednosti od odgovarajućih karakteristika *p*-aramidnih vlakana. I po mnogim su drugim svojstvima vlakna UHMPE u prednosti ili na razini kvalitete Kevlara. Vrlo su lagana (gustoća $0,97$ g/cm 3), otporna prema abraziji i savitljivija. Otpornost je prema Sunčevu zračenju i vodi odlična. Osnovni im je nedostatak mnogo manja toplinska stabilnost. Taj se nedostatak djelomice korigira obradom vlakana u gelnom stanju elektronskim snopom i gama-zračenjem te acetilenom, pri čemu nastaje poprečno povezivanje makromolekula (djelomično umrežavanje). Tako obrađena vla-

kna mogu se u primjeni izložiti temperaturama do 200°C . I adhezivnost vlakana UHMPE s polimerima, koji služe kao matrične komponente, nedovoljna je i mora se poboljšati oksidacijskom obradom površine (kisik u obliku plazme, elektroobradba pržnjenjem u koroni).

Područje primjene vlakana UHMPE vrlo je široko. Najčešće se od njih izrađuju jedrena platna, ribarske mreže, konopci i užad za pomorstvo i ribarstvo. Za takve su primjene ta vlakna posebice prikladna jer su lagana, otporna prema ultraljubičastom zračenju, morskoj vodi i abraziji, ne upijaju vodu, proizvodi su postojana oblika i velike čvrstoće.

Uz navedena mehanička svojstva, vlakna UHMPE imaju i vrlo veliku sposobnost apsorpcije kinetičke energije pri naglim udarcima (čak veću od *p*-aramida), što ih čini vrlo pogodnim za izradbu zaštite odjeće, kako za balističku zaštitu, tako i za zaštitu u mnogim drugim rizičnim poslovima i športu. Vlakna se lakše prerađuju u tekstilne predmete, a odjeća je lagana i udobnija od one od *p*-aramida. U sve većoj se mjeri vlakna UHMPE upotrebljavaju i za ojačavanje kompozitnih materijala za raznovrsne namjene u civilnom i vojnom inženjerstvu i tehniči te kao implantati u medicini.

Na primjeru polietilenskog vlakna najočitije se može spoznati ovisnost svojstava kemijskih vlakana o njihovoj molekulnoj strukturi i značenje koje pritom ima tehnologija ispredanja i procesni parametri, odnosno tzv. visoka tehnologija. Niti jedno drugo vlakno nema tako jednostavnu kemijsku građu kao polietilen: $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2]$. Uobičajenim se postupkom ispredanja dobiva jedva upotrebljivo vlakno, a tek gelnim ispredanjem, kojemu su procesni parametri u funkciji postizanja sasvim određene strukture makromolekula, dobivaju se vlakna najveće čvrstoće u skupini organskih vlakana, mnogo čvršća i od ugljičnih, staklenih i čeličnih vlakana. Zato se danas teško mogu objasniti i prikazati svojstva kemijskih vlakana bez poznavanja procesa njihove proizvodnje.

Fluorna vlakna (PTFE) gradena su od linearnih makromolekula alifatskih fluorugljikovodika. Poznata su i kao *polietrafluoretilenska vlakna*, a proizvela ih je 1954. tvrtka DuPont kao vlakna posebno otporna prema povišenoj temperaturi. Ispredanje je vlakana složeno, jer se ona bez razgradnje ne mogu ni rastaliti ni otopiti u nekom pogodnom otapalu, pa je bio nužan razvitak specijalnih postupaka proizvodnje vlakana.

U primjeni su fluorna vlakna posebno cijenjena zbog visoke temperature termičkog raspada ($327\cdots 342^\circ\text{C}$) i negorivosti (LOI ~ 95). Veća ili manja sklonost gorenju izražava se tzv. *graničnim udjelom kisika* (engl. Limited Oxygen Index, LOI), tj. najmanjim obujamnim udjelom kisika u zraku pri kojem ispitivana tvar još može gorjeti. Međutim, zagrijavanjem na zraku promjene nastupaju već na temperaturama višim od $180\cdots 200^\circ\text{C}$ (razvijanje škodljivih razgradnih plinova, što je bilo saznanje koje je bitno smanjilo popularnost posuda s teflonskom oblogom). Vlakna su i iznimno otporna prema većini kemikalija i prema ultraljubičastom zračenju, izvrsnih su elektroizolacijskih karakteristika, ali imaju veliku gustoću ($2,1\cdots 2,3$ g/cm 3) i malu čvrstoću ($8\cdots 18$ cN/tex), tamnosmeđe su boje i ne mogu se bojiti.

Fluorna vlakna upotrebljavaju se pretežito u tehničke svrhe: za izradbu termoizolacijskog materijala, obloga za električne kable, filterskog materijala, ali i za izradbu odjeće za zaštitu od topline i gorenja te od kemikalija. U novije su doba vrlo cijenjene mikroporozne membrane od vlakana Gore-Tex, s kojima se može postići vrlo učinkovita zaštita (odjeća, obuća) uz istodobnu termofiziološku udobnost (propusnost zraka), ali i vrlo selektivna propustljivost tekućina i plinova pri visokozahtjevnim filtracijama u industriji, pročišćavanju otpadnih voda, plinova i sl.

Najpoznatije je trgovacko ime Teflon, a susreću se i druga, npr.: Gore-Tex, Halar, Kynar, Profilen.

Klorna vlakna (CLF) gradena su od linearnih makromolekula u kojima je maseni udio vinil-klorida ili viniliden-klorida u lancu veći od 50% (ili veći od 65% ako je ostatak lanca graden od akrilonitrila, čime se iz definicije isključuju modakrilna vlakna). Danas je njihova proizvodnja malena, što zbog velike toplinske osjetljivosti, što zbog poteškoća u proizvodnji. Ispredaju se suhim ili mokrim postupkom iz smjese otapala u kojoj je ugljični disulfid obično jedna od komponenata.

Moguće su brojne modifikacije u sustavu polimera, npr. povećanje stupnja kloriranja naknadnim kloriranjem, upotreba viničnog-klorida umjesto vinil-klorida, ugradnja komonomera, pa među klornim vlaknima postoji velika raznolikost svojstava i proizvodnih postupaka i nerijetko se kemijski sastav i svojstva tih vlakana vežu uz njihova trgovacka imena (Vinyon, Saran, Rho-vyl), a ne uz generička imena.

Klorna se vlakna ističu teškom gorivošću (LOI 37...46), izrazitom otpornošću prema kemikalijama, svjetlosti i atmosferiljama. Stoga je od primjene u tekstilstvu važnija njihova tehnička upotreba za izradbu zaštitnih radnih odijela, filterskog materijala, brtava, ribarskih mreža, šatorskog platna, cerada, pokretnih vrpca i sl.

Vinilalna vlakna (PVAL) građena su od linearnih makromolekula poli(vinil-alkohola) acetaliranog do različitog stupnja (najčešće 30...50%). Karakteristično je da je poli(vinil-alkohol), kao polazni polimer za vinilalna vlakna, topljav u vodi, što pruža mogućnost relativno jednostavne priprave otopine za ispredanje, ali je i temeljni nedostatak za primjenu vlakana. Stoga je trebalo riješiti problem topljivosti vlakana u vodi, u čemu su najvažnije rezultate postigli japanski stručnjaci.

U proizvodnji vinilalnih vlakana primjenjuje se suho i mokro ispredanje iz otopine. Iz čistog se poli(vinil-alkohola) priređuje vodena otopina polimera i ispreda u vlakna. U suhom se postupku voda otparjuje vrućom zračnom strujom, a u mokrom niti se skrućuju taloženjem u vodenoj otopini natrijeva sulfata i amonijeva sulfata. Svježe ispredena vlakna toplinski se obrađuju pri temperaturi od 200°C, pri čemu se bitno povećava kristalnost vlakna, ali je i nakon takve obradbe vlakno još uvijek topljivo u vodi. Netopljivost u vodi postiže se tzv. otvrdnjivanjem vlakna, tj. obrad bom s formaldehidom u kiseloj kupelji. Glavna reakcija koja se pritom zbiva jest stvaranje acetalnih veza između formaldehida i hidroksilnih skupina polimera, čime nastaje povezivanje, kako unutar makromolekula, tako i između susjednih makromolekula (poprečno umrežavanje). Dodatkom natrijeva sulfata i cinkova sulfata u kupelj za obradbu taj se proces usmjereno vodi do traženog stupnja (najčešće se na taj način povezuje 30...50% raspoloživih hidroksilnih skupina polimera). Nakon završnih obradbi istezanja i termofiksiranja dobiva se stabilno i u vodi netopljivo vlakno.

Svojstva vinilalnih vlakana bitno ovise o stupnju acetaliranja. U navedenim granicama acetalirana vlakna imaju gustoću 1,26...1,31 g/cm³, u usporedbi s drugim sintetskim vlaknima dobro upijaju vlagu (~5% u standardnoj atmosferi, ali i do 12% u prostoru relativne vlažnosti zraka 100%), što ih čini udobnim pri nošenju. Toplinska otpornost vinilalnih vlakana nije osobito velika (u vrućem zraku do 110°C, a termički se raspadaju u području 240...260°C). Vrlo su otporna na organska otapala i razrijeđene kiseline i lužine, ali ih koncentrirane mineralne kiseline otapaju. Na Sunčevu zračenje i mikroorganizme otpornija su od kemijskih celuloznih vlakana. Čvrstoća im je velika, za vlasasta vlakna 20...55 cN/tex, za filamentna 55...77 cN/tex, a tipovi filamenta velike čvrstoće dosežu vrijednosti do 230 cN/tex. U mokrom je stanju čvrstoća nešto manja. I otpornost na habanje je dobra, ali nešto slabije podnose opterećenja na savijanje i uvijanje.

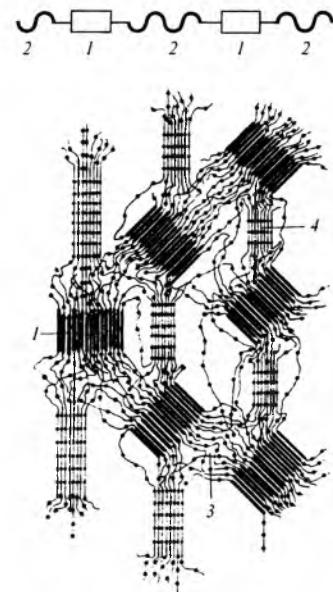
Vlasasta se vinilalna vlakna primjenjuju u mješavinama s pamukom i kemijskim celuloznim vlaknima za izradbu odjevnog tekstila. Od takvih se vlakana izrađuju i netkani tekstil, pri čemu jedno služe i za učvršćivanje runa (vezivna vlakna, toplinsko omekšanje). Glavno je područje primjene filamentnih vlakana za raznovrsni tehnički tekstil (užad, ribarske mreže, cerade, šatorska krila, geotekstilije i sl.), pri čemu su zbog niske cijene u prednosti pred mnogim drugim tehničkim vlaknima. Filamenti velike čvrstoće primjenjuju se i kao ojačala za kompozitne materijale. Vodotopljiva poli(vinil-alkoholna) vlakna upotrebljavaju se za posebne namjene u kojima se iskorištava upravo to svojstvo. To je prije svega u medicini (kirurški konac), ali i izradbi posebnih čipaka jetkanjem i raznih tekstilnih dekorativnih predmeta.

Vinilalna se vlakna najviše proizvode u Japanu i Kini, a najpoznatija su trgovacka imena Kuralon, Mewlon, Niti-Vilon, Vilon i dr.

Elastanska vlakna (EL) građena su od visokopolimernog materijala u kojem je maseni udio poliuretana najmanje 85%. Od

vlakana se traži da se mogu rastegnuti najmanje na trostruku duljinu i da se nakon prestanka djelovanja sile odmah vrati na početnu duljinu. Elastanska vlakna, prije poznata i kao *poliuretanska vlakna*, ubrajaju se u skupinu visokorastezljivih, elastomernih vlakana. Na tržištu ih je početkom 1960-ih godina predstavila tvrtka DuPont pod trgovackim imenom Lycra.

Elastanska vlakna sadrže tzv. segmentirani poliuretan, tj. sastoje se od dva tipa segmenta. Kruti segmenti, koji npr. potječu od toluen-diizocijanata, s poprečnim vodikovim vezama daju stabilitet i čvrstoću, dok potrebnu rastezljivost daju savitljivi makrodiolni segmenti sa srednjom relativnom molekulnom masom 2 000...3 000, koji potječu od niskotakljivih poliestera ili polietera (sl. 20). Djelovanjem vanjske sile kruti se segmenti prostorno jednakorijentiraju, a savitljivi se segmenti rastežu. Nakon prestanka djelovanja sile sve se ponovno vraća u prvobitni položaj.



Sl. 20. Model strukture elastanskog vlakna prema H. Rinkeu. 1 kruti segment, 2 meki segment, 3 amorfni meki segment, 4 istezanjem kristalizirani meki segment

Elastanska se vlakna ispredaju suhim ili mokrim postupkom iz otopine u dimetil-formamidu ili dimetil-acetamidu. Kao i sva elastomerina vlakna, elastanska vlakna slabo upijaju vodu (1,0 do 1,3% u standardnoj atmosferi). Lako se prlaju i zahtijevaju gotovo svakodnevno pranje. Međutim, za razliku od elastodienskih vlakana, nisu osjetljiva prema mastima, uljima i otapalima. Otporna su prema kiselinama i Sunčevoj svjetlosti, ali nisu otporna prema alkalijama i sredstvima za bijeljenje.

Standardni tipovi elastanskih vlakana nešto su manje rastezljivi od elastodienskih vlakana, ali zbog drugih boljih svojstava služe kao sirovina za mnoge tekstilne proizvode.

U novije se doba proizvode elastanska vlakna koja se mogu rastegnuti i na deveterostruku duljinu te tipovi vlakana za koje se za produljenje lanca upotrebljavaju spojevi koji mogu stvarati tekuće kristale, što daje mnogo veću krutost tvrdih segmenta i time bolji elastični oporavak vlakna nakon rastezanja.

Elastanska se vlakna pretežito proizvode kao multifilamentna preda (finoča 11...2 600 dtex), ali i kao monofilament. Upotrebljavaju se u izvornom obliku (tzv. gola preda, gumasta izgleda i dodira), a mnogo češće u obliku jezgraste prede u kojoj je elastanska komponenta jezgra, a vanjski je omotač koji drugo vlakno ili preda istaknutijega tekstilnog karaktera.

Glavno područje primjene je tzv. elastični tekstil, čarape, steznici, rublje, sportska odjeća i sl., ali i razni proizvodi koji služe u medicinske svrhe (elastični zavoji, čarape, elastične proteze i sl.). Već prema vrsti proizvoda, udio elastanskih vlakana u njemu je različit (najčešće 2...10%, samo iznimno za medicinska pomagala i 50% i više).

Najpoznatija su trgovacka imena Lycra, Dorlastan, Espa, Glospan, Cessato, Clespan, Fujibo-Spandex, Texlon i dr.

Elastodienska vlakna (ED) građena su od vulkaniziranog prirodnog ili sintetskog poliizoprenskog kaučuka ili od kaučuka dobivenih polimerizacijom drugih diana, u kombinaciji s vinil-

nim monomerima ili bez njih (v. *Kaučuk i guma*, TE 6, str. 742). Od vlakana se traži da se mogu rastegnuti najmanje na trostruku duljinu i da se nakon prestanka djelovanja sile odmah vrati na početnu duljinu. Proizvode se rezanjem tanke gume u vrlo uske vrpce ili protiskivanjem kroz mlaznice. Protiskuje se emulzija kaučuka, a zatim se koagulirane niti vulkaniziraju, ili se protiskuje otopina gume u benzинu.

Elastodienska vlakna, koja se ubrajaju u skupinu elastomernih vlakana, odlikuju se velikom elastičnošću i prekidnom rastezljivošću (i do 750%). Međutim, to su debela vlakna masnog opisa i vrlo osjetljiva na ulja i masnoće, pa i na masnoću ljudske kože i kozmetičkih preparata. Slabo su postojana i na Sunčevu zračenje, tako da s vremenom postaju krti i slaba. Stoga se za tekstilnu primjenu preda od elastodienskih vlakana izrađuje tako da se gumeni niti obavijaju tankom pamučnom pređom, a takav se proizvod na tržištu često naziva *lasteks*. Od elastodienskih se vlakana izrađuju rastezlivi tekstilni proizvodi (hlače, steznici, vrpce i dr.), ali ih sve više iz primjene istiskuju elastanska vlakna.

R. Čunko D. Raffaelli

ANORGANSKA VLAKNA

Pod anorganskim se vlaknima razumiju prirodna i kemijska vlakna građena od anorganskih spojeva. Jedino *prirodno anorgansko vlakno*, u velikim količinama prisutno u prirodnim nalazištima, jest *azbest* (v. *Azbest*, TE1, str. 633). Sva ostala vlakna iz te skupine (uglična, staklena, kremena, keramička, borna, boronitridna, bornokarbidna, titanskonitridna, niobijskonitridna, niobijskокарбидна, molibdenskokarbidna, metalna i dr.), kojima se značenje i uporaba danomice povećavaju, dobivaju se raznovrsnim industrijskim procesima, većinom iz anorganskih spojeva. Iznimka su ugljična vlakna, koja se uglavnom proizvode od organskih vlakana ili drugih sirovina organskog podrijetla, ali takvim procesima kojima se u vlaknu nastoji postići struktura prirodnoga grafita, što je razlog da se i ta vlakna najčešće svrstavaju u skupinu anorganskih vlakana.

Bez obzira na pojedinačne posebnosti, kao zajedničke karakteristike anorganskih kemijskih vlakana mogu se istaknuti: negorivost (osim ugljičnih vlakana) i velika termička otpornost i pri opterećenju, velika čvrstoća te većinom i veliki modul elastičnosti, relativno velika kemijska otpornost, što toj skupini vlakana osigurava široko područje primjene. Osim u tzv. tekstilnoj primjeni, ta su vlakna prisutna i u raznim granama tehnike, industrije, građevinarstva, a posebno je važna njihova primjena u proizvodnji visokokvalitetnih kompozitnih materijala u kojima služe kao ojačala.

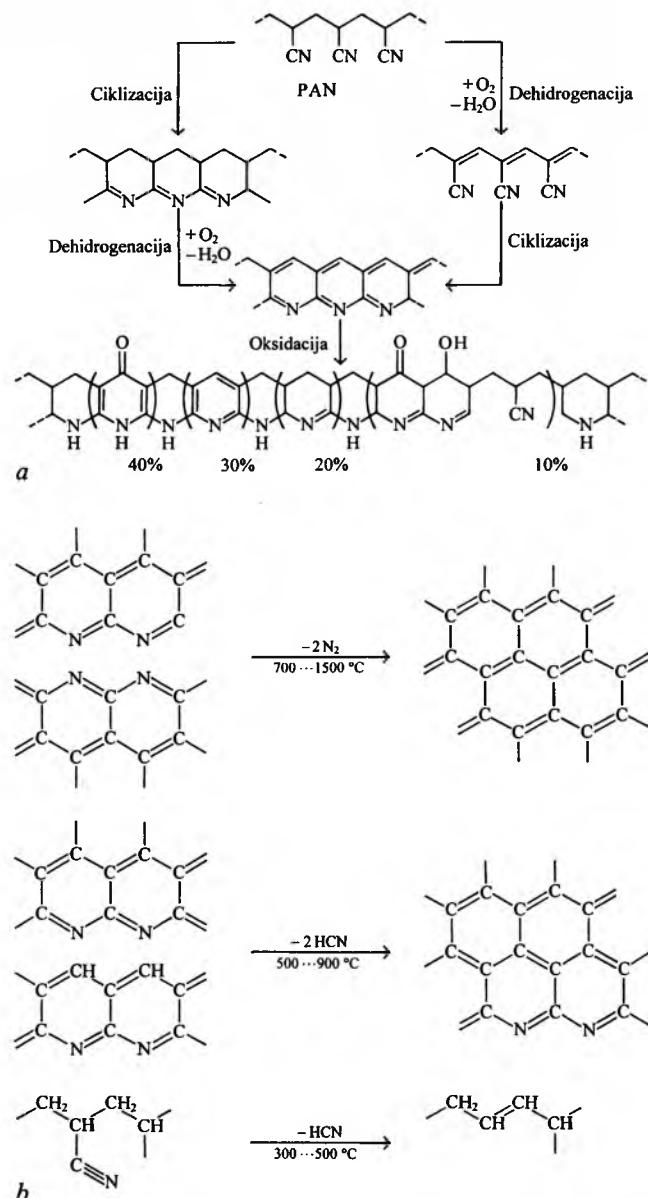
Ugljična vlakna

Ugljična se vlakna (CF) definiraju kao vlakna dobivena pirolizom organskih vlakana ili ugljikovih spojeva. Termička obradba pritom određuje udio ugljika u vlaknu, prema kojemu se razlikuju *djelomično karbonizirana vlakna* (udio ugljika 70...90%) i *ugljična vlakna* (udio ugljika >90%, za anizotropna vlakna obično >95%).

Prv patent za ugljična vlakna koja bi se mogla primijeniti u električnoj žarulji prijavio je još 1878. godine T. A. Edison. Međutim, važnije proizvodne primjene nije bilo do 1959., te su to vlakna novijeg doba. Zrakoplovna je industrija potakla teorijska te tehnička i primijenjena istraživanja, koja su dovela do veće primjene tih vlakana u suvremenim visokovrijednim materijalima, posebice zanimljivim u gradnji zrakoplova i svemirskih letjelica, ali i u drugim područjima.

Dobivanje. Zbog svoje netopljivosti i netaljivosti prirodni grafite ne može služiti kao sirovina za ugljična vlakna, pa je valjalo naći druge izvore. Jedan od njih su netaljiva organska vlakna, a drugi je izvor smolasti ostatak nakon pirolize nafte i kamenog ugljena (tzv. mezofazna smola), koji je moguće prevesti u talinu i iz nje oblikovati vlakna. Na primjeni tih dviju sirovina osmisljuju se danas dva temeljna načina industrijske proizvodnje ugljičnih vlakana. Termičkom obradbom u nekoliko stupnjeva postupno se iz organskih vlakana uklanjuju svi kemijski elementi osim ugljika, istodobno se provodi postupna ciklizacija ugljika, a u završnom stupnju obradbe i grafitiranje strukture ako se žele dobiti *grafitna vlakna*.

Proizvodnja od poliakrilonitrilnih vlakana velike čvrstoće ima danas još uvijek najveću komercijalnu važnost. Pretvorba u grafitna vlakna zbiva se u tri faze. To su: oksidativna stabilizacija (predobradba), karbonizacija i grafitiranje. Oksidativna stabilizacija započinje termičkom obradbom pri temperaturi od ~180 °C, pri čemu se zbiva intramolekulna adicija na nitrilmnim skupinama (sl. 21 a). Te su reakcije praćene karakterističnom promjenom boje (preko žute i smeđe do crne), gubitkom mase zbog oslobođanja hlapljivih razgradnih produkata (voda, amonijak), oslobođanjem topline i skupljanjem vlakana. Zatim se oksidativna stabilizacija nastavlja obradbom na temperaturi od 300 °C u atmosferi zraka (kisika), pri čemu se veže kisik (u masenom udjelu ~15%) u obliku karbonilnih, fenolnih, peroksidnih i eterskih mostova. Cilj je te obradbe da se pri daljoj pirolizi sprječi preveliki gubitak mase vlakana i poveća iskorištenje ugljika. Zbog jake sklonosti vlakana skupljanju obradba se provodi uz istezanje. Ta je faza završna pri dobivanju elektrovdlijivih vlakana, a dobiveni je sastav vlakana: 62...70% ugljika, 20...24% dušika, 5...10% kisika i 2...4% vodika.



Sl. 21. Proizvodnja ugljičnih iz poliakrilonitrilnih vlakana. a - oksidativna stabilizacija, b - karbonizacija

Daljim zagrijavanjem vlakana u atmosferi dušika na temperaturi od 1200...1700 °C nastaje gotovo potpuna karbonizacija i stvaraju se planarni molekulni kompleksi ugljika, a glavni su razgradni produkti HCN, NH₃, H₂O i CO₂ (sl. 21 b). Kemijski sa-

stav vlakana jest $\geq 98\%$ ugljika, $1\cdots 2\%$ kisika i $< 0,5\%$ vodika. Iskorištenje s obzirom na početnu masu vlakana iznosi $50\cdots 60\%$. Ugljična vlakna takva sastava primjenjuju se u svrhe u kojima nije bitna velika čvrstoća i veliki modul elastičnosti.

Prilikom proizvodnje grafitnih vlakana velikog modula elastičnosti provodi se završna kratkotrajna termička obradba radi grafitizacije strukture i povećanja usmjerenosti strukturalnih elemenata prema uzdužnoj osi vlakna. Stoga se ta obradba provodi uz istezanje i na vrlo visokim temperaturama ($2400\cdots 4000^\circ\text{C}$).

Proizvodnja od kemijskih celuloznih vlakana ima sve manju komercijalnu važnost, a u načelu se zbiva po jednakoj shemi kao i proizvodnja od poliakrilonitrilnih vlakana, samo su procesni parametri prilagođeni drugoj sirovini. Predobradba se provodi u inertnom mediju (dušik ili argon) uz postupno povećavanje temperature, pri čemu se najprije uklanja voda ($25\cdots 150^\circ\text{C}$), zatim vodik ($150\cdots 240^\circ\text{C}$) pa kisik ($240\cdots 400^\circ\text{C}$). Tako nastaje ciklička struktura s velikim udjelom ugljika, a zatim slijedi karbonizacija na temperaturi od $400\cdots 700^\circ\text{C}$ i na kraju grafitiranje uz istezanje pri $\sim 3000^\circ\text{C}$.

Dobivanje od mezoafazne smole kao ostatka pirolize nafte i kamenog ugljena u novije je doba komercijalno sve važniji postupak. Smolasti ostatak od kreiranja sadrži mnoštvo (više od 10 000) različitih ugljikovodika. Čišćenjem ostatka ekstrakcijom organskim otapalima može se dobiti frakcija idealna za proizvodnju ugljičnih vlakana, tzv. mezoafazna smola. Mezoafazna se frakcija zbog veće gustoće sferolita nastalih polimerizacijom ugljikovodika pri temperaturi od $400\cdots 500^\circ\text{C}$ taloži iz smjese, što omogućuje njezino odvajanje. Ona se pretežito sastoji od složenih aromatskih ugljikovodika anizotropne strukture. Primjenom ekstrudera smola se prevodi u talinu i ekstrudira u vlakna. Slijedi istezanje do potrebnog promjera vlakana i potom oksidativna stabilizacija u zračnom mediju pri temperaturi od $\sim 300^\circ\text{C}$ da bi se spriječilo taljenje vlakana pri budućim, intenzivnjim termičkim obradbama. Karbonizacija se također provodi u atmosferi zraka, pri temperaturi od $1000\cdots 2000^\circ\text{C}$, a zatim se grafitira pri $\sim 2700^\circ\text{C}$ u atmosferi inertnog plina i uz istezanje.

Izvrsna mehanička svojstva ugljičnih vlakana u kompozitima mogu se potpuno iskoristiti samo pri zadovoljavajućoj čvrstoći veze između vlakna i matrice. Radi povećanja te čvrstoće provodi se završna oksidativna obradba, pri čemu se na površini vlakna stvaraju oksidi koji mogu u reakciji s matricom stvarati čvrste kemijske veze. Primjenjuje se mokra, suha i anodna oksidacija površine.

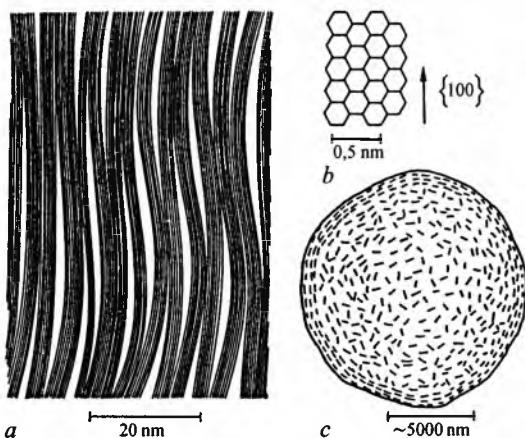
Struktura i svojstva. Prema strukturi razlikuju se izotropna i anizotropna ugljična vlakna.

Izotropna ugljična vlakna (udio ugljika $\sim 90\%$) polikristalaste su strukture. Veličina kristalita je u području $1,5\cdots 3\text{ nm}$ i nema prevladajućeg smjera orijentacije kristalita. Obujamni udio šupljina (pore) relativno je velik ($30\cdots 40\%$), što ima za posljedicu i manju gustoću ($1,5\cdots 1,7\text{ g/cm}^3$) s obzirom na anizotropna vlakna.

Za anizotropna ugljična vlakna rentgenskom je struktornom analizom i elektronskom mikroskopijom dokazana grafitna osnovna struktura (s malim odstupanjem s obzirom na prirodnji grafit) te fibrilna kristalasta nadmolekulna struktura. U pojedinim slojevima grafitne strukture ugljikovi su atomi međusobno povezani čvrstim kovalentnim vezama, dok su poprečne van der Waalsove sile koje povezuju slojeve mnogo slabije (potanje o strukturi grafita v. *Grafit, TE 6, str. 250*). U grafitnoj strukturi ugljičnih vlakana utvrđeno je zakretanje (rotacija) slojeva oko kristalne osi *c* (tzv. turbostratska struktura), što ima za posljedicu nešto veći razmak među slojevima nego u prirodnom grafitu ($2,340\text{ nm}$ prema $2,335\text{ nm}$) i što uz nesavršenosti u ciklizaciji uzrokuje pojedinačne veće strukturne defekte s posljedicama za svojstva vlakana. Osnovni su elementi nadmolekulne strukture kristaliti fibrilnoga vrpčasta oblika, širine $\sim 6\text{ nm}$, duljine $> 100\text{ nm}$, usmjereni manje-više usporedno s uzdužnom osi vlakna (sl. 22). Zbog razmaka između pojedinih grafitnih slojeva i fibrila stvaraju se i duguljaste šupljine (pore) kojih je obujamni udio $20\cdots 30\%$.

Ugljična su vlakna karakteristične crne boje, većinom kružnog presjeka. Bez obzira na stupanj anizotropije strukture, za sva su ugljična vlakna karakteristična sljedeća svojstva: kemijska inertnost, velika otpornost na djelovanje kiselina, dužina i organskih

otapala, nekorozivnost, velika termootpornost (zadržavanje mehaničkih karakteristika pri trajnom djelovanju visoke temperature) uz neznatnu toplinsku rastezljivost (koeficijent toplinskog rastezanja reda veličine $10^{-6}/\text{K}$), dobra električna provodnost (električna otpornost reda veličine $10^{-6}\Omega\text{ cm}$), nemagnetičnost, neznatna apsorpcija rentgenskog zračenja, potpuno neupijanje vlage, velika krutost i krtost.



Sl. 22. Fibrilni model strukture grafitnih vlakana. *a* valoviti grafitni slojevi u smjeru osi vlakna, *b* orijentacija grafitnih slojeva u smjeru vlakna, *c* orijentacija u smjeru poprečnom na os vlakna

Čvrstoća vlakana bitno ovisi o primijenjenoj sirovini i uvjetima termičke obradbe u pirolizi i karbonizaciji (tabl. 4), a modul elastičnosti o pravilnosti grafitne strukture i usmjerenoći fibrila prema osi vlakna. Tako polikristalasta izotropna vlakna imaju relativno malu čvrstoću (σ), ali još uvjek relativno veliku s obzirom na mnoga organska vlakna, i mali modul elastičnosti (E-modul). Anizotropna grafitna vlakna smatraju se visokokvalitetnim vlaknima, a po čvrstoći i modulu elastičnosti mogu se dobro razlikovati te se po tim karakteristikama svrstavaju u *vlakna velike čvrstoće* (znak HT, $\sigma=3\cdots 5\text{ kN/mm}^2$, E-modul=200 do 250 kN/mm^2), *vlakna srednjeg modula elastičnosti* (znak IM, $\sigma=4\cdots 5\text{ kN/mm}^2$, E-modul=250 \cdots 350 kN/mm^2) i *vlakna velikog modula elastičnosti* (znak HM, $\sigma=2\cdots 4,5\text{ kN/mm}^2$, E-modul=350 \cdots 800 kN/mm^2).

Vrijednost i iskoristivost velike čvrstoće i velikog modula elastičnosti posebno se ističe ako se te karakteristike promatraju s obzirom na gustoću, odnosno masu materijala u primjeni. U tom je smislu specifična čvrstoća ugljičnih vlakana $5\cdots 7$ puta veća od čvrstoće većine metala. Ako se uzme u obzir i veća otpornost na zamor materijala te nekorozivnost, za pojedine primjene proizlazi izrazita prednost grafitnih vlakana pred čelikom i aluminijem kao konstrukcijskim materijalima. Za razliku od drugih anorganskih vlakana, ugljična vlakna gore, premda vrlo teško (granični udio kisika, LOI > 60), ali su vrlo otporna na vrućinu (djelovanje suhe topline). Maksimalna temperatura primjene ovisi o vrsti vlakna i mediju (tabl. 4).

Izotropna se ugljična vlakna pretežito proizvode u malim duljinama i prerađuju se dalje u netkane tekstilije s vrstama i oblicima određenima primjenom. Anizotropna grafitna vlakna uglavnom su filamentna, promjera $5\cdots 10\text{ }\mu\text{m}$. Na tržištu obično dolaze u obliku neuvijene multifilamentne prede (finoča rovinga od $67\cdots 40000$ tex). Takve se pređe dalje prerađuju u raznovrsne linearne, plošne i prostorne tekstilne proizvode uglavnom za ojačavanje kompozita ili se režu na malu duljinu (uobičajeno 6 mm) za druge primjene.

Posebno su visokovrijednih svojstava vrlo fina (promjer $0,5\cdots 5\text{ }\mu\text{m}$) monokristalna ugljična vlakna (*viskeri*), koja se mogu dobiti u duljinama od nekoliko centimetara, a proizvode se specijalnim postupcima za posebne namjene.

Primjena. Izotropna ugljična vlakna upotrebljavaju se za namjene u kojima nije bitna velika čvrstoća vlakana, ali im se iskoristi druga izvrsna svojstva, npr. za supstituciju azbesta, ojačavanje betona, kao filtri i brtivila u kemijskoj i drugim industrijskim, punila i izolacije, elektrovodljive jezgre u dvokomponentnim vlaknima i dr. Anizotropna se vlakna najviše upotre-

VLAKNA

Tablica 4
NEKA SVOJSTVA KEMIJSKIH ANORGANSKIH VLAKANA

| Vlakna | Gustoća g/cm ³ | Promjer µm | Vlačna čvrstoća kN/mm ² | Modul elastičnosti kN/mm ² | Prekidno produljenje % | Talište (temperatura raspada) °C | Najveća temperatura u primjeni zrak/inertna atmosfera °C |
|---|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------------------|--|
| Uglijčna na bazi poliakrilonitila na bazi smole | 1,75…1,95 2,0…2,2 | 5…10 5…10 | 1,8…7,0 1,4…3,0 | 230…540 140…820 | 0,4…2,4 0,2…1,3 | (~3 600…4 000) (~3 600…4 000) | 500/3 000 300/3 000 |
| Staklena staklo E staklo AR staklo S | 2,52…2,60 2,60…2,68 2,46…2,48 | 3…27 2…11 5…15 | 2,6…3,5 2,5…3,5 4,6…4,8 | 72…73 71…73 85…87 | 4,8 2,0 5,4 | ~1200 ~1200 ~1200 | 300…400 350…400 300…400 |
| Kremena | 2,2 | 7…14 | 3,45 | — | 1,0…1,2 | — | 1000 |
| Keramička na bazi Al ₂ O ₃ na bazi SiC | 2,7…4,2 2,3…2,65 | 10…20 10…20 | 1,4…2,3 1,2…3,0 | 154…380 150…300 | 0,4…1,1 0,8…1,6 | 1740…2040 2 500…2 690 | 1300/1600 1400/1800 |
| Borna | 2,63 | 33…140 | 3…4 | 380…400 | 1,0 | (2 300) | 500/200 |
| Viskeri α-Al ₂ O ₃ , korund α-SiC grafitni | 3,96 3,2 2,2 | 0,6…10 0,5…10 0,5…5 | do 28 do 35 do 25 | 420…500 490 720 | — — — | 2 040 2 700 (3 600…4 000) | — — — |
| Čelična za automobilski kord fina vlakna | 7,8 8,0 | 150 7 | 2,5…7,6 3,8…7,6 | 150…205 160…210 | 1,8 1,5…1,8 | 1400 1400 | 500 500 |
| Aluminijkska | 2,7…3,25 | 17…20 | 0,7…1,8 | 70…210 | 2,4 | 660 | — |
| Volframna | 19,3 | 12 | 3…4 | 350…420 | — | 3 400 | — |

bljavaju u proizvodnji kompozita. Tek u prikladnoj polimernoj matrici (npr. epoksidne, poliesterske, poliamidne i fenolne smole) i prikladnoj konstrukciji u kojoj se maksimalno uzima u obzir izrazita anizotropija vlakana mogu se u potpunosti iskoristiti izvrsna svojstva grafitnih uglijčnih vlakana. Glavno područje primjene raznovrsnih kompozitnih materijala s uglijčnim vlaknima jest zrakoplovna industrija i gradnja svemirskih letjelica. U toj je primjeni optimalno iskorištena njihova velika čvrstoća i krutost s obzirom na malu masu te termootpornost i nekorozivnost. Primjenom takvih materijala za pojedine dijelove zrakoplova može se masa zrakoplova smanjiti za više od 30% uz istodobno povećanje sigurnosti i uštede u primjeni. Od uglijčnih se vlakana izrađuju i razni visokokvalitetni proizvodi za šport i rekreatiju, kod kojih je uz izvrsna mehanička svojstva bitna i što manja masa (teniski reketi, palice za golf i hokej, štapovi za ribolov, skije, trkači automobili, motori i bicikli). Kako od svih poznatih materijala uglijčna vlakna pokazuju i najbolju biokompatibilnost s krvljem, mekanim i vezivnim tkivom, sve je važnija njihova primjena kao implantata u medicini (posebice su nezamjenjiva za izradbu umjetnih ligamenata).

Ulaganja u istraživanja radi poboljšanja svojstava uglijčnih vlakana, posebice u visokorazvijenim zemljama (SAD, Japan), velika su, što jamči dalje širenje i nove primjene tog izvrsnog suvremenog materijala. Najnovija stručna izvješća (1995) pokazuju da je japanskim znanstvenicima uspjelo laboratorijski dobiti monokristalna uglijčna vlakna dijamantne strukture, što je sigurno znakovit pokazatelj smjera njihova daljeg razvoja.

Najveći je svjetski proizvođač uglijčnih vlakana japanska tvrtka Toray Industries, a najpoznatija trgovacka imena jesu Rorayaca, Thornel, Carbolon, Hitron, Grafil, Celion i dr.

Staklena vlakna

Staklena vlakna (GF) skupni je naziv za vlakna promjera manjeg od 40 µm dobivena postupcima ispredanja iz taline različitih vrsta stakala određene fizikalno-kemijske građe i svojstava.

Još su stari Egipćani u doba oko ←1600. umjeli iz žitke staklene mase izvlačiti niti kojima su ukrašavali staklene posude. U srednjem su se vijeku staklene niti izvlačile iz zagrijanih staklenih štapića i također, osobito u Veneciji od XVI. do XVIII. st., upotrebljavale za ukrašavanje staklenih predmeta i izradbu filigranskog stakla.

U tridesetim godinama XIX. st. bilježe se prvi pokušaji primjene staklenih niti za ukrašavanje odjeće. Pariški staklopunčari Oubers i Bonnet načinili su svileni prekrivač isprepleten staklenim nitima sa odar Napoleona I. Nedugo zatim, 1842, u Manchesteru je L. Schwabe izložio staklena vlakna i iz njih otkan tekstil (tkaninu). Vlakna je proizveo propuštanjem staklene taline kroz sitne otvore, tj. primjenio je preteču današnje mlaznice.

Prvu manufakturu za proizvodnju staklenih vlakana osnovao je u Beču 1866. Francuz J. de Brunfaut. Fina vlakna promjera 6…12 µm izvlačila su se iz zagrijanih staklenih štapića, a bila su, zahvaljujući originalnoj recepturi stakla, mnogo savitljivija nego prije. Iz takvih su se vlakana izradivale vlasulje, kape i velovi. Prvi patent o primjeni staklenih vlakana u elektroizolacijske svrhe prijavljen je 1906. u Austriji, a 1935. u Njemačkoj je prijavljen patent o primjeni staklenih vlakana kao ojačala za kompozite. Međutim, prvi kompoziti ojačani staklenim vlaknima proizvedeni su u SAD-i, i to u vrijeme Drugoga svjetskog rata kao materijal za vojne svrhe.

Industrijska proizvodnja dovoljno finih staklenih vlakana koja su se mogla preradivati u predu i tkati započela je 1931. pronalaskom postupka ispredanja kroz mlaznicu uz izvlačenje puhanjem (pronalažači G. Slayter i J. H. Thomas; industrijska proizvodnja Owens-Illinois Glass Co., Newark, Ohio, SAD). Po istom su se postupku vlasasta staklena vlakna 1937. počela proizvoditi i u Europi (Njemačka). Postupak za industrijski proizvodnju filamentarnih staklenih vlakana razvila je 1936. američka tvrtka Owens Corning Fiberglass Corp.

Izbor vrste stakla podređuje se zahtjevima dalje preradbe i uporabe vlakana. Slovna oznaka stakla pokazuje na neka posebna svojstva koja su posljedica kemijskog sastava, odnosno specifičnog udjela pojedinih oksida. Tako, npr., staklo E svojim kemijskim sastavom (50…56% SiO₂, 12…16% Al₂O₃, 16…25% CaO, 6% MgO, 6…13% B₂O₃, do 0,7% F, 0,3…2% Na₂O, 0,2…0,5% K₂O, 0,3% Fe₂O₃) osigurava optimalna svojstva vlakana za široko područje primjene te se ~90% ukupne količine staklenih filamentara proizvodi od te vrste stakla. Uz silicijev oksid kao osnovnu komponentu, bitan je i veći udio aluminijeva oksida te borova oksida. Od stakla AR, koje je zahvaljujući povećanom udjelu cirkonijeva oksida otporno na alkalije, proizvode se vlakna za učvršćivanje (armiranje) betona. Za staklo D tipičan je određeni udio borova oksida (8…13% B₂O₃), a ono se uz kemijsku i termičku otpornost odlikuje posebnim dielektričnim svojstvima, pa se od njega proizvode izolacijska vlakna. Ako je udio Al₂O₃ veći od 17%, a alkalijskih oksida manji od 1%, radi se o staklu ECR vrlo otpornom na kiseline, od kojeg se proizvode vlakna za ojačavanje polimernih materijala kiselog karaktera. Od stakla S, za koje je karakterističan veliki udio magnezijeva oksida i odsutnost kalcijeva oksida, proizvode se vlakna velike čvrstoće. Sličnog sastava je i staklo HS od kojeg se proizvode vlakna otporna na velika mehanička opterećenja. Staklo M je specijalno staklo koje sadrži berilijev oksid i jedino se od te vrste stakla proizvode vlakna vrlo velikog modula elastičnosti.

Staklena vlakna dobivena od različitih vrsta stakala svrstavaju se u *tekstilna vlakna, mikrovlastna, izolacijska i šuplja vlakna*. Glavni kriteriji podjele pritom su područja primjene i morfološke karakteristike.

Tekstilna staklena vlakna u prvom su redu ona koja se proizvode i preraduju postupcima tipičnim za tekstilnu preradbu. Ona obuhvaćaju *filamentna vlakna*, obično kružnog presjeka i jednoli-

čnog promjera po cijeloj duljini. Takva vlakna promjera 3,5 do 16 µm dalje se prerađuju u pređe za raznovrsne tekstilije, a od filamenata promjera 7 do 27 µm pretežito se izrađuje neuvijena multifilamentna pređa (tzv. *roving*) za ojačavanje kompozita. Vlasasta staklena vlakna postoje u različitim duljinama, a dalje se prerađaju u raznovrsne uporabne oblike (predena pređa za tkanje i pletenje, netkane tekstilije različitih vrsta).

Isolacijska staklena vlakna uglavnom se proizvode kao vlasasta vlakna i prerađuju u netkane tekstilije za toplinsku i elektroizolaciju, pri čemu stupanj sređenosti, tj. uzdužne ili poprečne usmjerenosti vlakana u netkanoj tekstiliji, može biti veći (vrpcе, koprе, pustovi) ili manji (staklena vuna i vata), a jednoličnost promjera po duljini vlakna nije toliko bitna kao za vlakna za ostale namjene.

Staklena mikrovlekna vrlo su fina, uglavnom vlasasta vlakna promjera 0,5–2,0 µm. Služe za specijalne namjene u kojima se, uz druga svojstva, posebno iskorištava njihova velika specifična površina (npr. mikroporozne membrane za specijalnu filtraciju u kemijskoj industriji).

Šuplja staklena vlakna izdvajaju se u posebnu skupinu na temelju specifičnih morfoloških karakteristika. U središnjem dijelu vlakna nalazi se uzdužna šupljina (do 30% ukupnog obujma), čime se postiže znatno smanjenje mase, a istodobno se, zahvaljujući specijalnoj vrsti stakla (staklo S-2), osigurava velika čvrstoća. Ta se vrsta vlakana primjenjuje za ojačavanje kompozita za koje je posebno bitna mala masa.

Optička vlakna čine posebnu skupinu. To su fina dvokonstitucijska staklena vlakna koja se upotrebljavaju kao svjetlovodi u optičkim telekomunikacijama (v. *Optičke telekomunikacije*, TE 9, str. 644) te kao svjetlosni izvori za neke specijalne primjene, npr. u medicinskoj dijagnostici.

Proizvodnja staklenih vlakana obuhvaća najmanje dvije faze: pripravu stakla potrebnog kemijskog sastava i ispredanje vlakana iz staklene taline. Te se dvije faze mogu povezati u kontinuirani industrijski proces, što je tipično za suvremenu proizvodnju filamentnih staklenih vlakana, ili se zbivaju kao dva diskontinuirana procesa kao pri proizvodnji vlasastih vlakana.

U kontinuiranom procesu ispredanja staklenih vlakana, koji je zbog ekonomskih razloga i sve većih zahtjeva glede kvalitete vlakna i ekološke prihvatljivosti procesa sve zastupljeniji, staklo se proizvodi u postrojenjima s pužnim talionikom, kojemu kapacitet iznosi do 80 t/dan. U takvom su postrojenju ujedinjena tri procesa: priprema stakla, kondicioniranje taline i ispredanje vlakana.

Za ispredanje vlakana primjenjuje se *izravno izvlačenje* (v. *Staklo*, TE12, str. 232). Talina temperature 1350–1250 °C slobodno istječe kroz mlaznicu oblika kadice (400–1600 rupica promjera 1–2 mm) i oblikuju se niti. One se izvlače brzinom od 1200–1500 m/min pri proizvodnji filamenata promjera ≥ 14 µm, odnosno još većim brzinama pri proizvodnji finijih niti (3 000–3 600 m/min za filamente promjera ≤ 10 µm). Skrtnjivanje niti pospješuje se hlađenjem preko srebrenih i bakrenih rebrastih elemenata smještenih ispod mlaznice te prskanjem niti vodom. Na stvrđnutu i djelomično ohlađenu vlakna nanose se preparacijska sredstva (maseni udio 0,1–2,5%), kojima se treba poboljšati preradivost vlakana, a mogu im se korigirati i neka uporabna svojstva. Preparacijska se sredstva priređuju u obliku emulzija, a sadrže sredstva za poboljšanje adhezivnosti, kohezivnosti i glatkoće, spojeve koji smanjuju sklonost vlakana nabijanju statičkim elektricitetom, omekšivače, pigmente i dr. Nakon toga filamenti se ujedinjuju u snop (broj niti, odnosno finoga snopa određena je namjenom) i namataju na namotak. Oko 90% filamentnih vlakana promjera 5–24 µm proizvodi se takvim postupkom.

Za diskontinuirani proces ispredanja vlakana potrebno se staklo priprema ili primjenom opisanog pužnog talionika ili u vertikalnom talioniku, a potom se od staklenih kuglica ili štapova priprema talina za ispredanje vlakana. Od brojnih tehnoških postupaka ispredanja koji su s vremenom razvijeni za dobivanje vlasastih vlakana (npr. centrifugiranje, puhanje pod različitim kutovima s obzirom na smjer toka niti, puhanje i centrifugiranje) danas prevladava *izvlačenje rotirajućim valjkom*, kojim se proizvodi 90–95% vlasastih staklenih vlakana. U platinskoj kadi-

-mlaznici staklene se kuglice rastale i zagriju na temperaturu od 1000–1200 °C, pri čemu talina istječe. Kapi taline izvlače se rotirajućim valjkom u niti, a promjer se vlakna namješta brzinom okretanja valjka, odnosno time određenom brzinom izvlačenja niti. Pri brzini od ~3 500 m/min dobivaju se vlakna promjera 8–11 µm. Preparacijska se sredstva nanose neposredno ispod mlaznice, prije dodira s valjkom. Kad se ohlade na temperaturu nižu od točke mekšanja, filamenti se režu na potrebnu duljinu (2 cm–1 m) i pneumatski odvode na dalju preradbu. Pritom se izrađuju istegnuti prameni vlakana i pretpreda te se u obliku krizišnih namotaka daju na tržiste.

Za proizvodnju *mikrovlekana* razvijeni su specijalni postupci (npr. stanjivanje puhanjem plamenom, varijante centrifugalnog postupka, elektrostatički postupak), a za dobivanje *šupljih staklenih vlakana* konvencionalni je postupak modificiran dodatnom sapnicom koja se smješta koncentrično u otvor na platinskoj kadi-mlaznici. Pri istjecanju taline kroz takvu se sapnicu puše komprimirani zrak koji potiskuje talinu iz središnjeg dijela mlaza, zbijajući je uz stijenke koje se tvore bržim skrtnjivanjem vanjskog sloja, stvarajući time središnju šupljinu.

Svojstva i primjena. Svojstva staklenih vlakna u prvom su redu određena njihovom kemijskom gradom i izotropnom (amorfnom) strukturon, karakterističnom za tzv. staklasto stanje. To se stanje definira kao zamrznuto stanje pothlađene tekućine, a stvara se potiskivanjem kristalizacije taline (v. *Staklo*, TE12, str. 223). Takav se proces zvá pri naglom hlađenju i istezanju niti tijekom proizvodnje vlakana, kada je trajanje skrtnjivanja prekratko da bi nastala slobodna kristalizacija i stvorili se visokouređeni kristalni elementi strukture vlakna. Uvjeti ispredanja (brzina izvlačenja, temperatura, intenzivnost hlađenja) time također bitno utječu na svojstva vlakana.

Od uporabnih svojstava staklenih vlakana valja istaknuti općenito veliku čvrstoću uz relativno malu gustoću, veliku termičku otpornost i negorivost, dobre izolacijske karakteristike, otpornost na mikroorganizme, dobru kemijsku otpornost na ulja, masti i organska otapala te na kiseline i lužine u pH-području od 3–9. Od nedostataka valja spomenuti osjetljivost nekih tipova staklenih vlakana na površinsku koroziju, krtost i s tim u vezi relativno tešku preradivost. Usporedbeni prikaz nekih karakteristika bitnih za uporabu dan je u tablici 4.

Za staklena je vlakna mnogo važnija tehnička od tekstilne primjene. U tekstilnoj se primjeni uglavnom iskorišćuje njihova negorivost, pa se od njih izrađuju zavjese, zastori i slični proizvodi za unutrašnje uređenje prostora te zaštitna odjeća. Razvojem negorivih i teško gorivih organskih vlakana važnost se staklenih vlakana za tekstilnu primjenu smanjuje. U tehnici se područje uporabe razlikuje za filamentna i za vlasasta vlakna. Filamentna vlakna prerađena u raznovrsne uporabne oblike (roving, tkanine, pleteni elementi, vrpcе, cjevasti proizvodi i dr.) većinom se primjenjuju za ojačavanje materijala (kompoziti, gradevinski proizvodi, strojni dijelovi, toplinska i električna izolacija, zaštita od gorenja). Vlasasta staklena vlakna prerađuju se u pređe, tkanine, pletiva, raznovrsne netkane tekstilije, vrpcе, filtre i membrane i uglavnom se primjenjuju u raznim granama industrije i građevinarstvu. Za primjenu u kemijskoj industriji (filtracija, mikroporozne membrane, zamjena za toksični azbest) bitna je njihova kemijska otpornost, za građevinarstvo su najvažnija izolacijska svojstva (toplinska i zvučna izolacija, podloge za bitumen, krovna i podna izolacija, armiranje betona), a za elektroniku i elektrotehniku bitna su dielektrična svojstva. I druga su područja netekstilne primjene brojna (obloge spremnika za tekućine, punila, filtrirajući materijali, ojačavanje kompozita, automobilска industrija i dr.).

Najpoznatija su trgovačka imena staklenih vlakana Fiberglas, Araton, Beta, S-Glas, Vetrotex, Iceberg i dr.

Kremena (silicijevoksidna) vlakna

Silicijevoksidna vlakna građena su gotovo samo od silicijeva dioksida (maseni udio >99,8%, po američkim kriterijima čak >99,99%). Prema načinu dobivanja razlikuju se vlakna dobivena ispredanjem iz taline, gel-ispredanjem te ispredanjem pomoću posrednika. Proizvode se u promjerima od 7–14 µm u obliku

filamentata te u manjoj mjeri i kao vlasasta vlakna, a ima ih i u monokristalnom obliku (viskeri). Odlikuju se velikom čvrstoćom ($3,45 \text{ kN/mm}^2$) pri relativno maloj gustoći ($2,2 \text{ g/cm}^3$), termičkom otpornošću (posebice na temperaturne šokove, koeficijent toplinskog rastezanja $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), dobrim toplinskoizolacijskim i elektroizolacijskim svojstvima, otpornošću na kemikalije, a osobito na kiseline. Osim toga, monokristalna kremena vlakna velike čvrstoće otporna su i na nuklearno (neutronsko i gama) zračenje. Primjenjuju se kao komponente pri izradbi visokvalitetnih materijala, pretežito za potrebe svemirskih istraživanja, a u manjoj mjeri, u kombinaciji s ugljičnim vlaknima, i za izradbu vrlo kvalitetnih športskih rekvizita (npr. teniski reketi).

Bazaltna vlakna

U okviru novijeg razvijta anorganskih vlakana, posebno krajem 1980-ih godina, u većoj su se količini počela proizvoditi i bazaltna vlakna. Osnovna je sirovina kamen magmatnog podrijetla, bazalt (udio ~64%), kojemu se dodaje prirodno sedimentno kamenje (vapnenac, dolomit, ~9%) i koks radi taljenja (~18%). Od tih se sirovina u metalurškim pećima priprema talina (temperatura $1600 \cdots 1700 \text{ }^\circ\text{C}$), iz koje se puhanjem i centrifugiranjem dobivaju kratka vlakna (duljina 2–3 mm). Već tijekom ispredanja vlakna se slažu u koprenu i runo. Ono se iglanjem učvršćuje u kompaktni pust, koji se pretežito primjenjuje kao izolacijski materijal za toplinsku, zvučnu i elektroizolaciju u građevinarstvu i različitim industrijskim granama.

Polikristalasta anorganska vlakna

Pod skupinom polikristalastih vlakana razumiju se ona vlakna koja su građena od raznovrsnih, međusobno povezanih i sraslih kristalita anorganskih spojeva ili čak elemenata, ali ne i vlakna od izrazitih metala. Za razliku od staklenih vlakana, kojima su po kemijskom sastavu neka od tih vlakana slična, polikristalasta vlakna daju rentgenogramme tipične za anizotropne materijale.

Poticaj za razvoj te skupine vlakana bila je težnja da se proizvedu lagani, čvrsti, kruti i termootporni materijali, prije svega potrebni za zračne i svemirske letjelice te za vojnu industriju. Pošto su stečena prva saznanja i iskustva o primjeni staklenih vlakana za ojačavanje polimerne plastike i o dobivanju vlaknima ojačanih kompozita (1940), u daljem razvoju još čvršćih i termootpornijih vlakana težište je stavljeno na postizanje polikristalaste strukture anorganskih vlakana. Time su u središtu zanimanja došli anorganski spojevi (oksiidi, nitridi, karbidi i boridi lakih viševalentnih metala) te elementi berilij, bor i ugljik, za koje se smatralo da bi uz prikladnu sitnozrnatu polikristalastu strukturu mogli dati vlakna željenih svojstava.

Osnovni problem koji je trebalo riješiti bila je tehnologija proizvodnje, jer uobičajeni tehnološki postupci ispredanja kemijskih vlakana nisu bili primjenljivi. Prvi proizvodni postupci, razvijeni krajem pedesetih godina, osnivali su se na pretvorbi nekog primarnog vlakna u polikristalasto (naslojavanjem anorganske komponente ili kemijskom reakcijom). U načelu tako su dobivena borna, cirkonij-oksidna, metalonitridna, metalokarbidska i silikatna vlakna. Noviji razvoj osamdesetih godina rezultirao je ovladavanjem proizvodnjom keramičkih vlakana ekstruzijom i sinteriranjem pa su danas keramička vlakna komercijalno najvažnija polikristalasta anorganska vlakna.

Keramička vlakna prisutna su na tržištu od 1981. godine. To su polikristalasta termootporna i termostabilna vlakna građena od metalnih oksida, metalnih karbida, metalnih nitrida ili drugih mješavina. Uz aluminij i cirkonij, u tom se smislu i bor i silicij smatraju metalima. Osnovne komponente mogu biti smjesa aluminijeve oksida i silikata ili silicijeva karbida i nitrida, a uz njih i drugi vatrostalni oksidi. Na temelju toga razlikuju se dvije osnovne skupine keramičkih vlakana: *vlakna na bazi aluminijeve oksida* i *vlakna na bazi silicijeva karbida*.

Dobivanje keramičkih vlakana načelno se svodi na pripremu smjese prikladnih anorganskih spojeva u vodi, eventualno uz dodatak linearnih polimernih spojeva za postizanje viskoznosti potrebne za ispredanje vlakana ekstruzijom kroz mlaznicu, poslije čega se provodi piroliza i sinteriranje pri temperaturi od

~ $1200 \cdots 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. kemijska pretvorba u finozrnatu strukturu ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Na sličan se način dobivaju i aluminijsko-cirkonijska polikristalasta vlakna.

Na veliko zanimanje najšao je postupak kojim tvrtka Nippon Carbon proizvodi keramička vlakna na bazi silicijeva karbida kao filamentnu predu pod trgovaćkim nazivom Nicalon. Proces počinje dekloriranjem diklordimetilsilana rastaljenim natrijem, čime se dobiva čvrsti polimer dimetilpolisilan. Daljom polimerizacijom u autoklavu (temperatura $470 \text{ }^\circ\text{C}$, atmosfera argona, 8–12 sati) on se prevodi u polikarbosilan, iz kojeg se ispredanjem iz taline u atmosferi dušika dobivaju vlakna. Da bi se spriječilo taljenje vlakana pri naknadnoj termičkoj obradbi provodi se termička stabilizacija (kondenzacija) na temperaturi od $190 \text{ }^\circ\text{C}$ u trajanju od 30 min. Pretvorba u silicijev karbid postiže se toplinskom obradbom na ~ $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, uz vakuum i dušik.

Od polikarbosilana koji sadrže bor na sličan se način, ali uz mnogo višu temperaturu pirolize ($1600 \text{ }^\circ\text{C}$), dobivaju silicijsko-karbidska vlakna koja sadrže i bor, a imaju još veću termičku otpornost.

Za dobivanje keramičkih vlakana za kompozite s keramikom razvijen je poseban postupak u kojem se suspenzija vrlo fine praškaste keramike u smjesi vode i poli(vinil-alkohola) ekstrudira kroz mlaznicu u vlakna koja se zatim sinteriraju.

Struktura, svojstva i primjena. Premda se općenito radi o polikristalastim vlaknima, morfologija strukture keramičkih vlakana ovisi o kemijskom sastavu pojedinih vrsta vlakana (tabl. 5) te o procesnim parametrima.

Tablica 5
KEMIJSKI SASTAV KOMERCIJALNO VAŽNIH KERAMIČKIH VLAKANA

| Vlakno | Sastav | Proizvođač |
|------------|--|----------------------|
| Safimax | 96% $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 4% SiO_3 | ICI |
| PRD-166 | 80% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 20% ZrO_2 | Dupont |
| Nextel 312 | 62% Al_2O_3 14% Bi_2O_3 24% SiO_2 | 3M |
| Nicalon | 65% SiC 15% C 20% SiO_2 | Nippon Carbon |
| MPs | 69% Si 30% C 1% O | Dow Corning/Celanese |
| Fiberamic | 57% Si 13% C 22% N 8% O | Rhone Poulenc |

Keramička vlakna na bazi aluminija imaju pretežito finu polikristalastu mikrostrukturu, ali se pojedinačno proizvode i viskeri. Da bi se postigla karakteristična uporabna svojstva, bitno je proizvodnim procesom osigurati veliku gustoću, sitnozrnatu strukturu, malu poroznost i malu brzinu rasta kristala. U tom je smislu važno postići potrebnu modifikaciju ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Eventualna prisutnost silicija u aluminijeveoksidnim vlaknima pridonosi homogenosti strukture, pri čemu je poželjna i ϵ -modifikacija kristalita Al_2O_3 koji su fino razdijeljeni u amorfnoj matrici. Prosječna je veličina kristalita u aluminijeveoksidnim keramičkim vlaknima ~ $60 \mu\text{m}$, prosječna veličina pora ~ $25 \mu\text{m}$, a kristalni udio u vlaknu iznosi ~50%. Zagrijavanjem $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ na temperaturu veću od $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ (sinteriranje) stvaraju se relativno veliki kristali (do nekoliko desetaka μm).

Keramička vlakna na bazi silicijeva karbida tek obradbom na temperaturi $1200 \cdots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ lagano prelaze iz amorfne u kristalastu strukturu, pri čemu se stvaraju kristalni $\beta\text{-SiC}$ i grafit, a u amorfnom obliku zaostaje SiO_2 .

Najvažnija su svojstva keramičkih vlakana velika otpornost na kemikalije, mala toplinska provodnost i vrlo velika otpornost na nagle temperaturne promjene i na trajno djelovanje vrlo visokih temperatura. Keramička vlakna mogu u primjeni trajno biti izložena temperaturi od $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, pojedine vrste i temperaturi od $1800 \text{ }^\circ\text{C}$, bez većeg gubitka čvrstoće, a kratkotrajno se mogu

izložiti čak i temperaturama višim od tališta. Općenit im je nedostatak relativno velika krtost te stoga i otežana preradba.

Najvažnija je primjena keramičkih vlakana u izradbi kompozitnih materijala, gdje se upotrebljavaju za ojačavanje metala, stakla i keramike. Takvi kompozitni materijali vrlo su cijenjeni u zrakoplovnoj industriji, raketnoj i svemirskoj tehnici i strojogradnji, tj. svugdje gdje se primjenjuju vrlo čvrsti i sigurni, a istodobno i relativno lagani materijali, posebice otporni na vrlo visoke radne temperature i na trošenje. Zbog termootpornosti i velike otpornosti na kemikalije keramička su vlakna dragocjeni materijali i u kemijskoj i srodnim industrijama (filtracija vrućih plinova i tekućina, brtivila i dr.).

Borna vlakna. Veoma sitnozrnate polikristalaste strukture, dobrih mehaničkih svojstava i pogodna za ojačavanje kompozita, borna vlakna dobivena su mnogo prije keramičkih (1959, Texaco Experiment Inc.). Proizvedena su naslojavanjem bora na finu volframu nit (promjera $12\text{ }\mu\text{m}$) kao supstrat. U pretkomori se u struji vodika i na temperaturi od 1200°C najprije površina niti čisti od oksida i nečistoća, a potom brzinom od 10 m/min prolazi kroz reakcijsku komoru u kojoj se na 1100°C zbiva kemijska reakcija:



Nastali se bor taloži brzinom od $\sim 2,5\text{ }\mu\text{m/s}$ na površinu volframske niti u obliku sitnozrnatih kristala. Zbog velike gustoće volframa, dovoljno mala gustoća bornog vlakna kakva je potrebna za primjenu u kompozitima što manje mase postiže se pri debljini bornog sloja od $\sim 44\text{ }\mu\text{m}$, što odgovara promjeru vlakna od $\sim 100\text{ }\mu\text{m}$. Osim te finoće, proizvode se i borna vlakna promjera $140\text{ }\mu\text{m}$ i $200\text{ }\mu\text{m}$ (gustoća $2,63\text{ g/cm}^3$).

Komercijalno najzastupljenija borna vlakna promjera $100\text{ }\mu\text{m}$ imaju modul elastičnosti $380\cdots400\text{ kN/mm}^2$, specifičnu uporabnu čvrstoću $1060\cdots1330\text{ Nm/g}$, termički se raspadaju na 2300°C , a otporna su na temperature do 500°C u zraku, odnosno do 1000°C u inertnoj atmosferi.

Metalonitridna i metalokarbidična vlakna. Tvrtka Carborundum Corp. razvila je 1973. proizvodnju polikristalastih vlakana koja se temeljila na kemijskoj pretvorbi nekog primarnog vlakna u reakciji s plinom ili plinskom smjesom određenoga kemijskog sastava. Temperatura procesa povećavala se postupno; najprije se prilagođavala potrebi provedbe kemijske reakcije, zatim povećavala radi pirolize i pri kraju dostigla vrlo visoke vrijednosti ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$). Tako su proizvedena različita metalonitridna i metalokarbidična termostabilna vlakna (tabl. 6). Ta su vlakna bila razvijena za ojačavanje visokokvalitetnih kompozita, ali im se usavršavanjem proizvodnje keramičkih vlakana, koja imaju mnogo veću termičku otpornost i bolja mehanička svojstva, komercijalna važnost sve više smanjuje.

Tablica 6

REAKCIJSKE KOMPONENTE ZA PROIZVODNJU POLIKRISTALASTIH METALONITRIDNIH I METALOKARBIDNIH VLAKANA

| Primarno vlakno | Plin | Polikristalasto vlakno |
|-----------------|------------------------------|--|
| Bornooksidno | NH_3 | bormonitridno (BN) |
| Bornonitridno | $\text{TiCl}_4 + \text{H}_2$ | titanonitridno (TiN) |
| Bornonitridno | $\text{NbCl}_5 + \text{H}_2$ | niobijevonitridno (NbN) |
| Uglijično | $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$ | bornokarbido (B ₄ C) |
| Uglijično | $\text{MoCl}_5 + \text{H}_2$ | molibdenovokarbido (Mo ₂ C) |
| Uglijično | $\text{NbCl}_5 + \text{H}_2$ | niobijevokarbido (NbC) |

Monokristalna vlakna (viskeri)

Viskeri su vrsta vlakana u kojima svako vlakno predstavlja jedan kristal. Većinom su poligonalanog presjeka, a promjer različitih vrsta viskera općenito varira od nekoliko μm do $50\text{ }\mu\text{m}$ (u pojedinačnim primjerima iznosi i $0,1\text{ }\mu\text{m}$ i $200\text{ }\mu\text{m}$). Zasada proizvodni postupci omogućuju dobivanje monokristalnih vlakana malih duljina (od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara, premda su proizvedeni i viskeri duljine $2\cdots3\text{ m}$).

Iako su mineralozi pojavu nitastih monokristala zabilježili još daleke 1574. godine, stvarno zanimanje za viskere nastalo je tek

pedesetih godina XX. st. kada su istraživači tvrtke Bell Telephone Laboratories uspjeli proizvesti monokristalno kositreno vlakno. Čvrstoća takva vlakna bila je blizu teorijske vrijednosti koja se može izračunati za čvrste tvari na temelju međutomnih razmaka, a tome je najbliži monokristalni oblik tvari. S vremenom su od mnogih dobivenih viskera komercijalno najvažniji postali korundi, silicijevokarbidi, kremeni i grafitni viskeri.

Korundni visker ubičajan je naziv za monokristalno vlakno od $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Načelno se dobiva zagrijavanjem rastaljenog aluminija u struji vodika (uz vrlo malo vode) na temperaturi od $1300\cdots1500^{\circ}\text{C}$. Pritom se najprije stvara plinoviti AlO , koji se adsorbira na korundni supstrat i prelazi u Al_2O_3 . Tako su dobivena monokristalna vlakna promjera $2\cdots3\text{ }\mu\text{m}$ i duljine do 30 mm .

Silicijevokarbidični viskeri proizvode se od 1969. u dvije kristalne modifikacije: kao heksagonski i kubični silicijev karbid ($\alpha\text{-SiC}$ i $\beta\text{-SiC}$). Visker heksagoniske modifikacije dobiva se od silicijeva karbida koji se zagrijavanjem uz smanjeni tlak prevodi u parovito stanje te se njegove pare hvataju na supstrat od fino-praškastog lantana, pri čemu nastaju monokristali nitasta oblika. Visker kubične modifikacije u načelu se dobiva od elementarnog ugljika i silicija koji se u atmosferi klorovodika zagrijavaju na temperaturu $1200\cdots1400^{\circ}\text{C}$. Reakcijom nastali silicijev karbid taloži se u obliku viskera na supstrat, uz prinos od $\sim 1\text{ kg/8h}$.

Zbog velike čvrstoće i posebice vrlo velikog modula elastičnosti (tabl. 4) ta su vlakna u prvom redu razvijana za ojačanje kompozita, i to ne samo polimernih materijala nego i metala i keramike. Međutim, uz već spomenute tehnološke teškoće pri dobivanju vlakana potrebnih dimenzija, i pri izradbi kompozita naišlo se na teškoće pri postizanju potrebine usmjerenoosti vlakana u kompozitnim konstrukcijama. Prožimanje vlakana matricom, što je potrebno za stvaranje čvrste veze, često je nedovoljno, a posljedica toga jest nemogućnost da se u potpunosti iskoriste povoljna svojstva vlakana u takvim konstrukcijama. Unatoč velikim ulaganjima u razvoj, problemi nisu ni do danas sasvim riješeni, pa zanimanje za ta vlakna jenjava. Tome je u novije vrijeme priđeno i uspešan razvoj visokokvalitetnih keramičkih vlakana, koja u primjeni po mnogim svojstvima nadmašuju viskere.

Metalna vlakna

Od metalnih su vlakana (MF) najvažnija vlakna od čelika, aluminija, berilija i volframa. Prema strukturi to su polikristalasta vlakna jer se sastoje od mnoštva međusobno čvrsto sraslih kristala. Iznimku čine volframska vlakna, u kojima postoje područja velikih kristala, pri čemu pojedini kristali mogu obuhvaćati cijelu površinu presjeka. Da bi se mogla prerađivati u tekstilnoj industriji, promjer vlakana treba biti vrlo malen ($\sim 10\text{ }\mu\text{m}$), dok za druge namjene može biti i veći.

Dobivanje. U primjeni je više postupaka dobivanja finih metalnih niti, od kojih najveću važnost imaju izvlačenje i Taylorov postupak, a za vrpčasta vlakna rezanje folije.

Pri izvlačenju se polazi od relativno grubih metalnih niti (žica), koje se zatim radi smanjenja promjera strojno izvlače u nekoliko isteznih polja. Između pojedinih stupnjeva razvlačenja provodi se i obradba žarenjem. Tako se, npr., proizvode vlakna od čelika (kord za automobilske gume). Čelična žica promjera 1 mm elektrolički se obloži s mjesti radi osiguranja čvrste adhezije s gumom i potom izvlači dok se ne dobije promjer od $\sim 150\text{ }\mu\text{m}$. Mnogo tanje niti (promjera $<12\text{ }\mu\text{m}$) mogu se dobiti ako se izvlači snop metalnih niti uložen u bakrenu matricu, koja se nakon izvlačenja ukloni.

Taylorov postupak u načelu se sastoje u izvlačenju metala iz taline do potrebne finoće niti. U tu svrhu služi staklena cijev u koju se stavlja metal (žica ili metalni prah), a zatim zagrijte na temperaturu na kojoj se rastali metal i omogućuje razvlačenje staklene obloge do željenog promjera metalne niti. Na taj se način mogu dobiti metalna vlakna kao monofilamentne promjera $1\cdots100\text{ }\mu\text{m}$. Prema talištu metala trebaju se odabrat prikladne vrste stakla, a postupak omogućuje dobivanje vlakana i od krutih metala. Vlakna se mogu upotrebljavati zajedno sa staklenom oblogom, a staklo se može i ukloniti kemijskim jetkanjem ili mehanički, ultrazvukom.

Vrpčasta metalna vlakna (pravokutnog presjeka) dobivaju se rezanjem folije. U tu se svrhu priređuje tanka metalna folija (de-

bljine $5\cdots 50 \mu\text{m}$) koja se rotirajućim nožem reže u vrpce širine $125\cdots 250 \mu\text{m}$. Tako se, npr., proizvode aluminijiska vlakna za tekstilnu primjenu.

Svojstva i primjena. Metalna su vlakna većinom čvrsta, a neka od njih imaju i veliki modul elastičnosti (tabl. 4). Temperature taljenja su im također uglavnom visoke. Međutim, uz mehanička svojstva, glavne značajke koje određuju specifična područja njihove primjene jesu velika električna i termička provodnost.

Najvažnije područje primjene čeličnih vlakana jest ojačavanje automobilskih guma, pogonskog remenja, visokotlačnih cijevi i dr. Vlakna od nehrđajućeg čelika upotrebljavaju se i u tekstilu kao sredstvo za uklanjanje statickog elektriciteta (npr. u podne prostirace ugradjuju se u tu svrhu u masenom udjelu od $0,5\cdots 6\%$). Aluminijiska vrpčasta vlakna uglavnom se primjenjuju u tekstilnoj industriji za postizanje ukrasnih efekata na odjevnim predmetima. Vrlo fina volframska vlakna (promjera $12 \mu\text{m}$) služe kao žarne niti u električnim žaruljama te kao primarna vlakna pri proizvodnji bornih vlakana. Od sintetiziranih metalnih vlakana proizvode se vrlo učinkoviti filtri za filtriranje tekućina i vrućih plinova. Novija primjena supravodljivih vlakana od krtih slitina (npr. Nb, Sn) jest u supravodljivim magnetima. Vlakna od berilija svojedobno su zbog vrlo velikog modula elastičnosti bila vrlo zanimljiva za ojačavanje kompozita. Međutim, danas su ih iz tog područja gotovo posve istisnula visokoučinkovita termootporno polikristalasta anorganska vlakna, jer su berilijska vlakna vrlo otrovana, termički mnogo manje stabilna i vrlo skupa.

U značajnoj se mjeri metalna vlakna prerađuju u tkanine (u novije doba i pletiva) koje se primjenjuju kao filtri i sita te kao ojačavajući elementi u građevnim konstrukcijama, automobilskoj industriji, strojogradnji i elektroindustriji.

R. Čunko

LIT.: H. F. Mark, N. G. Gaylord, N. M. Bikales (eds.), Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 6. John Wiley, New York–London–Sydney 1967. – R. W. Moncrieff, Man-made fibres. Newnes–Butterworths, London 1975. – R. Bonart, H. Orth, Fasern, Struktur, u djelu: Ullmann's Encyclopädie der technischen Chemie, Band 11. Verlag Chemie, Weinheim 1976. – H. F. Mark, D. F. Othmer, Ch. G. Overberger, G. T. Seaborg (eds.), Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley, New York–Chichester–Brisbane–Toronto 1980. – Z. A. Rogowin, Chemiefaser. Georg Thieme Verlag, Stuttgart–New York 1982. – H. Batzer, Polymere Werkstoffe, Band I, II, III. Georg Thieme Verlag, Stuttgart–New York 1984/85. – M. S. M. Alger, Polymer Science Dictionary. Elsevier, London–New York 1990. – R. Bauer, H. J. Koslowksi, Chemiefaser-Lexikon. Deutscher Fachverlag, Frankfurt/M 1993. – S. K. Mukhopadhyay, High-performance Fibres. The Textile Institute, Manchester 1993.

R. Čunko D. Raffaelli I. Šmit

VODA, prirodni spoj vodika i kisika, vodikov oksid s kemijskom formulom H_2O , bezbojna kapljevinu bez boje i mirisa. Glavni je sastojak Zemljine površine jer pokriva gotovo tri njezine četvrtine (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396). Voda je i važan sastojak atmosfere i ima bitan utjecaj na klimatske prilike (v. *Klimatologija*, TE 7, str. 140).

Voda ima osnovno značenje za život na Zemlji i bila je bitna za postanak i razvoj organizama. Ona sudjeluje u fotosintезi i sastavni je dio živih organizama, gdje je njezin udio $50\cdots 90\%$. U prirodi je rijetko čista, a otopljeni organski i anorganski spojevi, koje voda prenosi, hranjivi su sastojci u biogeokemijskom kruženju tvari u prirodi. U industriji se voda primjenjuje kao sirovina, izmenjivač topline i prijenosnik tvari. Posebno je važna upotreba vodene pare u industriji i energetici (v. *Parni kotao*, TE 10, str. 164).

Molekula vode, H_2O , sastoji se od dva vodikova i jednog kisikova atoma. Prirodna je voda smjesa molekula vode koje se međusobno razlikuju po izotopnom sastavu svojih elemenata. Kako su izotopi ^1H i ^{16}O mnogo obilniji od ostalih stabilnih vodikovih i kisikovih izotopa (^2H , ^{17}O , ^{18}O), to molekula $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ čini više od $99,98\%$ svih molekula vode. Industrijski se proizvodi i voda obogaćena deuterijem, tzv. teška voda, D_2O .

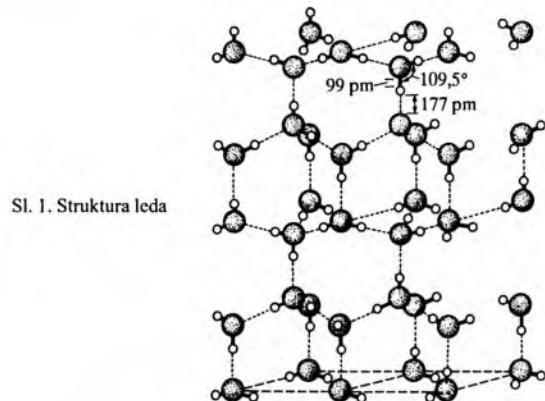
Voda nastaje prilikom izgaranja spojeva koji sadrže vodik, dakle praktički izgaranjem svih organskih tvari, zatim pirolizom hidrata i metaboličnim reakcijama u organizmu, a može nastati i izravnom reakcijom vodika s kisikom:



U molekulama vode vodikovi su atomi vezani na kisikov atom kovalentnom vezom. U kapljevinama je duljina tih veza 96 pm i one zatvaraju valentni kut od $104,5^\circ$, dok su u ledu veze dulje (99 pm), a i valentni je kut veći ($109,5^\circ$) i odgovara tetraedarskom kutu. Raspoloživo je elektrona u molekulama vode asimetričan, što je uzrok dipolnog karaktera molekule vode i vanjskog električnog polja. Dipolne molekule vode međusobno se privlače vodikovom vezom. U toj je vezi vodikov atom jedne molekule, koji ima parcialni pozitivni naboj, vezan slabom vezom s kisikovim slobodnim elektronskim parom druge molekule. Zbog dipolnog privlačenja nastaju asocijacije, odnosno polimerizacija vodenih molekula. U tako asociranoj molekuli djeluju kovalentne veze, a zbog dipolnog privlačenja i vodikove veze. Polimerizirane molekule vode stvaraju tetraedarsku strukturu. Pri zagrijavanju raspada se tetraedarska i polimerna struktura, a povećava se gustoća vode. Polimerizacija se zbiva u temperaturnom rasponu od $+4^\circ\text{C} \cdots 0^\circ\text{C}$, a raspad kristalne strukture od $0^\circ\text{C} \cdots +4^\circ\text{C}$.

Struktura vode ovisi o agregatnom stanju (para, led, kapljevina). Vodena para sastoji se od molekula vode koje se u prostoru gibaju praktički slobodno, skoro bez ikakve međusobne ovisnosti. Na temperaturi višoj od 1200°C vodena para disociira na vodikov atom i hidroksidni slobodni radikal. Koncentrirana para veće gustoće ($\sim 0,4 \text{ g/cm}^3$) zadobiva donekle svojstva karakteristična za kapljevinu vodu, pa može, npr., otopiti mjerljive količine soli.

LED se sastoji od molekula vode međusobno povezanih usmjerenim vodikovim vezama. Svaki je kisikov atom povezan preko vodikovih atoma s četiri druga kisikova atoma u tetraedarsku strukturu. Tetraedri su složeni poput sača i stvaraju heksagonske kanale, što daje šupljikavu građu leda (sl. 1). Srednji razmak među molekulama u kristalnoj rešetki leda veći je nego u kapljevitom stanju vode, pa je obujam iste mase leda za 9% veći od obujma kapljevine.



Sl. 1. Struktura leda

I molekule kapljevite vode povezane su vodikovim vezama. Smatra se da i voda u kapljevitom stanju ima pseudokristalnu strukturu, u kojoj se vodikove veze zbog termičkog gibanja molekula naizmjence prekidaju i ponovno uspostavljaju (v. *Kapljevine*, TE 6, str. 654). Zbog manjih razmaka među molekulama izraženje su elektrostatičke kohezijske sile i vodikove veze, pa se u kapljevinama stvaraju nakupine većeg broja povezanih molekula.

Teška voda, D_2O ili $^2\text{H}_2\text{O}$, voda obogaćena deuterijem (v. *Vodik*), po svojim je svojstvima vrlo slična običnoj, tzv. lakovoj vodi (tabl. 1). Udio teške vode u prirodnoj je vodi $\sim 0,015\%$, a nešto je veći u nekim slanim vodama i u morskoj vodi na većim dubinama. U smjesi lake i teške vode brza je izotopna izmjena vodika i deuterija:

