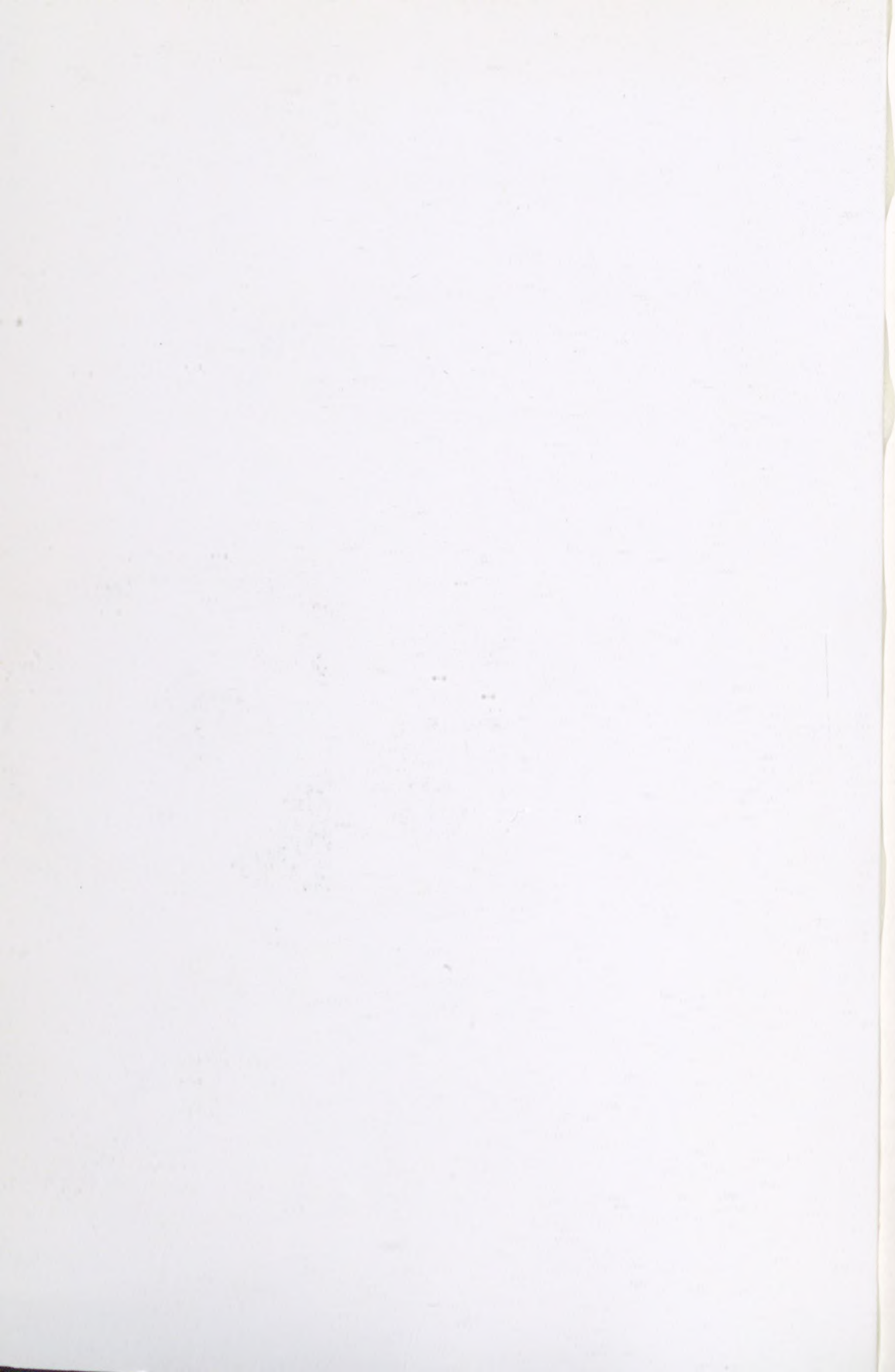


Juhász András • Tasnádi Péter

ÉRDEKES ANYAGOK ANYAGI ÉRDEKESSÉGEK

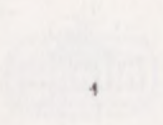


AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST



ÉRDEKES
ANYAGOK
ANYAGI
ÉRDEKESSÉGEK

Jelentés a Magyar Tudományos Akadémiának



Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 1992

7325

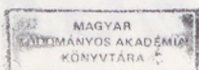
ÉRDEKES ANYAGOK ANYAGI ÉRDEKESSÉGEK

Juhász András és Tasnádi Péter



Akadémiai Kiadó, Budapest 1992

507937



ISBN 963 05 6082 8

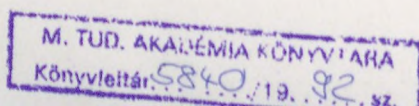
Kiadja az Akadémiai Kiadó, Budapest

Első kiadás, 1992

© Juhász András és Tasnádi Péter, 1992

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítást, a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát, az egyes fejezeteket illetően is.

Printed in Hungary



TARTALOM

ELŐSZÓ	9
--------------	---

I. A KRISTÁLYOK VILÁGA (*Rend a lelke mindennek*)

1. Amit egy leejtett kristály árult el	11
2. A láthatatlan rácsszerkezet megfigyelése	13
2.1. A történelmi jelentőségű kísérlet	17
2.2. A diffrakció matematikája	20
2.2.1. A kristálysíkok matematikai jellemzése	20
2.2.2. A Bragg-egyenlet	22
2.2.3. A Laue-egyenletek	23
2.3. A rácsatomok "közvetlen" megfigyelése kétmilliószoros nagyításban	25
3. A természet tapétamintái	27
3.1. A legegyszerűbb kristályszerkezetek – optimális helykihasználás	28
3.2. Rossz térkihasználású kristályok	33
3.3. Szerkezet és forma	35
4. "A fától az erdőt"	38
5. A kristályban kötelező a hiba!	41
5.1. Hogyan keletkeznek a rácslyukak és mennyi van belőlük a kristályban?	42
5.2. Mozgó rácslyukak	44
5.3. Rácslyukak és atomreaktorok	46
5.4. Kristályfestés rácslyukakkal	47
5.4.1. Mitől függ a kristály színe?	47
5.4.2. A színcentrumok kvantummechanikája	49
6. A kettős törés	51
6.1. Mi okozza a kristály különleges tulajdonságait?	53
6.2. Egy kis fizikatörténet	55
7. A kvarckristály hangja	57

II. HAJLIK, NYÚLIK, TÖRIK

1. Egy kis technikatörténet	60
2. Mitől függnek a fémek tulajdonságai?	60
3. A kristályok rugalmas és képlékeny alakváltozása	61
3.1. A deformáció mechanizmusa – A Frenkel-féle becslés	62
3.2. Többet ésszel, mint erővel	64
3.3. A képlékeny alakváltozás diszlokációs elmélete	66
3.4. Addig üsd a vasat, amíg meleg!	68
3.5. Hogyan növelhető a fémek szilárdsága?	70
	71

4.	Mi teszi a vasat acéllá?	72
4.1.	Sorby: a modern fémtan megalapítója	73
4.2.	Szerkezetváltozás szilárd állapotban	74
4.3.	Az acél ezer arca	76
4.4.	Egy titokzatos változás - a martenzites átalakulás	79
5.	A damaszkuszi pengék titka	81
6.	A rideg törés	83
6.1.	A törés fizikája	84
6.1.1.	A törési feszültség egyszerű becslése	84
6.2.	Cementből rugó?	87
7.	Különleges fémek	87
7.1.	Felfűjható fémek - a szuperképlékenység	87
7.1.1.	A szuperképlékeny alakváltozás feltételei	88
7.1.2.	A szuperképlékeny alakváltozás anyagszerkezeti magyarázata	89
7.2.	Szuperötvözetek	91
7.2.1.	A szuperötvözet szerkezete	91
7.3.	Az emlékező fémek	93
7.3.1.	Mire képes a nitinol?	94
7.3.2.	Az alakmemória és a martenzites átalakulás	95
7.3.3.	A nitinol hőerőgép	96
7.3.4.	A nitinol jelentősége	98
8.	Nem fémes szerkezeti anyagok	99
8.1.	Kerámiák	100
8.1.1.	A legősimbb kerámia - az égetett anyag	101
8.1.2.	Miből áll az agyag?	101
8.1.3.	A vizes agyagmassza képlékenysége, az agyagtárgyak formázása	102
8.1.4.	Az agyagégetés folyamata	104
8.2.	A szupravezető kerámiák	105
8.2.1.	A Nobel-díjas felfedezések	105
8.2.2.	A hagyományos szupravezetők	106
8.2.3.	A szupravezetés elméleti magyarázata	107
8.2.4.	Az 1-2-3 anyag	108
8.3.	A társított vagy kompozit anyagok	110
8.3.1.	A szálerősítési anyagok	110
8.3.2.	A leggyakrabban használt erősítő szálak	112
8.3.3.	A beágyazó anyagok és a kompozit gyártás	113
8.4.	A beton	114
8.4.1.	A beton alapanyaga, a cement	114
8.4.2.	Hogyan lesz a klinkerből cementkő?	115
8.4.3.	A habarcs és a beton	116

III. MITŐL MÁGNES A MÁGNES?

1.	Minden anyag mágneses!	117
1.1.	Honnan származik az anyagok mágneses tulajdonsága?	119
2.	Az Einstein-de Haas- és a Barnett-kísérlet	120
3.	Az atomi mágnesség és a periódusos rendszer	121
4.	A para- és a diamágnesség magyarázata	122
4.1.	A diamágneses szuszceptibilitás becslése	123
4.2.	A paramágneses szuszceptibilitás becslése	126
4.3.	Egy különleges kivétel az elektrongáz paramágnességére	128
5.	A vas mágnessége	130
5.1.	Hosszú távú rend a ferromágneses anyagokban	132
5.2.	Folyékony mágnes?	133

5.3.	Mi okozza a hosszú távú rendet a ferromágnesekben?	134
5.4.	A felmágnesezhetetlen anyag - az antiferromágnesesség	135

IV. FOLYADÉKOK ÉS MAKROMOLEKULÁS ANYAGOK 136

1.	Óriás láncmolekulák	136
1.1.	A láncmolekula alakja	137
1.2.	Törvényszerűség az összeviasságban	140
1.3.	Egy egyszerű becslés	141
1.4.	Egy különös anyag: az ugrógitt	143
1.5.	A mechanikai tulajdonságok és a szerkezet	145
1.6.	A gumi	146
1.6.1.	A gumimolekula szerkezete	147
1.6.2.	A gumi rugalmassága	149
1.6.3.	A gumiszál energiamérlege	150
1.6.4.	Egyszerű hőerőgép gumiszálakból	153
1.7.	Rendeződött óriásmolekulák - kristályos polimerek	154
1.8.	Színpompás fóliacsíkok	155
2.	Feszültségoptika	157
3.	Biopolimerek	160
3.1.	Legősbibb szerkezeti anyagunk: a fa	160
3.2.	Fehérjék	162
3.3.	A gyapju és a haj építőanyaga: a keratin	165
3.4.	Kötőszövetek fontos alkotórésze: a kollagén	166
3.5.	A kollagéngép	167
4.	A legközönségesebb folyadék - a víz	168
4.1.	A víz fizikai tulajdonságai	169
4.1.1.	A fázisdiagram	169
4.1.2.	Az olvadáspont csökkenésének bemutatása	170
4.1.3.	A víz néhány további tulajdonsága	170
4.2.	A vízmolekula	172
4.3.	A vízmolekulák kapcsolódása	173
4.4.	A jég szerkezete	175
4.5.	A víz szerkezete	176
4.6.	Miért könnyebb a jég a víznél?	177
4.7.	A víz 4°C-on a legsűrűbb	178
4.8.	A víz jó oldószer	178
4.9.	Miért szózzák télen az utakat?	179
4.10.	Egy meglepő kísérlet, a víz és alkohol elegyítése	179
4.11.	Fázisátalakulások nagyon tiszta vízben	180
4.11.1.	A forrás	180
4.11.2.	A lecsapódás	181
4.11.3.	A fagyás	182
4.12.1.	Víz a légkörben	183
4.12.1.	A felhők és a csapadék keletkezések	183
4.12.2.	Miért függ a telítési gőznyomás a felszín görbületétől?	184

V. FOLYÉKONY, VAGY SZILÁRD 186

1.	Mi a folyadék?	186
1.1.	Mit jelent a nyíró igénybevétel?	186
1.2.	Nyíróerők a mozgó folyadékban, a viszkozitás	187
1.3.	Nyírásra lágyuló és keményedő anyagok	190
1.4.	A makromolekulás folyadékok tulajdonságai	191

2.	A folyadékkristályok	195
2.1.	A folyadékkristályok szerkezete	196
2.2.	Mire használhatók?	198
3.	Az üvegek	199
3.1.	Az üvegek szerkezete	199
3.2.	Az olvadék túlhűtése - Az üvegállapot kialakulása	201
3.3.	A szilikátüvegek szerkezete	202
3.3.1.	Az üveggyártás	204
3.3.2.	Az üveg törékenysége	206
3.4.	A fémüvegek	208
3.4.1.	A fémüvegek szerkezete	209
3.4.2.	Elektromos és mágneses tulajdonságok	210
3.4.3.	Mechanikai tulajdonságok	211
3.4.4.	Hogyan készülnek, mire használhatók?	212
3.5.	Az üvegkerámiák	213
3.5.1.	Az üvegkerámiák tulajdonságai és alkalmazásuk	214
4.	A kvázikristályok ötös szimmetriája	215
4.1.	És mégis létezik	216
4.2.	Milyen hát az új anyag szerkezete?	217

ELŐSZÓ

Karóránkon folyadékkristályos kijelző mutatja az időt, a gáztűzhely lángját piezoelektromos kristályból pattintott szikrával gyűjtjük meg... Egyre újabb és újabb tulajdonságú anyagok jelennek meg hétköznapi környezetünkben, s mennyi mindent nem tudunk a régiekről sem! Miért szilárdul meg a beton? Miért hajlékony az edzett acél, s miért törik az öntöttvas? Mi teszi a jénai edényeket hőállóvá? Megannyi egyszerű kérdés, amelynek megválaszolása még a természet-tudományokban jártas olvasó számára is nehézséget jelenthet.

A felvetett kérdések egy új tudományág, az anyagtudomány témakörébe tartoznak. Az anyagtudomány kifejlődése a XX. század elejére tehető. Ettől kezdve tudjuk ugyanis az anyagok szerkezetét és tulajdonságait atomszerkezeti alapon értelmezni. Az anyagtudomány azonban, ha más tudományágakba rejtve is, már évszázadokkal előbb is létezett. Fontosságát az emberi fejlődésre gyakorolt döntő hatása indokolta.

Ennek alátámasztására szabad fordításban felidézzük Georgius Agricola német bányorvos 1556-ban közzétett gondolatát. (A könyvet közel két évszázadon keresztül használták a bányászat és kohászat alapvető kézikönyveként.)

Ha az emberiség többé nem használná a fémeket, akkor nemcsak a jelenlegi kultúrához méltó élet, hanem az egészség megőrzésének lehetősége is megszűnne. Ha nem lennének fémek, akkor az ember élete a vadállatokéhoz képest is szánalomra méltóvá válna. Vissza kellene térni a makkok, bogyók és fűvek fogyasztásához. Az emberek éjszakánként pusztá kézzel vájt üregekben aludnának, napközben pedig vadállatként kóborolnának az erdőben és a mezőkön. Van-e hát olyan örült, aki a fémeknek a táplálkozásban, ruházkodásban és az emberi élet védelmében betöltött szerepét semmibe véve ezt a jövőt választaná?

Agricola közel négyszáz éves gondolatai kis kiegészítéssel, de ma is érvényesek. A fémek mellett sok egyéb természetes és mesterséges eredetű anyag biztosítja a XX. századi életforma fenntartását.

Az emberiség létszámának növekedése a múlt század elejétől kezdve rohamosan gyorsul. Ezzel párhuzamosan gyorsul a technikai fejlődés is, amelyet egyre újabb és újabb anyagok kifejlesztése és előállítása tesz lehetővé. Az 1800-as évek után bekövetkezett robbanásszerű népesedést olyan anyagok megjelenése támo-

gatta, mint az alumínium, a modern acélok, műanyagok és félvezetők. Az új anyagok lehetővé tették olyan, az életvitelünket döntően meghatározó találmányok megvalósulását, mint a gőzgép, a rádió és a televízió, a gépkocsi és a repülőgép, valamint a számítógépek. Az új anyagok és találmányok megjelenése ma is tart. Jelenleg a kerámiák és a kompozit anyagok tulajdonságai biztatnak újabb nagy technológiai áttöréssel.

Meggyőződésünk, hogy az anyagtudományi ismeretek az elismert általános műveltségi anyagban jóval csekélyebb mennyiségben szerepelnek, mint fontosságuk alapján indokolt lenne. Ennek kompenzálására az "Érdekes anyagok, anyagi érdekességek" című könyvecskében az anyagokkal kapcsolatos hétköznapi kérdésekre adható válaszokból gyűjtöttünk össze egy csokorra valót. A könyvben azt szeretnénk megmutatni, hogy a környezetünkben található természetes és mesterséges anyagoknak sokféle tulajdonsága megérthető speciális alapképzettség nélkül is.

A könyv anyagának válogatásakor kétféle szempont vezetett bennünket; egyrészt igyekeztünk olyan érdekességeket összegűjteni, amelyek a hétköznapi tapasztalatokkal szemben váratlan anyagtulajdonságokkal kapcsolatosak (emlékező fémek, ugrógitt, damaszkuszi acél stb.), másrészt a rendezett szerkezetektől a rendezetlen felé haladva meg kívántuk mutatni, hogy az egyes anyagtípusok tulajdonságai milyen általános elvek alapján érthetők meg. Az anyagi tulajdonságok értelmezésekor általában egyszerű, fizikai alapelvekből kiinduló kvalitatív modellekre támaszkodunk.

Mint minden válogatás, természetesen ez sem teljes, s alapvetően tükrözi a szerzők érdeklődési körét. Reméljük azonban, hogy sikerült olyan anyagszerkezeti összeállítást adnunk, amely indíttatást ad az olvasónak arra, hogy a hétköznapi életben felvetődő problémákat hasonló szellemben végiggondoljon.

Befejezésül köszönetet mondunk mindazoknak, akik a könyv kiadását lehetővé tették. Köszönettel tartozunk Hatta Gizella, Juhász Ágnes és Soós Károly fizikusoknak, akik hasznos tanácsaikkal segítettek bennünket. Megköszönjük továbbá Nagy Tibor szerkesztőnek a kézirat gondos megszerkesztését és az Akadémiai Kiadónak a mű kiadását.

Budapest, 1991. február

A szerzők

I. A KRISTÁLYOK VILÁGA

(Rend a lelke mindennek)

1. Amit egy leejtett kristály árult el...

Az emberek már évezredek óta csodálják és gyűjtik a természetben található szép kristályokat. A "kristály" görög eredetű szó (krisztalosz), eredetileg jeget jelentett. Ma, hétköznapi értelemben a szabályos formájú, síklapokkal határolt ásványképződményeket nevezzük kristályoknak. Érdeemes felkeresni egy-egy nagyobb ásványgyűjteményt (ilyen például a Magyar Nemzeti Múzeum épületében található). A tárlókban sorakozó sokféle színű és formájú kisebb-nagyobb kristálybámulatba ejti a szemlélőt. Jogos a csodálat: a természet minden egyes kristályban egy-egy remekművet alkotott. Szinte hihetetlen, hogy az áttetsző hatszögletű kvarckristály, a kocka alakú kősó, az aranyárga pirit (vas-szulfid) (I.1. ábra, színes fotó) minden emberi beavatkozás nélkül "magától" alakult ki, és a szabályszerűség ismétlődik kristályról-kristályra. A leghíresebb ékszerész is büszke lenne rá, ha olyan változatossággal tudna tükörsima lapú szabályos ékkövet csiszolni, mint amilyen egy-egy eldugott sziklaüregekben kialakult kristályegyüttesben figyelhető.

A természettudósokat régóta foglalkoztatja a kristályok szabályos formája, csodálatos sokszínűsége. A gyűjteményekben felhalmozott sokféle kristályt először geometriai szempontból vizsgálták tudományos igényességgel.

A lelőhelyeken az egyes kristályok nem magányosan fordulnak elő. Általában több hasonló alakú kisebb-nagyobb kristály található együtt. Ezek a kristályok, bár első látásra hasonlóknak tűnnek, alaposabb összehasonlítás után mégiscsak különböznek. A kősó kristályai nem mind kocka alakúak. Találhatók téglatest vagy négyzetes oszlop formájúak is. A kvarckristály hatoldalú oszlopkristályainak keresztmetszete szinte soha nem szabályos hatszög, a különböző oldalak mérete rendszerint más és más. A XVII-XVIII. század krisztallográfusai hamarosan rájöttek, hogy ezek a különbségek nem igazán lényegesek. A kristálytestvérek hasonlóságát egy szigorúan érvényesülő törvény biztosítja: *a megfelelő kristálylapok mindegyik példányban azonos szöggel hajlanak egymáshoz*. Ez a lapszögek általános törvénye. A törvényt felismerve lehetővé vált az idealizált kristályalak meghatározása és azok geometriai szempontú vizsgálata.

Minden idealizált kristályalak jól felismerhető szimmetriatulajdonságokkal rendelkezik.

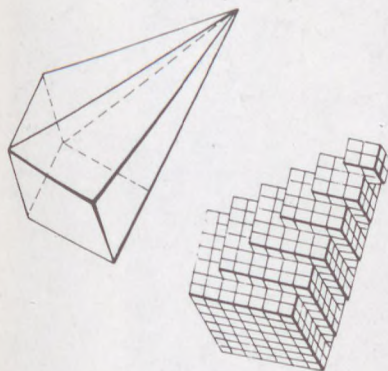
Tükörszimmetriáról beszélünk akkor, ha a kristály képzeletben keresztül szelhető olyan síkkal (gyakran több ilyen sík is van), amelynek két oldalára eső két kristályfél egymás tükörképe.

Forgásszimmetriáról beszélünk, ha létezik a kristályt keresztüldőő olyan egyenes, amely mint forgástengely körül a kristályt egy teljes fordulattal (360°) elforgatva az többször is kiindulási helyzetével egyenértékű helyzetbe kerül. E szerint másod-, harmad-, negyed- és hatodrendű forgásszimmetriák lehetségesek. Érdekes, hogy ötös vagy hetes forgásszimmetria, ami az élő természetben (pl. virágok) gyakori, a kristályok világában nincs.

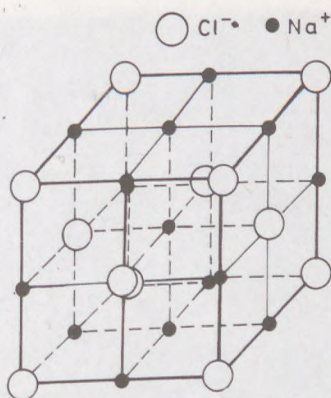
Egy kristályforma szimmetriatulajdonságait a tükrözési és forgási szimmetriák összessége határozza meg. Az idealizált kristályformák szimmetriatulajdonságai alapján a természetben található kristályokat 32 csoportba, ún. kristályosztályba lehet besorolni. A geometria segítségével így a XVIII. században lehetővé vált a kristályok csoportosítása, rendszerezése. Ez azonban nem elégítette ki a természetbúvárokat, hiszen nem volt magyarázat a geometriai szabályosság okára, a kristályformák sokféleségére.

Az első tudományos értékű elmélet a kristályok szabályos alakjának szerkezeti magyarázatára René Just Haüy francia tudós pap nevéhez fűződik. Az abbé nagy kristálygyűjteménnyel rendelkezett. Gyűjteményét állandóan bővítette, és kapcsolatban állt korának jelesebb krisztallográfusaival. A hagyomány szerint Haüy egy barátjával a kristályokról beszélgetett, amikor a beszélgetés tárgya, egy szép kalcitkristály kiesett a kezéből és eltört. Haüy, miközben a darabokat szedegette a kőpadlóról, észrevette, hogy a széttört kristályok különböző darabkái hasonlóak – romboéder formát mutatnak. (A romboéder egy olyan lapított-deformált kocka, amelynek mind a hat lapja rombusz.) Ez a felfedezés nem hagyta nyugodni, és ezután már akarattal törte dirib-darabokra gyűjteményének szebbnél szebb kalcitkristályait. Az eredmény mindig ugyanaz lett – a kalcit romboéderlapok mentén tört el. Ez a szabályosság még akkor is megvolt, amikor a kristálytörmelékét már csak nagyító alatt lehetett megvizsgálni.

Meddig lehet egy nagy kalcitkristályt egyre kisebb és kisebb romboéder darabokra aprítani? – vetődött fel a jogos kérdés. Haüy feltételezte, hogy a nagy kristály feldarabolásával előbb-utóbb el kell jutnunk egy olyan kis romboéderhez, amit már nem lehet tovább bontani anélkül, hogy a kalcit még mindig kalcit maradjon. A kalcit tehát nagyon kicsi, de mégis létező romboéder alakú téglácskákból kell hogy álljon – vallotta. Kősókristályok hasadási tulajdonságai alapján következtettek arra, hogy a NaCl-kristály parányi kockákból épül fel. Haüy és követői e néhány kísérlet eredményét úgy általánosították, hogy minden kristály valamilyen szabályos alakú, szemmel, de még mikroszkóppal sem látható, kristálytétről áll. E tanítás, bár voltak ellenzői is, mégis egyre elfogadottabbá vált a XVIII-XIX. században. Könyvünk I.2. ábrájának eredetije egy korabeli krisztallográfiai szakkönyvben található. A rajz azt magyarázza, hogy a kocka alakú kristálytétről nem csak kocka formájú kristály épülhet fel. Ilyenkor a kristálylapok nem tökéletesen simák, hanem lépcsőszerűek. A lépcsők azonban olyan parányiak, hogy nincs az a nagyító, amellyel látni lehetne ezeket – a lépcsőzött felületet hibátlan síknak látjuk.



I.2. ábra

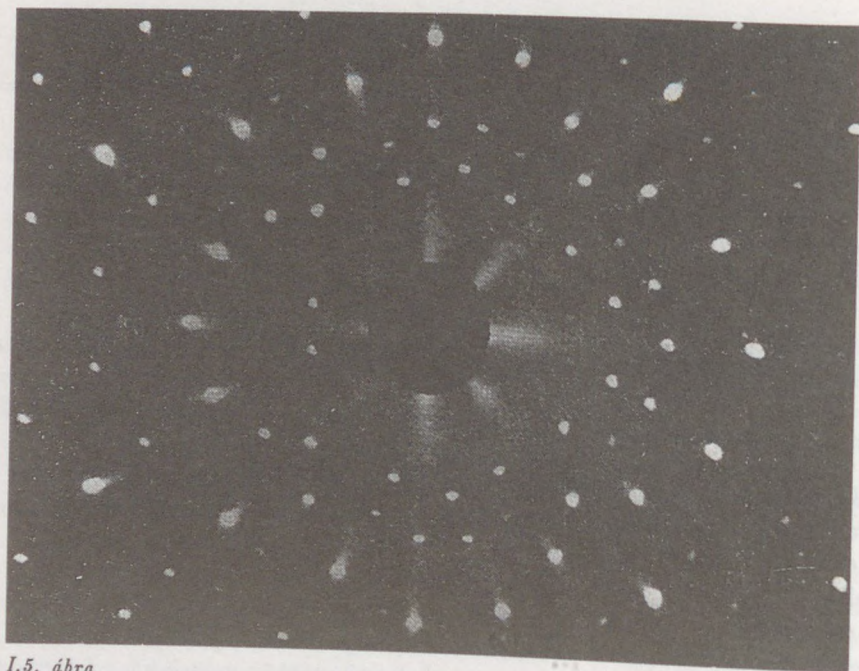


I.3. ábra

A XVIII. században Haüy jó megfigyelése alapján éles logikával következtetett a parányi kristálytégglák létezésére. Elméletének közvetlen kísérleti bizonyítéka azonban egészen a XX. század elejéig nem volt. 1912-ben Max von Laue és két munkatársa, Walter Friedrich és Paul Knipping (mindhárman német fizikusok), röntgensugárzás segítségével igazolták, hogy a tudós abbé elmélete lényegében helyes volt. A kísérletek alapján tisztázódott azonban, hogy a kristályokat felépítő láthatatlan téglácskák nem olyanok, mint a gyerekek építőkockái, vagy a házfalak téglái. Míg ez utóbbinak tényleges lapjai vannak, addig a kristálytégglák csak képzeletbeli oldallapokkal rendelkeznek. Hogyan is kell tehát helyesen elképzelni a kristályok szerkezetét? A kristályokban az atomok a tér mindhárom irányában szabályosan rendeződnek el. Ha egy kiválasztott atomtól a térben hozzá legközelebb eső hasonló atomokig egyenes vonalakat húznánk, majd ezt minden atomra megismételnénk, egy térbeli rácsszerkezet rajzolódna elénk. A kristályok szerkezetét ilyen rácsszerkezettel lehet jellemezni. E rács csomópontjaiban helyezkednek el az atomok, a képzeletben húzott rácsvonalak a geometriai teret egybevágó kis tartományokra, cellákra osztják fel. E cellák lényegében a Haüy-féle kristálytégglácskáknak felelnek meg. Az I.3. ábra a kősókristály rácsszerkezetét szemlélteti, kiemelve azt a tartományt – az úgynevezett elemi cellát, – amelyből, mint képzeletbeli téglákból az egész kristály felépíthető.

2. A láthatatlan rácsszerkezet megfigyelése

Az olvasó bizonyára sétált már késő este esőben. Ha ilyenkor az esernyő sűrű szövésű anyagán keresztül egy távoli fénylő pont, pl. messzi lámpa felé nézünk, úgy tűnik, mintha az egyetlen fénylő pont szabályosan elrendeződő szírványszínű pontsokasággá sokszorozódna (I.4. ábra, színes fotó). Ezt a jelenséget a fizikában *fényelhajlásnak*, idegen szóval *diffrakciónak* nevezik, és számunkra azért különlegesen érdekes, mert lényegében hasonló kísérlettel igazolta Max von Laue és

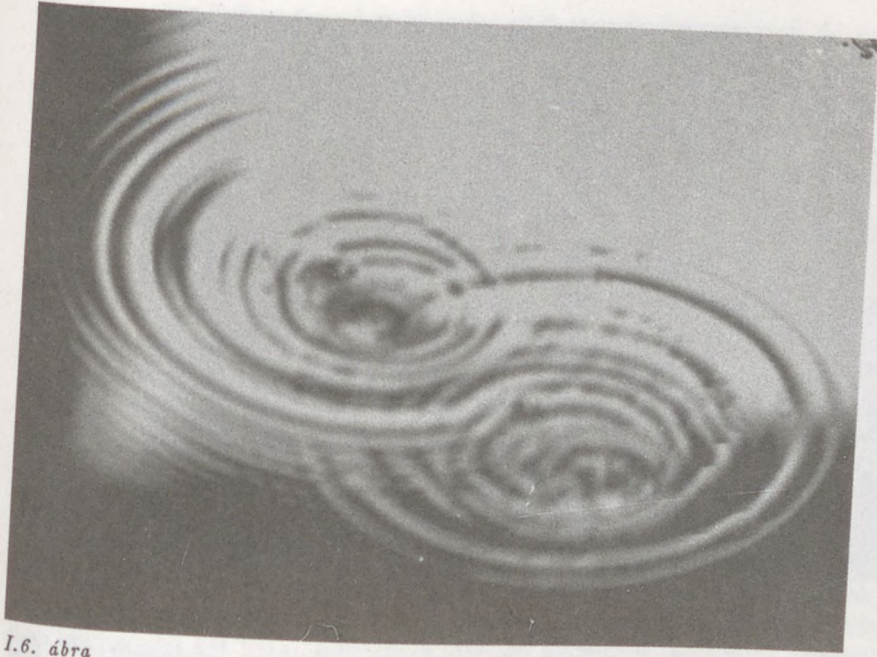


I.5. ábra

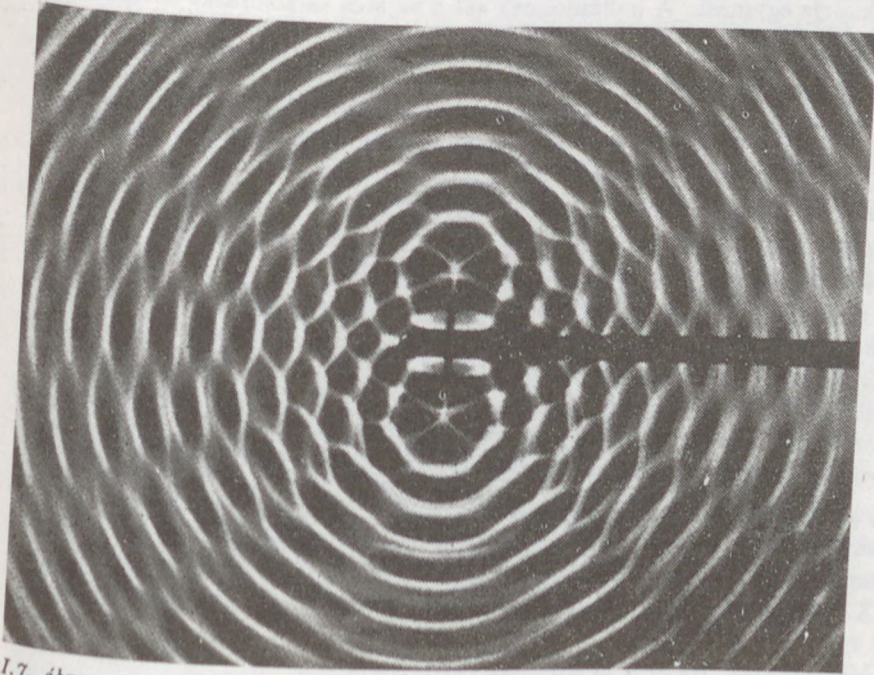
két munkatársa a kristályok rácsszerkezetét. Laue kísérletében "lámpaként" egy röntgensugár-forrás szolgált, a diffrakciót előidéző esernyőselymet pedig egy kristály helyettesítette. A kapott diffrakciós kép (I.5. ábra, fotó) hasonlít az esernyőselymen kapott elhajlási képhez. A röntgen-, elektron- vagy neutronsugarakkal végzett diffrakciós kísérletek azóta is a legfontosabb módszert jelentik a kristályos anyagok szerkezetvizsgálatában. Ebben a fejezetben azt próbáljuk érzékeltetni, hogy mi a kapcsolat a diffrakciós kép fénylő pontocskái és a kristályok rácsszerkezete között.

A magyarázatot messziről, a hullámok néhány fontos tulajdonságának felidézésével kell kezdenünk.

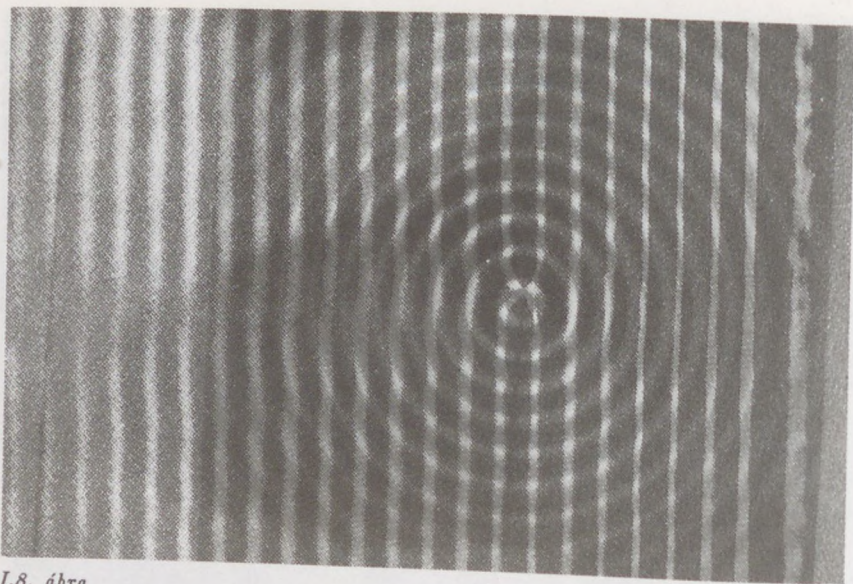
Ha egy mozdulatlan sima víztükörbe követ dobunk, a csobbanás helyéről körkörös hullámok futnak szét a felszínen. Könnyen megfigyelhető az is, hogy a különböző forrásból származó hullámok alig zavarják egymást, könnyedén átfutnak egymáson (I.6. ábra, fotó). A két hullám találkozási helyén mindössze annyi törtenik, hogy a vízfelület hullámalakját az egyidejűleg áthaladó két hullám együtt határozza meg. Így ha hullámhegy hullámheggyel, illetve völgy völgyel találkozik, az eredő hullám magassága megnő, ha hullámhegy hullámvölgyel találkozik, a vízfelszín egy pillanatra kisimul. Az I.7. ábra (fotó) a vízfelszín hullámképét mutatja. A hullámokat egy lapos tálban a vízfelületet folyamatosan rezgető két hullámforrás kelti. A két forrás egyszerre működik, a köztük lévő távolság állandó. A vízfelszín hullámképe nem egyenletes. Vannak olyan helyek, ahol erős a hullámozás, de vannak olyanok is, ahol a vízfelület szinte sima. Az előbbi helyeken a két forrásból származó hullámok úgy találkoztak, hogy hullámhegy hullámhegyre, völgy völgyre rakódott, és így a hullámozás felerősödött. A vízfelszín olyan helyeken



I.6. ábra



I.7. ábra



I.8. ábra

tűnik simának, ahol hullámhegy hullámvölgygel találkozáva semlegesíti, – úgy mondjuk, kioltja egymást. A hullámoknak ezt a sajátos találkozását nevezzük interferenciának.

Az I.8. ábra (fotó) egy víz hullámokkal végzett másik kísérlet hullámképét mutatja. A hullámokat itt a vízfelszín szabályos gyakorisággal ütögető egyenes vonalzó kelti. A hullámok párhuzamos vonulatokban követik egymást egészen addig, amíg kicsiny akadályba nem ütköznek.

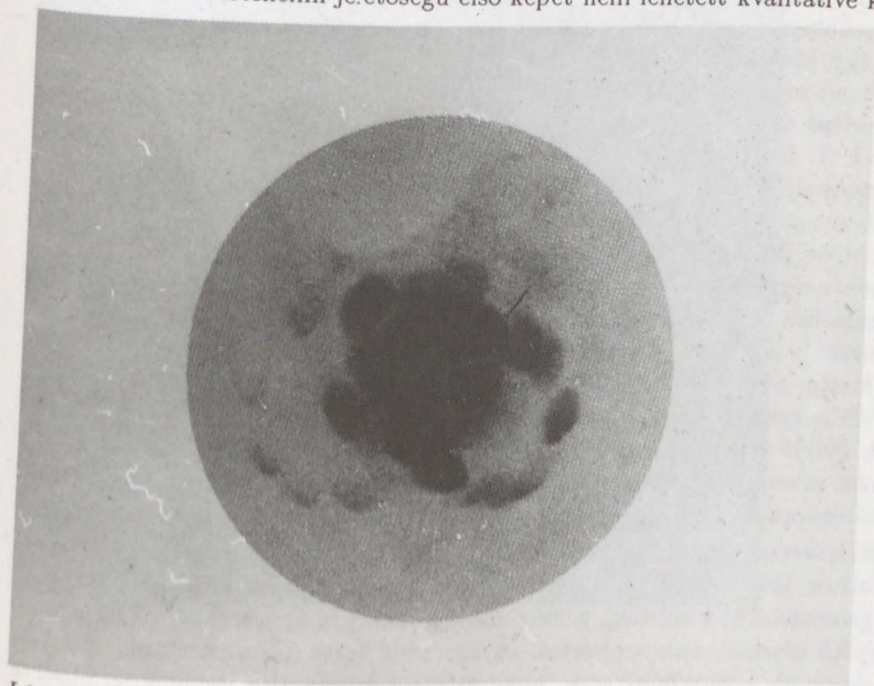
A víz felszínén ekkor – amint az az I.8. ábrán látható – a továbbhaladó egyenes hullám mellett egy, az akadályból kiinduló gyenge körhullám is megjelenik. A kicsiny akadály tehát önálló, körhullámokat kibocsátó hullámforrásként működik.

Ha az egyenes hullámok útjába több – síkrács-szerkezetbe rendezett – akadályt helyezünk el, akkor az eredeti síkhullám mellett a síkrács-szerkezet mögött az egyes akadályokról kiinduló elemi hullámok interferenciája nyomán két másik síkhullám is megjelenik. A beeső hullámok terjedési iránya e két újabb hullámvonulat terjedési iránya által bezárt szög szögfelezője. (A jelenség nehezen figyelhető meg a víztartály szélein bekövetkező visszaverődések miatt, ezért nem közlünk róla fényképet.)

A síkrács mögött a víz felszínén megjelenő interferenciakép a kristályok röntgendiffrakciós vizsgálatának egyszerű modellje. Ebben az esetben a rácsba rendezett atomok képezik az elemi hullámforrásokat. A röntgensugarak hullámtermészetét a XX. század elején interferenciakísérlettel sikerült igazolni. Ez utóbbi számunkra azért különösen érdekes, mert a kísérlet egyúttal a kristályok rácsszerkezetét is bizonyította. Haladjunk azonban lépésről lépésre!

2.1. A történelmi jelentőségű kísérlet

A századfordulóra esett, hogy Konrád Röntgen felfedezett egy addig ismeretlen, nagy áthatoló képességű sugárzást, amelyet X-sugárzásnak nevezett. E sugarakkal végzett kísérletek alapján egyre több kutató jutott arra a következtetésre, hogy a titokzatos X – vagy ahogyan azóta nevezzük – röntgensugarak – a fény-nyel rokon természetű hullámok, amelyek hullámhossza azonban jóval kisebb a fényénél. A kicsiny hullámhosszal magyarázható, hogy az X-sugarakkal a fényhez hasonlóan a sugarak hullámtermészetét bizonyító interferenciakísérletet nem sikerült elvégezni. Egy sugárzás hullámszerűségének perdöntő bizonyítéka mindig a sikeres interferenciakísérlet. Ehhez azonban az kell, hogy a sugárzás útjába a hullámhosszal közel azonos periodicitású akadálysort (rácsot) helyezzenek. A röntgensugarak interferenciájához sokáig nem találtak megfelelő finomságú rácsot. Max von Laue német elméleti fizikusban vetődött fel a gondolat, hogy a kristályok – feltételezve, hogy rácsszerkezetűek – alkalmasak lehetnek röntgensugár-interferencia kísérletekhez. Laue először számításokat végzett, megbecsülte a kristályok rácsállandóját (a periodikus térszerkezet ismétlődési távolságát), és vizsgálta a térbeli rács és az elektromágneses hullám kölcsönhatását, az interferencia létrejöttének feltételeit. Csak miután számításai biztató eredményeket adtak, fordult segítségért két fiatal, tehetséges kísérleti fizikushoz, próbálják kísérletileg igazolni eredményeit. Friedrich és Knipping egy szépen fejlett rézgálickristályt helyeztek a röntgensugárzás útjába. A próbálkozás sikeres volt, bár az I.9. ábrán (fotó) látható történelmi jeletőségű első képet nem lehetett kvalitatíve kiértékelni,



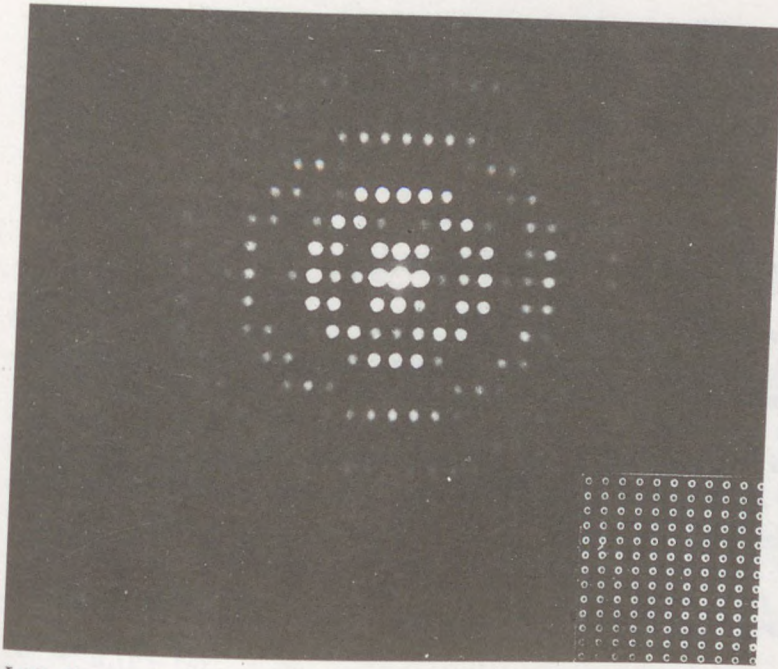
I.9. ábra

a felvétel az interferenciát egyértelműen igazolta. Ezt követően más anyagokkal is elvégezték a kísérletet, és az eredmény itt is pozitív volt, sőt hamarosan olyan minőségű képet kaptak, amely már alkalmas volt az elméleti számítások eredményeivel történő összehasonlításra is – az egyezés meggyőző erejű volt. Friedrich és Knipping kísérlete egyszerre két igen jelentős eredményt adott. Egyrészt igazolta, hogy a röntgensugarak elektromágneses hullámok, másrészt bizonyította a kristályok rácsszerkezetét. Max von Laue a kísérlet ötletéért és a diffrakciós kép elméleti értelmezéséért méltán kapta meg 1914-ben a legnagyobb tudományos elismerésnek számító Nobel-díjat.

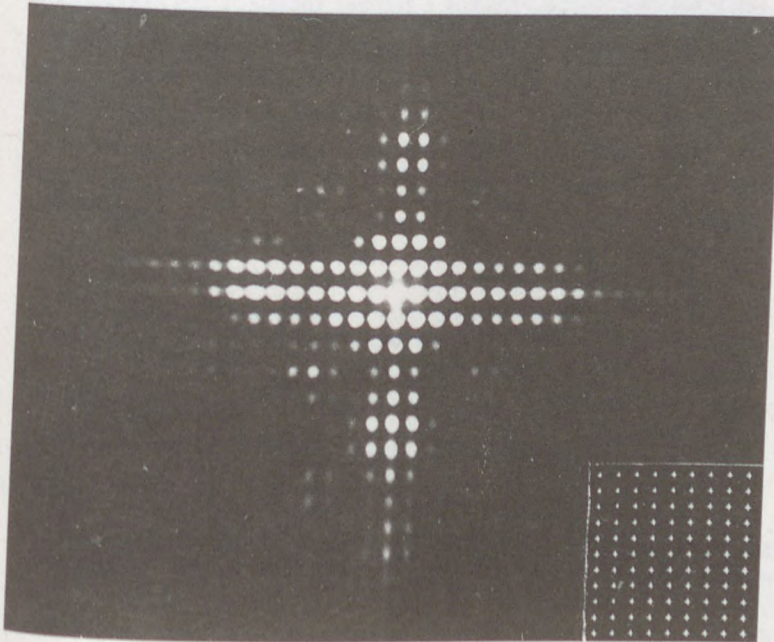
Az I.9. ábrán bemutatott első kristálydiffrakciós felvételt sok-sok újabb követte és követi napjainkban is. A feladat persze ma már nem a rácsszerkezet létének, vagy a röntgensugarak hullámtulajdonságának bizonyítása. A ma kutatói a kísérletek során kapott interferenciaképek alapján a kristályok pontos térszerkezetét határozzák meg, illetve azt vizsgálják, hogy a különböző fizikai hatások (melegítés, mechanikai terhelés stb.) hogyan befolyásolják ezt a szerkezetet. Ennek a munkának részletes leírása hosszadalmas lenne és nehéz számításokat igényelne, ezért itt néhány szemléletes optikai modellkísérlet ismertetésével csak érzékeltetni akarjuk mit is olvashat ki a hozzáértő az interferenciaképből.

Kétdimenziós optikai rács egyszerűen készíthető úgy, hogy írógéppel szabályos elhelyezkedésű jeleket ütünk egy papírlapra, majd ezt a kétdimenziós rácsszerkezetet fotózással annyira kicsinyítjük, hogy a filmen az egyes jelek távolsága közel a fény hullámhosszának megfelelő legyen. A fénysugár útjába elhelyezett negatív film optikai rácsként szolgál, síkbeli modellje a kristály térrácsának. A diffrakciós képet a legegyszerűbben úgy figyelhetjük meg, hogy a rácsot közvetlenül a szemünk elé tartva egy távoli fényforrást nézünk. Az I.10., és I.11. ábra (fotó, Zsoldos Lehel felvétele) két különböző modellrács diffrakciós képét mutatja. A diffrakciós képek hasonlóak az esernyőselymen fellépő, a bevezetőben már említett képhez. Az I.10. és az I.11. fotók olyan rácsról készültek, amelyek négyzethálósan elhelyezett jeleket tartalmaztak. Az I.10. esetben a négyzetháló pontjaiba "+" jeleket, az I.11. esetben ugyanilyen elrendezésű "0" jeleket ütöttek írógéppel. A két képet összehasonlítva megfigyelhető, hogy a fénylő pontocskák – a diffrakciós intenzitás maximumok – egyformán négyzethálóba rendezettek. Ez a rácsponatok hasonló elhelyezkedésének következménye. A két felvétel abban különbözik egymástól, hogy az erősebb és a gyengébb megvilágítás maximumok elrendeződése más. Az I.10. felvételen, ahol a négyzetrácsot "+" jelek alkotják, a legfényesebb elhajlási maximumok is kereszt formát mintáznak. Az I.11. fotón, ahol a rácsban "0" jelek vannak, a fénylő pontocskák koncentrikus gyűrűket rajzolnak ki. A diffrakciós maximumok intenzitáseloszlásából tehát a rácsponatokban elhelyezkedő jelekre az ún. "szórócentrumokra" lehet következtetni.

A kristályszerkezetek röntgendiffrakciós vizsgálata során a szakemberek a modellkísérletben látottakhoz hasonlóan az elhajlási maximumok helyéből a kristályrács geometriai szerkezetére, a maximumok intenzitáseloszlásából pedig a kristályt felépítő atomok, atomcsoportok anyagi minőségére következtetnek. Fel kell azonban hívunk a figyelmet arra, hogy míg a kétdimenziós modellkísérletnél a



I.10. ábra



I.11. ábra

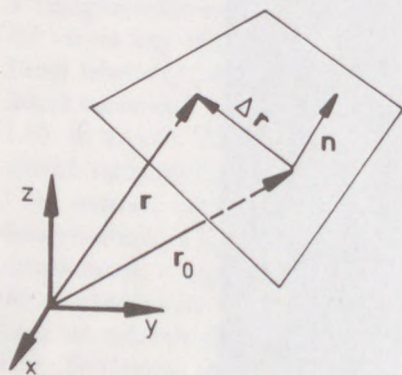
dimenziós rács és a diffrakció kép kapcsolata jóval bonyolultabb. Mindenképpen igaz azonban az, hogy a periodikus szerkezetről készült diffrakciós felvételeken szabályos pontsorozat látható. A röntgendiffrakciós felvételek kiértékelése, egy-egy ismeretlen kristályszerkezet meghatározása nagy szaktudást és gyakorlatot igénylő, fáradságos munka.

2.2. A diffrakció matematikája

Az előzőekben kvalitatív képet adtunk arról, hogy a röntgensugarak szóródásából hogyan következtethetünk a kristályok atomjainak geometriai rendjére. A leírás viszonylag elemi számítások segítségével kvantitatív szinten is megérthető. A számításokhoz csak vektoralgebrai ismeretek szükségesek, így középiskolai szakkörökön, fakultatív matematikát tanuló osztályokban minden további nélkül követhetők, s igen jól szolgálják a kristálytan és a diffrakciós anyagvizsgálat fogalomrendszerének pontosabb megértését.

2.2.1. A kristálysíkok matematikai jellemzése

Egy-egy kristálymodellt kézbe véve és különböző irányból nézve, az atomokat különböző síkokba rendezettnek látjuk. Ezeket a síkokat rácssíkoknak nevezzük.



I.12. ábra

A sík matematikai egyenlete jól ismert, s az ábra alapján az $\mathbf{n}$ normálvektor és a sík egy ismert $\mathbf{r}_0$ helyvektorú pontja segítségével az

$$\mathbf{n}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = 0 \quad (2.1)$$

alakban írható fel (I.12. ábra). Az egyenlet azt fejezi ki, hogy a normálvektor merőleges a síkban fekvő $\mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ vektorok mindegyikére. Az $\mathbf{r} = (x, y, z)$,

$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ derékszögű koordináták segítségével, valamint az $\mathbf{n}\mathbf{r}_0 = d$ állandó felhasználásával a (2.1) egyenlet az

$$n_1x + n_2y + n_3z = d \quad (2.2)$$

alakra hozható. További átalakítással a sík

$$\frac{x}{\frac{d}{n_1}} + \frac{y}{\frac{d}{n_2}} + \frac{z}{\frac{d}{n_3}} = 1 \quad (2.3)$$

tengelymetszetes egyenlethez juthatunk. Az elnevezés onnan ered, hogy

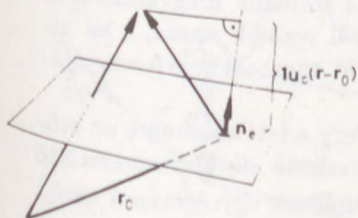
$$\frac{d}{n_1}, \quad \frac{d}{n_2}, \quad \frac{d}{n_3}$$

rendre a síktól az x, y, z tengelyekből lementszett szakaszok hosszával egyenlő. További, a sík egyenletéből azonnal adódó eredmény a következő. Válasszuk a normálvektort egységvektornak, azaz legyen $n = n_e = 1$, és tekintsük az

$$f(\mathbf{r}) = \mathbf{n}_e(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (2.4)$$

függvényt, ahol $\mathbf{r}$ a tér tetszőleges pontja. Nyilvánvaló, hogy a vizsgált sík pontjaira $f(\mathbf{r}) = 0$. Az I.13. ábra alapján adódik az is, hogy $f(\mathbf{r})$ általában az $\mathbf{r}$ helyvektorú pont és sík távolságát adja meg. A távolság előjeles; pozitív, ha $\mathbf{r}$ a síknak azon az oldalán van, amerre $\mathbf{n}_e$ mutat és negatív, ha az $\mathbf{r}$ ellenkező oldalra esik.

A sík egyenletével kapcsolatos rövid összefoglalás után térjünk vissza ismét a rácssíkokhoz. Felvetődik a kérdés, hogy mi tünteti ki a rácssíkokat egy tetszőleges síkhoz képest?



I.13. ábra

Az egyszerűség kedvéért foglalkozunk csak köbös rácsokkal, helyezzük a koordináta-rendszer origóját egy rácspontba, és a tengelyeken válasszuk egységnek a legközelebbi rácspontba mutató szakasz hosszát. Ekkor a rácssíkokat az tünteti ki, hogy vannak egész koordinátájú pontjaik. Minthogy az origót tetszőleges rácspontban felvehetjük, a kristályok leírása szempontjából az egymással párhuzamos rácssíkok egyenértékűek, tulajdonképpen csak az a lényeges, hogy milyen normálvektor irányokhoz tartozhatnak egyáltalán rácssíkok. Ezért egy párhuzam-

mos síksereg jellemzésére kiválaszthatjuk például azt a rácssíkot, amely az origóhoz legközelebb metszi mindhárom tengelyt egész koordinátájú pontban. (A tengelymetszetek tehát relatív prímek.) Az A, B, C tengelymetszetű sík egyenlete.

$$\frac{x}{A} + \frac{y}{B} + \frac{z}{C} = 1, \quad (2.5)$$

normálvektora pedig

$$\mathbf{n} = \left(\frac{1}{A}, \frac{1}{B}, \frac{1}{C} \right). \quad (2.6)$$

A kristálytanban egy rácssíksereg jellemzésére az úgynevezett Miller-indexeket használják. A Miller-indexek definíció szerint a síksereg olyan normálvektorának koordinátáival egyeznek meg, amelynek koordinátái a lehető legkisebb egész számok. A Miller-indexeket derékszögű koordináta-rendszerben formálisan úgy kaphatjuk meg, hogy a legkisebb egész koordinátájú tengelymetszetek (esetünkben A, B, C) reciprokát vesszük, $\frac{1}{A}, \frac{1}{B}, \frac{1}{C}$, közös nevezőre hozunk, majd a nevezőt elhagyjuk. Ha pl. $A = 1, B = 2, C = 3$, akkor a Miller-indexek: 6, 3, 2; $A = 2, B = 3, C = 4$ esetén pedig 6, 4, 3.

Amennyiben A, B, C páronként relatív prímek (ilyen előállítás nem mindig lehetséges), akkor a Miller-indexek BC, AC, AB .

2.2.2. A Bragg-egyenlet

A kristályra eső és onnan visszaverődő röntgensugár különböző irányokban vett erősödésének, illetve gyengülésének szokásos, bár kissé formális magyarázata a következő. A röntgensugár a rácssíkokról mint tükrökről verődik vissza, s az intenzitás változása a különböző mélységből visszaverődő sugarak interferenciájának eredménye.

Az I.14. ábra alapján egyszerűen meghatározhatjuk egy adott síksereg az erősítés feltételét. Két szomszédos, d távolságban elhelyezkedő síkról visszaverődő sugár akkor erősíti egymást, ha útkülönbségük a hullámhossz egységszámú többszöröse, azaz

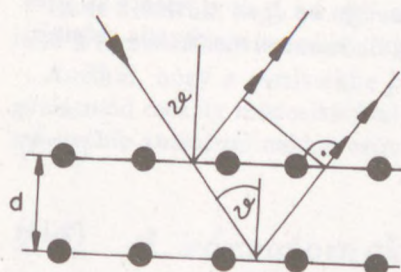
$$\frac{2d}{\cos \vartheta} - 2d \cdot \operatorname{tg} \vartheta \cdot \sin \vartheta = k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.7)$$

ahonnan egyszerűen adódik a

$$2d \cos \vartheta = k\lambda \quad (2.8)$$

Bragg-egyenlet.

A további rácssíkokkal azért nem foglalkozunk, mert ha két szomszédos sík esetén teljesül az erősítés (2.8) feltétele, akkor bármely két sík esetén is teljesül. Az eredmény összhangban van a kísérleti tapasztalatokkal, bár a rácssíkokról való

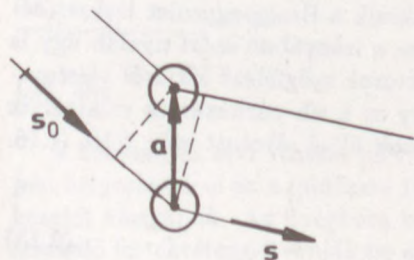


I.14. ábra

visszaverődés okát nem magyarázza. Megjegyezzük még, hogy a levezetés során felhasználtuk azt, hogy a röntgensugarak gyakorlatilag törés nélkül hatolnak át az anyagokon.

2.2.3. A Laue-egyenletek

A röntgendiffrakció kissé bonyolultabb, de fizikailag sokkal mélyebb értelmezése a következő. A kristályra eső röntgensugarakat az atomok minden irányban szórják. A diffrakciós felvételen e szórt sugarak interferenciájának eredménye látható. Maximális erősítést akkor kapunk, ha bármely két atomról szóródó sugarak erősítik egymást. Válasszunk ki két egymástól a távolságban elhelyezkedő atomot. Legyen a beeső sugár irányába mutató egységvektor s_0 a vizsgált irányba mutató pedig s .



I.15. ábra

A szórt sugarak az I.15. ábra szerint akkor erősítik egymást, ha a találkozó hullámok fáziskülönbsége 2π egészszámu többszöröse. A fáziskülönbség a beeső hullámok s_0 és a szórt hullámok s útkülönbségét felhasználva $\frac{2\pi}{\lambda} a(s - s_0)$, vagyis az $S = s - s_0$ jelöléssel az erősítés feltétele a

$$\frac{2\pi}{\lambda} Sa = 2k\pi \quad (2.9)$$

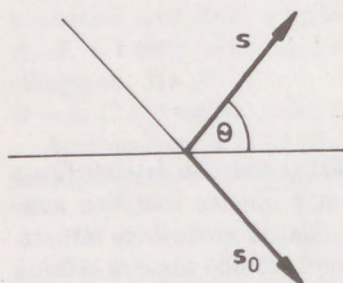
alakban fogalmazható meg. Ha az $\mathbf{a}$ vektor az x tengely mentén elhelyezkedő két szomszédos atomot összekötő vektor, akkor az erősítés feltétele bármely az x tengely mentén elhelyezkedő atomra teljesül. Hasonlóképpen adódik az y és z tengelyek mentén elhelyezkedő atomokra az erősítés feltétele, így ha $\mathbf{b}$ és $\mathbf{c}$ jelenti az y és z tengelyek mentén a szomszédos atomok távolságát, akkor a maximális erősítési irányokat a

$$\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{a} \mathbf{S} = 2k\pi \quad k = 1, \dots \quad (2.10)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{b} \mathbf{S} = 2l\pi \quad l = 1, \dots \quad (2.11)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{c} \mathbf{S} = 2m\pi \quad m = 1, \dots \quad (2.12)$$

úgynevezett Laue-egyenletekből álló egyenletrendszer megoldásai adják.



I.16. ábra

Megmutatjuk, hogy a Laue-egyenletből következik a Bragg-egyenlet levezetésének alapfeltétele. Az I.16. ábra mutatja, hogy az $\mathbf{s}$ irányában szórt nyaláb úgy is felfogható, mintha a szórt nyaláb az $\mathbf{s}$ és $\mathbf{s}_0$ vektorok szögfelező síkjáról visszaverődve jönne létre. Azt kell csak belátnunk, hogy ez a sík párhuzamos valamelyik rácssíksereggel. Jelöljük ϑ -val az $\mathbf{s}$ és $\mathbf{s}_0$ vektorok által alkotott szög felét (I.16. ábra). Ekkor $|\mathbf{s}| = |\mathbf{s}_0| = 1$ felhasználásával

$$S = 2 \sin \vartheta \quad (2.13)$$

Jelöljük továbbá az $\mathbf{S}$ vektor és a koordinátatengelyek által alkotott szögek koszinuszait α, β, γ -val, és válasszunk olyan mértékegységeket a tengelyek mentén, hogy $a = b = c = 1$ legyen. Ekkor a Laue-egyenletek a

$$2\alpha \sin \vartheta = k\lambda \quad (2.14)$$

$$2\beta \sin \vartheta = l\lambda \quad (2.15)$$

$$2\gamma \sin \vartheta = m\lambda \quad (2.16)$$

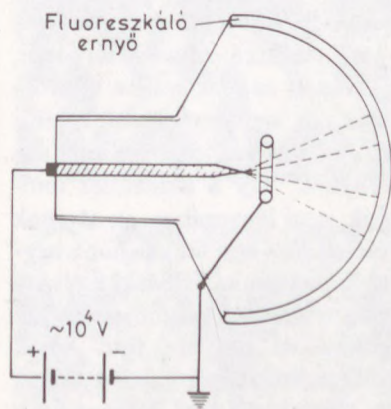
alakot öltik, azaz $\alpha \sim k$, $\beta \sim l$, $\gamma \sim m$. Vegyük észre, hogy az S vektor éppen az s, s_0 vektorok szögfelezősíkjának normálvektora, s ez a sík egyben a kristály egy rácssíkja is, hiszen párhuzamos a k, l, m . Miller-indexű (normálvektorú) síkkal.

Ezzel beláttuk, hogy az atomokról szóródó nyalábok interferenciája megfeleltethető a rácssíkokon visszaverődő nyalábok interferenciájának.

Anélkül, hogy a részletekbe belemennénk, megemlítjük, hogy a Laue-féle tárgyalásmód csekély módosításával figyelembe vehető az is, ha a rácspontokon a beszó nyaláb anizotrop módon szóródik.

2.3. A rácsatomok "közvetlen" megfigyelése kétmilliószoros nagyításban

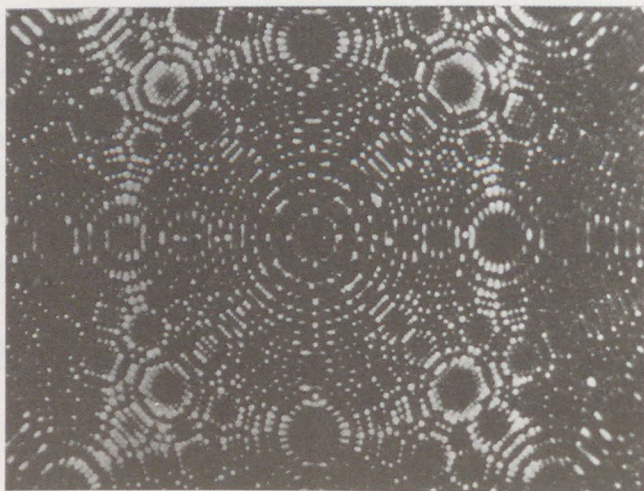
Az 1960-as években új szerkezetvizsgálati módszert fejlesztettek ki. A "tériónmikroszkóp" közel kétmilliószoros (!) nagyítása lehetőséget nyújt arra, hogy egyes fémek kristályrácsba rendeződött atomjait közvetlenül megfigyelhessük.



I.17. ábra

A berendezés elvi vázlata az I.17. ábrán látható. Gömb alakú üvegbura közepén helyezkedik el az a midőssze 100 nm átmérőjű tűhegyes fémcsúcs, aminek szerkezetét vizsgáljuk. Az üvegbura belső felületét a TV képernyőhöz hasonlóan fluoreszkáló festékréteggel vonják be és leföldelik. A burából leszívattyúzzák a levegőt, majd a vákuumba igen kis mennyiségű (mintegy 0,002 Torr nyomású) hélium- vagy argongázt juttatnak. A mikroszkóp működésbe helyezésekor a középső fémtűt cseppfolyós héliummal lehűtik, majd több tízezer voltnyi feszültség pozitív pólusára kapcsolják. A fluoreszkáló ernyőn fénylő pontocskák szabályos rendszere rajzolja elénk a fémtű-kristályok felületén elhelyezkedő atomokat (I.18. ábra, fotó).

A tériónmikroszkóp működése az elektromos csúcs hatásán alapul. A hegyes csúcson az elektromos térerősség megsokszorozódik, és olyan naggyá válik, hogy a közelébe kerülő nemesgázatomokról elektront szakít le, ionizálja azokat. A pozitív töltésű nemesgázionokat a pozitív csúcs elektromos tere eltaszítja. Az ionok



I.18. ábra

az ionizáció helyéről sugárirányban száguldanak a földelt üvegbura felé és becsapódnak a festékrétegbe. A becsapódás helyén a fluoreszkáló festék felvillan, fényt bocsát ki. A pozitívan töltött kristálycsúcs felületén az elektromos térerősség az atomok elrendeződésének megfelelően változik. A nemesgázatomok ionizációja ott következik be nagyobb valószínűséggel, ahol az elektromos térerősség nagyobb. Ezekről a helyekről több ion érkezik az ernyőre. Így a fémfelület ionizálóképességének atomi léptékű térképe vetődik elénk, ami lényegében az atomok elrendeződését tükrözi. A térionmikroszkópos felvételen egy-egy fénylő pont egy-egy atomnak felel meg. Ha a fémtű melegszik, a fénylő pontocskák foltokká olvadnak össze. Ez jelzi, hogy az atomok hőmozgása miatt a felület lokális ionizációs képessége is folytonosan változik, az egyes atomokról az ernyőre jutó ionok becsapódási helyei egyre inkább átfedik egymást. Térionmikroszkóppal a fémek felületének atomelrendeződéséről kapunk képet. A mélyebben levő atomrétegek szerkezetét úgy vizsgálják, hogy a tű gyors felfűtésével a legfelső atomokat elpárologtatják, így egyre újabb és újabb rétegek kerülnek a felszínre. A térionmikroszkópnak az ötvözetek kutatásában és különböző kristályhibák vizsgálatában van döntő szerepe.

Bár működése könnyen megérthető, felépítése egyszerűnek tűnik, a térionmikroszkóp mégis a legdrágább anyagvizsgáló berendezések közé tartozik. Ennek első sorban az az oka, hogy a folyamatos üzemeltetés biztosításának igen kemény feltételei vannak. Nehéz a vizsgálandó fémből kellő vékonyságú tűhegyet formálni, a bura leszívattyúzásához és a megfelelő nyomású gázatmoszféra biztosításához tökéletes vákuumtechnikai berendezések szükségesek. Nehéz megoldani a vizsgálatok alatt a minta folyamatos hűtését, valamint az újabb és újabb rétegek felszínre hozatalát biztosító pontosan szabályozható fűtést. A vázolt technikai problémák és a megoldásukhoz szükséges tetemes költségek miatt ez ideig hazánkban térionmikroszkóp nem működik.

3. A természet tapétamintái

M. C. Escher grafikusművész sajátos alkotásokkal lett világhírű. A legváltozatosabb motívumokból, mesebeli szörnyek, angyalok, egzotikus állatok, virágok stb. olyan színes mintákat rajzolt, melyek szabályosan ismétlődve úgy fedik le a síkot, hogy közben a legkisebb felület sem marad rajzolat nélkül. Escher gyűjteményes albumát



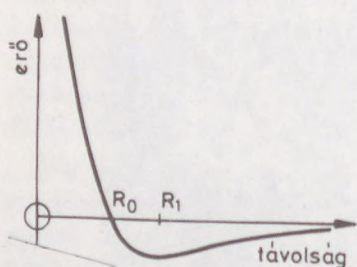
I.19. ábra

az egész világon ismerik. Matematikusok, krisztallográfusok elemzik, a laikusok csodálják a geometria rendjébe foglalt művészi ötletességét. Az I.19. ábrán, Escher néhány ötletes mintáját mutatjuk be. A minták szigorú szabályossága az első pillantásra szembetűnő, a szerkezet szimmetriatulajdonságainak meghatározása azonban már nem is olyan egyszerű feladat. Az ábrán bejelöltük a szerkezetre jellemző forgásszimmetria-tengelyek helyét és a mintáknak azt az alaptartományát (elemi celláját), amelyet ha egymás mellé illesztve megsokszorozunk, a tapéta tetszőleges méreteig folytatható. A lehetséges szimmetriakombinációk alapján a tapétamintákat 17 csoportba lehet rendezni. Ez tisztán geometriai szempontú korlátozás, az ismétlődő motívumoknak számtalan variációja lehetséges. Escher művészi fantáziáját dicséri az albumában megjelent mintegy negyven különféle minta.

Escher tapétamintái sok szempontból párhuzamba állíthatók a szabályos rácsszerkezetű kristályokkal. Egy kis túlzással azt is mondhatnánk, hogy a kristályok nem egyebek, mint a természet atomokból, molekulákból kirakott térbeli tapétamintái. Változatosságuk messze felülmúlja Escher ötletességét. A szimmetriatulajdonságok kombinációja szerint tisztán geometriai szempontú osztályozás 230 különféle rácsot különböztet meg. A természet valamennyi kristálya besorolható e 230 változat valamelyikébe. A térbeli minták száma tehát jóval nagyobb, mint az Escher által használt 17 alapminta. A közel 100 féle atom, a belőlük kialakuló alcsoportok, molekulák sokasága pedig már végtelenre növeli a természet térbeli mintáinak gazdagságát.

3.1. A legegyszerűbb kristályszerkezetek – optimális helykihasználás

Az atomok kristályrácsba rendeződése annak a kisiskolás korban tanult ténynek a következménye, hogy az atomi részecskék erővel hatnak egymásra. A kristály-



I.20. ábra

szerkezetek vizsgálatakor az atomokat parányi golyóknak képzeljük el. A legegyszerűbb esetekben bármely irányból közelítünk egy golyó-atomot a másikhoz, a köztük ébredő erő mindig ugyanolyan lesz. Az I.20. ábrán sematikusán ábrázoltuk a két atom közti erőt az atomok távolságának függvényében. A grafikon értel-

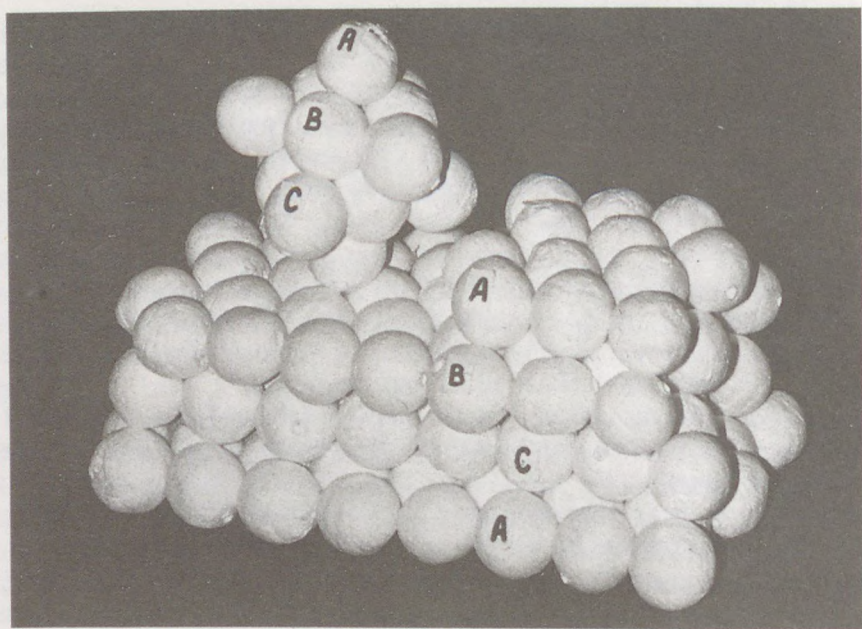
mezése a következő: a koordináta-rendszer kezdőpontja jelöli az egyik atom középpontját, a másik atom ehhez képest különböző távolságokban lehet. Ezt a vízszintes tengelyen tüntetjük fel. A függőleges tengely pozitív irányában a taszítóerőt, negatív irányában a golyók közti vonzóerőt ábrázoljuk. Igen távoli atomok között az erőhatás elhanyagolhatóan kicsiny. Ahogyan a két atomot közelítjük egymáshoz (r értéke csökken), eleinte egyre inkább vonzzák egymást. A vonzóerő $r = R_1$ távolságban a legnagyobb, majd csökkenni kezd. Az $r = R_0$ helyen az atomok között nem mérhető erőhatás. Itt jegyezzük meg, hogy R_0 rendszerint csak kevésbé tér el a golyónak tekinthető atom átmérőjétől. Az $r \leq R_0$ tartományban az atomok taszítják egymást. A grafikon alapján nyilvánvaló, hogy két egymás közelében levő atom, ha semmi sem akadályozza őket, $r = R_0$ távolságban helyezkedik el, az atomokat jelképező golyók szinte érintkeznek egymással.

Mit mondhatunk, ha nem kettő, hanem nagyon sok egyforma, egymással kölcsönhatásban álló atom halmazát vizsgáljuk? Hogyan helyezkednek el most az atomok egymáshoz képest?

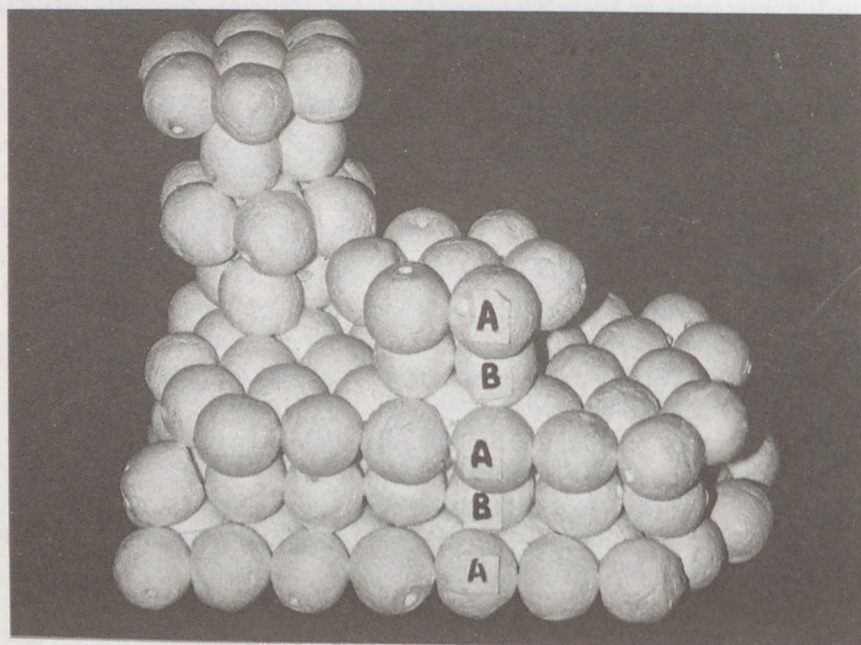
Könnyen belátható, hogy bármelyik atomot választjuk is ki, azt a lehetőség szerinti legtöbb atom igyekszik R_0 távolságban körülvenni. Ha figyelembe vesszük, hogy R_0 a két szomszédos atom középpontjának távolsága, azaz egy golyó-átmérőnyi, meghatározható az egy-egy atomot körülvevő közvetlen szomszédok száma és lehetséges elrendeződése a térben. Egy síkban minden atomgolyót hat közvetlen szomszéd vehet körül. E réteg alatt és fölött egyaránt három golyót helyezhetünk el úgy, hogy az közvetlenül érintkezzen a központi atomgolyóval. Az optimális esetben tehát minden atomnak $6+3+3=12$ közvetlen szomszédja van. Két olyan kristályszerkezet is van, amelyben a fent leírtak megvalósulnak. A két kristályrács pingponglabda-modelljét mutatjuk be az I.21. és az I.22. ábrán.

Mindkét rács felépítéséhez először szoros illeszkedésű rétegekbe rendezzük a golyókat. Minden atomgolyót hat szomszéd fog közre. Ezeket a rétegeket úgy helyezzük egymásra, hogy a második réteg golyói az első réteg bármely három érintkező gömbje közt kialakuló kis gödrökbe süppedjenek. Az I.21. és I.22. ábrákon bemutatott két kristályszerkezet közti különbség a harmadik réteg elhelyezkedésében van. Az első esetben (I.21. ábra) a harmadik réteg golyói az első réteg golyói fölött helyezkednek el, majd a negyedik réteg a másodikkal kerül fedésbe, az ötödik ismét az első és a harmadik réteggel azonos helyzetű, és így folytatódik tovább... Ezt a szerkezetet *hatszöges szoros illeszkedésű kristályrácsnak* nevezik. A kristály elemi celláját a modellkristály utolsó rétege fölött külön kiemeltük. Hatszöges szoros térkitöltésű rács a fémek között gyakori. Így kristályosodik ki például a cink (Zn) és a kadmium (Cd).

Az I.22. ábrán bemutatott másik kristályszerkezet esetén a harmadik réteg nem kerül fedésbe az első réteggel. Tekintsük az I.23. ábra magyarázó rajzát! A rajz a második réteg atomjait mutatja. Az első réteg atomjai ezek alatt helyezkednek el. Középpontjuk helyét a rajzon *gal jeleztük. A harmadik réteg atomjai a *-gal jelzett mélyedésekbe kerülnek. A kristályban ez a hármas rétegződés szakaszosan ismétlődik. A kristályszerkezet elemi cellája egy olyan kocka, amelynek csúcaiban, illetve a lapjai közepén van egy-egy atom. Az I.21. ábra jól mutatja, hogy a kocka hogyan helyezkedik el a hatszöges golyórétegekhez viszonyítva: a kocka testátlója

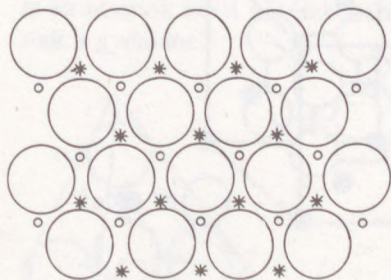


I.21. ábra



I.22. ábra

merőleges a rétegekre. Ezt a kristályszerkezetet elemi cellája után *lapközépen centrált kockarácsnak* nevezik. Ilyen rácsban kristályosodik a nemesgázok és fémek jelentős része, mint például az alumínium (Al), a réz (Cu), a nikkel (Ni), az ezüst (Ag), az arany (Au), az ólom (Pb). Itt jegyezzük meg, hogy a fématomok közti kölcsönhatás igen bonyolult, amelyről első közelítésként annyit mondhatunk, hogy a kötést a kristályba rendeződött atomok közössé vált elektronrendszere biztosítja. E kötés ad magyarázatot a fémek jellegzetes fizikai tulajdonságaira, mint pl. az alakíthatóság, jó elektromos vezetőképesség, fémes fény stb.

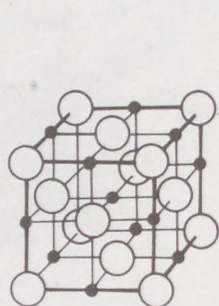


I.23. ábra

Az eddigiekben két igen egyszerű kristályszerkezetet ismertünk meg, amelyek azonos atomokból épülnek fel úgy, hogy az atomok térkihasználása a lehető legjobb legyen. Az anyagok döntő többsége különböző atomokból épül fel, a kristályokat azonban ilyen anyagok esetén is gyakran szorosan egymás mellé illeszkedő atomokból állnak. Jó példaként szolgálnak erre az ionkristályok. Ezek az anyagok pozitív és negatív ionokból állnak. A különböző ionok közt az I.20. ábrának megfelelő erők működnek. Mivel azonban a különböző ionok mérete általában jelentősen eltér, a kristályszerkezet is különbözik az eddig megismertektől. Az ionokat most is jól modellezhetjük gömbökkel. A pozitív ionoknak kisebb, a negatív ionoknak nagyobb golyó felel meg. A kristályban az ionok úgy rendeződnek, hogy az ellentétes töltések minél szorosabban és a lehető legnagyobb számban vegyék körül egymást. Az ionkristályok elektromosan semlegesek, tehát éppen annyi pozitív töltés van bennük, mint amennyi negatív. Ez a kristály tetszőleges kis darabjára igaz egészen az elemi cellákig. Ismerkedjünk meg néhány ionkristályszerkezettel.

Az ionkristályok iskolapéldája a mindenki által ismert konyhasó (NaCl). Kristályrácsát egyszeres negatív töltésű kloridionok (Cl^-) és ugyancsak egyszeres pozitív töltésű nátriumionok (Na^+) építik fel. A kloridionok jóval nagyobbak a nátriumionoknál. A kloridion-golyók sugara mintegy kétszerese a nátriumion-golyók rádiuszának. Ilyen jelentős méretkülönbség esetén a kristály úgy épül fel, hogy a nagyméretű kloridionok lapközépen centrált kockarácsot képeznek, míg a kicsi nátriumionok a kloridionok közti hézagokba ülnek bele. (A szoros térkitöltésű kristályszerkezetek leírása során nem hangsúlyoztuk ugyan, az olvasó bizonyára mégis észrevette, hogy ezekben a szerkezetekben a gömbökkel való térkitöltés optimális, de nem teljes. A golyók között kihasználatlan üres tartomá-

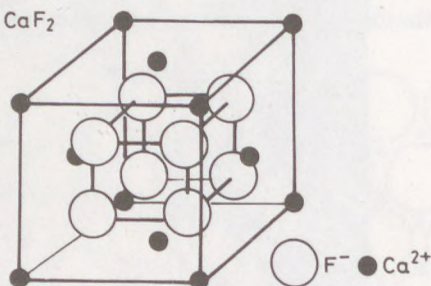
nyok vannak.) A konyhasó kristályrácsában a kloridionok lapközépen centrált kockájának élközepein, valamint a kocka középpontjában helyezkednek el a nátriumionok. Így olyan térbeli sakktáblaszerkezet alakult ki, amelyben minden nátriumiont oktaéderesen elhelyezkedő hat kloridion, és fordítva minden kloridiont ugyanígy hat nátriumion vesz körül. A konyhasó kristályrácsát az I.24. ábra mutatja.



I.24. ábra

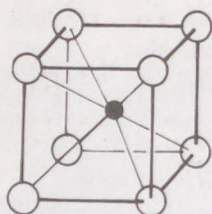


CaF_2

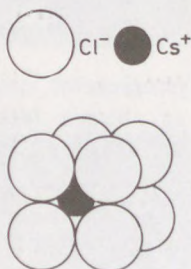


I.25. ábra

CsCl



I.26. ábra



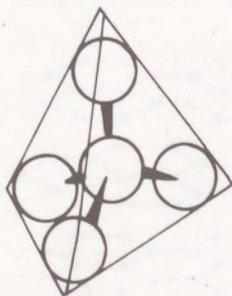
A cézium-klorid (CsCl) vegyület kémiai értelemben a NaCl közeli rokona, kristályszerkezetük mégis lényegesen különböző. Az eltérést a pozitív és a negatív ionok méretarányának megváltozása okozza. A céziumion (Cs^+) bár a kloridionnál kisebb, a nátriumionnál lényegesen nagyobb. A nagyobb céziumion köré több kloridion fér el. A kristályrácsban (I.25. ábra) minden céziumiont nyolc kloridion vesz körül. A kloridionok egy olyan kocka csúcsaiban helyezkednek el, amelynek közepén van a céziumion. A kölcsönösség természetesen itt is fennáll, minden kloridionnak nyolc céziumion szomszédja van.

Harmadik példaként ismerkedjünk meg a kétértékű pozitív töltésű kalciumionokból (Ca^{2+}) és egyszeres negatív töltésű fluoridionokból (F^-) álló kalciumfluorid (CaF_2), ásványtani nevén folypát szerkezetével.

A Ca^{2+} és F^- -ionok méretaránya közel esik a Cs^+ - és Cl^- -ionok méretarányához. A cézium-klorid-rács nyolcas koordinációja azonban itt nem valósulhat meg, hiszen az eredő töltéssemlegesség megköveteli, hogy a Ca^{2+} -ionok száma a kloridionok számának fele legyen. A kalcium-fluorid kristályrácsa (I.26. ábra) olyan cézium-klorid elrendezésű rácshoz hasonló, ahol minden második pozitív ion hiányzik.

3.2. Rossz térkihasználású kristályok

Igen sok olyan kristály található a természetben, amelyben az atomok optimálisan töltik ki a teret, vannak azonban szép számmal olyanok is, amelyek nem tesznek eleget ennek az elvnek. A jó térkitöltésű kristályokat olyan részecskék építik fel, amelyek gömbszimmetrikusak, így bármely térirányban egyenértékű kötések kialakítására képesek. Gyakori azonban, hogy egy atom csak néhány kitüntetett térirányban kapcsolódhat össze más atomokkal. Ilyenkor a kristályrács szerkezete is az atomok közti kötések irányától függ. Tipikus képviselője az ilyen kristályoknak a gyémánt.

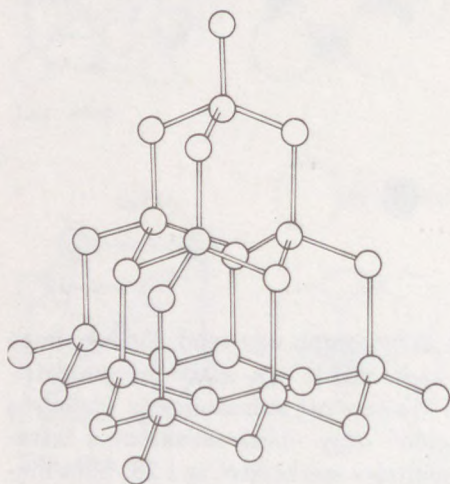


I.27. ábra

A gyémántkristály szénatomokból áll. A szénatomok úgy rendeződnek, hogy minden atom tetraéderesen négy másikhoz kapcsolódik. (A szerkezet geometriájának magyarázatához képzeljük el, hogy a kiválasztott szénatom egy szabályos tetraéder közepén helyezkedik el. A kapcsolódó négy másik szénatom a tetraéder négy csúcsában van (I.27. ábra). A gyémántrács szerkezetét az I.28. ábra mutatja. Az ábrán jól látszik, hogy az atomok milyen rossz térkihasználással, mennyire lazán helyezkednek el. Az atomok méretének és a rács paramétereinek ismeretében kiszámítható, hogy a kristálynak közel 75%-a "üres". A gyémánt közismert keménysége, magas olvadáspontja bizonyítja, hogy ez a "laza" rácsszerkezet rendkívül erős, a szénatomokat összekötő erők igen nagyok. Ennek az az oka, hogy ebben a szerkezetben az egyes szénatomokat párokba rendeződött elektronokból létrehozott igen erős ún. kovalens kötés kapcsolja össze. Az elektronpárok igen erősen helyhez kötöttek, emiatt a gyémánt rossz vezető és mechanikailag igen merev. A gyémántkristályhoz hasonló szerkezetű a szilícium és a germánium is. Ezek a kristályok az utóbbi évtizedekben óriási jelentőségre tettek szert. Belőlük készülnek a modern elektronikai berendezések legfontosabb elemei a tranzisztorok, integrált áramkörök, chipek.

A gyémántrács bemutatása után ismerkedjünk meg egy másik szénkristállyal a *grafittal*. A természetben nem ritka, hogy egyazon anyag kettő, vagy több különböző kristályszerkezetben is előfordul. Ilyen a gyémánt és a grafit, a fémes ón és a por alakú fehér ón, a szilícium-dioxid mintegy hatféle kristályos módosulata

(köztük a legismertebb a kvarckristály) stb. Ezt a jelenséget nevezik *polimorfíának* (többalakúság), a különböző kristályszerkezeteket *polimorf módosulatoknak* hívják. A polimorfia oka, hogy a kristályszerkezetet nem kizárólag az anyagi minőség határozza meg, hanem lényegesek a kristályosodás körülményei (nyomás, hőmérséklet) is. A különböző kristályszerkezetek közül egy adott hőmérsékleten és nyomáson (pl. 20°C-on és 1 bar normál légközi nyomáson) mindig csak egy a stabilis. A megváltozott körülmények következtében instabilissá vált kristályszerkezet rendszerint gyorsan átalakul. Vannak azonban olyan esetek is, amikor ez az átalakulás igen-igen lassú. Ilyenkor többféle kristályos módosulattal egyszerre találkozhatunk. A szén két módosulata közül a gyémánt csak igen magas hőmérsékleten és nagy nyomáson stabilis (ilyen körülmények között képződik). A normál körülmények közt stabilis kristályszerkezet a grafit.



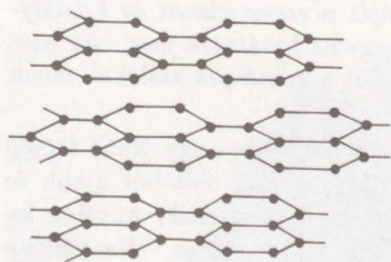
I.28. ábra

A grafitkristályban a szénatomok három egy síkban fekvő szomszédhoz kapcsolódnak. A kötésiirányok egymással 120°C-os szöget zárnak be, a kötés igen erős. Az így rendeződött szénatomok hatszöges rétegeket alkotnak. A rétegben levő atomok nemcsak páronként kötődnek egymáshoz, hanem a réteg valamennyi atomjára kiterjedő közös elektronrendszer révén is. (A közös elektronrendszernek köszönhető, hogy a grafit a fémekhez hasonlóan jó elektromos vezető.) A hatszöges rétegek félperiódusnyit elcsúszva rendeződnek egymás fölé. A rétegek távolsága mintegy 2,5-szerese a rétegben kapcsolódó két szénatom távolságának. A nagyobb távolságnak megfelelően a kristályrétegeket összetartó erő is kisebb. A gyenge kötés lehetővé teszi, hogy a rétegek elcsússzanak egymáson. A grafitkristályt ezért "puhának" érezzük. A grafit szerkezetét az I.29. ábra mutatja.

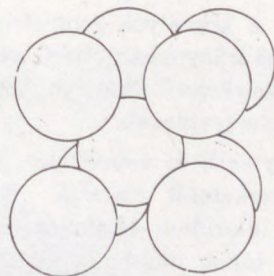
Befejezésül az egyik legfontosabb ipari anyagunknak, a vasnak a kristályszerkezetét részletezzük. A vasnak két allotrop* módosulata fontos számunkra. Az

* Allotrop módosulatnak nevezzük az ugyanazon atomokból más szerkezetben felépülő anyagokat.

egyik a magas hőmérsékleten, tiszta vas esetén 911°C felett stabilis, lapközépen centrált kockarács, amit gyakran γ -vasnak is neveznek. Ezzel az optimális térkitöltésű szerkezettel már foglalkoztunk. A másik az alacsonyabb hőmérsékleten stabilis módosulat térben középpontos kockarácsban kristályosodik. A szerkezet elnevezése az elemi cella felépítésére utal (I.30. ábra). Az elemi cella most egy olyan kocka, amelynek csúcspontjait és a kocka középpontját (testátlóinak metszéspontját) foglalják el a vasatomok. Ezt a kristályszerkezetet a kohászok a vas α -módosulatának nevezik. Az α -vas térkitöltése mintegy 9%-al rosszabb, mint a γ -vasé. Az eredeti kristályszerkezet felborulását első közelítésben azzal magyarázhatjuk, hogy az ilyen elrendezésben az atomok nemcsak közvetlen szomszédaikkal vannak erős kölcsönhatásban, hanem a másodszo­mszédokkal is. Alacsonyabb



I.29. ábra



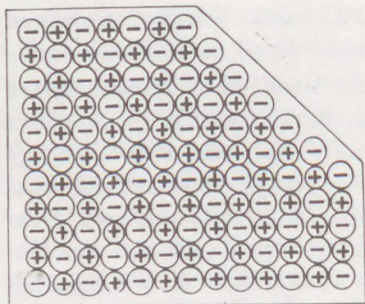
I.30. ábra

hőmérsékleten ez a szerkezet jobb kötést biztosít a vasatomnak, mint a szoros térkitöltésű γ -szerkezet, ahol a másodszo­mszéd kölcsönhatás lényegesen gyengébb.

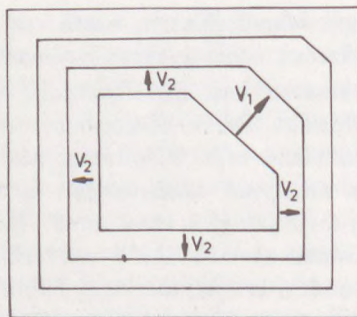
A természet számtalan térbeli tapétamintája között a most bemutatott kristályszerkezetek a legegyszerűbbek. A rövid ismertetőben igyekeztünk úgy válogatni, hogy miközben egy-egy fontos, vagy közismert kristály szerkezetét bemutatjuk, a kristályszerkezetek egy-egy nagy csoportjában érvényesülő általános szabályszerűséget is érzékeltessünk.

3.3. Szerkezet és forma

Ha egy ásványgyűjtemény kristályait figyelmesen szemléljük, előbb-utóbb feltűnik, hogy egymástól erősen különböző alakú, szimmetriájú kristályoknak is azonos az elnevezése. Ez annyit jelent, hogy ezek a különböző alakú kristályok kémiai szempontból azonos anyagúak. Az I.31. ábrán (színes fotó) különböző formájú kalcitkristályokat (CaCO_3) mutatunk be. A kristályok alakja, színe lelőhelyüktől függően változik, utalva arra, hogy a földtörténet során mikor, milyen körülmények között keletkeztek. Valamennyi kalcitkristálynak van azonban egy közös tulajdonsága, a kalcit mindig romboéder lapok mentén hasad. Ez a megfigyelés, amely Haüy-t a XVIII. században a rácsszerkezet feltételezéséhez vezette, számunkra a kristályszerkezetet ismerők számára felveti a kérdést: Mi a kapcsolat a kristály rácsszerkezete, a rács szimmetriatulajdonságai és a kristályalak



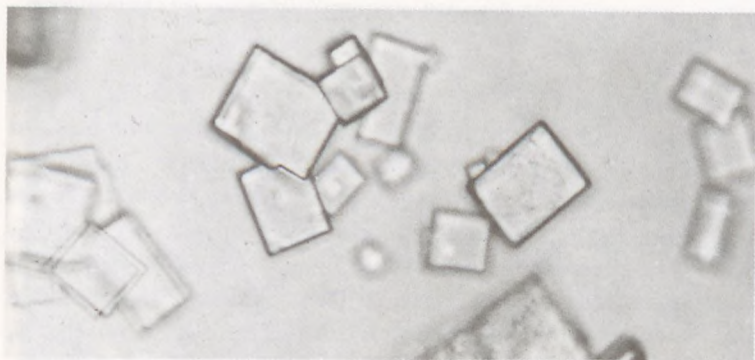
I.32. ábra



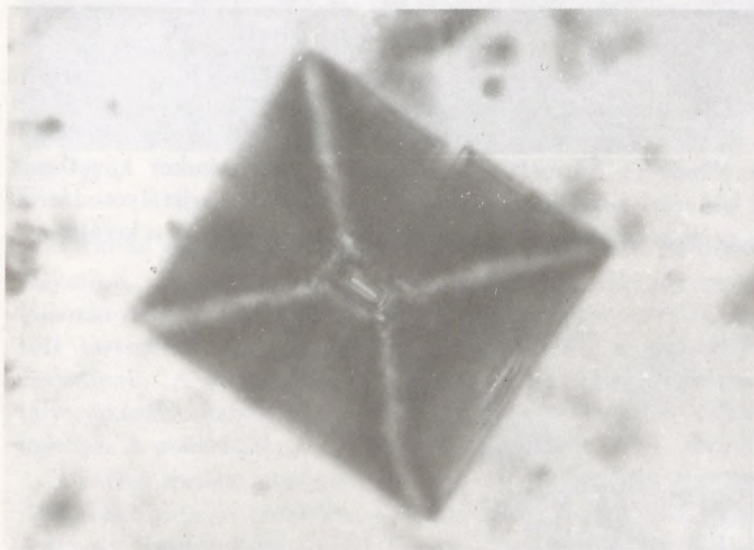
I.33. ábra

között? A válasz: a kristályok geometriai formáját a rácsszerkezet és kristálynövekedés különböző irányokban eltérő sebessége együtt határozza meg. Az azonos anyagú és rácsszerkezetű kristályok eltérő alakját a kristályok kialakulásának eltérő körülményei magyarázzák.

Nézzünk egy egyszerű és szemléletes példát! Az I.32. ábra egy NaCl (kősó) kristálycsíra rácsszerkezetét mutatja. Ez a kristály a NaCl-oldatból újabb és újabb nátrium- és kloridion csatlakozásával folytonosan növekszik, mivel a folyadékban úszkáló ionok minduntalan nekiütköznek a kristálynak. Ha például egy pozitív nátriumion olyan helyen ütközik, ahol a rácspan szintén pozitív ion helyezkedik el, az ütköző ion az elektromos taszítás miatt visszalökődik. Ha olyan helyet talál el, ahol negatív ion van, akkor az ellentétes ionok közti vonzóerő odatapasztthatja a kristályhoz. Az, hogy a szerencsés helyen ütköző ion hozzáépül-e a rácshoz attól függ, hogy mekkora sebességgel, energiával rendelkezik. A kis energiájú, lassú ionokat a kristály könnyebben magába építi, mint a nagy energiájúakat. A növekedésnek ez a módja a XX. század rohanó tempójához viszonyítva kissé lassúnak tűnik, a természetnek azonban van erre ideje. A legsebbe kristálypéldányok nagyon lassan, nagyon hosszú idő alatt fejlődtek ki. Még megbecsülni is nehéz, hogy a Föld legnagyobb kristályaként számontartott berill ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), amit az afrikai Malgas Köztársaságban találtak (hossza 18m, átmérője 3,5 m), meddig növekedett. Az I.32. ábrán bemutatott kristálycsíra "ferde" lapján csak egyfajta elektromos töltés van, míg a kockalapokon pozitív és negatív töltésű ionok váltogatják egymást. A ferde lap jóval kedvezőbb feltételeket kínál az ionok megkötődéséhez, mint a többi oldal. A példaként választott kristálycsíra növekedése tehát az egyes lapok mentén eltérő. A tapasztalat szerint a kristály a ferde kristálylapra merőlegesen növekszik a leggyorsabban. Az egyenlőtlen ütemű növekedés következtében a csíra eredeti alakja megváltozik. Az I.33. ábra sematikus rajza ezt a változást szemlélteti. A rajz a növekvő kristály körvonalait mutatja azonos időtartamok után. A kristálynövekedés során a gyors növekedési irányra merőleges kristálylapok mérete csökken, míg a lassú növekedési sebességgel kitolódó lapok mérete fokozatosan nő. Egyszerű példánk általános érvényű törvényt szemléltet: *A szépen fejlett kristályok alakját a legkisebb növekedési sebesség irányára merőleges lapok határozzák meg.*



I.34 a. ábra



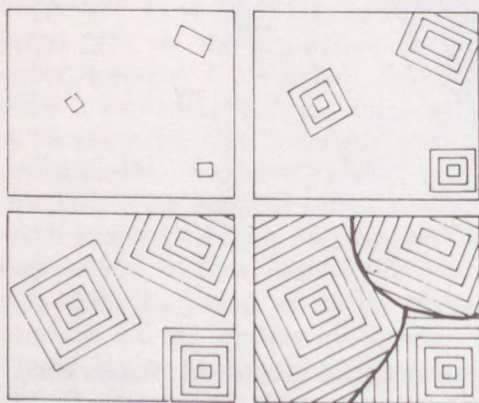
I.34 b. ábra

Hogyan lehetséges, hogy azonos szerkezetű kristályok geometriai formája különböző? A természetes kristályok nem steril laboratóriumi körülmények között nővekedtek, és ez módosíthatja a növekedés sebességét, a különböző irányokban. Meggyőzően bizonyítható ez a kősó kristályosítása során. Tiszta sóoldatból képződött kristályok tökéletes kocka, vagy téglalakúak. Ha azonban az oldatba kevés ólomion (Pb^{2+}) jut, a kocka sarkai eltűnnek, helyükön ferde oktaéderlapok jelennek meg: ritkábban az is előfordul, hogy a NaCl-kristály oktaéderalakúra fejlődik. A megváltozott kristályalak annak az eredménye, hogy a szennyezés (Pb^{2+} -ionok) az oktaéderlapok mentén a kristály növekedési sebességét lecsökkentette. Az I.34. ábra (fotó) apró kősókristályokról készült mikroszkópos felvételt mutat. Az első fotón derékszögű kockalapokkal határolt kristályok láthatók. A második képen megfigyelhető, hogy néhány kockának a sarkát sötét háromszögnek látszó oktaéderlapok vágják le.

4. "A fától az erdőt"

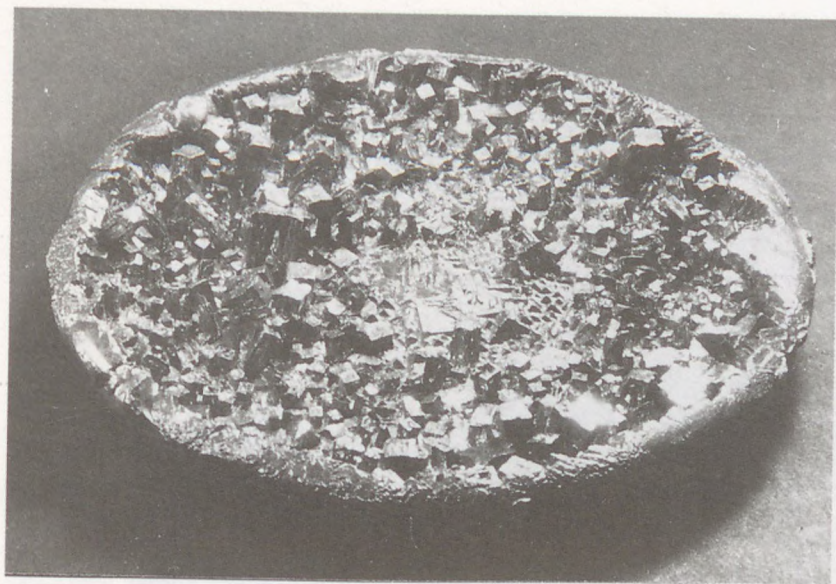
A közmondás szerint komoly hiba, ha valaki nem látja a fától az erdőt, hiszen sokkal fontosabb a fák ezreiből álló erdő, mint egyetlen fa. Ne essünk hát mi magunk sem ebbe a hibába! Eddig a sík lapokkal határolt szabályos alakokkal rendelkező, úgynevezett egykristályokkal foglalkoztunk. Nem szabad azonban megfeledkeznünk arról, hogy ezek jórészt gyűjteményekbe való érdekességek, és többnyire csupán tudományos vizsgálatok tárgyai. Hétköznapi életünkben elsősorban nem ilyen kristályokkal van dolgunk. A szervetlen szilárd anyagok döntő többsége kristályos szerkezetű. Kristályrácsba rendeződött atomok építik fel a kőzeteket, a homokszemcséket, az összes fémtárgyat, hogy csak a legfontosabbakat említsük. Egy-egy kavics vagy egy közönséges vasszög parányi, szorosan egymáshoz tapadó kristályok ezreit foglalja magában, hasonlóan ahhoz, ahogyan a fák erdőt alkotnak. Foglalkozzunk tehát most a sok-sok apró kristályból álló úgynevezett *polikristályos* anyagokkal.

A polikristályos szerkezet jóval gyakoribb a természetben, mint a szabályos alakú kristály. Hogy ezt megértsük, a kristályosodás folyamatát kell kicsit részletezni. A kristályképződés olvadékok hűtésekor vagy oldatok túltelítésekor következik be. Az egyszerűség kedvéért beszéljünk most olvadékokból való kristályosodásról, megjegyezve azt, hogy az oldatokból is nagyjából hasonlóan történik a kiválás.



I.95. ábra

A folyékony állapotú olvadékban kimutatható az atomok kis tartományokra kiterjedő (néhány atomátmérőnyi) és igen rövid élettartamú rendeződése. Az olvadékot lehűtve ezek a spontán módon rendeződött tartományok a kristályosodás kiindulópontjaivá, úgynevezett kristálycsírákká, kristálygócokká válhatnak. Ilyen kristálycsírák, az olvadáspont alá hűtött olvadékban, a folyadék tetszőleges helyén véletlenszerűen képződnek. A kristálycsírák növekedésével alakulnak ki a kisebb-nagyobb kristályok. A meglevő kristálycsírák növekedése már nem annyira véletlenszerű, és jóval gyorsabb, mint a keletkezésük, a csíra rácsszerkezete szinte irányítja a környező folyadékban "úszkáló" részecskéket a megfelelő helyre. Az



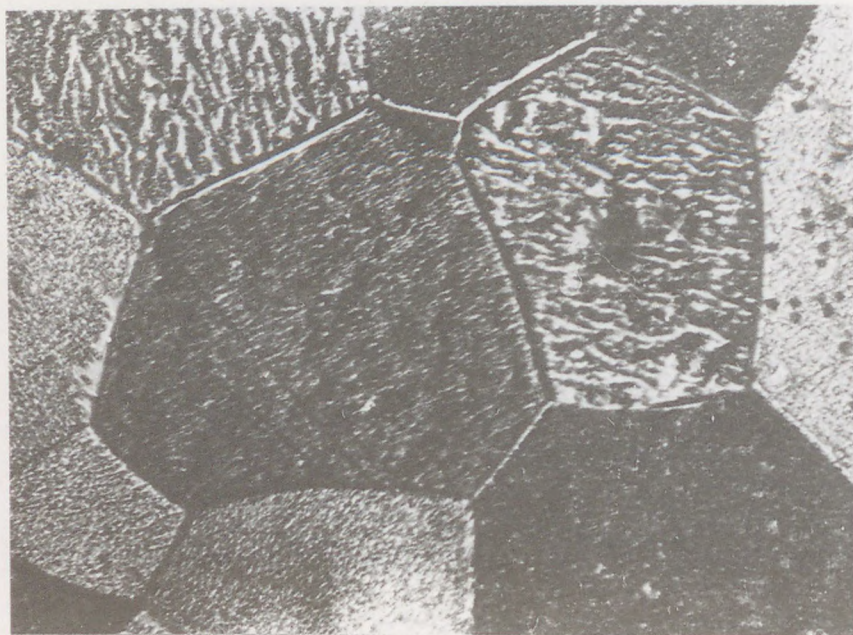
I.36. ábra

olvadékban egyidejűleg több helyen alakulnak ki és kezdenek növekedni a kristálycsírák. Zavartalan növekedésük addig tart, míg egymást el nem érik. A találkozás helyén a kristálynövekedés megakad, de a többi, még olvadékkal kitöltött tartományban mindaddig folytatódik, míg a szomszédos kristályok itt is összeérnek. A kristályosodás befejeztével az egyes kristályok úgynevezett "kristályszemcsék" szabálytalan felületek – szemcsehatárok – mentén illeszkednek egymáshoz. A polikristályos szerkezet kialakulását az I.35. ábra illusztrálja.

A rajzok mellett látványos kísérlettel is szemléltethető a fémolvadék kristályosodásának folyamata: analitikai tisztaságú fémbizmutot (Bi) gázlángon megolvasztva, majd az olvadékot kvarctégelybe öntve a tégely hideg falánál az anyag lehűl és megindul a kristályosodás, de a rossz hővezetés miatt csak lassan halad előre. Egy-két másodperc elteltével a tégelyből hirtelen mozdulattal leönthető a még olvadt állapotban maradt anyag. A tégelyben 3-4 mm nagyságú szabályos formájú bizmutkristályok figyelhetők meg (I.36. ábra, fotó). A kísérlet szemléletesen bizonyítja, hogy amíg a polikristályos anyag kristályszemcséi egymás növekedését nem zavarják, addig ugyanolyan szabályos kristályformával rendelkeznek, mint az ásványtárlókban kiállított egykristályok.

A polikristályos szerkezetben nem szükségszerű, hogy valamennyi szemcse azonos anyagú és kristályszerkezetű legyen. Ha az olvadék többféle anyag keveréke volt, akkor a megszilárdulás után egymás mellett találjuk a különböző anyagú és rácsszerkezetű kristályszemcséket. Az ilyen polikristályos szerkezetet szaknyelven *többfázisú* szövetnek* nevezik.

* Ebben a terminológiában egy-egy fázis egy-egy kristályszerkezetnek felel meg.



I.37. ábra

A polikristályos szerkezetben az egyes kristályok szabad szemmel általában nem különíthetők el. A kristályszemcséket csak különleges eljárásokkal tehetjük megfigyelhetővé.

A gyakorlatban felhasznált fémek szemcséi mikroszkopikus méretűek. A szerkezet vizsgálatához az anyagot síkra csiszolják, polírozzák, majd kémiai reagensekkel maratják. A maratás során a különféleképpen irányított kristálytartományok más-más módon reagálnak a vegyszerrel, és ennek következtében a fém fényvisszaverőképessége szemcséről szemcsére változik. Visszavert fénnel működő speciális mikroszkóppal az egyes kristályszemcsék jól elkülöníthetők. Az I.37. ábra (fotó, Rajkovits Zsuzsa felvétele) polikristályos alumíniumötvözet szerkezetét mutatja 200-szoros nagyítású mikroszkópos felvételen.

Polikristályos ásványok, kőzetek esetén a vizsgálni kívánt anyagból vékony szeletet vágnak, majd ezt csiszolással kb. $30\ \mu\text{m}$ vastagságúra vékonyítják. Az így elkészült mintát, úgynevezett "csiszolatot" üveglemezre ragasztva, mikroszkóp alatt átvilágítva vizsgálják. Az ásványok döntő többsége optikailag kettős törő tulajdonságú, így keresztezett polárszűrők között átvilágítva gyönyörű színes képet ad. Az egyes kristályok alakjuk és színeik alapján különböztethetők meg. Az I.38. színes fotón (Főzy István felvétele) kőzetcsiszolatról keresztezett polárszűrők közt készített mikroszkópos felvételt mutatunk be.

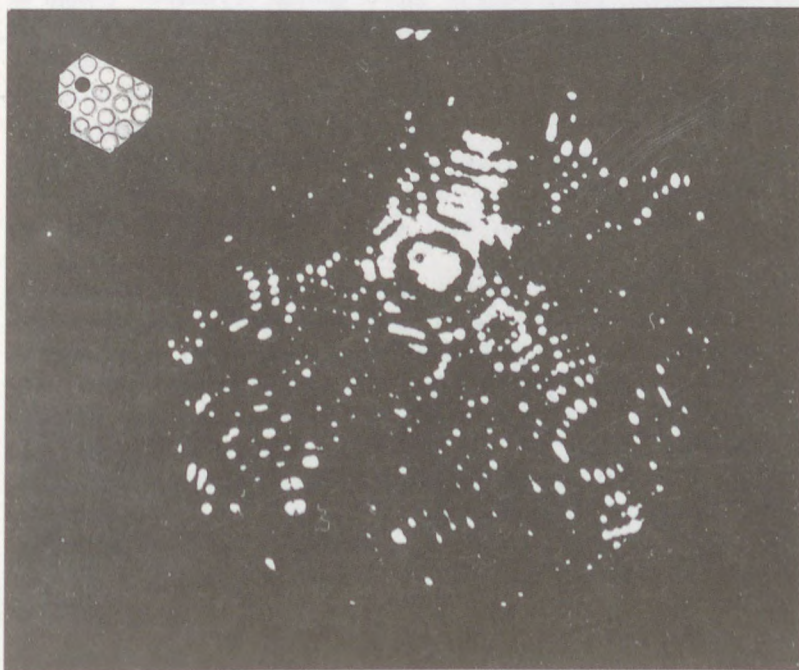
A polikristályos szerkezetet és kialakulását megismerve érdemes ismét visszanyarodni az egykristályokhoz. Az ásványtárókban talált szabályos alakú kristályok általában többedmagukkal egymás mellett fordulnak elő. Ez azt mutatja, hogy tulajdonképpen itt is polikristályos szerkezetről lehet beszélni, csak a kristá-

lyok olyan távol állnak egymástól, hogy egészen nagyra nőhettek anélkül, hogy zavarták volna egymást. A kristályosodás pedig valami oknál fogva leállt, mielőtt az egyes kristályok összeértek volna.

A kristályos szerkezetű anyag fizikai tulajdonságait a kutatók először egykristályokon tanulmányozzák. Ezekhez a vizsgálatokhoz külön erre a célra kifejlesztett berendezésekben mesterségesen állítják elő a kívánt egykristályokat. Ugyancsak így készülnek a mikroelektronikai ipar kiindulási anyagának számító szilícium- és germánium-egykristályok is.

5. A kristályban kötelező a hiba!

”A ló is megbotlik, pedig négy lába van” – tartja a közmondás. A népi bölcsesség azt fejezi ki, hogy tökéletes munkát még a leggondosabb szervezés mellett is ritkán végzünk. Megértéssel fogadjuk tehát az esetenként előforduló hibákat. A kristályok rendje sem tökéletes. Minden az ideális kristályszerkezettől való eltérést (pl. egy atom helye üresen maradt, rossz helyre szorult egy részecske, idegen anyag került a kristályba stb.) *kristályhibának* tekintünk. Ezek azonban nem olyanok, mint az emberek hibái, mert jelenlétük a stabilis kristályokban nélkülözhetetlen. Természettörvény, hogy a kristály nem létezhet kristályhiba nélkül. Ez a meglepő kijelentés természetesen bővebb kifejtést igényel.



I.39. ábra

Szorítkozzunk a következőkben a legegyszerűbb kristályhibákra, a *rácslyukakra*. Rácslyukról beszélünk, ha a kristályban egy, a rácsszerkezet által megszabott helyen hiányzik az odavaló részecske. Az ilyen hiba létezését közvetett és közvetlen bizonyítékok igazolják. Közvetett bizonyítéknak tekinthető, hogy a kristályok számos tulajdonsága nem értelmezhető, ha nem vesszük számításba a rácslukakat, ha viszont tényként fogadjuk el létezésüket, a megoldatlan kérdésekre magyarázatot kapunk. Közvetlen kísérleti bizonyítékként nézzük az I.39. ábrát (fotó)! A fotó egy térionmikroszkópos kép részletét mutatja kinagyítva. A fénykép mellett sematikus magyarázó rajz segíti az értelmezést. A rácsba rendeződött atomok (fénylő pontok) között egy üres hely – rácsluk van.

5.1. *Hogyan keletkeznek a rácslukak és mennyi van belőlük a kristályban?*

A rácslukak keletkezésében döntő szerepe van az atomok soha meg nem szűnő hőmozgásának. A kristályrácsban minden atomnak megvan a maga helye. Itt a részecskére ható eredő erő zérus, ez az atom minimális energiájú, tehát legkedvezőbb a helyzete. Abszolút nulla fok hőmérsékleten (-273°C) minden atom ilyen állapotban lenne, normál körülmények között azonban más a helyzet. Az atomok szinte soha nincsenek pontosan a ráctól kijelölt helyükön, hanem e pont körül össze-vissza rezgőmozgást végeznek. E rezgés iránya és tágassága állandóan változik. Az atomok folytonosan energiát adnak, illetve kapnak egymástól. Ebben az állandó energiacsereben szabályos rendszer nincs, ezért az atomok energiája véletlenszerűen ingadozik. Mindig vannak a kristályban olyan atomok, amelyek energiája pillanatnyilag nagy, és olyanok is, amelyeké egészen kicsi. Ez utóbbiak alig mozdulnak ki ideális helyzetükből, míg a nagy egyenrgiájúak nagyon eltávolodhatnak, esetleg ki is léphetnek a helyükről. Legkönnyebben a kristály szabad felszínén, vagy a szemcsehatárokon levő atomok hagyhatják el helyüket. A rácslukak tehát főleg ezeken a helyeken képződnek, és innen kerülnek a kristály belsejébe.

A nagyon sok részecskéből álló rendszerek energiaviszonyainak vizsgálatával a statisztikus fizika foglalkozik, felhasználásával meghatározható az atomok átlagos energiája, de megadható az is, hogy egy tetszőlegesen választott energiával az atomok hányad része rendelkezik. A rácslukak keletkezését vizsgálva ez utóbbi a fontos a számunkra. Ahhoz, hogy egy atom kilépjen a kristályrácsból, a szomszédok vonzóereje ellen W munkát kell végeznie. Erre csak azok az atomok képesek, amelyek energiája W értékét meghaladja. A statisztikus fizika szerint T hőmérsékleten egy N számú atomból álló kristályban

$$n = N e^{-\frac{W}{kT}}$$

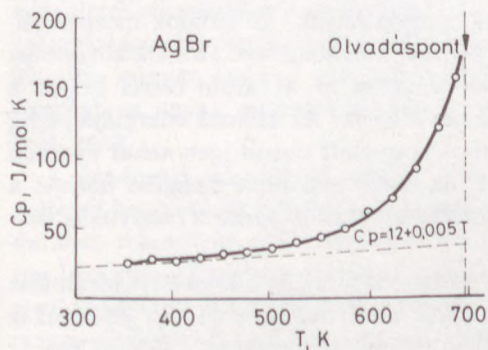
darab részecske rendelkezik W energiával. A képletben $e \approx 2,73$ a természetes logaritmus alapszáma $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$, a Boltzmann-állandó. T hőmérsékleten

tehát n atom lép ki a helyéről, ahol emiatt egy rácslyuk marad vissza. A fenti matematikai formula tehát meghatározza a kristályban levő rácslyukak számát. Mit is mond ez a matematikai kifejezés?

A rácslyukak száma a kristályban igen erősen (exponenciálisan) függ a hőmérséklettől. A hőmérséklet növekedésével a lyukak száma rohamosan nő. Ugyancsak befolyásolja a rácslyukak számát W értéke is. Ha például azonos hőmérsékletű jeget és gyémántot hasonlítunk össze, az adódik, hogy a jégben jóval több a rácslyuk, mint a gyémántban. A jégkristályban egy rácslyuk létrehozásához szükséges W energia ugyanis lényegesen kisebb, mint a gyémántban. A fenti formula segítségével kiszámítható, hogy a fémekben az olvadáspont közelében körülbelül minden ötezredik atom helyén található rácslyuk.

Bár a matematikai formula eredménye a rácslyukak közvetlen megfigyelésével és leszámolásával nem ellenőrizhető, közvetve több jelenség is bizonyítja érvényességét. Nézzünk ezek közül néhányat!

Az I.40. ábra grafikonja ezüst-bromid-kristály (AgBr) fajhőjének hőmérsékletfüggését mutatja. Alacsonyabb hőmérsékleten a fajhő csekély mértékben növekszik, a kristály olvadáspontjának közelében azonban meredeken emelkedni kezd. A jelenség jól értelmezhető a hőmérséklet növekedésével rohamosan szaporodó rácslyukakkal. A fajhőbe ugyanis a rácslyukak létrehozásához szükséges energiát is beletérjük.



I.40. ábra

Érdekes megfigyelés ejtette zavarba századunk elején a fizikusokat a hőtágulással kapcsolatban. Megállapították, hogy a pontos térfogatmérések alapján számított hőtágulási együttható az olvadásponthoz közeli hőmérsékleten lényegesen nagyobb, mint amit a kristály rácsállandójának röntgen-módszerrel mért növekedésével magyarázni lehet. Az ellentmondás feloldható, ha figyelembe vesszük a rácslyukak számának rohamos emelkedését. A kristály térfogatába ugyanis a rácslyukak térfogatát is belemérjük, míg a röntgendiffrakciós mérések nem érzékenyek a rácslyukakra.

5.2. *Mozgó rácslyukak*

A kristályrácsban az atomok helyhez kötöttek. Pusztán erre gondolva biztosak lehetnénk, hogy egy atom vándorlásához a kristályban jókora energia szükséges. Energia kell ahhoz, hogy az atom kilépjen a helyéről (itt rácslyuk keletkezik), de energia kell ahhoz is, hogy a többi rendeződött atom között lépésről-lépésre helyet szorítson magának. Az atomok helyválttatása a kristályban azonban nem így történik, hanem egy sajátos energiatakarékos mechanizmussal, amelyben a főszerepet a rácslyukak játsszák.

Az atomok mozgásmechanizmusa a kristályban erősen emlékeztet egy közismert ügyességi játékra. Egy lapos, négyzet alakú dobozban 15 számozott kis négyzetlap található, a tizenhatodik négyzet helye üresen marad. A játék lényege, hogy az össze-vissza elhelyezett számozott négyzeteket növekvő számsorrendbe rendezzük anélkül, hogy a lapocskákat kiemelnénk a dobozból. A megoldást a négyzetek ügyes tologatásával érhetjük el úgy, hogy az üres hely szomszédságában levő négyzetek valamelyikét az üres helyre toljuk — ezáltal az üres hely elmozdul, az új szomszédok közül egy ismét eltolható, és így tovább.

A kristályban az atomok hasonló mechanizmussal mozognak, mint a játék számozott négyzetei. Az az atom, amelynek szomszédságában rácslyuk van, a lyukkal

helyet cserélve már kis energiabefektetéssel elmozdulhat. Van azonban egy lényeges különbség! A játék lapocskáit tervszerűen mozgathatjuk, az atomok mozgása azonban teljesen rendszertelen. A rácslyuk szomszédságában levő atomok közül bármelyik egyforma eséllyel léphet, valójában azonban az az atom cserél helyet a lyukkal, amelyik ehhez elegendő energiával rendelkezik. Az atomok energiája pedig teljesen véletlenszerűen ingadozik. Az atomok bonyolult táncát igen nehéz nyomon követni és leírni. Egyszerűsödik a feladat, ha a sok-sok atom mozgása helyett a rácslyukak mozgását figyeljük. Az atomok helyválttatása során a rácslyukak összevissza bolyonganak a kristályban.

Igen érdekes, hogy ez a teljesen kaotikus mozgás határozott irányú anyagáramlást is eredményezhet. Ennek magyarázatához újból a már említett tili-toli játékunkat használhatjuk fel, előbb azonban gondolatban néhány változtatást kell tennünk.

Képzeljük el, hogy a négyzetekről lemoszuk a számokat és közülük hatot pirosra, nyolcat pedig fehérre festünk. A doboz egyik felébe a piros, a másik felébe a fehér lapocskákat rendezzük. A játék most az lesz, hogy bekötött szemmel összevissza tologatjuk a lapokat, és megnézzük, hogy hogyan változott meg a festett négyzetek elrendezése. Az eredményt mindenki el tudja képzelni – a különböző színű lapocskák összekeverednek. Ezt a változást úgy is értékelhetjük, hogy a játék végére a piros lapok átvándorolnak a fehérek térfelére és viszont.

A kristály atomjainak helyválttatató mozgása akkor válik különlegesen lényegesé, ha az anyag szerkezete valamilyen szempontból nem egyenletes – inhomogenitásokat tartalmaz. Vegyük azt a gyakori esetet, amikor a kristály egy kisebb-nagyobb tartományába idegen anyag atomjai épülnek be. (Ez véletlenül is megtörténhet, de gyakran tudatosan viszünk idegen atomokat az anyagba.) A kristály atomjainak, illetve a rácslyukaknak kaotikus mozgása előbb-utóbb oda vezet, hogy az idegen

atomok egyenletesen szétszóródnak az egész kristályban. Azt a folyamatot, amelynek során a kristály valamely szerkezeti inhomogenitása a rácslyukak mozgása révén megszűnik – *kristálydiffúzió*nak nevezzük. A folyamat a kristály melegítésével rohamosan gyorsul, összhangban a rácslyukak számának gyors növekedésével.

A következőkben néhány példán keresztül érzékeltetjük a kristálydiffúzió gyakorlati jelentőségét. A modern technika elválaszthatatlan a mikroelektronikától. A tranzisztorok, integrált áramkörök, a chipok gyártása során a pontosan eltervezett és kiszámított diffúziós folyamatok a legfontosabbak. Diffúzióval építhetjük be a kristályba azokat a szennyezőket, amelyek a tiszta szilícium- vagy germániumkristályokból az "n", vagy "p" típusú félvezetőrétegeket létrehozzák. A gyártás több szakaszban történik. Egy-egy szakaszban a fő lépések a következők; nagy-tisztaságú szilícium-, illetve germánium-egykristályokat növesztenek, majd ezeket vékony szeletekre vágják. A szeletek felszínére vékony rétegben viszik fel azokat az anyagokat, amelyek atomjait a kristályba kívánják diffundáltatni. Hogy ebből az anyagból mely helyekre jusson és mely helyekre ne, azt a kristály felületére helyezett speciális maszkokkal szabhatjuk meg. Az így előkészített lemezeket ezután pontosan meghatározott hőmérsékletű kemencébe helyezik, és szigorúan megszabott ideig melegítik. A melegítés hatására a kristálylemezben megnő a rácslyukak száma és a felületre felvitt szennyező atomok bediffundálnak a kristályba.

A diffúziónak alapvető jelentősége van a fémkohászatban is. Az ötvözőatomok egyenletes elkeveredését az anyagban a diffúzió biztosítja. A különböző fémötvözetek gyártástechnológiája legtöbbször különböző hőkezeléseket is előír. Az ilyen kezelés célja minden esetben valamilyen diffúziós folyamat előidézése, aminek eredményeként az anyag mikroszerkezete és ezen keresztül a fizikai tulajdonságai megváltoznak.

A gazdasági jelentőségű példák után nézzünk egy olyan esetet is, amely közvetlenül kapcsolódik hétköznapi tapasztalatainkhoz. Gyakori feladat, hogy két fémadarabot valamilyen okból össze kell forrasztanunk. A legegyszerűbb a vörösréz forrasztása cinnel (ón-ólom ötvözet), példánkban tehát ezt részletezzük. A sikeres forrasztás feltétele, hogy mindkét rézdarab felületét gondosan megtisztítsuk a rátapadt szennyeződésektől, a felületi oxidrészekről. A kötés azáltal jön létre, hogy a két síkfelület közé vékony olvadt cint juttatunk. Lényeges azonban az is, hogy a forrasztáskor mindkét részfelületet jól felmelegítsük. Ha ez nem történik meg (pl. kicsi a páka), hiába kerül az olvadt forrasztanyag a két felület közti hézagba, a kötés mégsem jön létre. A kötés kristálydiffúzió eredménye. Sikeres forrasztás esetén az ón atomjai bediffundálnak a réz kristályrácsába. A két forrasztani kívánt rézdarabot azért kell felmelegíteni, hogy mindkét kristályban legyen elegendő számú rácslyuk, és így a diffúzió sebessége nagy legyen.

Lyukas fogainkat az orvos gyakran ezüstamalgámmal tömi be. Az anyagot helyben keverik össze, higanyból és finom ezüstporból. A megtisztított fogüreget ezzel a masszával töltik ki. Alig három óra elteltével a korábban könnyen formálható pépes anyag szilárd fémmé áll össze. A változást az okozza, hogy a higany és az ezüst atomjai diffúzió révén összekeverednek, és egy egészen új tulajdonságú fémötvözet jön létre.

5.3. Rácslyukak és atomreaktorok

Az eddigiekben elmondottuk, hogy rácslyukak mindig találhatók a kristályokban. Mennyiségük a hőmérséklet függvénye. Egyes különleges esetekben, például erős radioaktív vagy neutronsugárzás hatására a rácslyukak száma a hőmérséklettől függetlenül is nőhet. A sugárzás nagy energiájú részecskéi a rácsatomokkal ütközve kilöki a helyükről azokat, és így rácslyukakat hoznak létre. A sugárzás és a rácslyukak kapcsolatának vizsgálatát egy Angliában történt reaktorbaleset indította el még az atomerőművek hőskorában.

Az atomreaktor működése közben erős neutronsugárzás éri a reaktor szerkezeti anyagait, így a fékező grafit tömböt is. A sugárzás hatására tömegesen keletkeznek rácslyukak. Megfelelő körülmények között ez még nem jelenti a rácslyukak korlátlan felszaporodását, hiszen a helyükről kiűtött atomok miután elvesztették a sugárzástól kapott energiájukat, előbb-utóbb betöltenek egy rácslyukat. Így a rácslyukak fokozott képződése mellett megnő a rácslyuk eltűnés sebessége is.

Az angliai baleset oka az volt, hogy túlzott hűtés miatt a kiűtött atomoknak arra sem maradt energiájuk, hogy egy rácslyukat keressenek maguknak és ismét beépüljenek a kristályba. A rácslyukak száma tehát egyre inkább szaporodott. A tragédia a hűtőkörben történt csekély üzemzavarral kezdődött, a reaktor melegedni kezdett, és a hőmérséklet addig nőtt, míg bekövetkezett a robbanás. Az történt ugyanis, hogy a hűtés csökkenésével az atomi mozgás megerősödött és a rácslyuk főleg rohamosan csökkenni kezdett. Minden rácslyuk eltűnésekor energia szabadul fel (pontosan annyi, amennyit a rácslyuk létrehozásához be kellett fektetni). A felszabaduló energia melegíti a kristályt, fokozza a hőmozgást, és ami ezzel együtt jár, gyorsítja a rácslyuk főleg eltűnését. Az angliai reaktorbalesetet az így kialakult lavinaszerű melegedési folyamat okozta.

A Wigner-effektusnak nevezett jelenséget úgy szokás megelőzni, hogy a reaktor-köpenyt kontrollált körülmények között túlfűtik, és ezzel lehetővé teszik a grafit-tömb atomjainak rendeződését.

Az 1986 áprilisában Csernobilban történt reaktorbalesetet egyes szakértők az angliai balesethez hasonlóan a rácslyukak lavinaszerűen meggyorsuló megszűnésére vélik visszavezetni.

A véletlenek szerencsétlen összejátszása folytán bekövetkezett reaktorbalesetek mellett a sugárzás hatására létrejött rácslyukaknak sokkal prózaibb következménye is van. A rácslyukak gyakran olyan módon tűnnek el a kristályokból, hogy sokadmagukkal összeolvadva az eredetileg tömör anyagban belső üregeket, mikrorepedéseket hoznak létre. Az így porózussá váló anyag fizikai paraméterei megváltoznak. Mivel elsősorban nagy terhelésnek kitett szerkezeti anyagokról van szó, a legfontosabb változás a mechanikai szilárdság csökkenése. Ez a szerkezeti változás – az úgynevezett "sugárzási károsodás" – igen lényeges a reaktor biztonságos üzemeltetése szempontjából. A reaktor anyagának sugárzási károsodását folyamatosan vizsgálják, mégpedig igen szellemes módon. Már az építés során elhelyeznek a reaktortömbben olyan, üzemelés közben is kivehető mintákat, amelyek pontosan olyan anyagúak, mint a reaktorköpeny sugárzásnak kitett részei. Ezekből a min-

tákból időről időre kiemelnek egyet és gondosan megvizsgálják. A kapott eredményekből következtetni lehet a hasonló sugárzásnak kitett elemek károsodására.

5.4. *Kristályfestés rácslyukakkal*

A természet a kristályok világában igazán bőkezűen bánt a színekkel. A kristályok között sok szín és számtalan árnyalat található a feketétől a hófehérig, a fémfényűtől a teljesen átlátszó víztiszta anyagokig. Gyakori az is, hogy azonos anyagú és formájú kristályok színe a lelőhelytől függően eltérő. Van például szintelen, üvegszerűen átlátszó kvarckristály, de gyakori az ezüstös-szürke "füstkvarc", gyönyörű a pirosas "rózsakvarc" és a féldrágakőként jegyzett ametiszt sem egyéb, mint lilára színeződött kvarc (I.41. ábra, színes fotó).

5.4.1. *Mitől függ a kristály színe?*

Minden anyagnak, így a kristályoknak a színét is, az szabja meg, hogy a rájuk eső összetett fehér fényből milyen színeket nyelnek el. Az anyagot az elnyelt szín úgynevezett komplementer vagy kiegészítő színében látjuk.

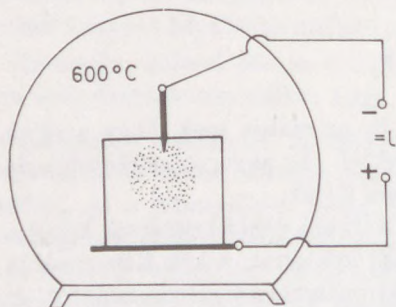
Így például az alább leírt módon elszínezett alkáli-halogenid-kristályok közül a sárgásbarna kősó a $\lambda = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{m}$ hullámhosszú kék színt, a kék KBr a sárga fényt abszorbeálja. A fényelnyelés az anyagok elektronszerkezetével kapcsolatos. A kristálybeli atomok elektronjai csak jól meghatározott, az adott anyagra jellemző energiákkal rendelkezhetnek. Természetes állapotban az elektronok az alacsonyabb energiaszinteket foglalják el. Egy alacsonyabb energiájú állapotból egy magasabb energiájú állapotba akkor kerülhet az elektron, ha az átmenethez szükséges energiát valahonnan, például a kristályra eső fényből megszerzi. A szintelen, átlátszó anyagok elektronszerkezete olyan, hogy a látható fény energiatartománya nem esik egybe a kristálybeli elektronállapotok energiakülönbségeivel. Ha a fény energiája éppen megegyezik az elektronok valamely alacsonyabb szintű betöltött és egy magasabb üres állapotának energiakülönbségével, a kristály a fényt elnyeli. Az így szerzett energia segítségével az elektronok magasabb energiájú állapotba kerülnek, úgy mondjuk – gerjesztődnek. Az ilyen kristályok színesek.

A bevezetőben említettük például, hogy a kvarc többféle színben is megtalálható. Mi az oka, hogy azonos anyagú és rácsszerkezetű kristályok színe eltérő? A különböző színű kristályok más-más lelőhelyekről származnak. A kristályosodás során a tiszta szilícium-dioxidba (SiO_2) idegen anyagok is beépülnek. Ezek mennyisége olyan csekély, hogy a kristály szerkezetét, illetve alakját nem változtatja meg, arra viszont elegendő, hogy az elektronok lehetséges energiaszintjei módosuljanak. A tiszta kvarc szintelen, átlátszó, a szennyezések hatására azonban színessé válhat. *Egyes szintelen kristályok idegen kémiai anyagok beépülése nélkül is megszínezhetők.*

A tiszta kősókristályok víztisztán átlátszóak, szintelenek. Hasonlóan szintelenek a többi alkáli-halogenid-kristályok is, pl. LiF, KCl, KBr stb. Érdekes sajátossága

azonban ezeknek az anyagoknak, hogy színessé válnak, ha a színtelen kristályt erős röntgensugárzás éri. A kőszó sárgásbarna, a KCl kék, a KJ barna színt kap. Ugyanez az eredmény, ha a kristályt üvegfolába forrasztva saját fémjének gőzében, az olvadáspontához közeli hőmérsékleten hevítjük, majd gyorsan lehűtjük. Az I.42. ábra a színezésnek egy harmadik módját illusztrálja. A kristályhoz $500 - 600^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten két elektródot csatlakoztatnak, majd ezek közé néhány száz volt egyenfeszültséget kapcsolnak. A pozitív elektród egy rézlemez, amire ráállítják a kristályt, a negatív elektród a kristály felső lapjába nyomott hegyes platinatű. A felmelegített alkáli-halogenid-kristály vezeti az áramot. (A hideg gyakorlatilag tökéletes szigetelő.) Az áram megindulása után rövidesen színes folt jelenik meg a negatív tüelektród környezetében, majd egyre inkább kiterjed az egész kristályban.

Mi a titka a kristályfestésnek? Mivel magyarázható, hogy mindhárom, egymástól különböző eljárással mindig ugyanaz, az anyagra jellemző színárnyalat adódik?



I.42. ábra

Ezekre a kérdésekre R. W. Pohl német kísérleti fizikus és munkacsoportja kezdte keresni a választ még 1925-ben. Vizsgálataik azt bizonyították, hogy az alkáli-halogenid-kristályok elszíneződésében, mindhárom említett kísérletben, a negatív ionok helyén keletkezett rácslyukaknak van döntő szerepük. Ezek közvetlen környezetében pozitív fémionok helyezkednek el, amelyek, ha mód nyílik rá, beszipantanak a hiányzó halogenid helyére egy-egy elektront. A "csapdába" esett elektronok a látható fény energiatartományába eső sugarakkal gerjeszthetők. A kristályra eső összetett fényből az elektronátmeneteknek megfelelő energiájú hullámhosszak eltűnnek. A kristály ezáltal az elnyelt szín kiegészítő színére "festődik". Mivel a kristály színesedésének okai az elektronokkal betöltődő rácslyukak, ezeket *színcentrumoknak*, illetve Pohl eredeti elnevezése szerint F-centrumoknak (Szín: németül Farbe) nevezik.

Nézzük meg tehát, mi történik a fent említett három különböző színező eljárás során! A röntgensugárzás energiája elegendően nagy lehet ahhoz, hogy a kristályrácsban levő halogenidionokról lefejtse a legkülső elektront. Ezáltal az ionból semleges atom keletkezik, ami azonban túlságosan nagy ahhoz, hogy elhagyja a helyét, így eredeti szomszédai közé beékelődve marad. A lefejtett elektron mindaddig szabadon bolyong a kristályban, míg beleesik valamelyik halogenidion helyen kialakult rácslyuk-csapdába, és így színcentrum keletkezik. A röntgensugár-

zással festett kristály színe azonban nem tartós, melegítésre, de közönséges fény-megvilágítás hatására is egyre halványul, majd eltűnik. Ennek oka, hogy a hőmozgást és a fényből felvett energiát felhasználva az elektron kiszabadul a csapdából és addig vándorol a kristályban, míg rátalál valamelyik, a röntgensugárzás hatására keletkezett semleges klóratomra. Ekkor az elektron ismét csatlakozik a klórhoz. A klórionok újraképződésével visszaáll a kristály eredeti állapota. A színcentrumok megszűnnek – a kristály elszíntelenedik. A kőso színváltozását elsőként megfigyelő Konrad Röntgen (a röntgensugárzás felfedezője) azt is észrevette, hogy a sárgásbarna kőso fényelektromos hatást mutat. A megvilágítás hatására fellépő vezetőképesség növekedést az elmondottak alapján már könnyen értelmezhetjük. A fényenergia segítségével a rácslyukakból kiszabaduló elektronok feszültség hatására szabadon vándorolnak a kristályban, és így vezetik az elektromos áramot.

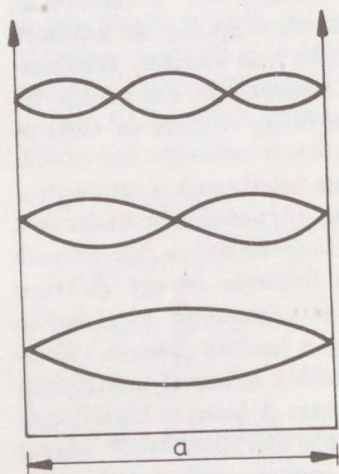
A nátriumgőzben hevített kőso kristályban más módon keletkeznek a színcentrumok. A leforrasztott üvegfiolában a nátriumgőz atomjai folytonosan bombázzák a kristály felületét. Ha egy viszonylag kis sebességű atom kedvező helyen, klórionok környezetében ütközik a kristálynak, megtapadhat a felületén és egy elektron leadása után pozitív ionként beépülhet a rácsba. Az olvadáspontot megközelítő hőmérsékleten a kristályban sok rácslyuk található, így a leadott elektron előbb-utóbb befogódik, és színcentrum keletkezik. Az ilyen módon színezett kristályban kémiai módszerekkel is jól kimutatható nátriumfelesleg van. A hiányzó klórionok szerepét a színcentrumok töltik be. Mivel ezek tömege a klórionokéhoz képest elhanyagolható, helyigényük a kristályban viszont közel azonos, a színezett kristály sűrűsége kisebb, mint a színtelené. A színcentrumok számának meghatározásához a kristály nátriumfölöslegének, és a sűrűségcsökkenésnek a mérése egyaránt felhasználható. A nátriumgőzben történő hevítéssel színezett kőso sem melegítésre, sem fény hatására nem veszti el sárgásbarna színét.

A harmadik, elektrolitikus színezés során az elektródok anyagát úgy választjuk meg, hogy a pozitív elektródon a klór könnyen leváljék, míg a tű alakú negatív elektródon a Na^+ -ionok semlegesítődése nehéz legyen. Az elektromos tér hatására a hevített kristály klórionjai a pozitív elektródhoz diffundálnak és ott semlegesítődnek. A negatív elektródon a Na^+ -ionok leválása helyett a tű elektromos csúcshatása révén elektronok lépnek be a kristályba. Ezek az elektronok színcentrumokat képezve betöltik a katód környezetéből elvándorló Cl^- -ionok helyén maradt rácslyukakat. A színeződés a tűhegy közelében jelenik meg először és innen terjed az anód irányába. Az elektródok polaritását megcserélve a kristály újból elszíntelenedik.

5.4.2. A színcentrumok kvantummechanikája

Az alkáli-halogenid-kristályok mesterséges megszíneződése önmagában is érdekes jelenség. Értékét azonban tovább növeli az, hogy a kísérlet eredménye egyszerű kvantummechanikai számítással értelmezhető, s ezzel az egyébként igen elméleti kvantummechanika kézzelfoghatóbbá, színesebbé tehető.

A színcentrumok a kristályban a halogenidionok helyén alakulhatnak ki, ha oda egy magányos elektron beépül. Itt az elektron a lokálisan pozitív töltésű környezet miatt potenciálgödörbe kerül és kötötté válik. A kötött elektron lehetséges energiaszintjeit legegyszerűbben úgy határozhatjuk meg, hogy a valóságos, térbeli potenciálgödört egy egydimenziós, végtelen magas falakkal határolt potenciálgöggel helyettesítjük, amelynek szélessége a kristály a rácsállandójával egyenlő.



I.43. ábra

A potenciális energiát célszerű úgy választani, hogy a gödör alján éppen zérus legyen. A potenciálgödörben az elektron olyan állóhullám állapotai stabilisak, amelyeknek a völgy határán csomópontja van. A lehetséges hullámállapotok a két végén rögzített hegedűhúr állóhullámaihoz hasonlóak. Ennek a feltételnek az I.43. ábra szerint a

$$\lambda = \frac{2a}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

hullámhosszúságú elektronhullámok tesznek eleget. A $\lambda = \frac{h}{p}$ de Borglie-féle összefüggést felhasználva (5.1)-ből a kötött elektron impulzusára

$$p = \frac{h}{2a} n \quad n = 1, \dots \quad (5.2)$$

adódik, ahol $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js a Planck-állandó. Az impulzusból azonnal kifejezhetők a kinetikus energia lehetséges értékei:

$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{8ma^2} n^2. \quad (5.3)$$

Mivel a potenciális energiát zérusnak választottuk, az (5.3) összefüggés éppen a színcentrumként viselkedő elektron lehetséges energiaszintjeit adja.

A színcentrum csak olyan fényt nyelhet el, amelynek fotonjára

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (5.4)$$

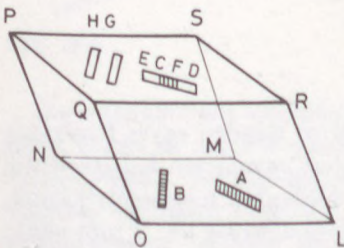
Közönséges körülmények között a színcentrumok többsége alapállapotban van ($n = 1$), és onnan a megvilágítás hatására a következő, $n = 2$ -vel megadható energiaszintre gerjesztődik. Így az elnyelt fény frekvenciájára

$$\nu = \frac{h}{8ma^2}(4 - 1) = \frac{3h}{8ma^2} \quad (5.5)$$

adódik. A KCl-kristályban $a \approx 0,7$ nm, azaz a képlet szerint a színcentrumokat a fehér fény $\nu = 5,5 \cdot 10^{14}$ frekvenciájú sárga színű összetevője gerjeszti. Emiatt a kristály kéknek (ez a sárga szín komplementere) látszik.

6. A kettős törés

Erasmus Bartholinus a koppenhágai egyetem matematika- és orvosprofesszora 1669-ben egy világot járó kereskedőtől izlandipát-kristályt kapott ajándékba. A szabályos formájú kalcium-karbonát-kristály izlandi lelőhelyéről kapta a nevét. (Manapság ezek az izlandi kalcitbányák már szinte teljesen kimerültek.) Bartholinus a szép átlátszó kristálynak igen meglepő sajátosságait fedezte fel. Észrevette, hogy az izlandi páton átnézve a tárgyak megkettőzve látszanak. Az I.44. ábrát Bartholinus 1670-ben megjelent cikkéből vettük át. Az ábrán romboéder alakú kalcit-kristály képe látható. A dán tudós egy papírlapra két ceruzavonást húzott, majd



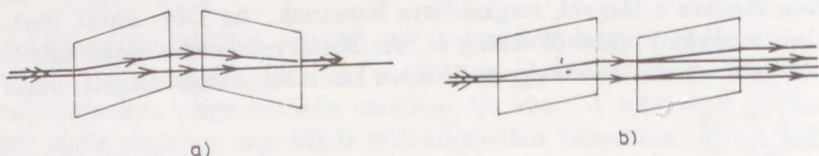
I.44. ábra

ráhelyezte a kristályt és a vonalak képét figyelte. A kristályt úgy állította be, hogy az A-val jelölt vonal az alaplap LN átlójának irányába essen, a B jelű vonal pedig erre az irányra merőleges legyen. Az izlandi pát alkotta képeket a H és a G, illetve ECFD jelű vonalak mutatják. A B vonalról tehát két egymással párhuzamos (H, G) kép keletkezett. A két kép azonban mélységében is elcsúszott egymáshoz képest. Az elcsúszás iránya – bár ez az ábrán nem észlelhető – az RN iránnyal volt párhuzamos. Hasonló módon csúszott el az A vonalak két képe is, ez az elcsúszás Bartholinus ábráján úgy látható, mintha a kép hosszabbá válna.

Még furcsább jelenség következett be, amikor Bartholinus a kristályt a papírra merőleges tengely körül forgatni kezdte. Tapasztalata szerint ekkor az egyik kép változatlanul ugyanazon a helyen maradt, a másik azonban a forgatás ütemében körüljárta az elsőt. A helyén maradó képet rendes vagy ordinárius képnek, míg a "nyughatatlan" másodikat rendellenes vagy extraordinárius képnek nevezzük.

A dán tudós által felfedezett jelenséget húsz évvel később Christian Huygens vette "pontosabban szemügyre". Keskeny napfénynyalábot bocsátott a kalcitkristályra, és figyelte a kilépő fénysugarakat. Meglepetéssel észlelte, hogy általában még a kristály felületére merőlegesen beeső fénysugár is két részre bomlik. A rendes sugár törés nélkül halad tovább, a rendellenes azonban fittyet hányva az eddigi tapasztalatoknak, még merőleges beesés esetén is megtörik. Amennyiben a kristályt az ordinárius (rendes) sugár, mint tengely körül megforgatjuk, akkor a rendellenes nyaláb a Bartholinus-féle megfigyelésnek megfelelően körüljárja a rendes sugarat.

Huygens azonban további kísérleteket is végzett. A kalcitkristályból kilépő fényt egy másik kalcitkristályra bocsátotta, s ekkor váratlan tapasztalatok újabb sorozata következett. Az I.45. ábrán a különböző lehetséges sugármeneteket mutatjuk be sematikus rajzokon. Az I.45/a), és b) ábrák szerint a rendes és a rendellenes sugár közötti eltérést a kristályok megfelelő elhelyezésével sikerült megkettőzni, illetve megszüntetni. Az esetek többségében a második kristály mind a rendes, mind a rendellenes sugarat újabb két részre bontotta. Huygens azt is tapasztalta, hogy ha ez utóbbi esetben a második kristályt a fénysugár, mint tengely körül megforgatta, akkor a négy fénynyaláb intenzitása periodikusan ingadozott,



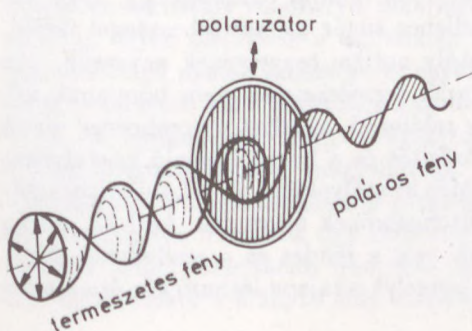
I.45. ábra

s minden fordulat során két alkalommal (nem egyszerre) minden egyes fénysugár fénye ki is aludt. Huygens bonyolultnak tűnő kísérleteit egyetlen kalcitkristály és a fényképezésnél használatos polárszűrő segítségével könnyen megismételhetjük. Helyezzünk egy írásvetítő felületére kartonlapot, amelyre előzőleg kb. 1 mm nagyságú lyukat vágtunk. Tegyük a kalcitromboédert a lyukra, és a lyuk kettős képét állítsuk élesre. A kristályt elforgatva az egyik kép helyben marad, míg a másik elfordul körülötte. Helyezzünk most a kristályból kilépő fény útjába polárszűrőt! A romboédert forgatva, az ernyőn a foltok fényessége a Huygens-féle kísérlethez hasonlóan változik, hol az egyik erősödik és a másik halványul, hol pedig fordítva. A kristály egy teljes fordulata alatt négy olyan helyzetet találhatunk, amikor az ernyőn csak egyetlen folt látható, mert a másik teljesen elsötétül. Ha abból a helyzetből indulunk ki, amikor a helyben maradó folt világos és a másik sötét, akkor a kristály 90° -os elforgatásával a helyzet éppen felcserélhető, s ez a csere a további 90° -os elforgatásonként ismétlődik.

A Huygens-kísérlet egyszerűsített változatában a polárszűrő vette át a második kristály szerepét. A szűrő ugyan nem bontja újabb két sugárra a fényt, a periodikusan bekövetkező kioltások azonban arra utalnak, hogy a kristályból kilépő fény különbözik a megszokott fénytől.

6.1. *Mi okozza a kristály különleges tulajdonságait?*

A kristályból kilépő rendes és rendellenes fény is síkban poláros! Emlékeztetünk arra, hogy a közönséges fény olyan elektromágneses hullámok keveréke, amelyekben az elektromos tér a terjedés irányára merőlegesen rezeg. Egy hullámban azonban az elektromos tér csak egy meghatározott irányban változik. Ez az irány és a fényterjedés iránya egy síkot, a fény polarizációs síkját jelöli ki. A fényt alkotó sok hullám között azonban mindenféle irányú (mindenféle polarizációs síkú) rezgés megtalálható, így ezen rezgések keveréke a terjedés irányára nézve szimmetrikus. Az I.46. ábra a polárszűrő működését illusztrálja.

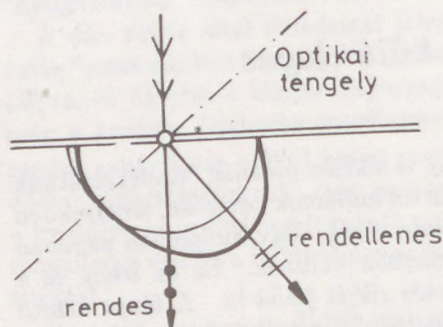


I.46. ábra

Ha a fényhullám valamilyen anyaggal találkozik, akkor elektromos terével rezgésbe hozza az atomok elektronjait, s a rezgő elektronok kicsiny sugárzó centrumokká válnak. Az anyagon keresztülhaladó fényt az egyes atomokból kibocsátott sugárzás egymásra rakódása, interferenciája alakítja ki. A kristályban az atomok meghatározott rendben helyezkednek el. Ennek a rendnek a következménye az is, hogy a kristály a különböző irányokban más és más tulajdonságokat mutat: anizotrop. Az anizotrópia következtében az atomi rezgések is csak meghatározott irányban mehetnek végbe. A kristályrendtől megszabott irányban rezgő atomok sugárzása hulláminterferencia révén két egymásra merőleges síkban poláros fényhullámot eredményez.

A két fényhullám azonban nemcsak polarizációs síkjában különbözik. Az egyik hullám a megszokott módon minden irányban azonos sebességgel terjed. Ez a rendes, vagy ordinárius sugár. A másik, az extraordinárius hullám terjedési sebessége irány szerint változik. Képzeljük el, hogy a kristály egy pontjában egy pontszerű

fényforrás működik, és rajzoljuk meg, hogy adott t idő alatt milyen távolságba jut el a rendes és a rendellenes sugár. Az izotrop terjedésnek megfelelően a rendes sugár hullámfelülete egy gömb, a rendellenes sugáré azonban egy ellipszoid. A két sugár szétválását tulajdonképpen a sebességbeli eltérés eredményezi.



I.47. ábra

A tapasztalat szerint a kristályokban azonban mindig található egy, vagy két olyan irány, amelyben a rendes és a rendellenes sugár azonos sebességgel terjed. Ezeket az így kitüntetett irányokat a kristály optikai tengelyének nevezzük. Az optikai tengely irányában haladó fénysugarak természetesen nem bomlanak két sugárra. A kalcitban csak egy ilyen irány található, amelyet a romboéder alakú kristály hosszabbik testátlója jelöl ki. A kalcitot és a hozzá hasonló kristályokat ezért optikailag egytengelyűnek nevezzük. Más kristályokban pl. a kordieritben két ilyen irány is létezik. Ezeket optikailag kéttengelyűnek nevezzük. Az I.47. ábrán a fénysugár beesési pontjai körül rajzoltuk meg a rendes és a rendellenes sugár hullámfelületének síkmetszetét. Az optikai tengelyt a rajzon látható kör és ellipszis érintkezési pontja jelöli ki.

Az optikai tengely és a beeső fénysugár egyenese meghatározza a rendes és a rendellenes fényhullám polarizációs síkját is. A rendes sugárban az elektromos térerősség mindig e két egyenes síkjára merőlegesen, a rendellenes sugárban pedig ezzel a síkkal párhuzamosan változik.

A rendellenes sugár "körtánca" nagy vonalakban a következőkkel magyarázható. A rendellenes sugár haladását a beesési irány mellett a kristály felépítéséből következő irányítottság is megszabja. A kristály forgatásakor ez a szerkezetből következő irány, s ennek következtében a rendellenes sugár is a kristállyal együtt elfordul.

A kettős törés egy érdekes esetét példázza a csillámkristály. A csillám közismert, átlátszó, könnyen rétegekre hasítható kristály. Jó elektromos és hőszigetelő tulajdonságai miatt elsősorban az elektromos és műszeriparban használják fel. A csillámlemezen keresztül nem látunk kettőzött képet, a csillám mégis kettős törő. Vizsgáljuk meg a csillámlemezt egy egyszerű kísérlettel.

Helyezzünk egymás után keresztezett állásban két polárszűrőt! A két szűrőn keresztül nézve nem jut fény a szemünkbe, a képmező sötét. Tegyük most vé-

kony csillámlemez a polárszűrők közé! A képmező színpompásan kivilágosodik. Érdekes azt is megfigyelni, hogy ha a csillámlemez óvatosan forgatjuk, a szűrőkön keresztülhaladó fény erőssége szabályosan ingadozik. Egy teljes körbeforgatás alatt négyszer, pontosan 90° -onként, a kép elsötétül, a közbülső helyzetekben pedig kivilágosodik. Ha a csillámkristály nem túl vastag, úgy a szűrők közt fehér fényű megvilágításban is színesnek mutatkozik. Ahol a lemez rétegvastagsága egyenletes, a szín is homogén, ha a rétegvastagság változik, a kristály színe is más lesz (I.48. ábra, színes fotó).

Az egyszerű kísérlet során megfigyelhető jelenségek a csillám kettős törő tulajdonságait bizonyítják. A kristályra az első szűrőn keresztül poláros fény esik. Ez a fény a kristályban két egymásra merőlegesen polarizált sugárra bomlik. A két sugár eltérő sebességgel, de azonos úton halad keresztül a lemezen, majd abból kilépve ismét egyetlen síkban polarizált nyalábbá egyesül. Az egyesült fénynyaláb polarizációs irányát a kristályon különböző sebességgel áthaladó fényhullámok fáziskülönbsége szabja meg. Általában a lemez után a fény polarizációs síkja különbözik a beeső fény polarizációs síkjától. A megváltozott polarizációs irányú fényt a második szűrő átengedi – azért világosodik ki a képmező a csillámlemez hatására. A kristályt elforgatva négyszer adódik olyan helyzet, amelyben a kristály valamelyik polarizációs iránya megegyezik a beeső fény rezgési síkjával. Ilyen esetekben a csillámban a fény nem válik ketté, hanem a kedvező polarizáltságú nyaláb sebességével egyetlen sugárban halad azon keresztül. A második polárszűrő ezt a fényt nem engedi át, ezért ilyen helyzetben a képmező elsötétül. A csillámlemez rétegvastagságtól függő színét a kristályban terjedő fénynyaláb interferenciájával magyarázzuk. A fehér fény különböző színű összetevői más-más hullámhosszúságúak és rezgésszámúak. Ha valamelyik szín esetén a kristályon áthaladó hullámok úgy találkoznak ismét, hogy rezgési síkjuk merőleges a második szűrő polarizációs irányára, akkor ezt a színt a szűrő nem engedi át. A kristályt ilyenkor a hiányzó fény kiegészítő színében látjuk.

6.2. Egy kis fizikatörténet

A kalcitkristályból kilépő fény tulajdonságait egy polárszűrő felhasználásával sikerült felderítenünk. A valóságban a felfedezés sorrendje éppen fordított volt.

1808-ban a Francia Akadémia pályázatot írt ki a kettős törés elméletének kidolgozására. A kérdéssel Malus, francia hadmérnök is foglalkozni kezdett. Egy-szer párizsi házában ablakában ülve egy mézspátkristállyal játszott. Véletlenül a Luxemburg-palota ablaktábláján visszaverődő fényt is elkezdte a kristályon keresztül nézegetni. Meglepődve tapasztalta, hogy bizonyos helyzetben a kalcit a szokásos két kép helyett csak egyet ad!

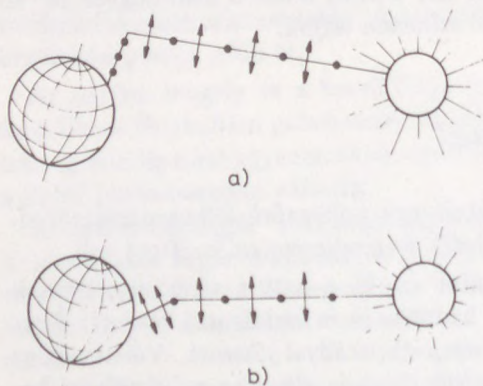
Ma már ismerjük ennek okát is, az ablaktábláról visszaverődve a fény polarizálódott. A kristályt forgatva a beeső fény polarizációs síkja egyes esetekben megegyezhet a kristály valamelyik speciális polarizációs irányával, s ekkor a másik sugár természetesen nem jelenik meg. Ezzel a véletlen kísérlettel fedezte fel Malus

a poláros fényt. Az elnevezés is tőle származik. A poláros szó Newton egy fénnel kapcsolatos elképzelésére utal. Newton a fényt áramló részecskék sokaságának képzelte. A kettős törés magyarázatára a fényrészecskékről feltételezte, hogy aszimmetrikusak, s a Földhöz hasonlóan pólusokkal rendelkeznek. Innen származik a polarizáció kifejezés.

A kristályok fénypolarizáló tulajdonságát kihasználva készítették az első polárszűrőket is. Nicol 1828-ban egy speciálisan csiszolt kalcitprizmát kettévágott, majd kanadabalzsam nevű ragasztószerral újra összeragasztott. Ennek következtében a prizmán csak a rendellenes sugár tudott áthaladni. A vágási felület olyan szögben helyezkedett el a prizma felületéhez képest, hogy a rendes sugár ezen a belső felületen teljes visszaverődést szenvedett.

Sokáig ezeket a Nicol-féle prizmákat használták polárszűrőként. A modern polárszűrőkben azonban már nem a szervesetlen kristályok anizotrop tulajdonságait használjuk a fény polarizálására. A polaroid szűrőkben hosszú poli(vinil-alkohol)-molekulákat rendeznek párhuzamosan egymás mellé, s a fénypolarizáció a láncmolekulák rendezettsége miatt jön létre. A makromolekulájú anyagok különleges tulajdonságaira könyvünk utolsó fejezetében még visszatérünk.

A kristálytani anizotropia azonban nemcsak a különböző polarizációs síkú fénysugarak szétválasztásában, hanem a fényelnyelőképesség változásában is megnyilvánulhat. Egyes kristályokban a fény elnyelődése erősen függ a fény színétől, polarizációs állapotától és a fényterjedés irányától. Ezt a jelenséget a modern kor számára Biot fedezte fel 1815-ben, amikor megállapította, hogy a turmalinkristály különböző irányból nézve barnának vagy zöldnek látszik. Biot azt is megállapította, hogy egy megfelelően metszett turmalinkristály a rendes sugarat szinte teljesen elnyeli, míg a rendellenes sugár gyakorlatilag fényerőcsökkenés nélkül halad át rajta. Ezt a hatást kihasználva turmalinlemezekből polarizátorokat is készítettek.



I.49. ábra

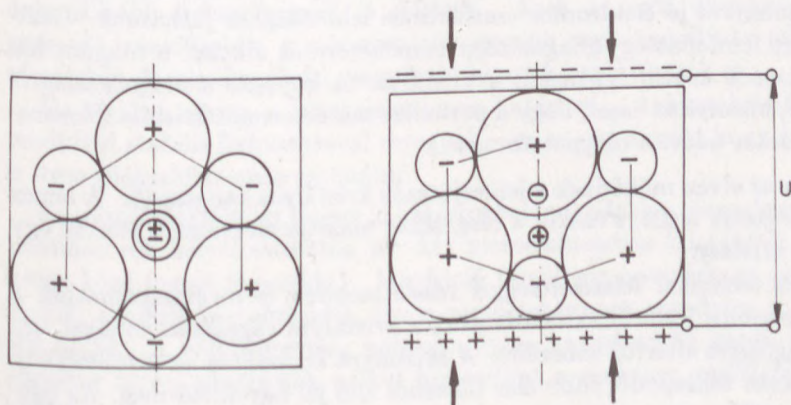
Ezt a jelenséget a vikingek is ismerték! A kordierit nevű, nagy darabokban előforduló ásvány optikailag kéttengelyű kristály. Ez a kristály az egyik kristálytani tengelyével párhuzamosan rezgő polarizált fényt elnyeli. Ezt kihasználva a vikingek a kordieritet navigációs segédeszközként alkalmazták. Az Atlanti-óceán északi ré-

szén ugyanis, ahol a vikingek hajóztak, napközben igen gyakran volt felhős az ég, így a hajókat nem lehetett a Nap iránya szerint vezetni. A viking hajósok, bár pontosan nem értették, felfedezték, hogy a légkörben szóródó fény szinte tökéletesen polarizált, ha a beeső nyaláb iránya és a fényszóródás iránya merőleges egymásra (I.49. ábra). Így ha a kordieritkristályt forgatva egy meghatározott irányban sikerült az áthaladó fényt kioltani, akkor a Napnak erre merőleges irányban kellett elhelyezkednie. A vikingek nem értették, hogy a Nap irányából érkező fényben miért nem sötétült el sohasem a kordieritkristály. Megnyugtató magyarázat volt azonban számukra az is, hogy a Nap olyan hatalmas fáklya, amelynek fényét nem lehet kioltani.

A megfelelően metszett kordieritkristály egyébként szép látványt is nyújt, mivel elnyelőképessége a hullámhossztól is függ. Emiatt három egymásra merőleges irányban halványsárgának, mélykéknek és világos ibolyaszínűnek látszik.

7. A kvarckristály hangja

Ceylonban figyelték meg – a felfedezés pontos időpontját nem ismerjük –, hogy a színpompás turmalinkristály, ha forró hamuba teszik, először magához vonzza, majd eltaszítja a hamuszemcséket. Ez az érdekes anyag a "Ceyloni mágnes" nevet kapta. A jelenség maga hasonló ahhoz, amikor egy megdörzsölt fésűvel közelítünk kicsiny papírdarabkákhöz. A feltöltött fésű magához vonzza és az érintkezés pillanatában feltölti a papírdarabkákat. Ezután az azonos töltések taszító hatása miatt a fésű "lelővi" magáról a papírdarabokat.



I.50. ábra

Pontosan ezen az elven működik a "Ceyloni mágnes" is. A turmalinkristályban a hőmérséklet-növekedés hatására az egyik kristálytani tengely mentén a pozitív és a negatív töltések szétválnak. Emiatt a kristály egyik fele pozitívvá, a másik negatívvá válik. A kristály elektromos tere révén rántja magához, majd taszítja el a hamuszemcséket.

A kristályokban hő hatására szétváló elektromos töltések a Curie testvérek, a 24 éves Jacques és a 21 éves Pierre figyelmét is felkeltették. A kristályok geometriai szimmetriája és a töltésszétválás iránya közötti kapcsolaton gondolkozva, arra a következtetésre jutottak, hogy a töltésszétválás a kristály megfelelő irányú összenyomásával is kiváltható.

Jacques és Pierre Curie a hatást sokféle anyagon mutatta ki. Kísérleteik alapján megállapították, hogy ha egy ferde határolólapú, nem vezető kristályt összenyomunk, akkor benne minden esetben meghatározott irányú töltésszétválás – elektromos polarizáció – jön létre. Ha ugyanezt a kristályt megnyújtjuk, a polarizáció iránya mindig az előzővel ellentétes lesz.

Ezt a hatást piezoelektromos hatásnak nevezzük. (A piezo szó görögül összenyomást jelent.) A piezoelektromosság jellegzetesen az ionkristályok sajátossága. Oka lényegében a következő. Deformálatlan állapotban a pozitív és negatív ionok töltésközéppontja egybeesik. Rugalmas deformáció hatására a pozitív és negatív ionok rácsa különböző mértékben deformálódik. Ennek következtében a pozitív és negatív töltésközéppont szétválik, a kristály polarizálódik (I.50. ábra).

A polarizációs feszültség igen nagy lehet. Szemléletesen bizonyítják ezt a piezoelektromos öngyújtók és gázgyújtók, amelyekben néhány milliméteres szikra pattan át két elektróda között. Ehhez pedig több ezer voltos feszültség szükséges.

A két leginkább közismert piezoelektromos anyag a Seignette-só (kémiai nevén kálium-nátrium-tartarát) és a kvarc. A Seignette-só kristályai házilag is könnyen növeszthetők, s segítségükkel egyszerűen tanulmányozható a piezoelektromos jelenség. Megfelelő nagyságú Seignette-só kristállyal pl. a következő kísérletet végezhetjük el. Ragasszunk az ábrán látható módon a kristály átellenes oldalaira vékony alumínium- vagy vörösréz fóliát (I.51. ábra). A lemez kristályról lelógó részét visszahajtva jó elektromos csatlakozási lehetőséghez juthatunk. Csatlakoztassuk a két fémfóliát egy magnetofon bemenetére és állítsuk a magnót felvételre. Kopogtassuk ezután ütemesen a kristályt. A kopogás a magnószalagról visszahallgatható, bizonyítva ezzel, hogy a periodikusan deformált kristály lökésszerű elektromos jeleket adott a magnetofonnak.

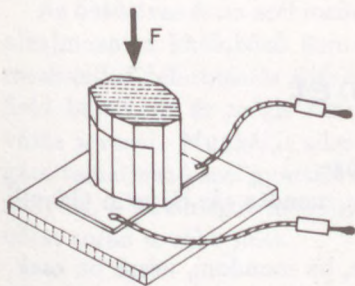
Pontosan ezen az elven működnek a lemezjátszók kristályos hangszedői. A lemez barázdái megrezegtetik a tűt, s ezeket a rezgéseket alakítja elektromos jelekké egy piezoelektromos kristály.

Kissé nagyobb technikai felszereltséggel részletesebben is megvizsgálhatjuk a Seignette-só elektromos jeleit. Csatlakoztassuk a kristályra ragasztott fóliákat egy oszcilloszkóp függőleges eltérítő lemezeire. A kristályra koppantva az oszcilloszkóp képernyőjén gyorsan csillapodó, több éles tüskéből álló jel figyelhető meg. Az oszcilloszkóp képernyője megmutatja, hogy a kristály a koppantás hatására gyors rezgésbe jött.

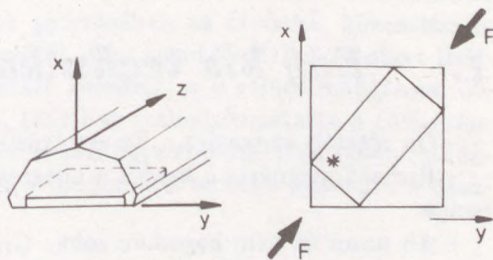
Fordítsuk meg most a hatást! Kapcsoljuk a Seignette-só kristályt egy hanggenerátor nagy ellenállású kimenetére. A generátor frekvenciáját változtatva a kristály sípolni kezd. A hangkibocsátás bizonyítja, hogy a piezoelektromos hatás valóban megfordítható, azaz a feszültség hatására a kristály deformálódik. Meg-

felelő ütemben ismétlődő váltakozó feszültség hatására a kristály berezonál; a sípoló hang a rezonancia miatt felerősödő rezgések következménye.

A piezoelektromosság, mint már említettük, a kristály anizotrópiájának következménye, így maga a hatás is erősen irányfüggő. Nem mindegy tehát, hogy milyen alakú kristállyal dolgozunk és milyen irányból nyomjuk össze. A Seignette-só kristályok esetén a legerősebb hatást akkor kaphatjuk, ha a természetes alakú kristályokból az ábrán látható téglatestet vágjuk ki. A fémfóliát a téglatest *-gal megjelölt oldallapjaira kell ragasztani és a nyílal megjelölt irányban kell a kristályt összenyomni (I.52. ábra).



I.51. ábra



I.52. ábra

A piezoelektromos hatás gyakorlati felhasználása egyre szélesebb körűvé válik. A megfelelően kivágott kvarckristály lemezek nagyon magas hangon "énekelnek", ultrahang-generátorokként használhatók. Kvarckristályokból nagy energiájú ultrahangsugárzó készíthető, amelynek intenzitása a hallható hangoknál észlelt fájdalomküszöb tízezerszeresét is elérheti. Ezek az erős ultrahang nyalábok nagyon jól irányíthatók, s a koncentrált energia segítségével pl. folyadékba kevert részecskék darabolhatók fel, vagy baktériumok pusztíthatók el.

De térjünk vissza a piezoelektromos hatáshoz. A kvarckristály oszcillátorok rendkívül stabilis frekvenciával rezegnek – ez az oka annak, hogy a kvarcórák lelke is ilyen piezoelektromos rezonátor.

Energiaátalakítóként is igen jó hatásfokkal működnek a piezoelektromos anyagok. Ventilátorok helyettesíthetők pl. két piezoelektromos kristályból készült vékony lemez közé fogott fémcsíkkal. Megfelelő feszültség hatására az egyik lemez megnyúlik, a másik összehúzódik, így a piezoelektromos szendvics a hosszabb lemez felé hajlik. A váltófeszültség hatására gyors hajladozásba kezdő piezoelektromos lemezsor forgó alkatrészek nélkül biztosíthat a szokásos ventilátorokhoz hasonló hűtést.

Remény van arra is, hogy a piezoelektromos anyagok segítségével sok, eddig elvesző energiát is megtakaríthatunk. A lehetőségek szinte kimeríthetetlenek, példaként csak azt említjük meg, hogy a gépkocsik kipufogócsövére szerelt kristály a kiáramló gáz lökéseitől rezonálva áramot fejleszthet, s ezzel az autó generátorát tehermentesítheti.

II. HAJLIK, NYÚLIK, TÖRIK

1. *Egy kis technikatörténet*

– Ön rátalált az igazira... Ez egy igazi Crivelli penge...

– Richard megnézte a kardot a világosságnál, s azt mondta rá: Ez nem Crivelli penge...

– Ah uram én nem hazudom soha. Crivelli penge, ha mondom, nézze ön csak. S azzal a kard pengéjét reszkető kezeivel meghajtva, Richard derekát öv gyanánt fogta vele körül. Megcsókolja a hegyével a markolatát.

Richard pedig egyet suhintott a levegőben a karddal, s azzal lecsapott a puskacsőre. A puskacső kétfelé szelve esett jobbra-balra.

Ez a kard nem Crivelli – szölt Richard, visszanyújtva a kardot a zsbárusnak –, ez valóságos Al Bochachen damaszkpenge; az ára száz arany.

A köztívű ember fiai című Jókai-regényből vett idézet mindannyiunk számára ismert történetet idéz fel. A csodálatosan rugalmas, ugyanakkor csorbíthatatlanul kemény damaszkuszi penge sok kalandon át kíséri Baradlay Richardot.

A damaszkuszi pengék titka a középkor óta izgatja a fegyverkovácsok, s újabban a fémkohász tudósok fantáziáját. Az előbbiek az elkészítési módot, az utóbbiak az anyagszerkezeti magyarázatot keresik.

S bár a titok megfejtéséhez a kohászok és a fémfizikusok közel kerültek, a damaszkuszi penge gyártásának pontos technológiai leírása minden bizonnyal még ma is szabadalmaztatható lenne.

A középkori kovácsok teljesítményénél nem kevésbé csodálatosak azonban a modern kor fémfizikájának termékei sem. Használati eszközeink nagy része fémből készül, s ma már szinte felsorolhatatlan azoknak az ötvözeteknek a száma, amelyek az eleinte szinte egyeduralkodó vas alapanyagot helyettesítik. De maguk a vasból készült anyagok is rengeteget változtak az utóbbi kétszáz esztendő során. A korszakváltások dátumainak kijelölése mindig kissé önkényes, a vas felhasználásának történetében azonban biztosan mérőöldkönek tekinthető az első vashíd megépítése. A ma is álló öntöttvas-híd a Severn folyó völgye felett egy angol kisvárosban építették 1778 és 1781 között. A híd az építést követő években idegenforgalmi nevezetesség volt, s a várost azóta már Ironbridge Townnak: Vashídvárosnak nevezik. A hídról neves festők készítettek képeket, s még a

híd mellett közlekedő postakocsit is azzal reklámozták, hogy a művészet legmegdöbbentőbb alkotása mellett halad el. A vashíd hírnevét azonban hamarosan homályba borították más vasból készült csodák. Angliában 1818-ban megépítették az első vasból készült hajót, a Volcano-t, s 1825-ben felavatták az első vasutat. Nem maradtak el a franciák sem; 1899-ben Gustav Eiffel mérnök megépítette a maig is Párizst szimbolizáló 300 méter magas karcsú tornyot. A kortársak nem bíztak a torony szilárdságában, s maga Eiffel is csak negyedszázadnyi élettartamot mert garantálni. Az Eiffel-torony azonban a rossz állapotáról szóló időről-időre felmerülő híresztelések ellenére ma is áll és Párizs egyik legvonzóbb turisztikai látványossága.

Az öntöttvas és az acél mellett a XIX. század végén keztek felismerni és tudatosan alkalmazni a különböző fém alapanyagok gyártásában az ötvözesi, hőkezelési és mechanikai deformációs eljárások hasznosságát. Egy angol fémfizikus, Robert Hadfield hajlékony és mégis kemény acélt akart készíteni, s e célból mangánnal ötvözte a vasat. Munkáját siker koronázta, 1883-ban szabadalmaztatta a 13% mangánt tartalmazó acél gyártási eljárását. Ez az acél figyelemreméltóan szilárdnak bizonyult, s különleges módon, szilárdsága a mechanikai terhelés hatására a használat során tovább nőtt.

2. *Mitől függnék a fémek tulajdonságai?*

A technikatörténeti példák sorát még folytathatnánk, ehelyett azonban gondolkozunk el azon, hogy a gyakorlati élet milyen követelményeket is vet fel egy-egy fémtárggyal kapcsolatban. Milyen tulajdonságok azok, amik a kohászokat, fémfizikusokat egyre újabb ötvözetek kidolgozására serkentik. A kérdés persze túl általános, hiszen a felhasználástól függően az anyaggal szemben támasztott követelmények ellentmondóak is lehetnek.

A damaszkuszi pengétől azt várjuk, hogy különlegesen rugalmas és ugyanakkor nagy szilárdságú legyen. A hidak acéltartóitól azonban nem várunk nagymértékű rugalmas alakváltozást, sőt, azt kívánjuk, hogy alakjuk terhelés hatására se változzék. Ismét mások a követelmények azokkal a fémekkel szemben, amelyekből az autók karosszériája készül. A karosszériának is szilárdnak kell lennie, ugyanakkor azonban egy-egy szerencsétlen ütközéskor éppen az óvhatja meg a vezető életét, ha a kocsiszekrény viszonylag nagymértékben deformálódik. Képzeljük el, mi történik egy autó vezetőjével, ha egy tökéletesen merev karosszériájú gépkocsival fának ütközik; az autó, s benne a vezető is a másodperc törtrésze alatt lefékeződik. A sofőr ez alatt az idő alatt akár a nehézségi gyorsulás 100-150-szeresével is lassulhat. Ezt a terhelést az emberi szervezet nem képes elviselni. Az ütközés ideje megnövelhető, ha a karosszéria maradandó deformációjával a megállásra hosszabb utat biztosítunk. Ennek következtében a gépkocsiveető lassulása is elviselhető mértékűre csökkenhet.

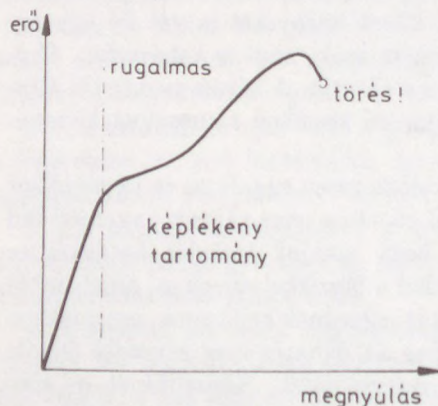
Persze a gépkocsi karosszériájával szemben még egyéb követelmények is vannak. Elvárjuk pl., hogy energiaszegény világunkban a motor minél kevesebb haszontalan

terhet cipeljen, a váz tehát legyen könnyű. További gazdasági szempont, hogy olcsó alapanyagot és lehetőleg egyszerű gyártási technológiát használjunk, ugyanakkor a termék időtálló legyen, tehát ellenálljon a korróziónak.

Nos, most már csokorba szedtünk néhány olyan tulajdonságot, amit a fémtárgyaktól elvárunk; rugalmasság, szilárdság, esetenként megfelelő mértékű alakváltozás, viszonylag egyszerű gyártási technológia, korrózióállóság, stb. Mindezek megvalósítására rendelkezésünkre áll a modern metallurgia fegyvertára, az ötvözés, a hőkezelés és a különböző alakítási technikák (kovácsolás, hengerlés, nyújtás, vákuumformázás stb.). Az eddigiekhez hasonlóan most is megpróbáljuk röviden összefoglalva az olvasó elé tárni azokat az anyagszerkezeti alapismereteket, amelyekre támaszkodva a fémfizikában alkalmazott eljárások megérthetők.

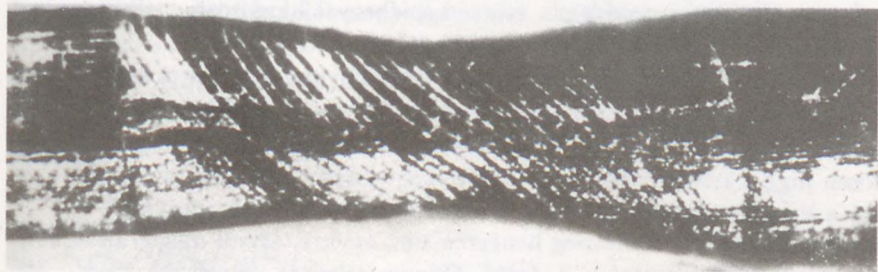
3. A kristályok rugalmas és képlékeny alakváltozása

A legegyszerűbb deformáció az egyszerű nyúlás. Kövessük végig egy huzal sematikus szakítási diagramja alapján a nyúlás jellegzetes szakaszait (II.1. ábra). A szakítási diagram egyébként a fémek kísérleti minősítésének egyik fontos eszköze. A vizsgálat során a huzalt fokozatosan növekvő erővel addig nyújtjuk, míg el nem szakad. A nyújtás során egy írószerkezet automatikusan grafikont rajzol az erő és a megnyúlás összefüggéséről – ez a szakítási diagram.



II.1. ábra

A nyújtás kezdeti szakaszán a húzóerőt megszüntetve a huzal eredeti hosszára ugrik össze. Ez a rugalmas alakváltozás tartománya. A diagramon ennek a tartománynak meredek egyenes szakasz felel meg, ami mutatja, hogy a húzóerő arányos a megnyúlással. A húzóerőt növelve az alakváltozás maradandóvá válik, azaz a huzal a terhelés megszűnte után sem nyeri vissza eredeti alakját. Ez a képlékeny alakváltozás tartománya. Azt a legkisebb feszültséget (a feszültség a hu-



II.2. ábra



II.3. ábra

zal egységnyi keresztmetszetére jutó erőhatás), amelynek alkalmazásakor képlékeny alakváltozás lép fel, folyáshatárnak nevezzük. A folyáshatárnál nagyobb feszültségeknél igen nagymértékű maradandó alakváltozások következhetnek be.

Extrém példa, hogy egy speciális úgynevezett eutektikus ón-ólom ötvözetet 280°C -on 55-szörösére nyújtottak meg. Ez az úgynevezett szuperképlékeny alakváltozás csak különleges körülmények között megy végbe, de 20-40%-os nyúlások normál szerkezeti anyagainkban is végbemehetnek. (A szuperképlékenységgel a 7. fejezetben még részletesebben is foglalkozunk.)

A legtöbb esetben a képlékeny alakváltozás során az egyre növekvő alakításhoz egyre nagyobb feszültség szükséges. Ezt a jelenséget nevezzük alakítási keménységnek.

A valóságban a különböző anyagok a terhelés hatására nem mindig a II.1. ábrán látható diagramnak megfelelően nyúlnak. Az anyag speciális szerkezeti sajátosságai következtében az egyes nyúlási tartományok aránya erősen változhat.

Egyes úgynevezett rideg anyagok pl. szinte képlékeny alakváltozás nélkül, már a rugalmas tartomány végén eltörnek.

A kristályok képlékeny tulajdonságainak és a kristályszerkezetnek a kapcsolatát, egykristályokat vizsgálva érthetjük meg a legkönnyebben. A kísérleti tapasztalatok azt mutatták, hogy a maradandó alakváltozáshoz szükséges feszültség (a folyáshatár) erősen függ a kristálynak a húzási irányhoz viszonyított orientációjától, azaz attól, hogy a kristály rácssíkjai milyen szöget zárnak be a húzás irányával.

A II.2. ábra (fotó) egy eredetileg hengeres cink egykristályról megnyújtás után készült fényképfelvételt mutat. A fotón érdekes jelenség figyelhető meg. Miközben a hengeres minta egy kicsit elvékonyodott, felületén finom ferde barázdák, úgynevezett csúszásvonalak jelentek meg. A kristály egyes rétegei egy kártyacsomag lapjaihoz hasonlóan csúsztak el egymáshoz képest. A kártyalapok a hatszöges szoros illeszkedésű kristályszerkezet síkjainak felelnek meg.

Polikristályos fémeket alakítva, az egyes kristályszemcsékben mikroszkóppal szintén megfigyelhetők a csúszásvonalak. A II.3. ábra (fotó) egy, a nyíllal jelzett irányban meghúzott polikristályos rézmintáról készült felvételt mutat. Az egyes szemcsékben a szemcse irányítottságától függően más-más irányokban történt elcsúszás.

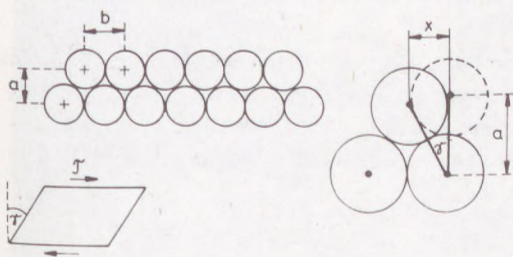
3.1. *A deformáció mechanizmusa – A Frenkel-féle becslés*

Az alakváltozással kapcsolatos kísérleti tapasztalatok már régóta ismeretesek voltak, anyagszerkezeti magyarázat azonban csak századunk 30-as éveiben született, jóval a fémek kristályos szerkezetének felismerése után. Frenkel, orosz fizikus a csúszásvonalak megfigyeléséből kiindulva 1926-ban egy egyszerű feltételezés segítségével elméleti úton próbálta meghatározni a kristályos anyagok folyásfeszültségét. Feltételezése szerint a kristályos anyagok deformációja során a kristály rétegei egy-egy kristálytani sík mentén csúsznak el egymáshoz képest. A legkönnyebben elcsúszó atomsíkok általában a szoros illeszkedésű atomsíkok. Ennek az oka, hogy a fémkristályokban ezek a síkok nagyobb távolságban vannak egymástól, mint a többi rácssíkok, így a síkon belül fennálló igen erős atomi kötések mellett a síkok között a vonzóerő viszonylag gyengébb. Hogyan képzelhetjük el ezután az atomsíkok egymás feletti elcsúszását? A II.4. ábra két egymás feletti azonos illeszkedésű atomsík metszetét mutatja. Ha a két réteget egymáshoz képest kissé

elmozdítjuk, akkor a felső réteg atomjai kiemelkednek az egyensúlyi helyzetnek megfelelő mélyedésekből. A rétegek elcsúszásához eleinte egyre nagyobb erő szükséges, amint azonban a rétegek elmozdulása eléri az atomtávolság felét, az erő zérusra csökken, és a továbbiakban az atomok már maguktól belecsúsznak az új egyensúlyi helyzetbe. Egyetlen ilyen elemi, kristálysíkbeli csúszás során a két sík egymáshoz képest éppen egy atomtávolsággal (rácállandó) mozdul el. Frenkel ebben a képben gondolkodva határozta meg a kristályok folyásfeszültségét. Bár az

így számított eredmény két nagyságrenddel nagyobb a kísérletileg meghatározott értéknél, mégis tanulságos a gondolatmenet végigkövetése.

A II.4. ábrán látható modellből következik, hogy a nyírófeszültségnek az atomtávolság függvényében periodikusan kell változnia. Amikor a felső réteg



II.4. ábra

atomjai az alsó réteg gödreiben ülnek, a részecskék egyensúlyban vannak, a rájuk ható erő zérus, s ez a helyzet atomtávolságonként megismétlődik. Közelítsük az egyensúlyi helyzetből kimozdított atomok esetén a nyírófeszültséget a

$$\tau = \tau_0 \sin \frac{2\pi}{b} x \quad (3.1)$$

függvénnyel, ahol b az atomtávolság (II.4. ábra). A maximális τ_0 feszültség abból a feltételből határozható meg, hogy kicsiny elmozdulások esetén teljesülnie kell a $\tau = G \cdot \gamma$ Hooke-törvénynek, mely szerint a nyírófeszültség arányos a nyírási szöggel. A G arányossági tényezőt nyírási modulusznak nevezzük. Kicsiny elmozdulások esetén a szinuszfüggvény az argumentumával közelíthető, azaz

$$\sin \frac{2\pi x}{b} \approx \frac{2\pi x}{b} \quad (3.2)$$

A II.4. ábráról leolvasható, hogy a nyírási szög:

$$\gamma \approx \frac{x}{a} \quad (3.3)$$

A Hooke-törvényből a (3.2) és a (3.3) közelítések felhasználásával

$$\tau_0 \frac{2\pi x}{b} = G \frac{x}{a}, \quad (3.4)$$

azaz

$$\tau_0 = \frac{G b}{2\pi a}. \quad (3.5)$$

Mivel $a \sim b$, a két atomréteg egymás feletti elcsúsztatásához szükséges feszültségre

$$\tau_0 = \frac{G}{2\pi} \quad (3.6)$$

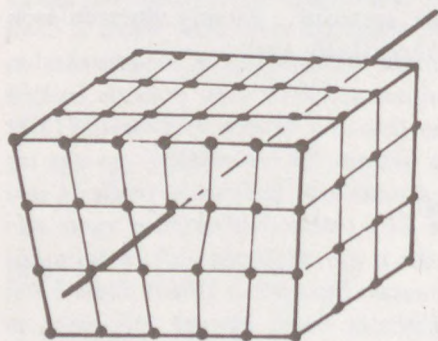
adódik. Ez az eredmény azonban, mint már említettük, több nagyságrenddel nagyobb, mint a kísérletileg kapható τ_0 érték.

A tökéletes kristályt feltételező modell alapján nem értelmezhető az alakítási keményedés sem. Az atomsíkok minden egyes elemi elcsúszása után visszaáll ugyanis az eredeti egyensúlyi helyzet, ezért tökéletes kristályokban az alakváltozás növekedtével a tapasztalattal ellentétben változatlan folyásfeszültségre lenne szükség.

3.2. Többet ésszel, mint erővel

A kísérleti tapasztalatokkal egyező eredményt adó elmélet alapjait Orowán Jenő és Polányi Mihály magyar, valamint G. J. Taylor angol kutatók dolgozták ki 1934-ben. Abból indultak ki, hogy a kristályban a teljes csúszási sík mentén egyszerre végbemenő mozgás helyett a deformáció fokozatosan terjed ki a szomszédos tartományokra.

E fokozatosság megértéséhez hozzásegít bennünket a következő példa. Képzeljük el, hogy egy hatalmas szőnyeget kell néhány centiméterrel arrébb húznunk. Erre semmi esélyünk sincs, ha az egész szőnyeget egyik végénél fogva egyszerre akarjuk elhúzni. Megoldhatjuk azonban a feladatot akkor, ha egy kicsiny gyűrődést kis lé-



II.5. ábra

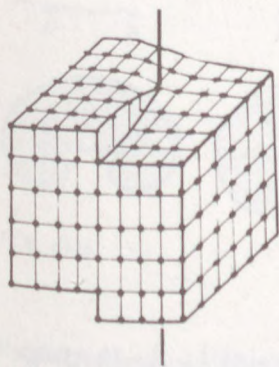
pésekben fokozatosan arrébb nyomunk. A gyűrődéssel a szőnyeg másik végére érve az anyag újra kisimul, a szőnyeg egésze néhány centiméterrel arrébb került.

Hasonló elképzelést dolgozott ki Orowán és Polányi a kristálybeli csúszások magyarázatára. Feltételezésük szerint a csúsztató feszültség hatására az elmozduló atomsík egy kicsiny szakaszán az atomok összesűrűsödnek, s ez a sűrűsödés a szőnyegen létrehozott gyűrődéshez hasonlóan vonul végig a kristályon.



II.6. ábra

Amint a sűrűsödés egyre messzebbre és messzebbre jut, a két kristályfél egyre nagyobb és nagyobb tartományra tolódik el egymáshoz képest egy atomtávolságnyi-ra. A kristály határára érve a "gyűrődés kisimul", de az anyag felületén egy atomnyi lépcsőt hagy maga után.



II.7. ábra

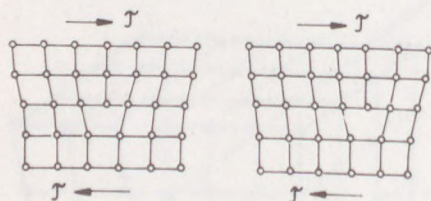
Az elcsúszott és eredeti helyén maradó tartományok határát szemügyre véve megállapíthatjuk, a kicsiny sűrűsödést egy olyan rácssík okozza, amelynek a mozdulatlan kristályfélben nincs folytatása (II.5. ábra). Az így keletkező kristályhibát nevezzük éldiszlokációnak. Orowán és Polányi elméleti hipotézisét az elektronmikroszkópia megjelenésével sikerült kísérletileg is igazolni. Az elektron-

mikroszkópos felvételeken jól felismerhetők a kristályok elcsúszott és el nem csúszott tartományait határoló vonalmenti hibák, a diszlokációk (II.6. ábra, fotó, Illy Judit felvétele).

Az előzőekben leírt egyszerű elcsúszás esetén a diszlokációvonal az ábra síkjára merőlegesen húzódik, az atomi elmozdulás pedig erre merőlegesen egy atomtávolságnyi. A diszlokációkat általában ezzel jellemezzük. Létezhetnek olyan diszlokációk is, amelyekben az atomi elmozdulás iránya a diszlokációvonal irányára nem merőleges. Az ilyen általános diszlokációk esetén az atomi rend elképzelése már igen nehéz. Újabb példaként a II.7. ábrán inkább az éldiszlokációhoz hasonlóan fontos speciális esetet, a csavardiszlokációt mutatjuk be. A csavardiszlokációban a szomszédos tartományok atomjainak elmozdulása párhuzamos a diszlokációvonalal. Ennek hatására a rácssíkok csavarmenetszerűen torzulnak. Erre utal a hiba elnevezése is.

3.3. A képlékeny alakváltozás diszlokációs elmélete

A diszlokációk segítségével könnyen megérthettük az atomsíkok elcsúszásának mechanizmusát. Azonnal érthető az is, hogy a csúszási folyamat elindításához valóban sokkal kisebb csúsztató feszültség szükséges, ha a kristályban diszlokációk is léteznek, mint egy tökéletes egykristály esetén. Ehhez csak azt kell meggondolnunk, hogy a nyugalmi helyzetben egy diszlokáció, illetve a hozzá tartozó extra rácssík a II. 8. ábrán látható módon szimmetrikusan helyezkedik el két hibátlan rácssík között. Ekkor az extra rácssík atomjaira két oldalról ható erők éppen kiegyenlítik



II.8. ábra

egymást. Amint a diszlokáció pl. jobb felé kezd haladni, az erők kiegyenlítetttsége megszűnik, s a jobbról ható torzító erők ellenében csak a külső feszültség hatására képes a diszlokáció tovább mozogni. Ezen mozgás során azonban a tényleges elmozdulás kicsiny, annyi történik ugyanis csak, hogy az extra rácssík a továbbiakban összekapcsolódik az alsó kristályfél egy rácssíkjával, s ezáltal a diszlokációvonal egy rácállandónyit tovább lép. A diszlokációvonal mozgása során tehát mindig csak kevés, a diszlokációvonal közelében levő kémiai kötés szakad fel, s a

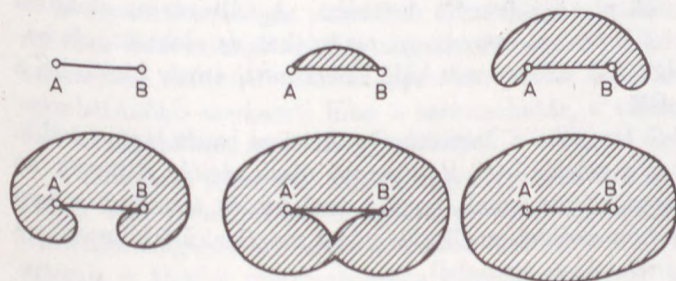
felszakadt kötések helyett az extra rácssík tovahaladásával ezek a kötések rövidesen újjászerveződnek.

A képlékeny alakváltozás a fémekben meglévő nagyszámú diszlokáció külső feszültség hatására végbemenő mozgása révén jön létre. Jól bizonyítja ezt az, hogy nagyon speciális körülmények között készített egykristályok, amelyek diszlokációkat nem tartalmaznak, rendkívül nehezen alakíthatók maradandóan.

Az elektronmikroszkópos felvételek tanúsága szerint a kristálysíkok elcsúszása során több ezer diszlokáció mozog egyszerre. A képlékeny deformáció ennyi diszlokáció folyamatos pótlását igényli! A tapasztalat azt mutatja, hogy az anyagban a képlékeny deformáció során nagyteljesítményű diszlokációforrások működnek. Leggyakoribbak az úgynevezett Frank-Read-források, amelyek úgy jönnek létre, hogy a csúszási síkban mozgó diszlokáció egy-egy szakasza áthatolhatatlan akadályba ütközik és megakad. Ilyen akadályt jelenthet pl. két diszlokációvonal találkozási pontja, vagy egy-egy idegen atomcsoport beékelődése a kristályba.

Az akadályoktól rögzített végű diszlokációszakasz a külső feszültség hatására továbbmozog, kihajlik, s a II.9. ábrán látható módon egyre nagyobb hurkot képez. Végül a hurok kétoldalt összekapcsolódik, s leszakad a forrásról. Az egyesülés közben a visszahajló diszlokációvonalnak a hurok kialakításában nem szereplő része a diszlokációvonal eredeti helyzetébe az akadályok közé ugrik vissza. Így a folyamat újra megismétlődhet. A diszlokációforrás működését a szappanbuborék-sorozatot fújó egyszerű gyerekjátékhoz hasonlóan képzelhetjük el.

A képlékeny alakváltozás közben a diszlokációk száma a források működése nyomán állandóan nő. Mi okozza hát azt, hogy az alakításkor a fémek többnyire



II.9. ábra

keményednek? A diszlokációk sokszorozódásával az anyagot kuszán át meg átszövő diszlokációvonalak egyre többször metszik egymást. A metszéspontban rögzülő diszlokációvonal pedig egyre nehezebben és nehezebben hozható mozgásba. Ennek az az oka, hogy a diszlokációk által létrehozott rácstorzulások a kristályban helyi, belső feszültségeket hoznak létre. Ezek a belső feszültségek esetenként jóval meghaladják a külső feszültséget, s megakadályozhatják a diszlokációforrások további működését, valamint a diszlokációk vándorlását.

3.4. Addig üsd a vasat, amíg meleg!

A diszlokációk sokszorozódási mechanizmusát most már nagyjából értjük. Változatlanul fennáll azonban a kérdés, hogy miért keletkeznek egyáltalán diszlokációk az anyagban.

Felmerülhet bennünk, hogy a diszlokációk a ponthibákhoz hasonlóan kötelező fogyatékoságai a kristályoknak. A ponthibák tárgyalásakor megállapítottuk ugyanis, hogy a termikus egyensúly megköveteli bizonyos számú ponthiba létezését. A ponthibák törvényszerű megjelenését azzal indokoltuk, hogy a hiba keletkezésével járó energianövekmény mellett a kristály lehetséges elrendeződéseinek száma is rohamosan nő, s ez a két hatás adott hőmérsékleten meghatározott számú rácslyuk megjelenésekor kompenzálja egymást.

Nos, a diszlokációk esetén a helyi ráctorzulások jelentős rugalmas energia felhalmozódását eredményezik, a kristály rendezetlenségét (mikroállapotainak számát) azonban csak jelentéktelen mértékben növelik. Ez utóbbi azzal magyarázható, hogy egy vonalhiba maga is sok atomra kiterjedő képződmény, ezért önmagában túlságosan rendezett ahhoz, hogy a teljes kristály számára növelje az elrendeződési lehetőségek (a mikroállapotok) számát.

A diszlokációk tehát nem stabilis képződmények, a kristályszerkezetnek nem olyan szükséges velejárói, mint a ponthibák.

Fordítsuk le most ezt a mikroszerkezeti eredményt a gyakorlati fémfizika nyelvére. Végezzük el a következő egyszerű kísérletet: puha rézdrót egyik végét fogjuk satuba, a másikat pedig egy villanyfűró tokmányába, a fűróhegy helyére. Indítsuk meg egy rövid időre a fűrőt. A puha huzalból kemény "rézszög" keletkezik, amit kalapáccsal beverhetünk pl. egy fenyőfa deszkába. A változás az alakítási keményedés következménye. A fűróval megcsavart rézdrótban az alakváltozás hatására diszlokációk millióiból álló szövevényes háló keletkezett, amely blokkolta a diszlokációk további mozgását.

Tartsuk most Bunsen-éggő lángjába a "rézszöget". A huzal ismét lággyá válik. A melegítés hatására a deformáció által létrehozott diszlokációk eltűnnek az anyagból. Ez egyenes következménye annak, hogy a diszlokációk termikusan nem stabilis képződmények, s a hőmérséklet-emelkedés miatt megélénkülő hőmozgás a diszlokációkat szétzilálja, eltünteti az anyagból.

A diszlokációkat 1934 óta ismerjük, az alakítási keményedés és melegítés hatására történő lágyulás azonban évezredes tapasztalat. Ezt használják ki a kovácmesterek, amikor a hidegen alakított, felkeményedett fémeket utólagos hőkezeléssel kilágyítják, vagy amikor az alakítási keményedés hatását úgy kerülik el, hogy a fémeket melegen, izzó állapotban alakítják.

Többször persze éppen ennek az ellenkezője a célunk, meg akarjuk őrizni az alakítással vagy egyéb módszerekkel létrehozott, a fém anyagát keménnyé tevő diszlokációszerkezetet. A stabilis diszlokációszerkezet kialakításának megértéséhez azonban egyéb, a diszlokációk mozgását akadályozó hatásokkal is meg kell ismerkednünk. Mielőtt azonban ezekre térnénk át, vegyünk észre, hogy az eredeti kérdésre, hogy miért keletkeznek diszlokációk a fémekben, még mindig nem választunk.

Nos a kérdés valóban nehéz, s jelenleg a legvalószínűbb válasz az, hogy a diszlokációk a kristályosodási folyamat során jönnek létre. A dermedés közben ugyanis a folyékony és szilárd halmazállapot térfogata közötti nagy különbség helyileg olyan belső feszültséget hoz létre, ami rácshibák, így diszlokációk keletkezéséhez vezet. Hasonló hatású a kristályosodás közben az egyenlőtlen hűlés és az idegen anyagok kiválása miatt keletkező belső feszültség is. A tapasztalat szerint diszlokációk még az igen gondosan növesztett, nagy tisztaságú egykristályokban is keletkeznek. Az ilyen kristályokban köbcentiméterenként kb. 10 méter összhosszúságú diszlokációvonal található. Ez rendkívül kevés, hiszen a polikristályos anyagokban lágy állapotban a diszlokációk hosszúsága 100 és 1000 km között van. Erős deformáció hatására pedig ez az érték a tízmillió kilométert is elérheti. Ez utóbbi adat azt jelenti, hogy ha egy 15 cm^3 térfogatú, erősen alakított fémkocka összes diszlokációit egymás után fűznénk, akkor ez a szál a Földtől a Napig érne.

3.5. *Hogyan növelhető a fémek szilárdsága?*

Az előzőekben megismerkedtünk a fémek maradandó alakváltozását létrehozó atomi mechanizmussal, a diszlokációmozgással. Kiderült, hogy a szilárdságot lényegében úgy növelhetjük, hogy a diszlokációmozgást amennyire csak lehetséges, akadályozzuk. A mozgás megakadályozásának egyik módja, mint már láttuk, a szövetvényes, önmagát rögzítő diszlokációháló létrehozása. Léteznek azonban egyéb lehetőségek is.

A diszlokációmozgás atomsíkok elcsúszását közvetíti, s ezt a mozgást az atomi rendben bekövetkező szabálytalanságok megnehezítik. Ilyen szabálytalanság egy kristályban rendkívül sokféleképpen létrejöhet. A polikristályos anyagokban a legszembetűnőbb szerkezeti hiba a szemcsehatár, s valóban a polikristályok általában keményebbek, mint az egykristályok.

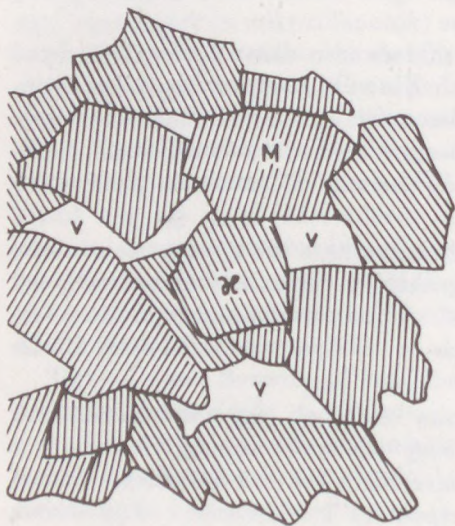
A természet jelenségei azonban igen gyakran kétarcúak. Így a szemcsehatárok esetén sem mondhatjuk ki egyértelműen, hogy jelenlétük mindig hozzájárul a fém szilárdságához. A szemcsehatárok laza szerkezete kedvező lehetőséget teremt ugyanis a kicsiny mikroszkopikus méretű repedések keletkezésére. Egy durva, nagyszemcsés anyagban a határokon összeérő repedések mentén akár az egész fémdarab eltörhet. A szemcsehatárok szilárdító hatása tehát többnyire csak megfelelően finom szemcse szerkezet esetén jelentkezhet.

A diszlokációmozgást megakadályozhatjuk azonban egy szemcsén belül is, ha oda a környezetétől eltérő szerkezetű anyagból álló kis csomókat, úgynevezett kiválásokat viszünk. A kiválások lehetnek ötvöző atomokból álló kis atomcsoportok, de alkothatnak kiválást az eredeti anyagnak az alapszerkezettől eltérő felépítésű csoportjai is. Végül igen hatékony módja az anyag keményítésének az, ha a kristályok diszlokációtartalmát szinte a nullára csökkentjük. Ilyen tűformájú diszlokációmentes kristályokat pl. vasból is előállíthatunk, gyakorlati jelentőségük általában csekély, bár egyes anyagokban felhasználhatók a szilárdság növelésére.

Ismét a természet látszólagos ellentmondásainak egyikébe ütköztünk, a leglágyabb és a legszilárdabb vasanyag egyaránt egykristály! Ez az ellentmondás persze számunkra már nem jelent problémát, hiszen tudjuk, hogy a szilárdság a fémekben elhelyezkedő vonalhibák pókhálószövedékének sűrűségétől függ.

4. *Mi teszi a vasat acéllá?*

A kis-ázsiai Balgala templomából előkerült a "bulat", a damaszkuszi acél egy formájának leírása: "A bulatot addig kell melegíteni, míg úgy fénylik, mint a felkelő nap a sivatagban, ezután le kell hűteni a királyi bíbor színére, majd egy izmos rabszolga testébe kell mártani... a rabszolga ereje átvándorol a pengébe, ez adja a fém erejét." Az eljárás szerint tehát a pengét magas hőfokra hevítették (a vörösesfehér sivatagi naphoz hasonló színben izzó vas kb. 1000°C -os), majd levegőn hűtötték (a bíborszínű izzás kb. 800°C -nak felel meg), végül 37°C hőmérsékletű sós folyadékban edzették.



II.10. ábra

Az empirikus leíráshoz kapcsolódó babonás elképzelés a kardba átvándorló emberi erőről, természetesen csak a régi korok emberének mítoszteremtő fantáziáját tükrözi. Maga a leírás azonban mutatja az ősi fémfizika eszköztárát, az izzó fém színét, mint a hőmérséklet jelzését, s a levegőn, illetve a folyadékban való edzést. A fémek előállításának és megmunkálásának technológiája évszázadokig a balgalai templomban találthoz hasonló utasításokon alapult. Az ősi "fémkohászoknak" nem voltak pontos műszereik, s nem ismerték az anyag szerkezetét sem.

Reaumur, akinek a nevét méltatlanul, szinte csak egy ma már nem használatos hőmérsékleti skáláról ismerjük, volt az első, aki tudományos igénnyel közeledett az acél gyártási technológiájához, és a fém szerkezetéhez. Emlékiratai szerint Reaumur egyrészt az acélgyártás technológiájával, másrészt különböző típusú vasanyagok töretfelületének mikroszkópos vizsgálatával is foglalkozott. Az ősidők óta használt és manapság "cementálás" néven ismert gyártási folyamatot vizsgálta. Ennek során a vasat szénnel dúsítják. A legrégebbi eljárásban ezt úgy hajtották végre, hogy vasérc és faszén keverékét hevítették. Tulajdonképpen a hevítés hatására a vasba diffundáló szénatomok *keményítik acéllá a vasat*. Mint már említettük, az eljárás ismert volt, a mechanizmus azonban nem. Reaumur volt az első, aki az 1700-as évek elején kijelentette, hogy az acél nem más, mint olyan vas, amelybe sók és szén diffundált. A részletesebb kémiai analízist Bergman, svéd kémikus végezte el, ő ismerte fel, hogy az acél lényegében a vas és a szén kémiai kölcsönhatásának terméke. De térjünk vissza még egy pillanatra Reaumurhoz. Mikroszkópos megfigyeléseit rögzítő rajzai arról tanúskodnak, hogy talán ő volt az első, aki a fémek szemcseszerkezetét a töretfelületeken felismerte és vizsgálta (II.10. ábra).

A mikroszkóp felhasználása az anyagvizsgálatban döntő fontosságú volt. Ez volt ugyanis az első lépés az empirikus tapasztalatok anyagszerkezeti magyarázata felé!

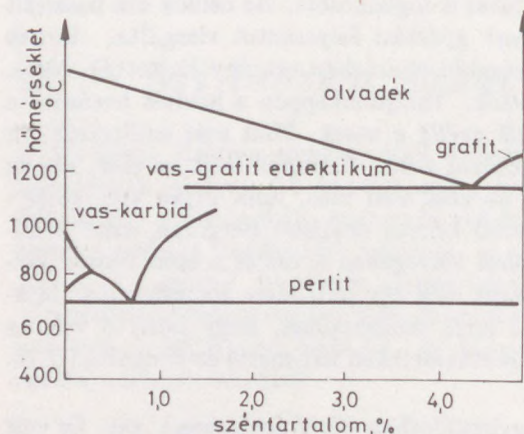
4.1. *Sorby: a modern fémtan megalapítója*

A mikroszkópos anyagvizsgálat, s ezzel együtt a modern fémtan megalapítója azonban nem Reaumur, hanem Henry Clifton Sorby, aki már nem töretfelületet, hanem simára csiszolt, polírozott fémfelületet vizsgált. 1863-tól kezdve Sorby többféle acél szerkezetét is tanulmányozta mikroszkópban. Tudománytörténeti jelentőségű az 1887-ben megjelent dolgozata, melynek ábrái között a világon először láthatók fémfelületekről készült mikroszkópos fényképfelvételek.

Az acélt alkotó összetevők között Sorby azonosította a tiszta vasat, a grafitos szenet, egy vas és szén keverékéből álló összetevőt, amelyet ma cementitnek nevezünk, valamint az egyes csiszolatok gyöngyházfényű csillogását okozó perlitet (pearl: angol szó, gyöngyházat jelent). Ez utóbbi szövettel sokat foglalkozott, megállapította, hogy a perlit váltakozva elhelyezkedő tiszta vas, valamint a vas és szén keverékéből álló lemezek együttese.

A Sorby úttörő munkássága alapján kialakult technikát a kutatók gyorsan elsajátították és továbbfejlesztették, s a mikroszkópban az acél szerkezetének szinte végtelen változatossága tárult fel. Hozzá lehetett kezdeni hát a rendszerezéshez. A rendszerezés alapját az képezte, hogy a mikroszkópban megfigyelhető szerkezet a hőmérséklettől és a vas széntartalmától függ. A szerkezeti elemek és a külső körülmények bonyolult kapcsolatának áttekintésére speciális grafikonokat, úgynevezett fázisdiagramokat konstruáltak, amelyekről leolvasható, hogy az adott százalékos összetétel és hőmérséklet esetén a vas-szén ötvözet melyik fázisa jön létre. A kohászok és a fémfizikusok kísérleti munkája nyomán egyre pontosabb és

pontosabb fázisdiagramokat szerkesztettek a vas-szén ötvözet különböző fázisainak megjelenéséről. Az olvadék és a szilárd állapotú tartomány tulajdonságait feltérképezték. A mai fémfizika vagy kohászati tankönyvek vas-szén állapotábrái időnként még az egyetemi hallgatók számára is riasztóan bonyolultak. Szeretnénk, ha



II.11. ábra

az Olvasó mégis fogalmat alkothatna arról, hogy milyen is egy fázisdiagram. A II.11. ábrán ezért egy 1907-ben készült vas-szén állapotábrát mutatunk be. Az ötvözet pontos viselkedéséről ekkor még viszonylag keveset tudtak, a fázisdiagram lényeges vonásai azonban ezen az ábrán is jól tükröződnek. Az ábrán látható vonalak azt jelzik, hogy egy adott fázis milyen hőmérsékleten és hány százalékos széntartalom mellett jelenik meg.

4.2. Szerkezetváltozás szilárd állapotban

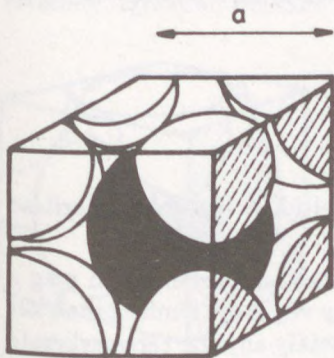
A szokatlanak tűnő szilárd állapotban bekövetkező fázisátalakulások egyike a tiszta vas esetén egyszerű kísérlettel is megmutatható.

Feszítsünk ki egy vashuzalt két szigetelőállvány között!

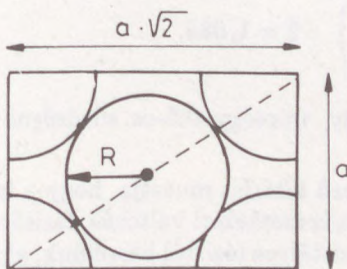
Kapcsoljunk ezután a huzalra változtatható feszültségű áramforrást és kezdjük növelni az áramerősséget! Az áram által leadott hő a huzalt felmelegíti. Eleinte a huzal a hőtágulás miatt egyre inkább "belóg". A huzal hosszabbodása még inkább felgyorsul, amikor a vasdrót izzásba jön. Ekkor azonban a vörösen izzó huzal hirtelen megrövidül, belógása csökken. További melegítés hatására az izzó drót ismét megnyúlik. Az áramerősség gyors csökkenésével a huzal ismét lehűtendő, s ekkor a hosszváltozás fordított értelemben játszódik le. Ekkor a huzal összehúzódását, majd hirtelen nyúlását, s ezután ismét összehúzódását figyelhetjük meg.

A melegítés hatására bekövetkező nyúlás ellenére a vashuzal 900°C-os hőmérséklet környékén hirtelen összehúzódik. A meglepő jelenségből arra következtethetünk,

hogy ezen a hőmérsékleten az anyagban szerkezeti változás megy végbe. A vas – amint ezt már az I. rész 3.2. fejezetében megállapítottuk – közönséges hőmérsékleten tércentrált kockarácsban kristályosodik. Ezt a szerkezetet a szakirodalomban α -vasnak, vagy ferritnek nevezzük. 911°C felett azonban a vas stabilis szerkezete a lapcentrált köbös kristályszerkezet, amelyet γ -vasnak vagy auszitenitnek nevezünk. A felületen centrált köbös rács tömörebb térkitöltésű szerke-



II.12. ábra



II.13. ábra

zet, mint a tércentrált köbös, így a 911°C -on végbemenő szerkezeti változás értelhető módon a húzal megrövidülését okozza.

Az α – γ fázisátalakulás során bekövetkező sűrűségváltozást egyszerű számítással is követhetjük, ha feltételezzük, hogy a vas atomjai merev gömbök, amelyek különböző kristályszerkezeti módosulatokban szorosan illeszkednek egymáshoz. A tércentrált köbös szerkezetben a kristály elemi egysége, amint azt az I. részben leírtuk, egy olyan kocka, amelynek csúsaiban és középpontjában helyezkedik el egy-egy vasatom (II.12. ábra). A merev golyóknak képzelt atomok akkor helyezkednek el a legszorosabban, ha a testátló mentén érintkeznek, így a tércentrált köbös szerkezetű vas "építőkockájának" testátlója éppen egy atom sugarának négyszerese ($4r$) (II.13. ábra). Ennek megfelelően a kocka éle $4r/\sqrt{3}$ hosszúságú. A tércentrált köbös felépítésű vas "atomsűrűségét" (az egységnyi térfogatra jutó atomok számát) úgy határozhatjuk meg, hogy az elemi kockába eső atomok számát elosztjuk a kocka térfogatával. A tércentrált köbös szerkezet esetén a kocka csúsaiban elhelyezkedő atomok nyolc, egymással érintkező elemi kockába nyúlnak, így egy kiválasztott cellához csak nyolcadrészüik tartozik. Ennek megfelelően a $V = (4r/\sqrt{3})^3 = 64r^3/(\sqrt{3})^3$ térfogatú cellához két atom tartozik, az atomsűrűség tehát

$$\rho_a = \frac{2}{V} = \frac{2(\sqrt{3})^3}{64r^3}$$

Hasonlóképpen határozható meg a felületen centrált köbös szerkezet atomsűrűsége. Ekkor a legszorosabb illeszkedés úgy valósul meg, hogy az atomok az elemi kocka lapátlói mentén érintkeznek egymással. Így a lap átlója $4r$ hosszúságú, a kocka éle $4r/\sqrt{2}$, térfogata pedig $64r^3/(\sqrt{2})^3$. Az elemi cella térfogata tehát kissé

nagyobb, mint a tércentrált köbös szerkezet esetén. Az atomsűrűség azonban mégis a felületen centrált rácsban nagyobb! Itt ugyanis egy elemi kockához négy atom tartozik, hiszen a nyolc csúcsban elhelyezkedő atomok $8 \cdot \frac{1}{8} = 1$ atomnyi járuléka mellett a lapok középpontjában ülő atomok felét is számításba kell vennünk, s ez további $6 \cdot \frac{1}{2} = 3$ atomot jelent. Így a felületen centrált szerkezetben az atomsűrűség $\rho_f = 4(\sqrt{2})^3/64r^3$.

A tércentrált és felületcentrált szerkezetek sűrűségének aránya jól becsülhető az atomsűrűségek arányával, azaz

$$\frac{\rho_f}{\rho_a} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)^3 \cdot 2 = 1,089.$$

Ezt a csekély, mintegy 9%-os sűrűségnövekedést észleltük a huzal felmelegítése közben.

Az egyszerű kísérlet mutatja, hogy a hőmérsékletváltozás következtében még a tiszta vasban is szerkezeti változás, fázisátalakulás megy végbe. A fémfizikában két különböző kristályos fázisról beszélünk, akkor ha két kristály anyaga, rácsszerkezete vagy mindkettő különbözik. Hasonló, de sokkal bonyolultabb változások zajlanak le a vas-szén ötvözetben, az acélban is. Itt azonban az új fázisok mellett lényeges a fázisok egymás mellé rendeződése is, a mikroszkópban megfigyelhető szövetszerkezet.

4.3. Az acél ezer arca

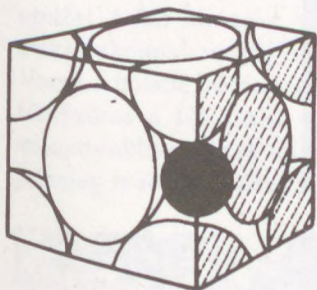
A folyékony oldatokat az jellemzi, hogy az oldott anyag részecskéi úgy oszlanak el az oldószer atomjai vagy molekulái között, hogy az oldatban a két alkotót mikroszkópban sem különíthetjük el, az oldat teljesen egynemű, homogén. Ez az atomi elrendeződés szilárd fázisában is létrejöhet. Ezeket az anyagokat szilárd oldatoknak nevezzük. A szilárd oldatok legfontosabb tulajdonsága az, hogy a színfémekhez hasonlóan egyetlen kristályrácsuk van. Ebben a kristályrácsban az oldott atomok kétféleképpen helyezkedhetnek el. Az úgynevezett szubsztitúciós vagy helyettesítési szilárd oldatokban az oldó anyag kristályrácsába, mint rácساتomok ülnek be az oldott anyag részecskéi, mintegy helyettesítve a saját atomokat. (Ilyen oldatot általában a hasonló nagyságú atomokból álló és azonos kristályszerkezetben kristályosodó anyagok alkotnak.)

Az interstíciós vagy rácsközi szilárd oldatokban, amint azt az elnevezés is mutatja, az oldott atomok az "oldószer" rácsában található üregekbe épülnek be. Ezek az oldatok általában olyan anyagokból keletkeznek, amelyekben az oldott atomok sokkal kisebbek, mint az oldószer atomjai.

Nos, a hosszú bevezetésre azért volt szükség, mert a szén a felületen centrált szerkezetű, az előbbieken megismert vasban rácsközi helyekre beépülve oldódik

(II.14. ábra). Ezt a szilárd oldatot Austen német fizikus tiszteletére ausztenitnek nevezzük. Ez a fázis jelentős mennyiségű egyéb ötvöző elemet is tartalmazhat, s általában csak magasabb hőmérsékleten stabilis.

Közönséges hőmérsékleten a vas tércentrált szerkezetű, s ez a ferritnek nevezett fázis oldott szénatomokat csak rendkívül csekély (maximum 0,025%) arányban tartalmazhat. Ferrit képezi a vasötvözetek leglágyabb, ugyanakkor legszívósabb, a törésnek leginkább ellenálló szerkezeti elemét, szövetét.



II.14. ábra

A vas szilárd oldat formájában viszonylag kevés szén elnyelésére képes. A 4% feletti szén tartalmú vas-szén ötvözetekben ezért a szén egyrészt grafit, másrészt nagyon kemény, cementitnek nevezett Fe_3C képletű vas-karbid formájában válik ki.

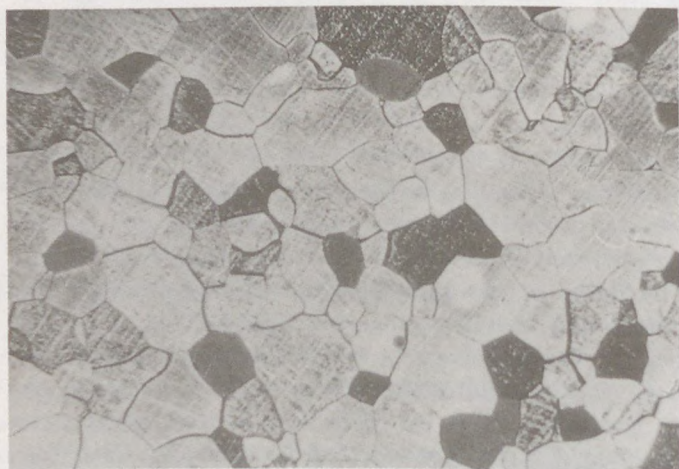
A vasötvözetek többnyire karbid és nem grafitképződéssel kristályosodnak. Ennek az az oka, hogy az elemi szén kristálycsírái lassan alakulnak ki, s a csírák növekedési sebessége is kicsiny. Vas-karbid esetén mindkét folyamat sokkal gyorsabb. Így módon a vas-szén olvadék lehűtésekor többnyire az történik, hogy a grafitcsírák még meg sem jelennek, amikor a vas-karbid fázis már gyors növekedésnek indul. A grafit általában csak akkor jelenik meg, ha az olvadék hűtése lassú, vagy ha a vas-karbid-képződést gátló ötvöző elemek (pl. a szilícium) is van az olvadékban.

A különböző acélokat lényegében az előzőekben felsorolt alkotóelemek változatos alakban növekvő kristályainak keveréke alkotja. A Sorby által felismert perlit pl. ferrit és cementit lemezes szerkezetű keveréke (II. 15. ábra, fotó, Varga Attiláné felvétele). Az alkotóelemek elrendeződését, alakját rendkívül sokféle hatás befolyásolja. Így szerepet játszanak a szén mellett előforduló egyéb ötvözők, a különböző hőkezelési és edzési folyamatok, valamint az anyag mechanikai igénybevétele, a hengerlés, sajtolás, kovácsolás stb.

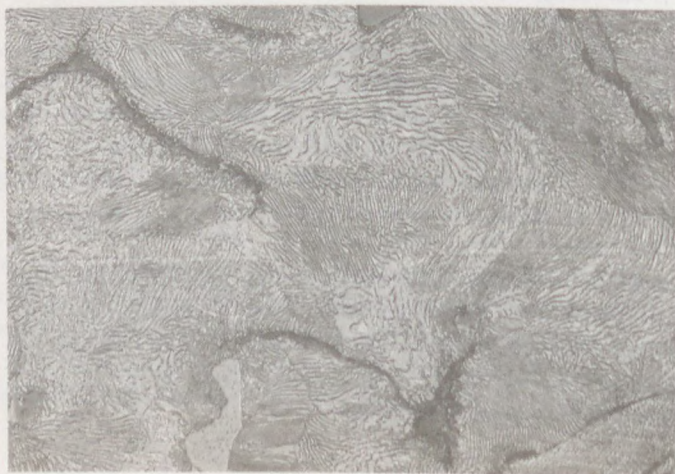
Az egyes fázisok kialakulása és növekedése lényegében azonos a kristályosodáskor megismert csíráképződési és növekedési folyamatokkal. Ezek a folyamatok mikroszkopikus szinten az atomok diffúziós mozgása útján mennek végbe. Ennek során a vas- és szénatomok a hőmozgás hatására rendezetlenül bolyongva hosszabb idő alatt találják meg "új" helyüket a kristályrácsban.



II.15a. ábra



II.15b. ábra

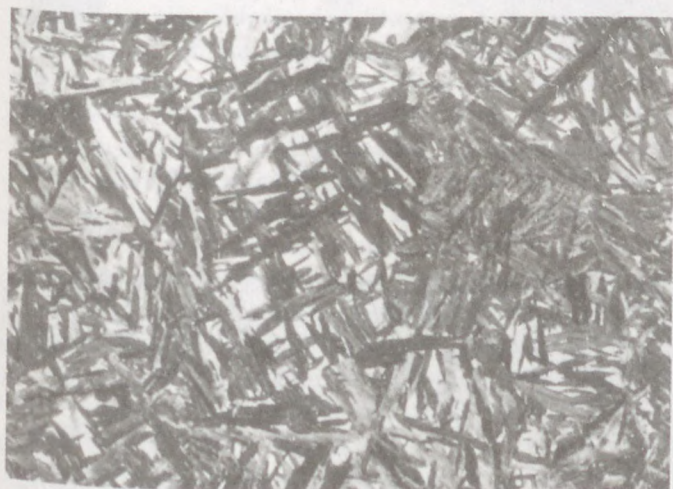


II.15c. ábra

4.4. Egy titokzatos változás – a martenzites átalakulás

Az eddigiekben nem szóltunk az acélban végbemenő fázisátalakulási folyamatok egy fontos tényezőjéről, a hűtés sebességéről. Ha a 900°C felett stabilis vas-szén szilárd oldatot lassan hűtjük, akkor két összetevőre, ferritre és cementitre (vas-karbid) esik szét. Az új fázisok kialakulását diffúziós folyamatok irányítják.

Más a helyzet azonban, ha az acélt gyorsan hűtjük. Körülbelül egy évszázaddal ezelőtt Adolf Martens, német kohász észrevette, hogy a gyorsan lehűtött acélban mikroszkóppal megfigyelve, tűszerű képződmények láthatók (II.16. ábra, fotó, Varga Attiláné felvétele). A felfedezőről nevezte el 1895-ben Floris Osmond francia fémfizikus a tűs fázist martenzitnek. A martenzit tulajdonságai azonban csak századunkban váltak világossá a kutatók számára, s a martenzites átalakulás maga jelenleg is sok tisztázatlan kérdést rejt.

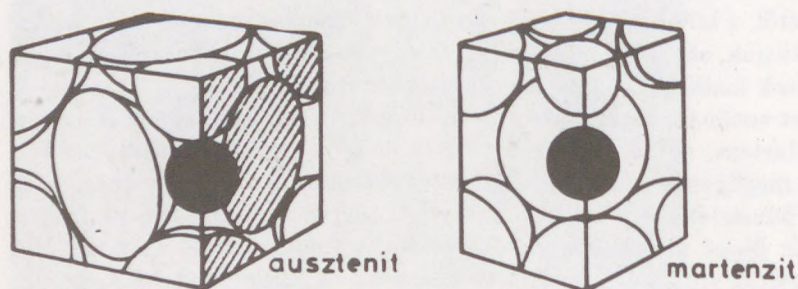


II.16. ábra

A martenzites átalakulás ma már világosan felismert legfontosabb sajátossága az, hogy a martenzitképződés diffúzió mentes szerkezeti változás. Ezzel kapcsolatos az is, hogy a martenzites átalakulás gyakran hallható kattanás kíséretében rendkívül gyorsan játszódik le.

Maga a szerkezetváltozás lényegében a felületen centrált ausztenitrácsnak egy tércentrált köbös rácsba, a martenzitrácsba történő gyors átbillenése. Lényeges szerepet játszanak a változás során az ausztenitbe épült szénatomok. A II.17. ábrán fekete pontokkal jelöltük az ausztenit felületen centrált köbös, illetve a martenzit tércentrált köbös szerkezetében a rácsközi helyeket, ahová a szénatomok beépülhetnek. A valóságban persze sohasem fordul elő, hogy minden rácsközi helyre beépül egy szénatom, mert ez erősen torzítná a vas atomrács szerkezetét. A két ábrát megfigyelve látható, hogy az ausztenitkocka alapján és a martenzitkocka átlósikján a vas- és szénatomok relatív elrendeződése ugyanolyan.

A martenzites átalakulást úgy képzelhetjük el, hogy az ausztenitrács (egy alaplapja) csekély torzulás árán a martenzitrács egy átlóssíkjává válik. Ehhez nincs szükség tehát jelentős atomi átrendezésre, azaz diffúzió nélkül is megvalósulhat úgy, hogy minden atom, ha csekély mértékben is, de egyszerre mozdul el eredeti helyéről.



II.17. ábra

Az, hogy az ausztenitből a ferrit és a cementit keverékéből álló perlit vagy martenzit keletkezik, a szénatomok diffúziójának gyorsaságán múlik. Tudjuk, hogy az ausztenitben akár két százaléknyi szén is feloldható, ezzel szemben a ferritben a szén alig oldódik (0,025%). Az ausztenitből tehát csak akkor keletkezhet ferrit, ha elegendő idő áll rendelkezésre, hogy az ausztenitrácsból a felesleges szénatomok diffúzió útján távozzanak. Az anyagot gyorsan lehűtve a diffúzió gátolt, mert a szénatomok már mozgásképtelenné válnak. Ezt az állapotot nevezik a szilárd oldat "túlhűtött" állapotának. Túlhűtött állapotú ausztenitből mindig martenzit keletkezik. Ennek az állapotnak elérésére az acélt egy kritikus hőmérséklet határ alá kell nagyon gyorsan lehűteni. Ez a hőmérséklet határ az egyes acélfajták esetén változik. Erdemes megjegyezni, hogy a martenzit mellett a hűtés vég hőmérsékletétől függően szinte mindig marad több-kevesebb a túlhűlt ausztenit fázisból is. Ez a maradék annál kevesebb, minél alacsonyabb hőmérsékletre hűtjük az anyagot. A martenzites acélt felmelegítve az átalakulás fordított irányban játszódik le. Furcsa tulajdonsága azonban ennek a fázisátalakulásnak, hogy az ausztenitképződés csak a martenzitképződés megindulását jelentő hőmérsékletnél magasabb hőmérsékleten kezdődik el.

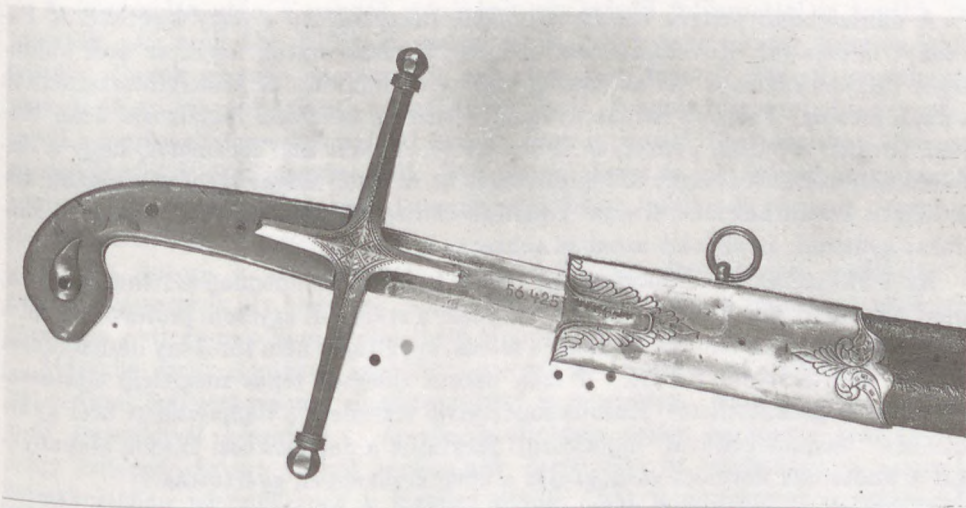
Az átalakulás leginkább rejtélyes és máig sem pontosan érthető sajátossága, hogy az ismételt hűtési-melegítési ciklusoknak alávetett anyagokban a martenzitlemezek mindig ugyanott jelennek meg. Azt azonban, hogy melyek lesznek ezek a helyek, ma még nem tudjuk előre megjósolni.

Bár a martenzitképződés mikroszerkezeti magyarázata ma is foglalkoztatja a kutatókat, a martenzit fázis tulajdonságait régóta ismerjük, s felhasználjuk az acél szilárdságának növelésére.

A részben túltelített martenzit fázis ugyanis rendkívül kemény és rideg anyag. A vasatomok közé rácsközi helyekre beékelődött szénatomok természetes akadályai az alakváltozást hordozó diszlokációmozgásnak. Az acélgyártás technológiájának megértésében ismét igen jelentős ponthoz jutottunk. Az edzéskor alkalmazott gyors hűtés során martenzit képződik, s ez a rendkívül kemény fázis jelentősen szilárdítja az anyagot.

5. A damaszkuszi pengék titka

Reméljük, hogy hosszúra nyúlt elméleti fejtegetésünk nem vette el az Olvasó kedvét a bevezetőben említett problémák, így a damaszkuszi pengék titkának megfejtésétől.



II.18a. ábra



II.18b. ábra

A kiváló mechanikai tulajdonságok, a hajlékonysággal párosuló keménység mellett a damaszkuszi pengéket furcsa szépségük is különlegesen értékessé tette. A kard tompa kék felületét kígyózó vonalakból álló természetes mintázat, a damaszk borítja. A mohamedán harcosok, akik a kardhoz könnyebben hozzájutottak, a felületi periodikusan változó mintázatot Mohamed lajtorjájának is nevezték. (II.18. ábra, fotó).

A damaszkuszi pengék tulajdonságainak magyarázata a nagy kísérletezőt Faradayt is izgatta. Következtetései azonban hibásak voltak, mert az acél különleges tulajdonságait a vas alapanyag kicsiny alumínium- és szilíciumtartalmának tulajdonította. Faraday leírása nyomán kezdett a kérdéssel foglalkozni Jean Robert Breant, a párizsi pénzverde fémelemzője. Breant már felismerte, hogy a damaszkuszi acél szívósságát és keménységét az ötvözet magas széntartalmának köszönheti. Breantnak sikerül saját készítésű ötvözetből damaszkuszi mintázatú kardokat gyártani, az eljárást azonban sohasem árulta el.

Az 1-2% szenet tartalmazó acélok ritkán kerülnek mindennapos felhasználásra, mert általában igen ridegek. Oleg Sherbynek, a stanfordi egyetem professzorának a figyelmét éppen az keltette fel, hogy a szívós, egyáltalán nem törekeny damaszkuszi pengék széntartalma 1,5-2%. A szén okozta ridegség tehát megfelelő eljárással biztosan megszüntethető! Kutatócsoportjával elkezdett a damaszkuszi acél gyártásának "technológiájával" foglalkozni. Szerintük a damaszkuszi kardok alapanyagát a wootz-nak nevezett vaspogácsát a következőképpen gyártották.

Vasérc és faszén keverékét kőkohóban 1200°C-ra hevítették és az így keletkező szivacsos szerkezetű vasból a szennyeződéseket kovácsolással eltávolították. Ezután ezt az alacsony széntartalmú kovácsoltvasat apróra darabolták és faszénnel keverve 7-8 cm magas 15 cm átmérőjű zárt agyagtégelyben ismét 1200°C-ra hevítették. Ezen a hőmérsékleten a kovácsoltvas még szilárd, azonban a belediffundáló szén hatására megolvad. Ezután az olvadékot tartalmazó tégelyt nagyon lassan kihűtötték. A lassú hűtés hatására a szén igen egyenletesen oszlott el az anyagban és magas széntartalmú (1,5-2%) ausztenit keletkezett. A hőmérséklet-csökkenés következtében azonban 1000°C körül megkezdődött a vaskarbid kiválása is és a nagyméretű ausztenitzemcsék körül durva cementitháló alakult ki.

A damaszkuszi mintázatot a penge megfelelő marószerszettel való kezelésével hívták elő. Ezek a marószerek a szénben gazdag cementitrétegekkel nem léptek reakcióba, ezért maradt fehér színű a csíkrendszer.

A cementit azonban rideg anyag, így ez a háló keménnyé, ugyanakkor azonban törékennyé is teszi az acélt. Ezt a ridegséget szüntették meg a fegyverkészítő mesterek az alapos kovácsolással. Ekkor alakult ki a cementithálóból a kardok felületén Mohamed lajtorjája. A kovácsolás volt a mesterek egyik titka! Az acélok esetén ugyanis a kovácsolást szokásosan a fehér izzástól a narancs izzásig terjedő hőmérsékleten végezték. A damaszkuszi pengék alapanyagát, a wootz-ot, ennél hidegebben, a 650 – 850°C-os hőmérsékletet kijelölő vérvörös és cseresznyeszínűen izzó állapotban kovácsolták. Az európai fegyverkovácsok valószínűleg azért nem tudtak még az Indiából beszerzett alapanyagból sem jó pengét készíteni, mert

fehéren izzó állapotban akarták kovácsolni, s ezen a hőmérsékleten a cementit újra feloldódott; az acél, mint Breant írja, "elmállott a kalapács alatt".

A viszonylag alacsonyabb hőmérsékletű kovácsolás hatására azonban a hálós szerkezetű cementit egyenletes eloszlású gömbszerű részecskékké töredezett. Ezek a részecskék még mindig elegendő mértékben szilárdították az anyagot, a háló folytonosságának megszüntetésével azonban a ridegség is megszűnt.

A kovácsolás után a pengék minőségét egy edzési folyamattal is tovább javították. Az acélt kb. 800°C -ra melegítették, majd vízbe mártva hirtelen lehűtötték. Ennek nyomán az ausztenit egy része nem ferritté, hanem martenzitté alakult át, ami tovább fokozta az acél szilárdságát. A szilárdságot mind a cementit, mind a martenzitrészecskék azáltal növelik, hogy a lágyabb ferrit fázisban könnyen mozgó diszlokációkat megakasztják. Nyilvánvaló, hogy az acél tulajdonságai annál jobbak, minél finomabb és egyenletesebb eloszlásban találhatók benne a cementit, illetve mertenzit kiválások.

Furcsa fintora a természetnek, hogy a legjobb damaszkuszi acélokban a cementitrészecskék oly kicsinyek, hogy Mohamed lajtorjája, a minőséget jelző természetes védjegy már nem is észlelhető a penge felületén.

Mágikus erejű mintázat azonban nemcsak a damaszkuszi pengéken, hanem az európai fegyverkovácsok mestermunkáin is megjelent. Ezek azonban egészen más technikával készültek. A viking sírokban talált kardokról kimutatták, hogy köteggé csavart vasból kovácsolták össze őket és felületükön a csavarás következtében jelennek meg a kígyózó sávok. Ezt a mintázatot a szakember könnyen megkülönbözteti a damaszkuszi acélok felületi vonalaitól.

Az indiai kovácsok és kohászok szakértelmét a kardok mellett számtalan egyéb tárgy is dicséri. Méreteikkel és időtállóságukkal kiemelkednek ezek közül a negyedik század elején Indiában emelt győzelmi oszlopok. Delhiben egy rombadőlt templom mellett még ma is áll a sors kezének nevezett 6,5 m magas tömör vasoszlop. Számtalan monda fűződik hozzá, s törzsébe másfél évszázad történelmét vésték be az átmenő hódítók (II.19. színes fotó). Majd' kétszer ilyen magas volt a Dhara mellett álló oszlop, ez azonban ledőlt és eltörött. Az oszlopok vas anyaga a mai fémfizikusok csodálatát is kiváltva, rozsdásodás nélkül állja az indiai időjárást. Az oszlopokat nagy tisztaságú korongokból készítették. A delhi oszlop a kémiai analízis szerint mindössze 0,08% szenet, 0,046% szilíciumot, és 0,114% foszfort tartalmaz. Korrózióállóságát valószínűleg speciális kovácsolási eljárással érték el, amelynek során a korongok felületi rétegében a szén mégis feldúsult.

6. *A rideg törés*

A II. világháború idején a csatahajók és harckocsik páncélzatának erősítése hihetetlenül fellendítette az acélipart. Történt azonban néhány megdöbbentő katasztrófa is. Hatalmas acélszerkezetek törtek el látszólag ok nélkül, szinte varázstűzésre. Több mérföldnyi hosszúságban hasadtak fel olajvezetékek és óriás tankhajók váltak ketté! A törést előidéző hatás azonban többnyire kideríthetetlen volt,

hiszen szinte nevetséges, hogy egy hajót egy hullámfodor kettétörjön! Jobban azonosítható, de hasonlóképpen elfogadhatatlan az, hogy 1951-ben Québecben egy hatalmas hidat a rajta áthaladó személyautó szakított le.

6.1. A törés fizikája

A tapasztalat szerint az anyagok törése két jól elkülöníthető csoportba sorolható. Az egyiket jól példázza a kőpadlóra ejtett, szilánkokra pattanó üveg pohár. Az üvegszilánkok sima, kagylós felületekkel rendelkeznek, a törés során az anyag gyakorlatilag előzetes alakváltozás nélkül hullik darabokra. Ezt nevezzük rideg törésnek, s ebbe a kategóriába tartozik az acél tartályhajók katasztrofális kettéhasadása is.

A másik törési típus egy alumíniumhuzal elszakadása lehet. A szakadást ekkor hosszabb képlékeny nyúlás előzi meg, amelynek során a szálon befűződés, úgynevezett nyak képződik. A szakadás a nyak fokozatos elvékonyodásával következik be. A törésfelület pórusos, egyenetlen.

Kármán Tódor 1911-ben Göttingában érdekes mérésorozatot végzett az anyagok rideg és képlékeny tulajdonságaival kapcsolatban. A közismerten rideg, törékeny carrarai márványról kimutatta, hogy alkalmas körülmények között képlékenyen alakítható. Kármán Tódor az alakításhoz speciális berendezést készített, amelyben a függőlegesen álló hengeres márványminta két befogópofa közé illeszkedett, míg oldalról glicerinnel vette körül. A glicerinnel arra szolgált, hogy a henger palástját kívülről egyenletesen lehessen terhelni. (Hasonló elven működik a gépkocsik fékberendezése, ahol a folyadék a fékpedál nyomását mind a négy kerekhez egyenletesen továbbítja.) Lényeges azonban, hogy Kármán Tódor a függőleges irányú terhelést az oldalnyomástól függetlenül szabályozta!

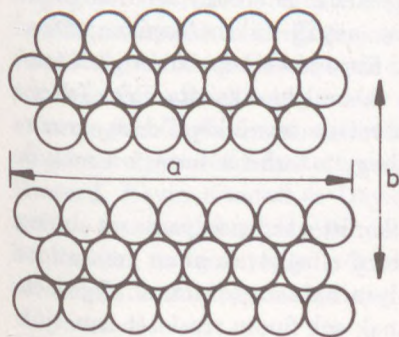
A kísérletek eredménye szerint, ha a palástra ható nyomás nagyobb volt, mint a tengelyirányú nyomófeszültség, akkor a minták megnyúltak, fordított esetben pedig összehúzódtak. Kicsiny folyadéknyomás (oldalterhelés mellett a minták – akár húzó, akár nyomófeszültség hatott a tengely mentén – gyorsan eltörték. A folyadéknyomás növekedtével azonban az általában ridegen törő anyag képlékenyen alakíthatónak bizonyult. Így például 500-800 atmoszférás nyomás esetén a márványt gyakorlatilag állandó erővel lehetett alakítani.

Kármán Tódor kísérlete a század elején megmutatta, hogy az anyagok alakíthatósága vagy éppen rideg törékenysége nem csupán az anyagi minőségtől, hanem a környezeti hatásoktól és az alakítás módjától is függ.

6.1.1. A törési feszültség egyszerű becslése

A rideg töréshez szükséges húzófeszültség, a σ_0 szakítószilárdság becslésére sokféle elmélet született. A különféle elgondolások közös alapját az képezi, hogy rideg töréskor az anyag teljes keresztmetszetében lényegében egyszerre válnak el egymástól az érintkező atomok.

Az A keresztmetszetű fémhuzal elszakításához $\sigma_0 A$ erőt kell kifejtenünk. Az erő ahhoz szükséges, hogy két szomszédos atomréteget a közöttük ébredő kötőerők ellenében eltávolítsuk egymástól. Az atomok között ébredő erők, mint tudjuk, igen



II.20. ábra

rövid hatótávolságúak, ezért jó közelítésként elfogadhatjuk, hogy a fém végleges eltöréséhez elegendő, ha a két atomréteg távolsága eredeti távolságuk kétszeresére nő (II.20. ábra). A befektetett energia arra fordítódik, hogy a fémbe két új A területű felületet hozzunk létre. A fémek felületén ugyanis a folyadékok felszíni hártáihoz hasonlóan egy nagyobb energiájú réteg alakul ki. E rétegek energiáját az α felületi feszültséggel határozhatjuk meg. A felületi feszültség a felületi réteg egységnyi területére eső energianövekményt adja meg. Ily módon a szakítási folyamat energiamérlegét a

$$\sigma_0 A b = 2 A \alpha$$

egyenlettel adhatjuk meg. Ez az összefüggés azt fejezi ki, hogy a $\sigma_0 A$ szakítóerő rácsállandónyi úton végzett munkája éppen e két újonnan létrehozott szabad felszín felületi energiájával egyezik. A réz felületi feszültsége: $\alpha_{Cu} = 1,7 \text{ J/m}^2$; rácsállandója: $b_{Cu} = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; így a szakítószilárdsága a fenti gondolatmenet szerint

$$\sigma_{0Cu} \approx 10^{10} \text{ Pa.}$$

Az eredmény a kísérleti tapasztalatokkal összevetve elfogadhatatlanul rossz. A valódi szakítószilárdság a mérések tanúsága szerint 50-100-szor kisebb.

A helyzet kísértetiesen emlékeztet a képlékeny alakváltozás vizsgálatokor tapasztaltakra. A folyásfeszültség helyes becsléséhez fel kellett ismerni az alakváltozás diszlokációs mechanizmusát, amely lehetővé teszi, hogy az anyag nem egyszerre, hanem csak fokozatosan deformálódjék. Hasonló felismerésre volt szükség a törés esetén is.

A megoldás alapgondolata Alan Griffith, angol fémfizikus nevéhez fűződik. Az elméleti becslés azért haladja meg sokszorosan a szakítószilárdságot, mert a képlékeny alakváltozáshoz hasonlóan a törési viselkedést is döntően befolyásolják

a valódi anyagokban mindig jelenlévő szerkezeti hibák. Griffith felismerte, hogy a törést elsősorban a töret felület közelében törés előtt képződő mikrorepedések okozzák. A mikrorepedések az anyag teljes térfogatában képződnek a terhelés hatására végbemenő diszlokációmozgás következményeként. A kicsiny, de már makroszkopikus méretű repedések csirái elsősorban az anyag mikroszkopikus méreteken lazább tartományai, pl. a szemcsehatárok. Repedések képződhetnek azonban az anyag helyileg jobban terhelte részein, pl. valamilyen akadály előtt feltorlódott diszlokációsokaság közelében is. A repedések véletlenszerű képződése okozza, hogy adott próbatest esetén nem jósolható meg, hogy a terhelés hatására melyik keresztmetszetben következik be a törés.

A mikrorepedésekre alapozva Alan Griffithnek sikerült a törési folyamatot elvileg helyesen-értelmező elméletet kidolgozni. Az egyszerű elmélet azonban nem adott választ arra, hogy az egyes anyagok pontosan milyen hatásra törnek el. Ilyen elmélet jelenleg sem létezik. A törés mechanizmusának sok finom részletét ismerjük azonban. Biztosan tudjuk azt, hogy a repedések továbbterjedését a repedés csúcánál helyileg fellépő feszültség nagysága szabja meg.

A repedés csak akkor indul növekedésnek, ha a csúcsnál fellépő feszültség egy kritikus értéket meghalad. Ezután azonban a repedés növekedési folyamata már lavinaszerűen gyorsul. A helyileg fellépő feszültség rendkívül sok tényezőtől függhet. Óriási lokális feszültség keletkezhet például, ha egy fémolvadékot egyenetlenül hűtünk, s a gyorsan összehúzódó hidegebb tartományok összeszorítva bilincsbe zárják a közbülső lassabban hűlő tartományokat. Helyi belső feszültségek ébredhetnek akkor is, ha az alakváltozás következtében egy Frank-Read-forrásból sorozatosan kibocsátott diszlokációk egy szemcsehatáron feltorlódhatnak. A belső feszültséggel telített anyag már kicsiny külső hatásokra is rendkívül váratlanul reagálhat. Szép példája ennek a fizikai kísérletekben felhasznált "bolognai" üveg-csepp. A bolognai üvegcséppet gyors hűtéssel készítik, így gyorsan hűlő felületi rétege robbanásig feszülve összeszorítva tartja az üveg belső részét. Ha a csepp hosszan kinyúló elvékonyodó részét lecsípjük, akkor az üveg halk pukkanás kíséretében "felrobban" és porrá omlik.

Lényegében ez a mechanizmus működik a hatalmas acélalkatrészek hirtelen törésekor is. A gyártás során az anyagban felhalmozódó feszültségek már csekély külső terheléssel összeadódva túlléphetik a repedések növekedéséhez szükséges kritikus feszültséget, s a törés katasztrofális gyorsasággal végbemegy.

A folyamat rendkívül gyors és igen sok tényezőtől függ. Befolyásolják a törési viselkedést az anyagban levő szennyezések, a használat során fellépő terhelés stb. Mindezek a hatások hozzájárulnak ugyanis ahhoz, hogy az anyagban pórusok, repedések keletkeznek, amelyek aztán kiindulópontjai lehetnek a törésnek.

Az anyagvizsgáló laboratóriumokban tudósok ezrei foglalkoznak azzal, hogy a hirtelen törést kiküszöböljék. Olyan technológiákon dolgoznak, amelyekkel minímálisra csökkenthető az anyagban az üregképződés veszélye. Teljes védelmet azonban ma sem élvezünk.

6.2. Cementből rugó?

Igen érdekes, hogy a fémek törését leíró Griffith-féle elmélet a törésnek az anyagban keletkező üregekre alapozott magyarázata kerámiák, sőt a cement esetén is alkalmazható. A Griffith-elmélet szerint a repedés továbbterjedéséhez a lokális feszültségnek a repedés csúcánál meg kell haladnia egy kritikus értéket. Ez a kritikus érték annál kisebb, minél nagyobb a repedés mérete. Várható tehát, hogy az anyagban levő üregek méretének csökkenése a szilárdság növeléséhez vezet. A szokásos eljárással készített cement pórusai milliméter nagyságrendűek. James Howard, Kevin Kendall és David Birchall angol kémikusok olyan eljárást dolgoztak ki, amelynek segítségével a cement pórusai mikrométer nagyságrendűvé csökkenthetők. Az új anyaggal végzett hajlítási kísérletek szerint a hibamentes cement az alumíniumhoz hasonló tulajdonságokkal bír, s akár rugó is készíthető belőle.

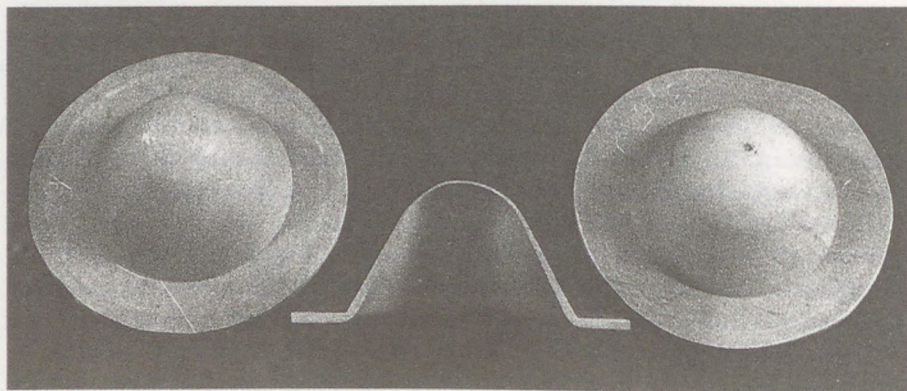
7. Különleges fémek

A fémek szilárdságát és az alakváltozás mechanizmusát az előzőekben a vas és az acél példáján tekintettük át. Megállapítottuk, hogy a képlékeny tulajdonságokat döntően speciális rácshibák, a diszlokációk szabják meg. Ebben a fejezetben néhány különleges tulajdonságú ötvözzel foglalkozunk, amelyekben az alakváltozás döntően nem a diszlokációmozgás, hanem egyéb hatások következtében megy végbe. (Ilyen hatásokról a 3.4. fejezetben röviden már szoltunk.)

7.1. Felfújható fémek – a szuperképlékenység

Az anyagok felfújásával kapcsolatban a luftballon és a szappanbuborék, vagy gyártási technológiaként az üvegfúvás jut eszünkbe. Semmi esetre sem gondolunk azonban ezzel kapcsolatban fémtárgyak készítésére. Pedig ez is lehetséges. A II.21. ábrán (fotó) látható félgömb és kúp alumíniumból készült olyan módon, hogy az 1 mm vastagságú sík lemezt nagy nyomású forró argongázzal befújták a mögötte elhelyezett formába. A lemez anyaga speciális alumíniumötvözet, amely az úgynevezett szuperképlékeny ötvözetek közé tartozik.

1934-ben Pearson angol fizikus érdekes megfigyelésről számolt be. Eszerint finom szemcsés ón-ólom, valamint ón-bizmut ötvözetet lassú húzással deformálva a minták eredeti hosszuknak hússzorosára is megnyúltak. (Ugyanezen az ón-ólom ötvözetben 1988-ban T. G. Langdon már 48-szoros megnyúlást tudott elérni.) A kezdetben az ón-ólom ötvözetekkel kapcsolatos kuriózumról kiderült, hogy megfelelő körülmények között igen sok más ötvözetben, így például acélokon, alumínium-, réz- és titánötvözeteken is megfigyelhető. Mivel a fémek többségénél még a 40-50%-os megnyúlás is ritka, az extra mértékben alakítható fémeket *szuperképlékeny anyagoknak*, magát a jelenséget pedig *szuperképlékenységnek* nevezik. Meg kell említeni, hogy a szuperképlékenység még a megfelelő anyagok esetén



II.21. ábra

is csak speciális alakítási körülmények között tapasztalható. Ugyancsak magyarázatra szorul, hogy miért a maximális megnyúlás mértéke a szuperképlékenység jellemzője. A fémfizikai vizsgálatok esetén az egytengelyű nyújtás a leggyakoribb, ennek eredményeit lehet fizikai szempontból jól, egyszerűen és egyértelműen értelmezni. Általános tapasztalat, hogy a jól nyújtható anyagok más eljárással, pl. préseléssel, kovácsolással, vagy akár a bevezetőben említett fújással is, jól alakíthatók. A gyakorlati alkalmazás szempontjából ez utóbbi eljárásoknak van jelentőségük.

7.1.1. A szuperképlékeny alakváltozás feltételei

Az 1960-as évek közepére a fémfizikusok számára nyilvánvalóvá vált, hogy a különlegesen nagy alakíthatóság előfeltétele a kicsiny, közelítőleg gömb alakú szemcséből álló polikristályos alapanyag. Megállapították továbbá, hogy az alakítást az adott ötvözet olvadáspontjának felénél magasabb hőmérsékleten és viszonylag lassan kell végrehajtani.

Ez utóbbi azt jelenti, hogy egy hosszúkás mintát másodpercenként körülbelül a hosszának ezredrészével, vagy még kevésbé szabad csak megnyújtani. Az egyszerű húzóvizsgálatokból lesűrűsíthető volt az is, hogy a szuperképlékeny alakváltozás során a minták teljes hosszukban, nyakképződés nélkül nyúltak. A nagy megnyúlásokat lényegében ez teszi lehetővé, hiszen a befűződés helyén lokálisan megnövekvő húzófeszültség általában az anyag gyors töréséhez vezet. További általános érvényes tapasztalat volt, hogy a szuperképlékeny nyújtáshoz szükséges húzófeszültség az eddigi ismeretekkel ellentétben nem a deformáció mértékétől, hanem a deformáció sebességétől ($\dot{\epsilon}$) függ. A folyásfeszültséget a

$$\sigma = A\dot{\epsilon}^m$$

függvény írja le. Érdekesség, hogy a maximális nyújthatóság és az m kitevő között összefüggés van. A tapasztalat szerint minél nagyobb az m értéke, annál na-

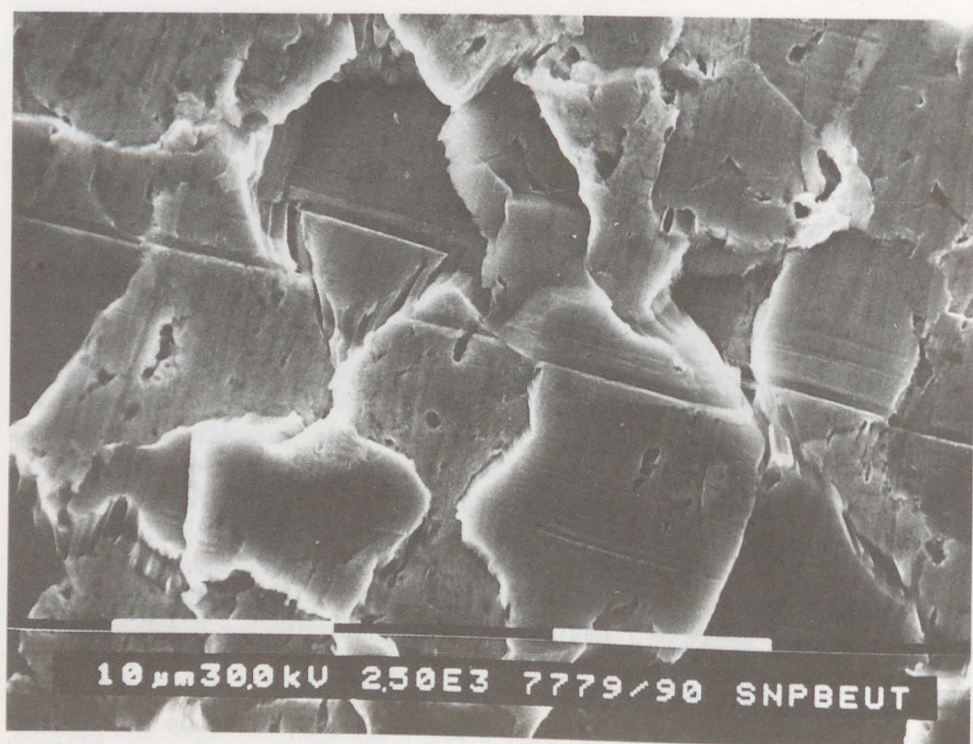
gyobb alakíthatóság várható. Az ötvözetek alakíthatóságát vizsgáló fémfizikusok általában m értékének alapján minősítik az anyagokat. Az ötvözetek $m \geq 0,3$ esetén szuperképlékenyeknek tekinthetők.

7.1.2. A szuperképlékeny alakváltozás anyagszerkezeti magyarázata

A szuperképlékeny alakváltozás megértéséhez a húzófeszültség erős sebességfüggése adta meg a kulcsot. A sebességfüggő erő a nyúlós folyadékok erőtvényére emlékeztet (lásd III. fejezet). A folyadékokkal való hasonlóságra alapozva született az elképzelés, hogy a szuperképlékeny alakváltozás során az anyag apró szemcséi egymáson elgördülve alakítják ki az új, megnyúlt formát. Szemléletesen ezt a homokórán lepergő homokszemek mozgásához hasonlíthatjuk. A homokóra elkeskenyedő nyílásán átfolyó homokszemek egymáshoz képest elmozdulva (elfordulva és elcsúszva) hosszú fonallá állnak össze. E mozgás során a homoktömb egésze deformálódik, maguk a homokszemek azonban nem. A szuperképlékeny nyúlás során az anyag szemcséi a homokszemekhez hasonlóan deformálódás nélkül őrzik eredeti, nagyjából gömbszerű alakjukat, s a makroszkopikusan észlelhető deformációt a szemcsék átrendeződése okozza.

Ezt az egyszerű elképzelést számos kísérleti tapasztalat támasztja alá. A mikroszerkezeti vizsgálatok mutatják, hogy a superképlékeny anyagok szemcséinek mérete és alakja a deformáció során alig változik. Az elektronmikroszkópos felvételek igazolják azt is, hogy ezekben az aprószemcsés anyagokban a szemcsék belsejében igen kevés diszlokáció található, s az alakváltozás során ezek csak kismértékben mozognak. A nagy deformáció tehát valóban nem értelmezhető a megszokott, diszlokációmozgásra alapozott elmélet segítségével. Az alakítás során a döntő mechanizmus az egyes kristályszemcsék egymáson történő elcsúszása. Ezt a döntő mechanizmust az II.22. ábra (fotó). A 2500-szoros nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvétel superképlékenyen deformált ón-ólom ötvözet felületéről készült. A próbatest felszínét az alakítás előtt síkra csiszolták, majd tükörfényesre polírozták. Az így előkészített felületre, a minta hossz tengelyével párhuzamosan, igen finom vonalakat karcoltak. A próbatest nyújtása során a kristályszemcsék határai mentén elcsúsztak egymáshoz képest. A kezdetben sík mintafelületen kiemelkedtek, lesüllyedtek, megdőltek, illetve elfordultak a különböző szemcsék. A karcvonalak megtörése, szakadása jól megfigyelhetővé teszi ezeket a superképlékenységre jellemző mikroszerkezeti változásokat.

A szemcsék mozgását illusztráló "homokpergés" modell azonban több, a szuperképlékenység szempontjából igen fontos kiegészítő folyamatról semmit sem mond. Így arról sem szól, hogy az egymáson elmozduló szemcséknek mindvégig szorosan kötödniük kell, nem keletkezhetnek közöttük üregek. Ez csak úgy biztosított, ha a szemcsék mozgása során képződő illeszkedési hiányokat diffúziós folyamatok időről időre begyógyítják. Ez magyarázza azt, hogy a szuperképlékeny deformációnak viszonylag magas hőmérsékleten és lassan kell végbemennie. Idő



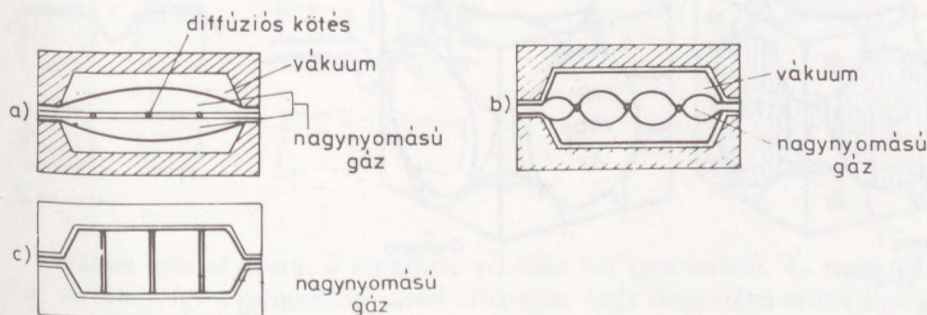
II.22. ábra

kell ugyanis ahhoz, hogy a diffúzió elegendő mennyiségű anyagot mozgasson meg az elcsúszó szemcsehatár mentén. Nyilvánvaló az is, hogy a homokszemek mozgásához képest a kristályszemcsék mozgása sokkal korlátozottabb módon mehet végbe.

A superképlékenyen alakított speciális ötvözeteket a modern technika egyre több területen alkalmazza. Általában bonyolult alakú, különleges igénybevételnek kitett, kis szériában gyártott termékek készülnek így. Elsősorban akkor alkalmazzák ezt a módszert, ha fontos, hogy az erősen alakított tárgy nagy szilárdságú, egyenletesen aprószemcsés szerkezetű legyen. A gépgyártás és a műszeripar mellett a legfontosabb terület a repülőgépgyártás és az űrtechnika.

1988-ban angol és francia repülőgépgyárak számoltak be arról, hogy sikeresen alkalmazták a superképlékeny titán- illetve alumíniumötvözetek fújással történő formázását. Többek között így készül a Mirage 2000 vadászgép néhány oldalsíkja és a Tornádó harci gép speciális S alakú ajtaja. A repülőgépeknél megkívánt kis súly és nagy szilárdság különleges technikai megoldásokat követel. Így az említett alkatrészek, a közönséges csomagolóanyagként használt hullámpapír szerkezetére emlékeztetnek. A különleges gyártási eljárás előnye, hogy a szerkezetet superképlékeny fújással úgy alakítják ki, hogy kötőelemekre, illetve külön hegesztési munkafázisra nincsen szükség. A szerkezeti kötések az alakítás során egymásnak préselt alkatrészek automatikus összeforradása, az úgynevezett diffúziós kötés hozza létre. A II.23. ábra négy rétegből kialakított belső bordázatú lemez

gyártásának részfolyamatait illusztrálja. A fűthető és megfelelő gázbevezető nyílásokkal ellátott formába négy lemezt helyeznek be egyszerre. Az első lépésben a két külső lemez a gáznyomás hatására (a ábra) felfekszik a forma falára. A két középső lemez eközben meghatározott vékony sávok mentén összeheged. (A lemezek felületét előzetesen úgy kezelik, hogy a diffúziós kötés csak a kívánt helyeken alakuljon ki.) A gyártás második fázisában a belső két lemez közé nagy nyomású gázt fújnak. Ennek hatására a belső lemezek sávokban kihasasodnak és



II.23. ábra

egymásnak feszülve elérik a külső lemezeket (b, c ábra). Az ezt követő több órás hőkezelés hatására az egymáshoz szoruló lemezek összeforrnak.

A szuperképlékenység jelenleg is a fémfizika intenzíven fejlődő területe. Rendkívül sokféle Al, Zn, Fe, Mg stb. alapú, a műszaki gyakorlatban is jól használható ötvözetet fejlesztettek ki, s a jelenség megértéséhez is közelebb jutottunk. Egységes és minden ötvözetre érvényes elmélet azonban még nem született.

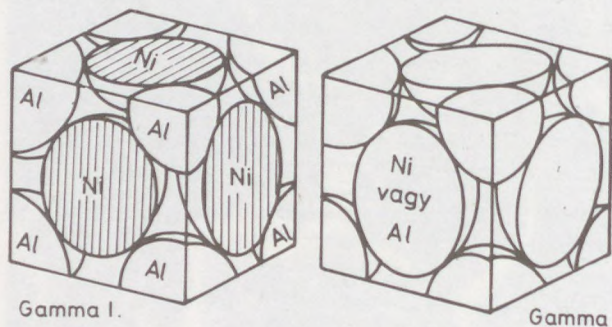
7.2. Szuperötvözetek

A szinte korlátlanul nyújtható, könnyen alakítható szuperképlékeny anyagok után most az ellenkező végettel, a nagy mechanikai és hőterhelést bíró úgynevezett szuperötvözetekkel foglalkozunk. Ezek a nikkel-alumínium, illetve titán és kobalt ötvözetek magas hőmérsékleten (1100°C-ig) is igen nagy terhelést bírnak el, kifejlesztésük pl. a repülőgépek sugárhajtóműveiben fellépő szélsőséges terhelésnek és az ezen a területen támasztott szigorú biztonsági követelményeknek köszönhető.

7.2.1. A szuperötvözetek szerkezete

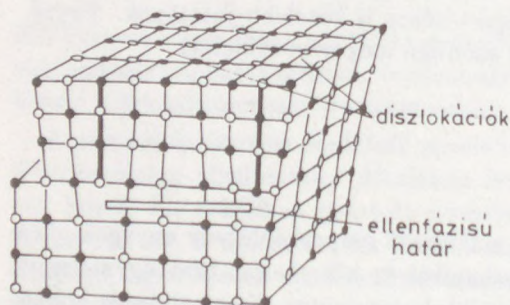
A szuperötvözetek tipikusan kétfázisú anyagok. A Ni-Al szuperötvözet például kétféle atomelrendezésű fázisból, az úgynevezett gamma- és gamma-1-fázisból áll. A gamma-1 fázisban az alumínium- és nikkelatomok rendje szigorúan megszabott, a II.24. ábrának megfelelően a lapon centrál köbös szerkezet kocka alakú cellájának csúcaiban mindig alumíniumatom, a lapok középpontjain pedig nikkelatom he-

lyezkedik el. A gamma-fázis ugyancsak lapon centrált köbös szerkezete ettől csak annyiban különbözik, hogy az alumínium- és nikkelatomok rendje nem megszabott, bármely rácspontba bármelyik atom beülhet (II.24. ábra). Az ötvözet alapanyaga ez a második rendezetlenebb fázis, amelyben lehetőleg egyenletes eloszlásban kell létrehozni a gamma-1-fázis kicsiny mikrokristályait.



II.24. ábra

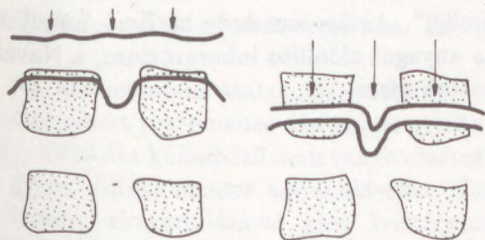
Az anyag rendkívüli szilárdságát az okozza, hogy az ötvözet nagyobb részét képező gamma-fázisban mozgó diszlokációk a gamma-1-fázisú mikrorészecskéken fennakadnak. A kristály rendezettsége miatt ugyanis a rácssíkokban felváltva találhatók a nikkel- és alumíniumatomok. Így amint ezt a II. 25. ábra mutatja, egyetlen diszlokáció elcsúszása az atomoknak ezt a periodikus rendjét megzavarja.



II.25. ábra

Ehhez nagy energia szükséges, ezért a diszlokációmozgás gátolt. Amennyiben azonban az első diszlokációt egy második is követi, akkor az atomok egymáshoz képest vett rendje visszaáll, s a diszlokációpár már áthatolhat az anyagon. Így a Ni-Al szuperötvözet rendkívüli szilárdságát az okozza, hogy deformálásához tulajdonképpen diszlokációpárok mozgatása szükséges (II.26. ábra). A két diszlokációt elválasztó rétegben azonban az atomok rendje éppen ellentétes a szomszédos kristályrészekhez képest, s az ilyen ellenfázisú rétegek létrehozásához mindig nagy energia szükséges.

További különleges sajátossága a rendezett fázisnak, hogy szilárdsága a hőmérséklet emelkedésével nő. E kísérleti tény elméleti magyarázata még tisztázatlan, technológiailag azonban természetesen hasznosítható. Felvetődhet a kérdés, hogy ha a gamma-1-fázis ilyen előnyös tulajdonságokkal bír, akkor mi szükség van a beágyazó gamma-fázisra?



II.26. ábra

A válasz igen egyszerű: a rendezett γ -1-fázis bár igen szilárd, de rendkívül rideg, törékeny, így a gamma-fázis azért szükséges, hogy elegendően szívós anyaghoz jussunk.

A szuperötvözet törése általában a szemcsehatárok mentén következik be. Ezt figyelembe véve a törés megakadályozására olyan gyártási technológiát dolgoztak ki, amelynek során a szemcsehatárok többsége egy irányban állt. Ezt úgy érik el, hogy az olvadékot tartalmazó tégely nagy részét az olvadásponthoz közeli hőmérsékletre melegítik, alsó részét pedig egy vízzel hűtött hideg vörösréz laphoz csatolják. Ezután a fellemegetett részt a hőmérséklet fenntartására folyamatosan egy meleg zónában tartják. A kristályosodás ekkor a hideg lemez közelében indul meg. Ha ezután a tégelyt a meleg zónából lassan kifelé húzzák, akkor a lemez közelében keletkezett kristályszemcsék hosszú oszlopokká növekednek.

Az ilyen irányított szerkezet a határok speciális elhelyezkedése miatt sokkal jobban ellenáll a szemcsék hosszirányába eső terhelésnek, mint a szokásos polikristályos anyagok.

A mikroszerkezeti hatások kihasználása a szuperötvözetek esetén egyre bonyolultabb gyártástechnológiához vezet. Kissé hasonlít a helyzet a damaszkuszi pengénél megismert eljárások komplexitásához. Lényeges különbséget jelent azonban, hogy napjainkban az új eljárásokat a mikroszerkezet ismeretében tudatosan tervezik.

7.3. Az emlékező fémek

A gépkocsi megfarolt, majd nagy csattanással egy fának ütközött. Vezetője fejcsoválva nézte a csúnyán behorpadt karosszériát, majd a csomagtartóhoz sétált és egy benzínlámpát vett elő. A lámpát begyújtva a lánggal melegíteni kezdte az elgörbült lemezeket. Elégedetten vette tudomásul, hogy az erős hő hatására a kocsiszkevény lassan visszanyeri eredeti alakját, és a törött lámpabura kivételével a baleset nyomai kezdenek eltűnni.

Az Olvasó bizonyára meg van győződve arról, hogy ez a rövid bekezdés egy fantasztikus regény részlete, s olyan fém, amely melegítés hatására visszanyeri eredeti alakját, nem létezik. Nos tudomásunk szerint gépkocsi karosszéria valóban nem készült még ilyen fémből, maga az anyag azonban létezik, s többféle gyakorlati felhasználását is ismerjük.

A furcsa alakváltozás megvalósítható lenne például az USA-ban 1958-ban kifejlesztett nikkel-titán ötvözetrel, a "nitinollal". Az ötvözet neve betűszó, amelyet a fém alkotórészeinek kezdőbetűiből és az anyagot előállító laboratórium, a Naval Ordnance Laboratory kezdőbetűiből állítottak össze.

7.3.1. *Mire képes a nitinol?*

A nitinol emlékező fém. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a nitinol alakját egy T_c kritikus hőmérséklet feletti hőkezelés során alakítottuk ki, akkor a fém erre az alakra a T_c hőmérséklet alatt bekövetkező maradandó alakváltozás után is emlékezik. Amennyiben ugyanis újra a kritikus hőmérséklet fölé hevítjük, akkor visszanyeri eredetileg kialakított formáját. A kritikus hőmérséklet az ötvözet pontos összetételétől függ.

A hétköznapi anyagokhoz képest ez merőben szokatlan tulajdonság, hiszen a fémek eredeti alakjukat általában csak akkor nyerik vissza, ha a deformáció a rugalmas tartományban történik. Ez esetben az alakváltoztató erő megszűnte után a deformáció is azonnal visszaalakul. A nitinol azonban a kritikusnál alacsonyabb hőmérsékleten maradandóan formálható, felmelegítés nélkül megállapíthatatlan, hogy a fém "memóriája" milyen eredeti formát őriz.

Az első emlékező fémeket még 1932-ben fedezték fel, ezek arany-kadmium, indium-titán és réz-cink ötvözetek voltak. Részletes vizsgálatukat az 1950-es évek elején kezdte meg Thomas Read munkacsoportja az illinoisi egyetemen. Ők mutatták meg, hogy ezek a fémek felhasználhatók például hőerőgép készítésére is.

Az emlékező ötvözetek ugyanis miközben a felmelegítés során visszanyerik eredeti alakjukat, hőt vesznek fel. Ennek a hőnek egy részét a fém az alakváltozása során mechanikai munkává alakítja át.

A nitinol éppen azért vált kiemelkedő jelentőségűvé a többi emlékező ötvözetrel szemben, mert a belőle készített gépben alakítható a legjobb hatásfokkal a hő mechanikai munkává, ugyanakkor ez a fém munkavégzés közben jelentős erő kifejtésére is képes. A Szovjetunió Össz-szövetségi Műszaki Intézetében például nitinol szalagból egyszerűen működő, légkalapácshoz hasonló törőeszközt készítettek. Az 55% nikkelből és 45% titánból álló szalagot 60°C -ra hevítették és S alakúra hajlították, majd lehűtötték. Ezután a szalagot 40°C -ig melegítették és fordított S alakot képeztek belőle, majd a szalag egyik végét a kalapács törzséhez, a másikat pedig az "ütőfejhez" erősítették. Gyors egymásutánban váltakozó melegítés és hűtés hatására a szalag hol kiegyenesedik, hol összehúzódik, az ütőfej pedig fel-alá jár, akárcsak a sűrített levegővel működő légkalapácsban. A mérések szerint egy 1 cm széles, 10 cm hosszú nitinol szalag kiegyenesedése során 6-8000 N erőt

fejt ki, így a nitinolos kalapács valóban alkalmas arra, hogy követ vagy betont törjünk vele.

Mielőtt az alakjukra emlékező fémek további alkalmazásaira rátérnénk, foglalkozunk először a különleges viselkedés szerkezeti magyarázatával.

7.3.2. Az alakmemória és a martenzites átalakulás

Az alakmemória kialakulása mögött "régi ismerősünk", az acéllal kapcsolatban megismert martenzites átalakulás rejtőzik.

1929 óta különböző nem vas ötvözetekben, sőt tiszta anyagokban is megfigyeltek gyors, diffúziómentes átalakulásokat. Ezeket a sok atom együttes, de atomonként kicsiny elmozdulásával járó kristályszerkezeti változásokat az acél mintájára más anyagokban is martenzites átalakulásnak, az átalakulás során kialakuló új kristályszerkezetet pedig martenzitnek nevezzük. Jellegzetesen hasonló a különböző anyagok martenzitjeinek optikai mikroszkópos képe is. A mikroszkópban általában az acél martenzit fázisához hasonló tűszerű párhuzamos sávokba rendezett képződményeket figyelhetünk meg, amely sávok esetenként 60° -os szögben találkozáva áthatolnak egymáson. Ugyancsak közös sajátága a martenziteknek, hogy keletkezésük során energiát nyelnek el, azaz úgynevezett metastabilis fázist képeznek. Furcsa eltérés azonban a névadó vasfázissal szemben, hogy a martenzit általában lágy, könnyen alakítható anyag. Az acélban e fázis kivételes keménységét mint már említettük, a rácsközi helyzetben elhelyezkedő oldott szénatomok okozzák.

Az alakmemória megértéséhez meg kell ismernünk a martenzites átalakulás egy olyan sajátosságát, amelyről eddig hallgattunk. A diffúziómentes átalakulás nemcsak megfelelő ütemű hűtéssel, hanem mechanikai feszültség alkalmazásával is kialakítható! A kétféle hatás azonban kissé eltérő szerkezetű fémszövetet eredményez! A pusztán hőmérsékletváltozás hatására végbemenő martenzites átalakuláskor a martenzit kristályszemcsék véletlenszerűen irányítva izotrop módon keletkeznek. A mechanikai feszültség azonban irányítottságot visz a martenzit szerkezetbe. A martenzit lemezben jellegzetes, a feszültség irányába rendezett úgynevezett ikerkristályok keletkeznek. Az ikerkristályokban az atomok a két kristály határ-síkjaára tükörszimmetrikusan helyezkednek el.

Melegítés hatására természetesen mindkét típusú martenzit az eredeti fázissá alakul vissza. Lényeges különbség van azonban a visszaalakulás során a belső feszültségek eloszlásában. A tűszerű martenzitkristályok térfogata általában nagyobb, mint az eredeti anyagé, így a martenzit keletkezése során a környező anyagban mindig belső feszültségek keletkeznek. Véletlenszerűen eloszlott martenzitfázis esetén a belső feszültségek is véletlenszerűen oszlanak el, s hatásuk még kicsiny térfogatrészekben is kiegyenlítődik. Az irányítottan keletkező martenzit esetén azonban más a helyzet. A belső feszültségek összegződése nyomán az anyag egyes részeire erő hat. Melegítés hatására a "befagyasztott" feszített állapot feloldódik, s az anyag egyes részei elmozdulnak. Minthogy azonban az irányított martenzit az eredeti alakhoz képest létrehozott alakváltozás hatására jött létre, s ezért

a belső feszültségek útján a fém eredeti alakját őrzi, a melegítés hatására az emlékező fém visszanyeri kezdeti alakját. A nitinolos "kalapács" azonban nem egy, hanem két stabilis formát őríz memóriájában. Ha a felmelegített anyagot visszahűtjük, akkor ismét a hidegen kialakított forma áll vissza. Azt, hogy erre a második alakra miért emlékezik az anyag, még ma sem értjük egészen pontosan. Nagyon valószínű azonban, hogy a martenzitfázis több hőkezelési ciklus esetén is mindig ugyanott keletkezik. A martenzitcsírák kialakulásának helye azonban mechanikai alakítással befolyásolható. Ezért a fémet mintegy betaníthatjuk két alakjára, ha néhány hőkezelési ciklus során a két alak között hajlítgatjuk is. Ezzel az alakítással stabilizáljuk a martenzitmagok kialakulásainak helyét, s a továbbiakban a fém a benne kialakuló belső feszültségek miatt pusztán a hőmérséklet periodikus változásának hatására a kívánt módon változtatja az alakját.

7.3.3. A nitinol hőerőgép

Lényegében eljutottunk annak megértéséig, hogy miként használhatjuk a nitinol hőerőgépeket. Azt kell csak megoldanunk, hogy az anyagot a gép mozgása közben megfelelő hőmérsékletű hőtartályokkal hozzuk kapcsolatba.

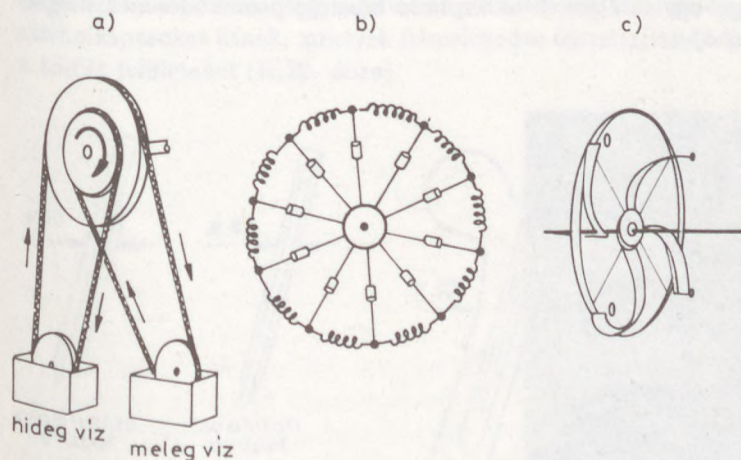
Ilyen motort először David Liebermann és Read konstruált arany-kadmium ötvözetből. Napjainkig nitinolból többféle hőerőgép is készült. Néhány egyszerű változatot a II. 27/ a), b), c) ábrákon bemutatunk. Az első kettőt David Johnson, a Berkeley egyetem kutatója, a harmadikat pedig Ahmad Golestaneh konstruálta az Illinois-i egyetemen. A II.27/ a) ábrán látható motort egy differenciálcsigán elhelyezett nitinolrugó-hurok működteti.

A differenciálcsgiga tárcsáin fogakat helyeztek el, hogy a rugó megcsúszását megakadályozzák. A rugót 520°C-on izzítva, szorosan tekercselve készítették. Erre a szoros spirálra "emlékezik" a fém a kritikus hőmérséklet felett. A hurok egyik vége hideg, a másik vége forró vízbe merülő tárcsán van átvetve. Megfelelő beállítás esetén a nitinolhuzal a tárcsákat mindaddig forgásban tartja, amíg a két víztartály hőmérsékletét változatlan értéken tartjuk. A mozgás azért jön létre, mert a forró vízben tartott huzal a kritikus hőmérséklet fölé hevülve összehúzódik, a hideg fürdőben pedig kitér. Ezért a forró fürdőbe merülő rugóágakban nagyobb F_1 erő ébred, mint a hideg vízbe merülő rugókban (F_2). Könnyen belátha-

tó, hogy a differenciálcsgiga h sugaru nagyobbik tárcsájára az óramutató járásával megegyező $(F_1 - F_2)R$ nagyságú forgatónyomaték hat. Az r sugarú kisebbik tárcsára pedig ezzel ellentétes irányú $(F_1 - F_2)r$ nyomaték működik. A gépet tehát az eredő $(F_1 - F_2)(R - r)$ forgatónyomaték hajtja.

A II. 27/ b) ábrán látható ugyancsak Johnsontól származó gép egy kerékagyhoz csatlakoztatott acélküllősről áll. A küllők külső végének közelébe kicsiny súlyokat kell erősíteni, majd a kereket pl. ólomcseppekkel ki kell egyensúlyozni. A motor forgásba hozható, ha a vízszintes tengelyű kerék felső részén elhelyezkedő rugót pl. gőzsugár segítségével a kritikus hőmérséklet fölé hevítjük. A fázisátalakulás

hatására a rugó megrövidül, összehúzza a küllőket, s ezáltal a kerék súlypontja a tengelyen kívülre kerül. Az így keletkező forgatónyomaték a kereket elfordítja. Amint a felhevített rugó kilép a gőzsugárból, lehül és kinyúlik, ugyanakkor a felül felforrósodó rugórészek húzódnak össze. Ily módon a súlyponteltolódás állandóvá válik, és a kerék mindaddig forgásban marad, míg a felső részeken melegítjük a rugót. A forgás sebességét a gőzsugárból kilépő rugók lehülésének üteme határozza meg.



II.27. ábra

Hasonló elv alapján működik a Golestaneh tervezte nitinolgép is, amelyben egy abroncsot ívelt alakított nitinol "küllők" csatolnak egy nehéz tengelyhez. A tengelyt vízszintesen egy vizes kád fölé kell helyezni úgy, hogy a nitinolíveknek körülbelül fele a vízbe merülhessen. Töltsünk a kádba a huzal kritikus hőmérsékleténél melegebb vizet. A levegőben levő nitinolívek kevert martenzit szerkezetűek és a tengely súlya alatt könnyen deformálódnak. A forró vízbe merülő szálak azonban a hő hatására bekövetkező fázisátalakulás miatt visszanyerik eredeti alakjukat, s ezért a kerék excentrikussá válik, s ennek következtében a Johnson-géphez hasonlóan forgásba jön.

Golestaneh gépe terheletlen állapotban ötvenkét fordulatot tett meg percenként, s néhány milliwatt energiát szolgáltatott a 20-40°C szobahőmérséklet és a 75°C-os hőmérsékleti határok között működtetve. A gép 4,7%-os hatásfokkal működött, ami jól megközelítette az elméletileg jósolt 5-7%-os értéket.

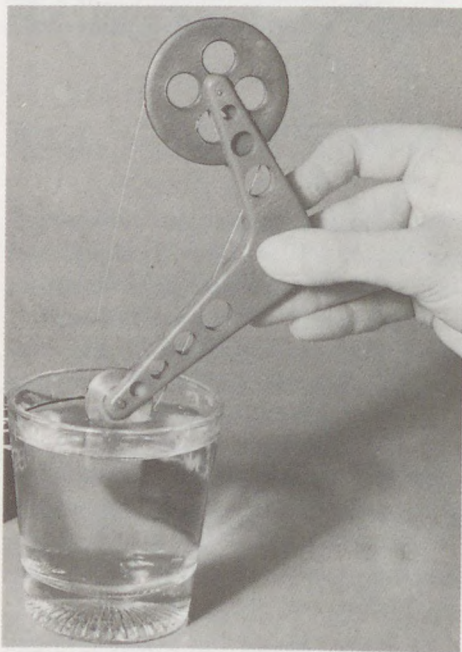
Az adatok mutatják, hogy a nitinolgép teljesítménye és hatásfoka egyelőre olyan csekély, hogy technikai alkalmazása nem várható.

További problémát jelent az is, hogy a nitinolgép már csekély mechanikai, illetve hőhatásbeli túlterhelésre kifárad, a huzal "elfelejti" az eredeti alakját, s a gép nem működtethető. Amennyiben tehát megvalósulna a fejezet elején leírt nitinolos kalapács, akkor nagyon valószínű, hogy a nitinolszalagot időről időre újra kellene formálni.

7.3.4. A nitinol jelentősége

Nagyon valószínű, hogy az alakmemóriával rendelkező fémek egyelőre csak kuriózmunként szerepelnek a fémek világában. Különleges tulajdonságaik segítséget adnak a kutatóknak a martenzites átalakulás tanulmányozásához, s szép feladatokkal szolgálnak a hőerőgépek tulajdonságait tanulmányozó egyetemi hallgatók számára.

Izgalmas feladat egy-egy játékszerként kapható nitinolgép működésének megértése is (II.28. ábra, fotó).

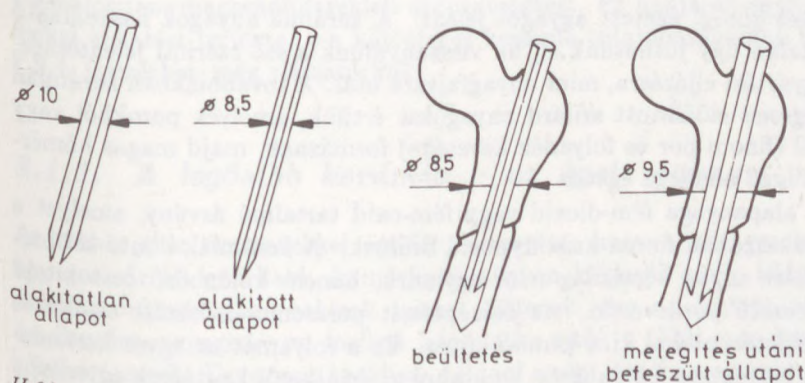


II.28. ábra

A nitinol azonban különleges mechanikai tulajdonságai mellett egyéb olyan sajátosságokkal is rendelkezik, amelyek az "anyagga" szerveződött atomi rendszerek tulajdonságainak jobb megértéséhez vezethetnek. A martenzites transzformáció során ugyanis az atomi rend újjászerveződése nemcsak az atomi kötőerők megváltozásával, hanem elektronszerkezeti változásokkal is jár. Az elektronszerkezeti változások következtében változik például az anyag elektromos ellenállása és mágnesezhetősége is. Ezeket a hatásokat jelenleg még nem értjük pontosan, kutatásuk azonban értékes eredményekre vezethet.

A szövetbarát nitinolötvözetekből törött csontrészek rögzítésére szolgáló kapcsok készíthetők. A csonttörések gyógyításakor alkalmazott külső gipszrögzítés, illetve belső csavarozás ugyanis még a rögzítő elemek gondos behelyezése esetén sem

akadályozza meg a törött csontfelületek mikromozgásait. Az esseni klinikán 1977-ben kezdték meg a nitinolból készült kapcsok alkalmazását. A hagyományos sebésetben az üreges csontok (combcson, sípcson) töréseit úgy rögzítik, hogy fémrudat vernek az eltört csöves csontba, s ez belülről rögzíti a törött csontot, így a beteg röviddel a műtét után már mankóval járhat. A nitinolból készült velőűrszeg kisebb átmérőjű lehet a hagyományosnál, mert a megfelelően alakított szegecs a test hőmérsékletére melegedve kitágul és feszesen kitölti a csont üregét. Törött csontfelületek szorosan egymáshoz rögzíthetők oly módon, hogy a csontokba olyan nitinolkapcsokat ütnek, amelyek felmelegedve összehajlanak és egymáshoz szorítják a törött felületeket (II.29. ábra).



II.29. ábra

Egyes sebészek az elzáródott verőerek nyitvatartására alkalmaznak nitinolspirálokat.

Megfelelő ötvözással a kritikus hőmérsékletet éppen az emberi test hőmérsékletére állítják be, majd a melegen spirállá formált rugókat lehűtik és egyenesre nyújtják. A leszűkült verőeret kitágítva a nitinolszálat az érbe húzzák. A testhőmérséklet hatására a huzaldarabka ismét spirállá ugrik össze és megakadályozza, hogy az esetleges vérrögöket a véráram magával ragadja.

8. Nem fémes szerkezeti anyagok

Az eddigiekben elsősorban a fémek mechanikai tulajdonságaival – szilárdságával, képlékenységgel – és ezen tulajdonságokat meghatározó anyagszerkezeti érdekességekkel foglalkoztunk. A gyakorlatban a fémek mellett alapvetően fontos egyéb szerkezeti anyagokat is használunk. Ezek közül néhány, mint például az égetett agyag (a tégl, cserép) évezredek óta ismert, másokat például a modern betont vagy egyes jó hőálló és kopásálló kerámiákat csak a XIX. és XX. században találták fel és kezdték alkalmazni. A következőkben, a teljesség igénye nélkül, egyes nem fémes szerkezeti anyagokkal kapcsolatos érdekességgel foglalkozunk.

8.1. Kerámiák

A köznapi ember számára a kerámia közismert használati tárgyak – a porcelán tányér, a virágcserep vagy a fürdőszobacsempe – anyagát jelenti. A szaktudósok, akik a közös és jellemző anyagszerkezeti tulajdonságok alapján próbálják az anyagokat csoportosítani, a kerámiák esetén nehéz helyzetben vannak, mert nemigen találni olyan szerkezeti sajátyságot, amely a sokféle kerámia anyagra egyaránt jellemző, s amelyek segítségével egyértelműen eldönthető, hogy mely anyagok sorolhatók ide. Akadnak olyanok, akik szerint minden olyan szilárd anyag, ami nem fém és nem makromolekulákból áll, kerámiának tekinthető. Ez azonban nyilvánvaló túlzás.

A kerámia szó görög, égetett agyagot jelent. A kerámia anyagok használható definíciójához talán úgy juthatunk el, ha visszanyúlunk a szó szerinti jelentéshez, ami inkább a gyártási eljárásra, mint anyagfajtára utal. A továbbiakban kerámián olyan mesterségesen előállított szilárd anyagokat értünk, amelyek porokból vagy szuszpenziókból (finom por és folyadék keveréke) formáznak, majd magas hőmérsékleten egybefüggő anyaggá égetik.

A kerámiák alapanyaga fém-dioxid vagy fém-oxid tartalmú ásvány, amelyet a gyártás első szakaszában finom kristályporrá őrölnek. A kerámiák döntő többségénél a kiindulási anyag kémiaiilag nem egyszerű, hanem különböző összetételű és kristályszerkezetű porkeverék. Az összepréselt porszemcsék között az égetés magas hőmérsékletén alakul ki a kémiai kötés. Ez a folyamat az egyes kerámiaanyagok esetén lényegesen különböző. Van, ahol az érintkezői kristályok egymásba diffundálnak, és így forrasztják össze a két szemcsét, máshol a határfelületen kémiai változások, szilárd fázisú kémiai reakciók mennek végbe, és így jön létre a kötés, ismét másutt egyes összetevő anyagok megolvadnak és a porszemcséket körbefolyva "ragasztják" össze azokat.

A kerámia anyagok fizikai, kémiai tulajdonságai igen sokfélék, néhány általánosan jellemző tulajdonságukat azonban érdemes kiemelni. Mechanikai szempontból a kerámiák nagy szilárdságú, kopásálló anyagok. Keménységük az atomokat összetartó kovalens és ionos kötések erősségének következménye. Jellemző, hogy nyomási szilárdságuk jóval nagyobb a húzó vagy nyíró szilárdságuknál (mintegy tízszerese annak). A kerámiák ridegek, törékenyek, képlékenyen nem alakíthatók. A gyártás során az anyagban igen gyakran maradnak üregek, mikrorepedések. Ha a terhelés hatására ébredő belső feszültségek egy kritikus értéket elérnek, a mikrorepedések hirtelen makroszkopikus méretűvé nőnek, és az anyag eltörik. Összenyomás esetén a kritikus feszültség nagyobb, mint a húzás vagy a nyírás esetén. A repedés kialakulását kerámiák esetén a II. 6. fejezetben már tárgyalt Griffith-féle elmélettel értelmezik. Sok kerámiaanyag magas hőmérsékleten is megőrzi kedvező szilárdságát, kopásállóságát. Ez teszi alkalmassá ezeket tüzeléstechnikai berendezések, magas hőmérsékleteken koptató hatásnak kitett gépalkatrészek előállítására. Japánban, Amerikában sikeres kísérletek folynak arra vonatkozólag, hogy a robbanómotorokban kerámia alkatrészeket használjanak. A kísérletektől azt várják, hogy a motorok hatásfoka a magasabb üzemi hőmérséklet

miatt, illetve a kisebb önsúly következtében javuljon. További előny, hogy a jó kopásállóság miatt a kerámia alkatrészek olajozást is alig igényelnek.

A kerámiák kémiai hatásokkal szemben is ellenállóak. E tulajdonság elsődleges magyarázatát a kerámiák kémiai anyagában kell keresnünk. Az alapanyag fém-oxid, ami további oxidációra, korrózióra már "képtelen". A magas hőmérsékleten stabilizált kémiai kötések kémiailag szinte megbonthatatlan, erős kovalens, ionos kapcsolatot hoznak létre az atomok között. A vegyi hatásokkal szembeni ellenállás, a korrózióállóság a kerámiát a vegyipari létesítmények értékes szerkezeti anyagává teszi.

A kerámiák általában elektromosan szigetelők, de vannak közöttük félvezetők is. Külön érdekességgént kell kiemelni, hogy kerámia anyagban sikerült először megvalósítani magashőmérsékleti szupravezetést. Ez napjaink egyik legérdekesebb fizikai kutatási területe, s a különleges kerámia tulajdonságainak ismertetésére a 8.2.4. fejezetben még visszatérünk.

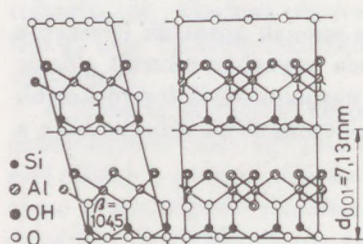
8.1.1. A legősibb kerámia – az égett agyag

Az ember már évezredekkel ezelőtt észrevette, hogy a környezetében található agyagos sár jól gyúrható, formázható, tűzben kiegetve pedig kőkeménnyé válik. A világ múzeumaiban sok-sok termet töltenek meg az égetett kerámiatárgyak. Az ősember agyagedényei mellett bámulatba ejtők a több ezer éves szobrocskák, kályhacsempék. Egyes országokban, például a régi Kínában a kerámiaégetés magas színvonala komoly szakismeretre utal. Az első kínai császár sírdombját feltárva több ezer életnagyságú – harcosokat, szolgákat, lovakat ábrázoló –, égetett agyagszoborra bukkantak a régészek. Kínában készült az első porcelán is, anyaga a kaolinit, finomított agyag – a közismert fazekas agyag – egyik összetevője. A régi mesterek tudása hosszú idő alatt szerzett, apáról-fiúra szálló tapasztalatokon alapult; a mai korszerű gyártástechnológiákban a tapasztalat mellett egyre nagyobb teret kapnak a tudományos anyagszerkezeti ismeretek. A következőkben anyagszerkezeti szempontból vizsgáljuk az agyagkerámiákat, alapanyagaik leírásától egészen a kész kerámia tulajdonságáig.

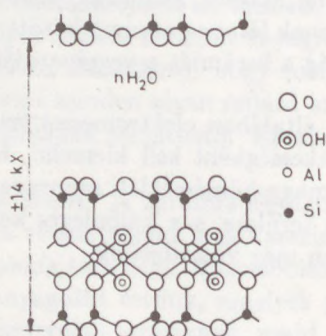
8.1.2. Miből áll az agyag?

Az agyag úgynevezett másodlagos kőzet, amely vulkáni eredetű, vagy üledékes kőzetek lebomlásával keletkezik. Az agyag sem kémiai, sem fizikai szempontból nem egységes, különböző vegyületek, különböző kristályos fázisok keveréke. Az egyes agyagok összetétele és ettől függően tulajdonságai a lelőhelytől függően is változnak, általánosan jellemző azonban, hogy az agyag különböző kristályszemcséi igen aprók, 0,01 mm-nél kisebbek. Az agyagok döntő részét az ismert "agyagásványok" gyűjtőnév alatt, három anyag, kaolinit, montmorillonit és illit adja. Ezek mellett található még az agyagokban több-kevesebb kvarchomok, csillám és néhány vas-tartalmú ásvány.

Az agyagok közös jellemző tulajdonsága, hogy vizet képesek megkötni. A felvett víz hatására az agyag megduzzad és képlékennyé válik. A sajátos viselkedés az agyagásványok szerkezetével magyarázható. Ezek az anyagok rétegrácsos szerkezetű alumínium-szilikátok. A kaolinit, amely tisztított formában a porcelángyártás alapanyaga, kettős rétegszerkezetű. Egy szilícium- és oxigénatomokat



II.30. ábra



II.31. ábra

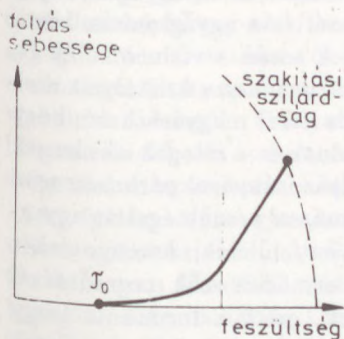
tartalmazó réteg és egy alumíniumot, oxigént és hidroxil-atomszoportokat tartalmazó réteg az oxigénatomokon keresztül kapcsolódik össze. Az így létrejött kettős rétegeket, az OH-csoportok révén, másodlagos kötések, H-hidak kötik össze. A rétegek keresztmetszetét mutatja a II.30. ábra. A *montmorillonit* hármas rétegekből épül fel (II.31. ábra). A réteghármasok köré vízmolekulák épülnek be és H-hídkötésekkel összekapcsolják azokat. Száraz állapotban a rétegek közötti vízmolekulák száma kicsi. Ha az agyaghoz vizet adunk, akkor a rétegek közé egyre több H_2O molekula épül be, így a rétegek távolsága nő. Ezzel magyarázható az agyag erős duzzadása víz hatására.

Az *illit* a szintén hármas rétegszerkezetet mutató csillámokból keletkezett úgynevezett hidrocillám. Rendkívül apró lemezkristályaiban az eredeti csillámokhoz képest megnőtt a víztartalom és lecsökkent az eredeti csillámszerkezet rétegeinek összetartásában szerepet játszó alkáliionok mennyisége.

8.1.3. A vizes agyagmassza képlékenysége, az agyagtárgyak formázása

Az agyag mechanikai tulajdonságai a víztartalomtól függnék. A száraz agyagkö kemény, rideg anyag. Víz hozzáadására megduzzad, ridegsége csökken, majd képlékennyé, gyúrható masszává válik. Tovább vizezve az agyagot, először sűrű pépé lesz, majd híg folyós iszapot, úgynevezett agyagszuszpenziót alkot. A vizes agyag képlékeny viselkedését az alakváltozás sebességének (folyási sebesség) és a deformáció feszültségének a viszonya jellemzi. Az agyagra jellemző folyási sebesség-feszültség összefüggést a II.32. ábra grafikonja szemlélteti. A grafikonról leolvasható, hogy a képlékeny deformáció megindításához először egy kritikus

feszültséget kell elérni. Az ezt meghaladó, de még nem túl nagy feszültség hatására az agyag a feszültséggel arányos sebességgel, de igen lassan folyik. A feszültség növekedésével az alakváltozás sebessége nő és egy rövid átmeneti tartomány után ismét (egészen a szakadásig) arányos lesz a feszültséggel. Ebben a tartományban az agyag ideális newtoni folyadékként viselkedik. A II.32. ábrán bemutatott sematikus



II.32. ábra

grafikon a gyúrható sűrű agyagmasszára és a híg folyós iszapra egyaránt érvényes. A víztartalom függvényében azonban a görbe a feszültség tengely mentén jobbra vagy balra tolódik. A sűrű massa képlékeny deformációja csak jóval nagyobb feszültség hatására indul meg, mint a hígabb iszapé.

Az agyagtárgyak készítésének klasszikus módszere a kézi formázás. A kezünk által kifejtett nyomás hatására az agyagmassza viszkózusan folyik (a görbe meredekebb egyenes szakasza) és felveszi a kívánt formát. A nyomást megszüntetve az alakváltozás is azonnal megszűnik, ha az agyag önsúlyából származó mechanikai feszültség nem éri el a folyás megindításához szükséges küszöbértéket. A rutinos szobrászok, fazekasok a gyakorlatból tudják, hogy milyen tömegeloszlásúnak kell lennie a formázott tárgynak ahhoz, hogy az agyag elbírja saját súlyát. Kezdőknel azonban előfordulhat, hogy a már elkészült, száradni kitett tárgy az állás során lassan deformálódik, mert az önsúlyból adódó feszültség a folyási sebesség-feszültség görbe első, laposan futó szakaszára esik. Ipari gyártás, tömegtermelés esetén az agyag formázásának két módja van. Az egyik a téglagyártásnál követett eljárás, itt a gyúrható agyagmasszát préseléssel formázzák. A másik technológiát általában a bonyolultabb formájú termékeknél alkalmazzák, ez az öntés. Míg az első módszer annyira hasonlít a kézi formázáshoz, hogy további magyarázatot sem igényel, addig az öntésről külön is érdemes néhány szót szólni. Öntéskor az agyagot híg folyós iszapként nedvszívó tulajdonságú, pl. gipszből készült, szétszedhető formába öntik. Kezdetben a pép saját súlya alatt is folyik és kitölti a forma legfinomabb részleteit is. A forma anyagának nedvszívó tulajdonsága miatt az agyag víztartalma csökken és hamarosan már elbírja saját súlyát. Ekkor vehető ki a tárgy a formából.

Az eddigiekben áttekintő fenomenologikus képet adtunk az agyag képlékenységi tulajdonságairól, formázásáról, mindezek anyagszerkezeti értelmezésével azonban még adósak vagyunk.

Az agyag formálhatósága a kristályszerkezet és a víz kölcsönhatásának eredménye. Az agyag tömegének döntő részét kitevő agyagásványok, mint ahogy már tárgyaltuk, réteges szerkezetű kristályok. A rétegek elektronszerkezete nem kiegyenlített, a rétegek ennek következtében másodlagos kötésekkel, leggyakrabban H-hidakkal kapcsolódnak egymáshoz. Ezek a másodlagos kötések mechanikai igénybevétel hatására (a közet őrlése, aprítása) felszakadnak, és az agyagásványok háromdimenziós kristályrácsa kristálylemezekre esik szét. Az agyagmassza készítésekor a porított agyagot vízzel gyúrnak össze. Ennek során a vízmolekulák H-híd kötést kialakítva megkötődnek a rétegek felszínén. A massa kristályait ezek a kötések tartják össze. Az agyagmassza gyúrható. Ez azzal magyarázható, hogy a nyíróerők hatására a lemezek közti H-hidak felszakadnak és a rétegek elcsúsznak egymáson. A deformáció során a kristálylemezek a folyás irányával párhuzamosan irányítódnak. Ez az irányítódás okozza, hogy a korongozással készült égetett agyagtárgyakon gyakran megfigyelhetők csigavonalszerű töretfelületek; korongozáskor ugyanis az agyagmassza csigavonalban áramlik. A deformációs erők megszűntével a kristálylemezek között ismét kialakulnak a kötések, ezért a formázott tárgy megtartja az alakját. Az agyagmassza hígításával a képlékenység nő, ami annak a következménye, hogy a kristályrétegek közé egyre több vízmolekula épül be. A rétegek egyre több H-híd közbeiktatásával (a vízmolekulák között is H-hidak vannak) kapcsolódnak össze. A laza H-híd háló megbontása annál könnyebb, minél több vízmolekula került a rétegek közé. A kristálylemezek közti vízréteg a fémfelületek közé kerülő olajréteghez hasonlóan megkönnyíti a lemezek elcsúszását.

A híg agyagiszap önthető folyadék. Érdekes tulajdonsága, hogy ha hosszabb ideig állni hagyjuk és mechanikai hatás nem éri, akkor viszkozitása erősen megnő, rázás, felkeverés után azonban ismét lecsökken. A tixotrópiának nevezett jelenség szerkezeti magyarázata a következő: a vízben a kristálylemezek szabálytalanul egymástól távol helyezkednek el. Ha az anyag nyugalomban van, a vízben lebegő kristálylemezek Brown-mozgást végezve változtatják helyüket és elhelyezkedésük irányát. Ennek során a rétegek közel kerülhetnek egymáshoz és kötések alakulhatnak ki közöttük. Hosszú állás alatt az agyagiszap lemezei laza térhálóba kapcsolódnak, a kristályrétegek egymáshoz viszonyított helyzete rögzül. Kis erőhatásokkal szemben ez a térszerkezet stabilis és a játékkártyából építhető kártyavárhoz hasonlítható. Amint a kártyavár összeomlik, az asztal erős megrázásakor, a kristálylapocskákból álló térszerkezet is felbomlik a nagyobb mechanikai igénybevétel hatására.

8.1.4. Az agyagégetés folyamata

A formázott agyagtárgyat először alaposan kiszáritják. A szárítás során az agyagban levő víz legnagyobb része elpárolog és az anyag kismértékben összezsugorodik. Ha az agyagmassza nedvességtartalma egyenetlen, akkor gyakran előfordul, hogy a különböző mértékű zsugorodás miatt az agyag megrepedezik.

A szárítást követi az agyag kiégetése. A kemencét fokozatosan melegítik. A közönséges fazekasáru és a téglák esetén a legmagasabb hőmérséklet $950-1150^{\circ}\text{C}$

között van. Speciális agyagtárgyak – kőagyaglapok, klinker-téglák, porcelán esetén a kemence hőmérséklete elérheti az 1600°C-ot is.

Az égetés során először az agyag fizikailag kötött víztartalma párolog el, majd az agyagásványokban kötött víz is. Ez utóbbi már az agyag szerkezetét megváltoztató kémiai reakció. Míg a fizikailag kötött víz elvesztése megfordítható folyamat, az égetés alatt kémiai szerkezetét megváltoztató agyag már nem tud vizet megkötni és ezáltal képlékeny alakíthatóságát is végképp elveszíti. A sok összetevőből álló agyagban a vízvesztésen túl is számos kémiai reakció megy végbe. Ezek együttes eredményeként az apró kristályos szemcsék összetömörödnek és erős kémiai kötések alakulnak ki köztük. E folyamatok számos részlete máig sem tisztázott. Bár a tégláégetés ősidők óta ismert, az optimális tulajdonságot adó égetési technológia kidolgozásával ma is számos kutató foglalkozik

Az égetés során egyes kerámiák, például az égetett agyag jellegzetesen megváltoztatják a színüket. A téglá, a cserép jellegzetes színe a különböző árnyalatú vörös és barna. A színváltozás oka a közönséges agyagokban található vastartalom. Levegőn, azaz oxidációs körülmények között végezve az égetést, a vastartalmú vegyületek vörös színű Fe^{3+} -ionokat tartalmazó oxidokká alakulnak. Az agyagban levő vas mennyiségétől függően változik a cserép színárnyalata. Ha az agyagot redukációs körülmények között égetik, akkor Fe^{2+} -ionok keletkeznek, s ezek az anyagot kékesre színezik.

8.2. *A szupravezető kerámiák*

8.2.1. *A Nobel-díjas felfedezés*

1986-ban két svájci kutató, Alex Müller és Georg Bednorz, lantán, bárium és réz-oxid keverékéből olyan kerámiát készített, amely 30 K alatti hőmérsékleten szupravezetővé vált. Az eredmény eleinte nem keltett szenzációt, amikor azonban Bednorz és Müller kutatásai nyomán Ching Wu Chu és munkatársai 93 K-ig szupravezető kerámiát állított elő, nyilvánvalóvá vált, hogy a szupravezetés hosszú ideig stagnáló területén áttörés következett be. A fizikusok többsége ugyanis már beletörődött abba az elméleti számításokkal alátámasztott eredménybe, hogy 40 K felett a szupravezetés lehetetlen.

A szupravezető kerámiák visszaadták a magashőmérsékleti szupravezetéssel, s a szupravezetés gyakorlati alkalmazásával foglalkozó kutatók hitét. A gyakorlati felhasználás legnagyobb akadálya ugyanis az volt, hogy a 15 K körüli hőmérséklet fenntartása rendkívül drága, mert folyékony héliumos hűtést igényel. A 93 K azonban folyékony nitrogén segítségével (a nitrogén 77 K-en cseppfolyósodik) könnyen fenntartható. Ezzel a szupravezető állapot elérése nagyságrendekkel olcsóbbá vált. A "nitrogén" hőmérsékleten 1 J energia elvonásához kb. 25-ször kevesebb energia befektetése szükséges, mint a hélium hőmérsékleten. Ismét elérhetőnek látszik tehát a nagy szupravezetőkből álló mágneses energiatárolók és veszteségmentes távvezetékek felépítése. Természetesen a közvetlen gyakorlati felhasználás

lást egyéb pl. a kerámia anyagok törekenységéből következő problémák még mindig akadályozzák. Ezek leküzdése azonban kevésbé látszik nehéznek, mint az 1986-ig elérhetetlennek hitt magas hőmérséklet-tartományú szupravezetés elérése. Méltán kapott tehát 1987-ben a kerámiák szupravezetését felfedező Bednorz és Müller Nobel-díjat.

Ahhoz, hogy a kerámia anyagok szupravezetésének elvi kérdéseivel foglalkozhassunk, először röviden meg kell ismerkednünk a hagyományos szupravezetők tulajdonságaival, s az erre vonatkozó elméletekkel.

8.2.2. A hagyományos szupravezetők

Kammerlingh Onnes dán fizikus 1908-ban a fémek alacsony hőmérsékleti ellenállását vizsgálva fedezte fel a szupravezetés jelenségét. Megállapította, hogy 4,2 K kritikus hőmérsékletnél a higany ellenállása hirtelen zérusra csökken. Azóta sokféle anyag esetén mutatták ki kísérletileg a szupravezetést és határozták meg a szupravezető átmenetre jellemző 1-20 K közé eső T_c kritikus hőmérsékletet. Szupravezető pl. a tiszta anyagok közül az irídium, a titán, a kadmium, az ólom, stb., az ötvözetek közül pedig a MoC, NbN, Nb₃Sn stb.

A szupravezetés kísérleti igazolása lényegében kétféle. Az egyik esetben egy áramjárta vezető két vége között fellépő feszültséget mérik az anyag folyamatos hűtése közben. A kritikus hőmérséklet elérve ez a potenciálkülönbség hirtelen zérussá válik. A másik, talán "látványosabb" eljárás az, hogy a vizsgált anyagból zárt vezető gyűrűt készítenek, s ezt a gyűrűt, síkjára merőleges mágneses térbe helyezik. Ezután a vezető gyűrűt a kritikus hőmérséklet alá hűtik, majd a mágneses teret kikapcsolják. A kikapcsoláskor fellépő indukciós lökés hatására a gyűrűben áram indukálódik. Kutatóintézetekben több évig "öriztek" ilyen áramjárta szupravezető gyűrűket. Az indukciós lökéstől keltett áram gyakorlatilag végtelen élettartama igazolja, hogy az adott anyag ellenállása tényleg közelíti a zérust, hiszen közönséges vezetőkben az így keltett áram 10^{-12} s alatt lecseng.

A hőmérséklet mellett a mágneses tér is befolyásolja a szupravezető anyagok tulajdonságait. A kritikus hőmérséklet alatt is megszűnik a szupravezető állapot, ha az anyag túlságosan nagy mágneses térbe kerül. A mágneses teret keltheti külső hatás, de létrehozhatja a szupravezető saját árama is. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a szupravezetőkben adott hőmérsékleten nem folyhat egy kritikus I_c -nél nagyobb áram, mert a keletkező nagy mágneses tér miatt az anyag szupravezető tulajdonsága megszűnik. A különböző anyagokkal végzett mérések szerint a kritikus mágneses tér nagysága adott T hőmérsékleten a

$$H_c = H_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$$

összefüggéssel adható meg, ahol H_0 a T_0 hőmérséklethez tartozó kritikus térerősség.

A szupravezetők további jellegzetes mágneses tulajdonsága, hogy a szupravezető anyag belsejében a mágneses indukcióvektor értéke zérus. Szokás ezt úgy is fogalmazni, hogy a szupravezetőből a mágneses tér "kiszorul". A gyakorlatban alkalmazott szupravezetőkbe a mágneses tér csekély mértékben mégis behatol, de 10^{-5} cm mélységben már zérussá válik.

8.2.3. A szupravezetés elméleti magyarázata

A szupravezetés mikroszerkezeti magyarázatát 1957-ben adták meg John Barden, Leon Cooper és Robert Schrieffer. A nevük kezdőbetűit idéző BCS-elméletért Nobel-díjat kaptak. A szupravezetés jellegzetesen kvantummechanikai effektus, amelyben a kvantummechanikai hatások makroszkopikusan is megnyilvánulnak. Az elmélet rendkívül bonyolult, ezért itt csak a legfőbb vonásainak érzékeltetésére szorítkozunk.

A BCS-elmélet alapja az, hogy a fémek elektronjai között a Coulomb-taszítás mellett sajátos vonzóerők is fellépnek. Az alacsony hőmérsékleten létrejövő szupravezető állapotban ezek a vonzóerők dominánssá válnak és a vezetési elektronokat úgynevezett Cooper-párokká kapcsolják össze. A kapcsolódás mechanizmusa, illetve a vonzóerő létrejötte durván azzal magyarázható, hogy a fémben mozgó elektron kissé deformálja a pozitív ionokból álló kristályrácsot. Ennek eredményeként az elektront egy pozitív töltésfelhő veszi körül, amely más elektronokra is vonzó hatást gyakorol. Az elektronokat párba rendező vonzás tehát az atomtörzsekből álló rács közvetítésével jön létre azáltal, hogy a mozgó elektron zavart okoz a rácsrezgésekben.

A párba kapcsolódó elektronokat azonban nem képzelhetjük úgy, mintha két elektron egyszerűen összetapadva együtt mozogna. Az elmélet szerint a Cooper-párok tagjainak impulzusa és spinje (saját forgásmennyisége) is ellentétes, és a két elektron távolsága 10^{-4} cm, azaz több nagyságrenddel nagyobb, mint a kristály atomjainak a távolsága.

Általában nem minden vezetési elektron kapcsolódik Cooper-párrá. A hőmérséklet növekedtével egyre valószínűbbé válik a párok bomlása, $T = T_c$ hőmérsékleten minden Cooper-pár felbomlik.

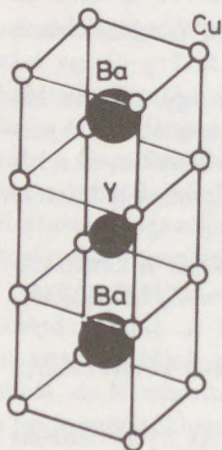
A szupravezetés jelensége az elektronpárok kialakulása alapján a következőképpen magyarázható.

A Cooper-párok ellentétes impulzusú elektronokból állnak. Az ilyen rendszer összipulzusa zérus, így a kvázirészecske $\frac{h}{p}$ de Broglie-hullámhossza végtelen nagyra válik. A teljes fémre kiterjedő elektronpár ily módon nem "érzékeli" a fémrács hibahelyeit, amelyek az elektromos ellenállás forrásai. Ugyanakkor az ellentétes spinű elektronokból álló kvázirészecske spinje zérus, így a Cooper-párokra a Fermi-Dirac-statisztika helyett a Bose-Einstein-féle eloszlásfüggvényt alkalmazhatjuk. A zérus spinű részecskékből tetszőleges számú lehet egy adott energiaállapotban, így a Cooper-párok többsége alapállapotban van. Ezért a fémekben nagy mennyiségű, energetikailag is egyenértékű részecske jön létre, amelyek kollektív mozgásba hozhatók és mozgásuk ellenállásmentesen fennmarad.

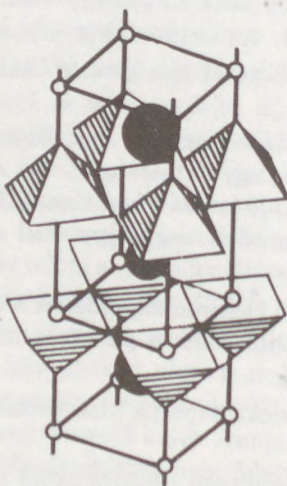
8.2.4. Az 1-2-3 anyag

Az ezen a néven híressé vált anyagot Chu és munkatársai állították elő finomra őrölt ittrium-oxid, réz-oxid és bárium-karbonát keverésével. Az égetés után 93 K-es kritikus hőmérsékletű anyaghoz jutottak. A nagy nagyítású optikai mikroszkópi vizsgálatokból kitűnik, hogy a kerámia igen finom, sötét smaragd zöld és fekete színű kristályok keveréke. A szupravezető tulajdonság a fekete, tökéletesen átlátszatlan kristályok tulajdonsága. E kristályok kémiai összetétele az $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ vagy az $Y_1Ba_2Cu_3O_6$ képlettel jellemezhető. A kristály elemi cellája tehát egy ittrium-, két bárium- és három rézatomot tartalmaz. Innen ered az 1-2-3 elnevezés!

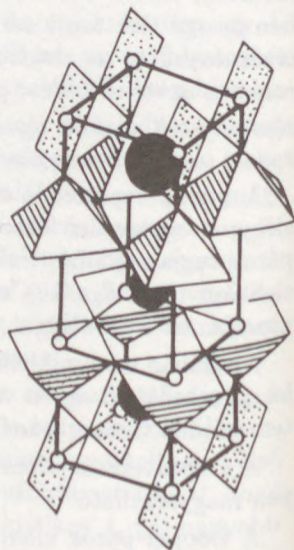
Az 1-2-3 kristályok geometriáját Robert Hasen és munkacsoportja derítette fel. Megállapították, hogy a kristály elemi cellája három egymás felett elhelyezkedő kockából áll. A kockák csúcspontjaiban rézatomok, középpontjukban pedig váltakozva bárium- és ittriumatomok helyezkednek el (II.33. ábra). Az oxigénatomok mindig az elemi cellát alkotó kockák élközéppontjaiban vannak. Egyes élközéppontok azonban mind az $YBa_2Cu_3O_6$, mind az $YBa_2Cu_3O_7$ módosulat esetén üresen maradnak. A kevesebb oxigént tartalmazó kristályban csak a bárium és ittrium középpontú kockák határlapjainak élközéppontjaiban, valamint a bárium



II.33. ábra



II.34. ábra



II.35. ábra

középpontú kockák függőleges élein (II.34. ábra) található oxigén. A két oxigént tartalmazó elemi cellán ehhez járulnak még a cella alap- és fedőlapjainak két-két élén elhelyezkedő oxigénatomok (II.35. ábra). Az ábrákon berajzolt négyzetek csúcsaiban ülő rézatomok szoros kötést létesítenek a négyzetek csúcsaiban elhelyezkedő oxigénatomokkal. Az elemi cellák egymásutánjából felépülő kristályban így módon sajátos réz-oxigén síkok épülnek fel.

Mivel a kísérleti vizsgálatok szerint az 1-2-3 anyag a rézatomok síkjával párhuzamosan vezet, feltételezhető, hogy a szupravezetés mechanizmusa ezekkel a réz-oxigén síkokkal kapcsolatos. Ez az anizotrópia megmutatkozik a kritikus mágneses tér értékében is. A kerámiaanyag szupravezetése akkor szűnik meg, ha a minta a réz-oxigén síkokra merőlegesen 40, illetve ha azokkal párhuzamos, 140 tesla mágneses térbe kerül. Biztosat azonban erről még nem tudunk mondani. A nagy lendülettel folyó kutatásokból egyelőre csak annyi derült ki, hogy a kerámiák szupravezetése – a fémekhez hasonlóan – Cooper-párok létrejöttének köszönhető. A párba csatolódásért felelős mechanizmus azonban ebben az esetben még ismeretlen, mind az elméleti, mind a kísérleti vizsgálatok arra utalnak, hogy a rácsrezgések szerepe kizárható.

A gyors fejlődésnek indult magashőmérsékleti szupravezetés terén a helyzet szinte napról napra változik, s mind az elmélet, mind a gyakorlati felhasználás területén bármikor születhetnek új, nagy jelentőségű eredmények.

Az 1-2-3 anyag mintájára az utóbbi két évben sok más hasonló szerkezetű kerámiát is előállítottak. Nem következik be lényeges változás sem az anyag szerkezetében, sem a kritikus hőmérsékletben, ha az ittriumot a három vegyértékű lantanoidák valamelyikével helyettesítik. Szupravezetést érzékeltek a Bi-Ca-Sr-Cu-O rendszerben is és 1988 márciusában egy amerikai kutatócsoport 125 K átmene-ti hőmérsékletű talliumtartalmú oxidkerámiát készített.

A szupravezető kerámiák gyakorlati felhasználásának legfőbb akadálya az, hogy a kritikus áramsűrűségük jelenleg igen kicsiny, de nehézséget okoz az is, hogy a kerámia megfelelő oxigéntartalmának beállítása technikailag igen nehéz.

Bár a gyakorlati felhasználástól még távol vagyunk, a szupravezetés létezését egyszerű, tanteremben is bemutatható kísérlettel is illusztrálhatjuk. Kicsiny szupravezető gyűrűt hűtsünk le, és kis magasságból ejtsünk rá egy parányi mágnes-t. Ilyen célra az igen erős kobalt-szamárium mágnesek alkalmasak. Meglepő dolgot



II.36. ábra

tapasztalunk: a mágnes a szupravezető gyűrű felett lebegve megáll. A jelenség magyarázata az, hogy az esés közben a gyűrűhöz közeledő mágnes a szupravezető gyűrűben örvényáramokat kelt. Ezek taszító hatása lebegteti a magasban a mágnes-t. Mivel az örvényáramok a szupravezetőben nem csillapodnak, a lebegés mindaddig fennmarad, amíg a szupravezető a kritikus hőmérséklet fölé nem melegszik (II.36. ábra).

8.3. A társított vagy kompozit anyagok

Az űrtechnika és a reaktorteknika fejlődése egyre nagyobb hő és mechanikai igénybevételt elbíró anyagok kifejlesztését teszi szükségessé. Az ilyen anyagokkal szemben további követelményt jelenthet, hogy korrózióállóak és viszonylag kicsiny sűrűségűek is legyenek. A különleges követelményekhez az anyagtechnológusok új anyagtypust fejlesztettek ki. Ezek az úgynevezett társított, vagy "kompozit" anyagok egymástól eltérő sajátosságú összetevőkből állnak. Tulajdonságaikban egyesítik az egyes összetevők előnyös tulajdonságait. Ilyen módon az egymű anyagokban soha nem tapasztalt új tulajdonságú anyagok jöttek létre.

A társítás alapelve lényegében azonos a szuperötvezetek leírásakor ismertetett ötlettel. A nikkel-alumínium szuperötvezetek szilárdságát – mint láttuk – a rendezett atomelrendezetséggű nikkel-alumínium fázis biztosítja. Ez a nagyon szilárd anyag azonban rideg, ezért mintegy védőburokban, a rendezetlen nikkel-alumínium fázisba ágyazva használható csak szerkezeti anyagként.

Nos ez az elv egymástól eltérő anyagok társításakor is használható. Sokféle olyan anyaggal rendelkezünk ugyanis, amely nagyon szilárd, ugyanakkor hő- és korrózióálló. Ilyenek például az üvegek és egyes kerámiák, vagy a speciális módon előállított szénszálak. Előnyös tulajdonságaikat azonban csak részben tudjuk kihasználni, mert igen nehezen alakíthatók és ridegek, törekenyek. Amennyiben azonban a szuperötvezetek szerkezetéhez hasonlóan a szilárd, de törekeny anyagot egy szívósabb hordozóba ágyazzuk, akkor kiváló szerkezeti anyaghoz juthatunk. Ennek az alapelvnek megfelelően fejlesztették ki a II. világháború után az első, ipari szempontból igen jelentős üvegszál-erősítésű műanyagokat. A poliészterbe vagy epoxigyantába ágyazott üvegszálakból készült kompozit szakítószilárdsága eléri az acélét, sűrűsége azonban csak ötödrésze annak. Az öntéssel készíthető, korrózióálló társított anyagból bonyolult formák, pl. hajótestek, medencék, bútorok is egyszerűen készíthetők. Érthető, hogy ez az anyag napjainkban rendkívül népszerű.

8.3.1. A szálerősítésű anyagok

A már említett üvegszál-erősítésű kompozitot a későbbiekben sok egyéb szálerősítésű anyag követte. A lágyabb hordozóba ágyazott nagyszilárdságú szálak hatását egy egyszerű modell alapján, számítással is érzékeltethetjük. Tegyük fel, hogy a kompozit anyagban az erősítő szálak az anyag teljes hossza mentén végignyúlnak (II.37. ábra). Fogadjuk el továbbá, hogy az erősítő szálak és a környező anyag mechanikai szempontból a II.38. ábrán látható feszültség-megnyúlás görbékkel jellemezhetők. Az 1. grafikon szerint az erősítő szálak viszelkedését úgy idealizálhatjuk, hogy a szál az alakváltozás során csak rugalmasan deformálódik, majd eltörik. A beágyazó anyagot a 2. grafikon szerint tökéletesen rugalmas - képlékeny viszelkedéssel modelleztük. Ez azt jelenti, hogy a rugalmas alakváltozási szakasz végén az anyag megfolyik, azaz a feszültség növelése nélkül folyamatosan maradóan deformálódik. Ha egy ilyen kompozit anyagú rudat nyújtunk, akkor a

kétféle komponens megnyúlása mindig azonos lesz. Így, ha a teljes keresztmet-
 szetben A_1 az erősítő, A_2 pedig a beágyazó anyag területe, akkor az ϵ relatív
 megnyúláshoz tartozó húzófeszültséget a

$$\sigma = \frac{F}{A_1 + A_2} = \frac{E_1 A_1 + E_2 A_2}{A_1 + A_2} \epsilon$$

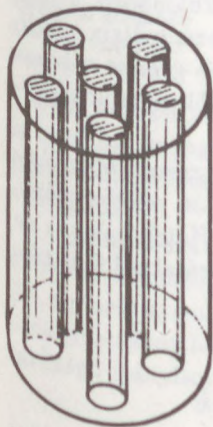
összefüggésből határozhatjuk meg, ahol F a nyújtáshoz szükséges erő. A képletet
 a $\sigma = E \epsilon$ Hooke-törvénnyel összehasonlítva a kompozit anyag E rugalmassági
 modulusa az

$$E = \frac{E_1 A_1 + E_2 A_2}{A_1 + A_2} = E_1 v_1 + E_2 v_2$$

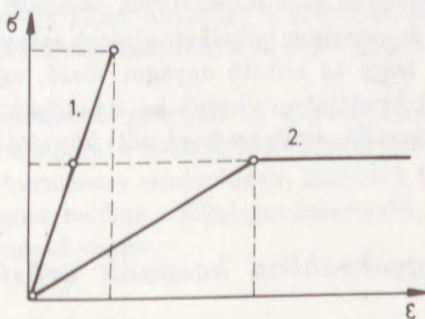
alakban fejezhető ki. Vegyük észre, hogy a

$$v_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \text{ és } v_2 = \frac{A_2}{A_1 + A_2}$$

tényezők a szálak és a mátrix relatív felületarányát fejezik ki a húzott keresztmet-
 szetben. A modellből következik azonban az is, hogy ezek a felületarányok mege-
 gyeznek a két összetevő térfogatarányával is. Az összefüggésnek ez utóbbi alakja
 azért fontos, mert felhasználásával az eredő rugalmassági modulus gyakran más
 térfogati elrendezés mellett is jól közelíthető.



II.37. ábra



II.38. ábra

Megjegyezzük, hogy hasonló becslés használható a kompozit szakítószilárdságá-
 nak meghatározására is.

A rugalmas tartományban egy anyag annál alaktartóbb, "szilárdabb", minél
 nagyobb a rugalmassági modulusa. A modell alapján számított képlet jól mutatja,
 hogy a kompozit rugalmassági modulusa mindig az összetevők rugalmassági mo-
 dulusai közé esik.

Látszik továbbá az is, hogy a társított anyagból álló rúdra háruló terhelés nagy részét az erősítő szálak hordozzák, hiszen a beágyazó anyag kicsiny rugalmassági modulusa miatt a szóba jöhető kis megnyúlások mellett csak kis erőhatás kifejtésére képes. Ennek alapján könnyen felismerhetjük a társíthatóság egy szükséges feltételét is. A húzott keresztmetszetben egyenletesen eloszló terhelést a szálak és a beágyazó anyag határán fellépő nyíróerők koncentrálik az erősítő anyagra. Ehhez az szükséges, hogy a társított összetevők jól tapadjanak egymáshoz. Rosszul tapadó anyagok esetén ugyanis a szálak elválának a mátrixtól, mintegy kihúzódnának belőle, s a kompozit elszakadna. A fentiek alapján érthető az is, hogy maguk az erősítő szálak is többnyire kötegeltek, azaz vékony, rendszerint összesodort szálakból állnak. A szálköteg azért előnyös, mert ekkor a rideg, törésre hajlamos erősítő anyagban az esetleges repedések sem válnak végzetessé.

Az ilyen repedések ugyanis az elemi szálak határán fennakadnak, s nem vezetnek a teljes szál töréséhez. A mikrotörések okozta hibák "gyógyításában" igen jelentős a beágyazó mátrix szerepe is. Ha pusztán egy erősítőszálakból álló köteget terhelnénk, akkor egy elemi szál törése azt jelentené, hogy a továbbiakban a teljes terhelés az épen maradt szálkötegre hárulna. A szívós mátrix jelenlétében nem ez történik. Amint ugyanis az eltörött szál végei elválnak egymástól, a mátrix és a szálak határán nyíróerők lépnek fel, hiszen a szál nem húzható ki a beágyazó anyagból. A nyíróerők hatására tehát a törött elemi szál továbbra is hordozza a teher egy részét. Így lehetséges, hogy még egy töredezett erősítőszálakból álló kompozit is szilárd maradjon.

Az egyszerű modellre alapozott gondolatmenetből következik, hogy a szálerősített anyag szilárdsága szálirányban és arra merőlegesen erősen különböző, hiszen a szálakra merőlegesen a terhelést szinte teljesen a lágy beágyazó mátrix viseli. Ebben az irányban az anyag ugyanis úgy viselkedik, mintha erős és gyenge rugókat kapcsolnánk sorba. Soros kapcsolásban az egyes rugókra ható erők egyenlők egymással, tehát a gyenge és az erős összetevők terhelése azonos.

A szálerősítésű kompozitok terhelhetőségének irányfüggése legegyszerűbben úgy szüntethető meg, hogy az erősítő anyagot rövid, egyenletesen és véletlenszerűen elosztott szálak formájában visszük be a hordozó mátrixba. Hatékonyabb, de sokkal drágább eljárás az, amikor a hordozott anyagot az erősítő szálakból font térhálós köré öntik.

8.3.2. A leggyakrabban használt erősítő szálak

A szálerősítés lényegének bemutatása után szóljunk röviden a felhasznált erősítő szálakról is.

Leggyakrabban a történetileg is először használt üvegszálakat alkalmazzák. Az üvegszál-erősítésű anyagok szakítószilárdsága az acéléhoz mérhető, rugalmassági modulusa azonban az acél rugalmassági modulusának csak az egyhatodát éri el.

Az 1960-as évektől kezdve éppen az üvegszálak gyengébb rugalmas modulusa miatt új, hatékonyabban erősítő szálak után kezdtek kutatni.

1964-ben W. Johnson, N. Philipe és W. Watt a Royal Aircraft Establishment (angol királyi légierő) kutatói nagy szilárdságú szénszál gyártási eljárását szabadalmaztatták. A szénszálakkal közel egyidőben az USA-ban kiváló szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező bórszálak gyártási eljárását dolgozták ki. Végül 1965-ben Stephanie Kwolek vegyész, a Du Pont cég alkalmazottja feltalálta az aramidnek, vagy kevlarnak nevezett szerves anyagú szálakat. Ez a szál lényegében az egyetlen olyan szerves szál, amelynek mechanikai tulajdonságai a fémekével vetekednek.

A modern kompozitgyártásban többnyire ezeket a szálakat használják. Megjelentek azonban olyan kerámiaszálak is, amelyek hőállóságuk és olcsó alapanyaguk (szilícium-karbid, szilícium-oxid) miatt a jövőben bizonyára egyre nagyobb szerepet kapnak. Az alábbi táblázatban az összehasonlítás kedvéért megadjuk a gyakrabban használt szálakat, illetve a belőlük készült modern kompozitok és az acél mechanikai jellemzőit.

	Sűrűség (ρ) g/cm ³	Szakító szil. (σ_0) $\times 10^3 \text{N/mm}^2$	Rugalmassági modulus (E)
Üvegszál	2,52	1,5–4,0	70
Szénszál	1,8	1,8–4,5	180–600
Aramid	1,45	2,7	130
Bórszál	22,5–2,9	3,1–3,8	380–420
Acél	7,8	0,8–1,6	210
Ötvözött alumínium	2,7	0,5–0,8	70
Üvegszál kompozit	1,4–2,0	0,2–1,5	15–35
Modern kompozit	1,4–1,6	0,8–1,8	120–230

Igen érdekes az erősítő anyagok gyártása is. A bórszálak tulajdonképpen maguk is társított anyagok. Az alap egy $12 \mu\text{m}$ átmérőjű volfrámszál, amelyre 1000°C -os bõrgõzbõl kondenzálják a bõrkristályokat, míg a szál $90\text{--}12 \mu\text{m}$ átmérõjûvé nem vastagszik.

A szénszálakat szerves mûszálakból gyártják. A kiinduló mûszálakat nyújtják és eközben hõkezelik. A nyújtás során a mûszál hosszú zezugos szénláncai (lásd IV. fejezet) kinyúlnak és párhuzamossá rendezõdnek, közben a hõ hatására, a fa-szengyártáshoz hasonlóan kiégnek belõlük a felesleges összetevõk, s csak a nagyszilárdságú irányított szénszál marad vissza.

8.3.3. A beágyazó anyagok és a kompozit gyártás

A kompozit gyártási technológiáját döntõen a beágyazó anyag szabja meg. A beágyazó anyag kiválasztása pedig aszerint történik, hogy a kompozitot milyen hõmérsékleti körülmények között kívánjuk felhasználni. Száz-kétszáz fok hõmérséklet esetén a beágyazó anyag többnyire poliészter, s a gyártás technológiája ennek megfelelõen a frõccsöntés. A grafit- és kevlarszálak hõállósága már ma-

gasabb hőmérséklet-tartományban használható kompozitok gyártását is lehetővé teszi. Hordozóként azonban ekkor hőre szilárduló polimerek (lásd IV. fejezet) használhatók, pl. az epoxigyanták. A különlegesen nagy hőigénybevételnek kitett anyagok esetén az erősítő szálakat fém hordozóba kell beágyazni. Ez a technológia azonban sokkal érzékenyebb, mint a műanyag hordozó felhasználása. A fémoldással való körülöntés esetén ugyanis gondosan ügyelni kell arra is, hogy a fém mátrix és az erősítő szálak határfelületén ne játszódjanak le káros kémiai reakciók.

A kompozit anyagok száma rohamosan nő, a társítás lehetőségei szinte végtelenek, s jelenleg még csak a kezdeti lépéseknél tartunk. A kutató laboratóriumokból kikerülő új anyagok, mint pl. a kevlerszál összetétele és gyártási eljárása, az élvonalbeli cégek féltve őrzött titka, szabadalma.

8.4. A beton

A XX. század legjellegzetesebb és talán legnépszerűbb építőanyaga a beton. E könyv olvasói közül – a szerzőkhöz hasonlóan – bizonyára sokan készítettek betonból járdát, házalapot, vagy vasbeton kerítésaljzatot. Betonkeveréskor többnyire jól bevált recepteket használunk, s nem gondolunk a víz, cement, homok és kavics keverékében végbemenő bonyolult folyamatokra. A kerámia és társított anyagok tárgyalása után érdemes kissé részletesebben foglalkozni a betonnal (és alapanyagával, a cementtel), mert ez az anyag bizonyos mértékben mindkét előbb említett csoporttal kapcsolatba hozható.

8.4.1. A beton alapanyaga, a cement

A tégláégetéshez hasonlóan tulajdonképpen ez az anyag is ősidők óta ismert, bár nem egészen a mai formájában. Már az etruszok készítettek betont oltott mész, homok és kavics keverékéből. A rómaiak vulkáni hamu és mészkő keverékéből égettek cementet.

A cement diadalútja mégis csak 1824-ben kezdődött, amikor Joseph Aspidin szabadalmaztatta a "Portland" cementet. Az elnevezés onnan származik, hogy a dél angliai Portlandban sok kőépület színe emlékeztet a cement színére.

Aspidin eredeti receptje szerint égetett meszet és agyagot kell vízben péppé keverni. Ezután ezt a cementiszapot annyira fel kell melegíteni, hogy a víz elpárologjon és a keverék részben meg is olvadjon. A hűtés után visszamaradó anyagot porrá őrölve kapjuk a portlandcementet vagy portlandklinkert.

Ma a klinkerégetés alapanyagát a mészkő, agyag, homok és általában némi vas-oxid (piritporok) képezi. Ehhez az égetés és őrlés után még kevés gipszet is adalékolnak. A kész cementpor végül igen bonyolult sok összetevőjű anyag. Legfontosabb részeit speciális elnevezésekkel jelölik. Ezek az *alít* (trikalcium-szilikát), a *belít* (dikalcium-szilikát), a *trikalcium-aluminát*, a *köztes anyagnak* nevezett alumínium-ferrit fázis és a gipsz.

Az égetési eljárás, továbbá az alit és a belit SiO_2 tartalma jellegzetesen emlékeztet a kerámiák gyártástechnológiájára és alapanyagára. Egyes kerámiaszakértők ezért a cementet is kerámiának tekintik. Ez azonban számunkra nem jelent mást, mint azt, hogy az anyagok csoportba sorolása mindig bizonyos fokig önkényes és rendszerint nem tehető meg olyan egyértelműen, hogy minden lehetséges nézőpontnak egyformán megfeleljünk.

8.4.2. *Hogyan lesz a klinkerből cementkő?*

A kérdésre első közelítésben egyszerű a válasz: vizet kell hozzáadni, s az anyag megszilárdul. (Ez gyakran szándékunk ellenére is bekövetkezik, a helytelenül tárolt cement a levegő páratartalmát magába szívja, s megkeményedik "döglötté" válik.) A bonyolult összetétel azonban sejteti, hogy a klinkerpor cementkővé szilárdulása mögött bonyolult kémiai folyamatok rejlenek.

E változásokat a szakemberek hidratációnak nevezik. A hidratáció során a cementpor összetevői reakcióba lépnek a vízzel és egybefüggő szilárd anyaggá alakulnak. A megszilárdulási folyamatnak három jellegzetes szakasza van. A víz és a cementpor összekeverését követő első 10-15 perc az úgynevezett nedvesedés szakasza. Ennek során a klinker alkotórészei kölcsönhatásba lépnek a vízzel – ezt erős melegedés jelzi –, de a szilárdulás még 4-8 óra hosszat nem indul meg. Ez a lassú, hőfejlődéssel járó várakozási idő az új kristályos fázisok kristálycsíráinak kialakulásához kell. A viszonylag hosszú időtartam alatt a kikevert anyag kényelmesen feldolgozható. A több órás csíráképződési szakasz után a kristálymagok növekedésnek indulnak, és ezzel megkezdődik a cement "kötése". A különböző klinkerösszetevő anyagokból kialakuló kristályok képződési sebessége eltérő. Először az alit szilárdul meg (1-2 nap). Ezután a beton már alaktartó, a zsáuzás eltávolítható. A teljes szilárdság kialakulása azonban még messze van. A cementpor másik fő komponense, a belit lassabban kristályosodik. Egy hónap is eltelik, míg az alitból képződő kalcium-szilikát-hidrát kristályok alkotta vázszerkezet hézagait kitöltik a belitből keletkező kristályok. A cementkő ekkor eléri végső szilárdságát. A klinkerpor további alkotói, az úgynevezett köztes anyag és a gipsz szintén reakcióba lép a vízzel. A belőlük képződő vegyületek azonban nem elsősorban a beton szilárdságát, hanem korrózióállóságát befolyásolják.

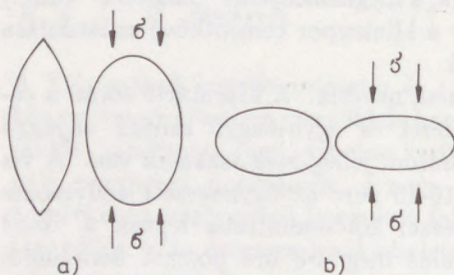
A cementkő szilárd kristályváza mindig tartalmaz különböző nagyságú üregeket. A nagyobb pórusok kialakulása a cementkő szilárdságát nagymértékben csökkentheti. A tapasztalat szerint e pórusok mennyisége nemcsak az anyag elengedhetetlenül szükséges mechanikai tömörítésétől, hanem a cementmassza víztartalmától is függ. A legjobb szilárdságú beton 4-5 rész víz, 10 rész cement keverékből jön létre. Mivel ez a meglehetősen sűrű, földszerű anyag viszonylag nehezen simítható, nagy a csábítás, hogy a vízmennyiség növelésével folyósabbá tegyük a masszát. Ilyenkor azonban gondoljunk arra, hogy a 7 : 10 arányú keverékből készült beton szilárdsága az optimális szilárdságnak csak az ötödrésze. A káros hatást az okozza, hogy a többlet vizet tartalmazó anyag pórusosan szilárdul.

8.4.3. A habarcs és a beton

A gyakorlatban sohasem használunk tisztán csak cementet, hanem azt homokkal, vagy sóderrel keverjük. Az előbbi az úgynevezett cementhabarcs, az utóbbi a beton.

A kavicssal kevert cementből készült beton kedvező tulajdonságait lényegében a kompozit anyagoknál tárgyalt szilárdító mechanizmussal magyarázhatjuk. A cement közé kevert kavics szerepe kettős: egyrészt nagy szilárdságával javítja a végtermék mechanikai tulajdonságát, másrészt olcsóságával jelentősen csökkenti az anyag árát.

A beton rendkívüli szilárdságát annak köszönheti, hogy a cementből keletkező szilárd fázis és a kődarabok között igen erős kötések jönnek létre. Bár a betonkompozitban nincsenek kitüntetett irányok, mint a szálerősítésű anyagokban, a tapasztalat szerint a beton mégis sokkal jobban bírja a nyomó terhelést, mint a húzó igénybevételt.



II.39. ábra

A jelenség magyarázatát a betonban mindig jelenlévő pórusok és a makroszkopikus repedések kialakulásában és terjedésében kell keresni. A törés szempontjából a repedés csúcs környezetében fellépő nyíróerők a kritikusak. Ha ez a nyírófeszültség egy kritikus értéket meghalad, a repedés gyorsan növekszik. A II.39. ábrán két eltérő helyzetű, szilvamag alakú üreget és ezeknek nyomóterhelés hatására bekövetkező változását mutatjuk be. Az a) üreg hossz tengelye a nyomófeszültség irányába esik. A terhelés hatására ez az üreg "meghíz", a repedés csúcs görbületi sugara nő, és ezzel a repedés feszültségszorzó hatása csökken. A b) repedést a terhelés ellapítja, de közben a csúcsokon nem ébred számottevő nyírófeszültség.

A nyújtási terhelhetőség javítására a betonba mintegy szálerősítőként vasszalakat szokás beépíteni. Ennek igen lényeges feltétele, hogy a cement jól köt a vashoz, továbbá, hogy a vas és a beton hőtágulása közel azonos. A "szálerősítésű" vasbeton a húzó igénybevétellel szemben is nagy ellenállást tanúsít.

Ez a tulajdonság tovább javul az úgynevezett feszített betonokban. Ezekben az anyagokban a betonmasszát erős húzófeszültségeknek kitett, rugalmasan nyújtott vashuzal váz köré öntik. A megszilárdulás után a vashuzalok terhelését megszüntetik. Az összehúzódnak húzalok a betont összenyomják, s így még a húzófeszültségnek kitett vasbeton is tulajdonképpen összenyomott állapotban, azaz a beton nagyobb teherbírású tartományában kerül felhasználásra.

III. MITŐL MÁGNES A MÁGNES

A mágnesség egyike azon jelenségeknek, amelyek át- meg átszövik mindennapi életünket, s amit az emberiség már ősidők óta ismer. Az első mágnesvasércet a legenda szerint Magnézia városa mellett találta egy pásztor az időszámítás előtti V. század körül. Az ókorba nyúlik vissza a mágnes első felhasználása is, a kínai és a föníciai hajósok iránytűvel tájékozódtak a tengeren. Tudunk azonban a mágnes mai hétköznapijainkhoz fogható felhasználásáról is. Egy kínai legenda szerint az időszámítás előtti harmadik században Hsziang városa mellett egy uralkodó sírját olyan ajtó zárta, amely a vasszerszámokat magához vonzotta. Hasonló módon mágneses kőből készültek egy, a sírhoz közeli palota kapui is, emiatt a vASFegyverzettel ellátott harcosokat a kapu magához rántotta és fogva tartotta. Pekingi tudósok a legendát azzal magyarázzák, hogy a Hsziang város mellett folyó Veipatak homokjában sok a magnetit és az egyéb vastartalmú érc. Ebből a homokból készülhettek a korszerű vas-oxid alapú mesterséges mágneseknél semmivel sem gyengébb ókori mágneszárak.

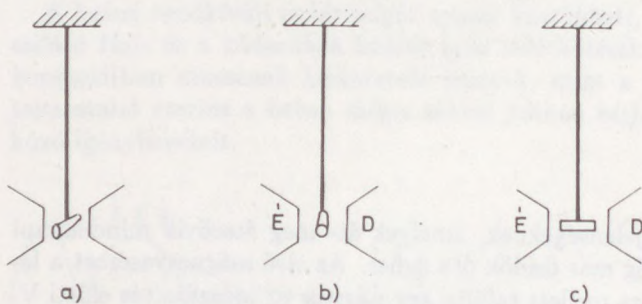
Az ősidők óta ismert mágnesség titkának megfejtése régóta foglalkoztatja az emberiséget, a mágnesség helyes magyarázatához azonban csak a modern atomelmélet, a kvantumfizika kialakulása óta jutottunk közelebb.

1. Minden anyag mágnes!

Mielőtt azonban a mágnesség anyagszerkezeti magyarázatával foglalkoznánk, ismerkedjünk meg néhány egyszerű tapasztalati ténnyel. Természetes tapasztalatunk, hogy ha mágnesruddal vastárgyakhoz közeledünk, akkor a mágnes más fémeket, az alumíniumot, aranyat, ezüstöt stb. nem vonzza. Erősebb mágneses teret alkalmazva és a kísérleti körülményeket pontosabban körülhatárolva megállapíthatjuk azonban, hogy a mágneses tér a közismerten nem mágneses anyagokkal is kölcsönhatásba lép.

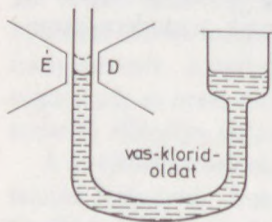
A III.1. ábrán látható módon lógassunk elektromágnes kúposan kiképzett pófái közé torziós szálon különböző anyagból készült rudacskákat. A mágneses tér

bekapcsolása előtt a rudacskák foglaljanak el ferde helyzetet a mágnespofák tengelyéhez képest. Az erős mágneses tér bekapcsolása után meglepő tapasztalatban lesz részünk! Az alumínium-, platina- és volfrámrudacskák a vashoz hasonlóan a mágnespofák irányába fordulnak. Ezeket az anyagokat a mágnes tehát a szó szoros értelmében vonzza. Sokkal meglepőbb azonban, hogy az ezüst-, arany-, réz-, gyémánt- stb. rudacskák erre az irányra merőlegesen állnak be. Ezeket az anyagokat a mágneses tér taszítja!

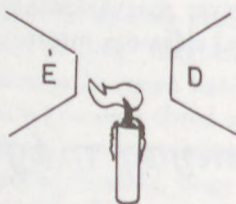


III.1. ábra

Mágneses térben nemcsak a szilárd anyagokra, hanem a folyadékokra és gázokra is hat erő. Helyezzük most a mágneses térbe egy U alakú cső egyik szárát és töltjük meg a csövet először vas-klorid-oldattal, majd vízzel (III.2. ábra). A közlekedőedények törvénye szerint a cső két szárában azonos magasságban áll a folyadék. A mágneses tér bekapcsolása után a vas-klorid szintje az U alakú cső mágnespofák között elhelyezett szárában kissé megemelkedik. A kísérletet vízzel végezve azt tapasztaljuk, hogy a víz szintje lesüllyed. Tegyük most a mágnespofák közé égő gyertyát; a láng kihajlik a mágneses térből (III.3. ábra).



III.2. ábra



III.3. ábra

Hétköznapi szóhasználatból élve tehát a mágnes a vas-kloridot vonzza, a vizet és a lángot alkotó gázokat taszítja. Valójában arról van szó, hogy a kúpos mágnespofák között inhomogén mágneses tér alakul ki, amely a mágnes tengelyében a legerősebb, s attól kifelé haladva fokozatosan gyengül. Az inhomogén mágneses térben az anyagok egy részére a nagyobb télerősségű helyek felé mutató erő hat. Ezeket a köznapiban értelemben nem mágneses anyagokat, a tengellyel párhuzamos beállásra utalva paramágneses anyagoknak nevezzük.

A paramágneses anyagok és a vashoz hasonlóan viselkedő ún. ferromágnesek a kísérlet szerint lényegében ugyanúgy viselkednek. Megkülönböztetésük azonban mégis indokolt, hiszen a ferromágnesek esetén a mágneses tér és az anyag kölcsönhatása sokkal intenzívebb (kb. ezerszerese a paramágneses anyagoknál tapasztaltnak). A ferromágneses anyagok közé tartozik a vas mellett pl. a nikkell és a kobalt is. Az anyagok másik csoportját, amelyre a gyengébb tér irányába mutató erő hat, diamágneses anyagoknak nevezzük. (A görög "dia" szó ellenkezőt jelent.)

Az elnevezések még Faradaytól származnak, aki a fentiekhez hasonló kísérletso-rozatot végzett az anyagok mágneses szempontból történő osztályozására. Egy anyag mágnesességének erősségét az M mágnesezettséggel szokás jellemezni. A mágnesezettség a dia- és paramágneses anyagok esetén az $M = \chi H$ összefüggés szerint függ a külső mágneses tértől, ahol a χ mágneses szuszceptibilitás az anyagi minőségtől és a hőmérséklettől függő állandó.

1.1. *Honnan származik az anyagok mágneses tulajdonsága?*

Abból, hogy a mágneses tér a gázokra is hat, arra következtethetünk, hogy már maguk az atomok is rendelkeznek mágneses tulajdonságokkal. A mágneses tulajdonságok gyökereit tehát az atomi mágnesek tulajdonságaiban kell keresnünk.

Az atomok mágnesessége lényegében kétféle eredetű. Egyrészt a mag körül mozgó elektronok, egy vezetőben folyó áramhoz hasonlóan mágneses teret keltenek maguk körül, másrészt igazolódott, hogy minden elektron maga is kicsiny mágnesként viselkedik.

Igen érdekes azonban, hogy az elektromossággal ellentétben a mágnesség "töltései", a mágneses pólusok még atomi szinten sem választhatók el egymástól. Mágneses szempontból még az elektront is mindig kicsiny mágnesrúdként kell elképzelnünk, amelynek van északi és déli pólusa is.

Ennél a kérdésnél azonban egy pillanatra megállunk! A fizikusok hosszú ideig hitték, hogy az elektromos töltéshez hasonló mágneses egypólusok (monopólusok) elvileg sem létezhetnek. Kételkedők azonban mindig akadtak. Az osztrák F. Ehrenhaft már 1920-ban bejelentette, hogy miközben elektromos térben mozgó töltéseket vizsgált, mágneses monopólust figyelt meg. Ehrenhaftnak azonban senki sem hitt. A mágneses monopólusok utáni igazán szenvedélyes hajsza 1931 után indult meg, amikor Dirac, angol fizikus kimutatta, hogy a mágneses töltésű részecskék létezése nem mond ellent az alapvető fizikai törvényeknek. Egy ígéretes kísérleti próbálkozás a Stanford egyetemen dolgozó Blas Cabrera nevéhez fűződik. Cabrera kísérleti berendezése egy szupravezető, azaz elektromos ellenállással gyakorlatilag nem rendelkező hurok volt. A mozgó monopólus maga körül mágneses és elektromos teret kelt. Így, ha a szupravezető hurkon monopólus haladna át, akkor hirtelen áram indulna meg abban. Ilyen hirtelen áramlökést figyelt meg Cabrera. A számítások szerint azonban az észlelt áramerősség túlságosan nagy volt ahhoz, hogy mágneses monopólus hatására jöhessen létre. A kutatások jelenleg is folynak,

s a bizakodó kutatók a kísérleti nehézségekben látják annak okát, hogy az egypólust még nem sikerült csapdába csalni. Az elméleti becslések szerint ugyanis a monopólus igen nehéz részecske, amelynek tömege a proton tömegének mintegy 10^{19} -szerese. Ilyen nagy tömeg esetén a Föld gravitációs vonzása a világűrből érkező mágneses monopólusokat a Föld belsejében összegyűjtve bebörtönözné. A fizikusok fantáziáját dicséri, hogy a Föld mágneses terének változásait, az északi és déli pólus vándorlását megkísérelték a Föld belsejében felgyűlt egypólusok mozgásával magyarázni.

Térjünk vissza most az atomok realisabb világához! Az atomi mágnesek tulajdonságait Ampere már 1820-ban megkísérelte azzal értelmezni, hogy az anyagban elemi köráramok folynak. A köráramok mágneses tere hasonló a mágnesrúd teréhez. Ha egy kicsiny vezetőgyűrű, amelyben áram folyik, mágneses térben szabadon elfordulhat, akkor síkja a tér irányára merőlegesen áll be.

Az anyag makroszkopikusan észlelhető mágneses tulajdonságai az Ampere-féle elképzelés szerint attól függenek, hogy az anyag elemi mágnesei, a köráramok mennyire rendeződnek a mágneses tér irányába. Ha az elemi mágnesek befordulnak a külső tér irányába, akkor a mágnes vonzza a kérdéses anyagot. Az atomfizika XX. századi fejlődése nyomán úgy tűnt, hogy az Ampere által felvetett elképzelés valóban helyes, hiszen a Bohr-féle atommodell keringő elektronja közvetlenül azonosítható az elemi köráramokkal.

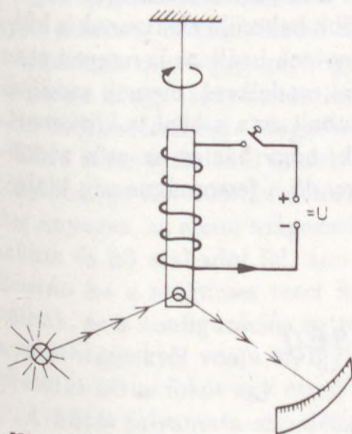
2. *Az Einstein-de Haas- és a Barnett-kísérlet*

A modell ellenőrzésére Einstein ötlete nyomán Einstein és de Haas 1915-ben a következő kísérletet végezték el. Vékony szálon ferromágneses anyagból készült hengert függesztettek egy tekercsbe (III.4. ábra), majd a tekercsbe erős áramot vezettek. Az így létrejövő mágneses tér a rúd elemi mágnesait a tekercs tengelyével párhuzamosan állította be. Ezután az áram irányát hirtelen ellenkezőre változtatták, s ezzel a mágneses tér irányát, így az elemi mágnesek beállítását is megfordították.

Elképzelésük beigazolódott, a vékony szálon lógó rudacska elfordult. A jelenség oka, hogy a külső mágneses tér megváltoztatására az atomi köráramok iránya és ezzel a mozgó elektronok forgásmennyisége (impulzusmomentuma) is ellenkezőjére fordult. A fizika egyik alapvető törvényének, a forgásmennyiség-megmaradásnak értelmében az elektronok hirtelen fellépő forgásmennyiség-változását az egész rúd elfordulása kompenzálja ki. Az Einstein-de Haas-kísérlet minőségileg valóban a várt effektust mutatta. A pontos mérések szerint azonban a rúd forgása nagyobb forgásmennyiséget hordozott a vártnál. A kísérleti eredményt csak egy, az elektronok pályamozgásától független, magához az elektronhoz rendelt forgásmennyiséggel, illetve az ehhez járuló mágnesességgel lehetett magyarázni.

Az Einstein-de Haas-kísérlet bizonyossága szerint minden elektron egy kicsiny mágnesezett pörgettyűként viselkedik. Az elektron saját forgásmennyiségét a fizi-

kában spinnek nevezik. Az Einstein-de Haas-kísérlet eredményét megerősítette Barnett ugyancsak 1915-ben elvégzett kísérlete, amelynek során egy vasrudat gyors forgatással sikerült felmágnesezni.



III.4. ábra

Ezek a kísérletek megmutatták, hogy a mágnesség pusztán az Ampere-féle áramok segítségével nem értelmezhető.

3. Az atomi mágnesség és a periódusos rendszer

Az atomi mágnesek viselkedésének megértéséhez idézzük fel röviden, hogy hogyan helyezkednek el az elektronok az atommag körül. Kémiai tanulmányainkból tudjuk, hogy az elektronok az atommag körül héjakon vagy pályákon rendeződnek. Az első héjon kettő, a másodikon nyolc, a harmadikon tizennyolc, a negyediken harminckét elektron foglalhat helyet. Az egyes pályákon belül az elektronok alhéjakat alkotnak. Az egyes pályán alhéjak nincsenek, a kettes két, a hármas pedig három alhéjra bomlik. A rendszám növekedésével az elektronok egyre magasabb és magasabb sorszámú héjakra és ezzel együtt egyre nagyobb energiájú állapotokba kényszerülnek. Az egyes pályákon igen érdekes a spineknek és ennek megfelelően az elektronok elemi mágneseseinek viselkedése. A tapasztalat szerint a spinek csak kétféle módon, a szokásos szóhasználat szerint felfelé vagy lefelé állhatnak be. A telített alhéjakon a különböző spinű elektronok száma mindig kiegyenlített, ezért a telített alhéjak elektronjai mágneses szempontból semlegesek. Az alhéjak telítődése során azonban amíg lehetséges, a spinek mindig egymással párhuzamosan állnak be. Így mágneses szempontból többnyire a félig telt alhéjakkal rendelkező elemek a legaktívabbak.

A mágnesség szempontjából további fontos sajátossága a periódusos rendszernek, hogy a harmadik elektronhéjtól kezdve az első két alhéj feltöltődése után nem az

adott héj harmadik alhéja kezd feltöltődni, hanem a negyedik héj első alhéjára ülnek be az elektronok. A harmadik héj harmadik alhéja csak a későbbiek során telik meg elektronokkal. Hasonló módon zajlik a negyedik és ötödik elektronhéj feltöltődése is. Ezekben az esetekben is érvényesül a maximális számú párhuzamos spinre való törekvés. Az alacsonyabb sorszámú elektronhéjra később bekerülő elektronok a külső hatásokkal szemben igen ellenállóak, így az elektronspinek beállása is nagyon stabilis. Az ilyen, a harmadik alhéjon néhány elektronnal rendelkező, elemek atomjai a legstabilabb atomi mágnesek! Ilyen elem a vas, a kobalt és a nikkell, a közismert ferromágneses anyagok. A későbbiekben látni fogjuk, hogy bár ez az erős atomi mágnesség hozzájárul, önmagában azonban nem elegendő a ferromágnesség kialakulásához.

4. *A para- és diamágnesség magyarázata*

A tapasztalat szerint azok az anyagok diamágnesek, amelyeknek atomjaiban a felfelé és lefelé álló spinű elektronok száma megegyezik. Az ilyen atomok mágnessége csupán a keringő elektronok "köráramából" származik. Ilyen atomokból áll pl. a héliumgáz. Úgy képzelhetjük, hogy a héliumban a két neutronból és két protonból álló mag körül két elektron kering ellentétes irányban és ellentétes spinállással. Ennek megfelelően közönséges körülmények között a héliumatom mágnessesen semleges. Mágneses térbe kerülve azonban az egyik elektron keringése meggyorsul, a másiké pedig lelassul. Így az egyik atomi köráram megerősödik, a másik pedig gyengül. Ez azt eredményezi, hogy a mágneses térbe került héliumatom maga is kicsiny mágnessé válik. Ez a mágnes azonban pontosan olyan, hogy az őt létrehozó külső mágneses tér taszítja! A hélium diamágneses tulajdonságú.

A hélium esetén leírt hatáshoz hasonló effektus minden atomban bekövetkezik. Végeredményben tehát a diamágnesség minden atom sajátossága. A para- és ferromágneses anyagokban azonban a gyenge diamágnességet egyéb, erősebb effektusok elnyomják.

A paramágneses anyagok atomjai a tapasztalat szerint mágneses tér hiányában is kicsiny állandó mágnesek. Ezek az atomi mágnesek azonban teljes összevisszaságban állnak, s a hőmozgás eredményeként véletlenszerűen változtatják irányukat. Mágneses tér hatására azonban az atomi mágnesek rendeződnek és a térerősséggel párhuzamos irányban állnak be. Ezt a rendet a molekulák hőmozgása folyamatosan bomlasztja, így adott pillanatban a mágneses tér erősségétől és a hőmérséklettől függően az elemi mágneseknek mindig csak egy bizonyos hányada áll be a tér irányába. A mágneses tér rendező és a hőmozgás rendet szétziláló hatását matematikailag végigkövetve a kísérleti tapasztalatokkal jól egyező eredmény, az ún. Curie-törvény adódik.

E szerint a mágneses szuszceptibilitás, ami az elemi mágnesek erősségét és a mágneses rendeződés mértékét jellemzi, a paramágneses anyagokra a hőmérséklet

reciprokával arányos. Itt említjük meg, hogy a paramágnesség mintegy ezerszer erősebb hatás, mint a diamágnesség, így a paramágneses anyagokban is meglévő diamágneses hatás elhanyagolható.

Igen érdekes felhasználása a paramágneses anyagoknak, hogy segítségükkel nagyon alacsony hőmérsékletek állíthatók elő. Alacsony hőmérsékleten ugyanis a hőmozgás már olyan gyenge, hogy az atomi mágnesek már nem túl nagy mágneses tér hatására is egy irányba rendeződnek, s ezt a szinte teljes rendet a hőmozgás már nem tudja szétzilálni. Mágneses tér hiányában természetesen az elemi mágnesek továbbra is rendezetlenül állnak. Ez a rendezetlenség a paramágneses anyagok entrópiájához egy ún. konfigurációs entrópia járulékot ad. Mágneses teret kapcsolva a hidedeg anyagra, az elemi mágnesek mind egy irányba állnak be, a rendezetlenség megszűnik és hő szabadul fel, ami pl. folyékony héliummal való hűtéssel elvezethető. Ezután ha a mágneses teret kikapcsoljuk az elemi mágnesek ismét rendezetlenné válnak, és a konfigurációs entrópia ismét megnő. Az ehhez szükséges hőt az anyag a rácsrezgésektől vonja el, így a paramágneses anyag lehül. Ezzel a módszerrel az abszolút zérus fokot egy ezred foknyira sikerült megközelíteni.

A hűtés folyamata szemléletesen úgy képzelhető el, hogy a mágneses anyag az energiáját a különféle mozgási lehetőségei – szabadsági fokai – között egyenletesen osztja el. Ha az elemi mágnesek mozgási lehetőségét megszüntetjük, akkor a teljes energia a rácsrezgésekre koncentrálódik, ahonnan hűtéssel elvezethető. A lehűtött anyag elemi mágneseit ismét felszabadítva azok újra részt kérnek az energiából, ezért a rácsrezgésekre jutó energia hányada csökken, az anyag lehül.

4.1. A diamágneses szuszceptibilitás becslése

A következőkben a hélium példáján mennyiségileg is végigkövetjük a diamágnesség kialakulását. Az elemi becsléshez a Bohr-modellt használjuk.

A He-atom magját két proton és két neutron alkotja, a mag töltése tehát $2e$. Tegyük fel, hogy az elektronok r_0 sugarú pályán v sebességgel keringenek. Ekkor egy elektron $I = e \frac{v}{2\pi r_0}$ erősségű köráramnak felel meg, amelynek mágneses momentuma

$$m_0 = -e \frac{v}{2\pi r_0} r_0^2 \pi = -\frac{evr_0}{2},$$

illetve az elektron

$$N_0 = mvr_0$$

impulzusmomentumával kifejezve

$$m_0 = -\frac{e}{2m} N_0.$$

Az m_0 pálya-mágneses momentum vektormennyiség, amely merőleges a pálya síkjára, és iránya a köráram mágneses momentumára vonatkozó jobbkez-szabállyal ha-

tározható meg. Mivel a He-atom eredő mágneses momentuma külső mágneses tér híján zérus, azonnal adódik, hogy a két elektronnak ellentétes irányban kell keringenie a mag körül.

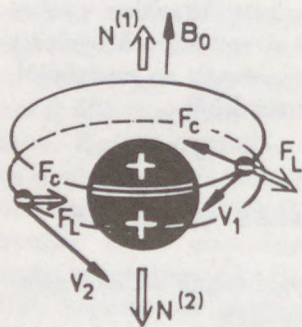
Kerüljön most a He-atom $B = \mu_0 H$ külső mágneses térbe, amelynek iránya az egyszerűség kedvéért legyen merőleges a keringő elektronok pályasíkjára. Ekkor az elektronok közötti taszítást elhanyagolva az elektronok mozgását a magtól kifejtett vonzerő mellett a Lorentz-erő is befolyásolja. Így az elektronok mozgásegyenlete:

$$\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} - ev_1 B = \frac{mv_1^2}{r_0^2}$$

és

$$\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} + ev_2 B = \frac{mv_2^2}{r_0^2}$$

alakban írható fel. A mozgásegyenletek felírásakor figyelembe vettük, hogy a Lorentz-erő az egyik elektron esetén a pálya középpontja felé, a másik elektronnál pedig az ellentétes sebesség miatt sugár irányban kifelé mutat (III.5. ábra).



III.5. ábra

A mozgásegyenletből következik, hogy az egyik elektron sebessége csökken ($v_1 < v$), a másiké pedig nő ($v_2 > v$). Ennek megfelelően változik a mágneses momentum értéke is, és az atom a külső mágneses tér hatására

$$m_e = m_2 - m_1 = -\frac{er_0}{2}(v_2 - v_1)$$

eredő mágneses momentumhoz (ún. indukált dipólusmomentumhoz) jut. A sebességek különbségét egyszerűen meghatározhatjuk, ha a második mozgásegyenletből kivonjuk az elsőt:

$$eB(v_1 + v_2) = \frac{m}{r_0}(v_2^2 - v_1^2),$$

amiből

$$v_2 - v_1 = \frac{eBr_0}{m} = \frac{er_0}{m}\mu_0 H.$$

Behelyettesítve ezt az eredő mágneses momentumot adó kifejezésbe azt kapjuk, hogy

$$m_e = -\frac{e^2 r_0^2}{2m} \mu_0 H,$$

ahol a vektoriális írásmód használatával azt juttattuk kifejezésre, hogy az indukált mágneses momentum és a külső tér iránya ellentétes.

Az atomi mágneses momentum ismeretében egyszerűen meghatározhatjuk a mágnesezettséget, hiszen M a térfogategységre jutó mágneses dipólusmomentum. Ha térfogategységként n héliumatom található a térben, akkor

$$M = -\frac{e^2 r_0^2 n \mu_0}{2m} H,$$

így a szuszceptibilitás

$$\chi = -\frac{e^2 r_0^2 n \mu_0}{2m}$$

a kísérleti tapasztalatnak megfelelően valóban független a mágneses tértől és a hőmérséklettől is.

A fenti modellből az $r_0 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m pályasugár és a normál körülmények esetén adódó $n = 2,69 \cdot 10^{25} m^{-3}$ érték felhasználásával a He szuszceptibilitása $-1,2 \cdot 10^{-9}$ adódik, ami a modell egyszerűségéhez mérten kiválóan egyezik a mérési eredmények alapján kapott $-2,25 \cdot 10^{-9}$ értékkel.

A diamágnesesség mechanizmusa a magasabb rendszámú anyagok esetén is a hélium mágneseességére talált magyarázattal értelmezhető. Ekkor azonban az elektronpályák különböző sugara miatt az eredő momentumot az

$$m_e = -\frac{e^2 \mu_0 H}{6m} \sum_{i=1}^z \overline{r_i^2}$$

összefüggéssel kell számolni, ahol $\overline{r_i^2}$ az egyes elektronpályák sugarának négyzetes átlaga. A $\sum \overline{r_i^2}$ összeg azonban helyettesíthető a Za^2 szorzattal, ahol a^2 az összes elektron távolságának négyzetes átlaga. Ezt felhasználva a mágnesezettségre

$$M = -\frac{Ze^2 na^2 \mu_0}{6m} H$$

adódik, amiből a mágneses szuszceptibilitás:

$$\chi = -\frac{\mu_0 Ze^2 na^2}{6m}$$

Az $a \sim 10^{-10}\text{m}$ és $n \sim 2 \cdot 10^{28}\text{m}^{-3}$ közelítéssel ebből szilárd és folyékony anyagokra a tapasztalattal jól egyező $\chi \sim 10^{-6}Z$ összefüggést kaphatjuk. Gázok esetén a szorzótényező a gázok és szilárd anyagok sűrűségének $\rho_{sz}/\rho_g \sim 10^3$ aránya miatt $\sim 10^{-9}$.

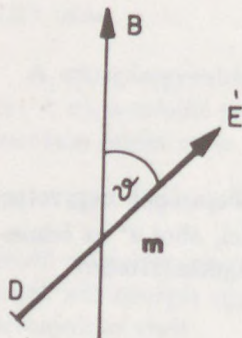
Megjegyzés: Mágneses térben minden anyag esetén keletkezik indukált dipólusmomentum. Az effektus azonban nagyon gyenge. A para- és ferromágneses anyagokban ennél jóval erősebb hatások is fellépnek, amelyek ezt a minden atomban meglévő diamágneses hatást elnyomják.

A diamágnesességet ezt a lényegében klasszikus fizikai kép alapján alkotott magyarázatát a kvantummechanika felhasználásával módosították. A kvantummechanikai leírás szerint kapott eredmények azonban csak csekély mértékben térnek el a fenti modell becslésétől. A legfontosabb eltérés az, hogy a Bohr-moddellel ellentétben az $l = 0$ mellékkvantum-számú pályákon az elektron pályaimpulzusmomentuma zérus.

4.2. A paramágneses szuszceptibilitás becslése

A következőkben egy egyszerű modellre támaszkodva mennyiségi becslést adunk a mágneses térben rendeződő elemi mágnes rendszerek – azaz a paramágneses anyagok mágneses szuszceptibilitására.

Tegyük fel, hogy külső mágneses tér nélkül az elemi mágnesek nem teljesen rendezetlenül, hanem egy derékszögű koordináta-rendszer tengelyei mentén állnak be. A mágnesezettség zérus értékét az biztosítja, hogy az egyes tengelyek pozitív és negatív irányai mentén a molekuláris mágnesek hatodrésze áll. (A feltevés hasonló a kinetikus gázelméletben felhasznált egyszerűsítéshez, amely szerint a gázmolekulák hatodrésze mozog a tér három egymásra merőleges egyenese által kijelölt $3 \times 2 = 6$ különböző irányban.)



III.6. ábra

Helyezzük ezt az anyagot x irányú B mágneses térbe, és tegyük fel, hogy az elemi mágnesek továbbra is csak a koordinátatengelyek mentén állhatnak be. Nyilvánvaló, hogy a mágneses tér hatására az x tengely mentén a különböző állású dipó-

lok egyensúlya megbomlik. Ha n_1 a B irányával megegyező, n_2 pedig az azzal ellentétes irányú dipólok száma térfogategységenként, akkor a mágnesezettségre

$$M = (n_1 - n_2)m$$

adódik. A B térbe helyezett m mágneses momentummal rendelkező elemi mágnes energiája

$$E = -mB \cos \vartheta,$$

ahol ϑ a tér és a dipól által bezárt szög (III.6. ábra). A térrel párhuzamosan álló dipólok energiája $\cos \vartheta = +1$ miatt

$$E_1 = -Bm,$$

az ellentétesen álló dipóloké pedig $\cos \vartheta = -1$ miatt

$$E_2 = Bm.$$

Így a Boltzmann-eloszlás szerint

$$n_1 = \frac{n}{6} e^{\frac{Bm}{kT}} \text{ és } n_2 = \frac{n}{6} e^{-\frac{Bm}{kT}}.$$

Mivel az atomi dipólmomentumok értéke nagyon kicsiny, közönséges hőmérsékleten alkalmazható az

$$n_1 = \frac{n}{6} e^{\frac{Bm}{kT}} \approx \frac{n}{6} \left(1 + \frac{Bm}{kT} \right)$$

és

$$n_2 = \frac{n}{6} e^{-\frac{Bm}{kT}} \approx \frac{n}{6} \left(1 - \frac{Bm}{kT} \right)$$

közelítés. A közelítés felhasználásával a mágnesezettségre az

$$M = (n_1 - n_2)m = \frac{nm^2}{3kT} B = \frac{nm^2 \mu_0}{3kT} H$$

összefüggést kapjuk. Következésképp a mágneses szuszceptibilitás

$$\chi = \frac{nm^2 \mu_0}{3kT}$$

alakban adható meg.

A paramágneses szuszceptibilitásra kapott eredmény jól visszaadja a kísérletileg tapasztalt $1/T$ -vel arányos hőmérsékletfüggést, azaz a Curie-törvényt.

A χ -re kapott összefüggés alapján megbecsülhetjük például egyes gázok szobahőmérsékleti szuszceptibilitását: $n \sim 2,69 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $T = -300 \text{ K}$, az atomok elemi mágneses momentuma $m \sim 9,27 \cdot 10^{-24}$, és így

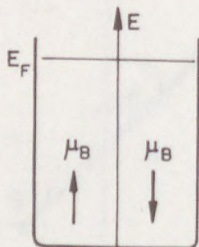
$$\chi = \frac{2,69 \cdot 10^{25} \cdot 9,27^2 \cdot 10^{-48} \cdot 4\pi}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10^7} \sim 2,3 \cdot 10^{-7}.$$

A mérések szerint az oxigén szuszceptibilitása 20°C -on $18,6 \cdot 10^{-7}$ és $0,8 \cdot 10^{-7}$ között van, az egyezés tehát nagyságrendileg jó. Szilárd anyagokra a kb. 10^3 -szor nagyobb sűrűség miatt a szuszceptibilitásra is kb. 10^3 -szor nagyobb érték adódik. Az összehasonlítás kedvéért közöljük, hogy platina esetén $\chi = 2,6 \cdot 10^{-4}$, lítiumra pedig $\chi = 2,3 \cdot 10^{-5}$. A mérési eredmények és az elméleti becslés mutatja, hogy a paramágneses szuszceptibilitás értéke mintegy ezerszerese a diamágneses szuszceptibilitásnak. A paramágnesség tehát valóban elnyomja a diamágneses hatásokat.

Megemlítjük még, hogy a levezetésben alkalmazott $\frac{Bm}{kT} \ll 1$ feltevés alacsony hőmérsékleten érvényét veszti. Alacsony hőmérsékleten a hőmozgás már nem zavarja az atomi dipólusok beállását, így a paramágneses anyagok mágnessége telítődik, azaz minden elemi mágnes a tér irányába áll be.

4.3. Egy különleges kivétel – az elektrongáz paramágnesessége

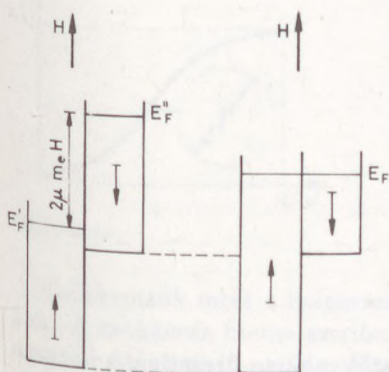
A paramágneses anyagok mágneses szuszceptibilitása a Curie-törvény szerint fordítottan arányos a hőmérséklettel. Egyes fémek esetén azonban a hőmérséklettől független paramágnesességet tapasztaltak. Wolfgang Pauli bizonyította be, hogy ez a szabad elektronok paramágnesességének következménye. A jelenség csak némi kvantummechanikai ismeretek felhasználásával érthető meg.



III.7. ábra

Foglalkozzunk egy fém vezetési sávjában elhelyezkedő elektronok sajátosságainak mágneses tér hatására bekövetkező változásával. Mágneses tér hiányában a fém mágnesesen semleges, tehát a vezetési sávban az ellentétes spinű elektronok száma

egyenlő. Ezt ábrázolja szematikusan a III.7. ábra. A külső mágneses tér hatására a térrel egyező spinbeállású elektronok energiája $E_1 = -\mu_0 m_B H$ értékkel csökken, az ellentétes spinű elektronoké pedig $E_2 = \mu_0 m_B H$ értékkel nő. (A képletekben $m_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ J/tesla}$ az ún. Bohr-magneton. A Bohr-magneton az elektron spinjéből eredő mágneses momentumnak egy adott irányra vett vetületének lehetséges értéke.) A mágneses tér hatására tehát a két sávfél az energiatengely mentén eltolódik egymáshoz képest, következésképpen eredetileg egyenlő Fermi-nívóik is $\Delta E_F = 2\mu_0 m_B H$ -val elcsúsznának.



III.8. ábra

Egyensúlyi állapotban azonban a Fermi-nívók kiegyenlítődnek. Ez azonban csak úgy lehetséges, ha a térrel azonos spinbeállású elektronok száma az ellentétes spinűek rovására megnő (III.8. ábra). A félsávok alján az energiaállapotok igen nagy valószínűséggel betöltöttek, s az ilyen állapotú elektronok spinjének átfordulásához kT termikus energia kevés. Mozgásképes elektronok csak a Fermi-nívó közelében lévő lazán betöltött tartományban találhatók (III.8. ábra). E sáv szélességét $\Delta\epsilon = kT$ -vel szokás becsülni, s így ha egyenletes állapotsűrűséget tételezzük fel, akkor a mozgásképes elektronok száma térfogategységenként

$$n_m \sim \frac{kT}{E_F} n.$$

Ezen elektronok esetén a Fermi-Dirac-statisztika helyett jó közelítéssel használhatjuk a Boltzmann-eloszlást. A térrel párhuzamosan álló spinű elektronok száma így az

$$n_m^p \sim n_m e^{\frac{\mu_0 m_B H}{kT}},$$

az ellentétes spinűeké pedig az

$$n_m^e \sim n_m e^{-\frac{\mu_0 m_B H}{kT}}$$

összefüggéssel becsülhető. Felhasználva, hogy az elektronok spinmágnesség miatt fellépő $\frac{\mu_0 m_B H}{kT}$ energijáruléka kicsiny, azt kapjuk, hogy

$$n_m^p \sim \frac{n_m}{2} e^{\frac{\mu_0 m_B H}{kT}} \sim \frac{n_m}{2} \left(1 + \frac{\mu_0 m_B H}{kT} \right),$$

és

$$n_m^e \sim \frac{n_m}{2} e^{-\frac{\mu_0 m_B H}{kT}} \sim \frac{n_m}{2} \left(1 - \frac{\mu_0 m_B H}{kT} \right).$$

Az

$$M = (n_m^p - n_m^e) m_B$$

mágnesezettségre ezekkel a közelítésekkel az

$$M = n_m \frac{\mu_0 m_B^2}{kT} H = n \frac{\mu_0 m_B^2}{E_F} H$$

adódik, amiből a szuszceptibilitásra a hőmérséklettől valóban független

$$\chi = n \frac{\mu_0 m_B^2}{E_F}$$

értéket kapjuk. Látható tehát, hogy az elektronok szuszceptibilitásának hőmérsékletfüggetlensége a Pauli-elv következménye, hiszen ez teszi lehetetlenné, hogy a mélyebb energiaszinteket elfoglaló elektronok is gerjesztődjenek.

Megjegyezzük, hogy pályamozgásuk miatt a vezetési elektronok viszonylag erős diamágneses tulajdonsággal is rendelkeznek. Ez az ún. Landau-féle diamágnesség azonban a paramágneses hatásnak csak mintegy harmadrésze.

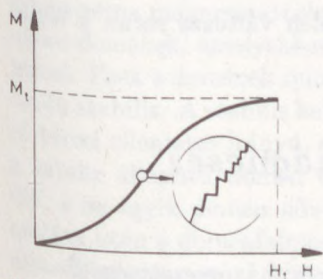
5. A vas mágneseessége

Az atomi mágnesség tulajdonságai alapján sikerült értelmezni a gyengén mágneses anyagok sajátosságait. Az igazi erős ferromágnesek viselkedése azonban jóval bonyolultabb, mint az eddig tárgyalt esetek és pusztán az atomi mágnesség alapján nem is érthető meg.

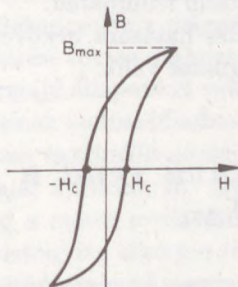
Tekintsük át bevezetőként röviden a kísérleti tapasztalatokat. Ha egy ferromágneses anyagot mágneses térbe helyezünk és a mágneses térerősséget fokozatosan növelve mérjük az anyag mágnesezettségét, furcsa jelenséget tapasztalunk (III.9. ábra). A mágnesezettség a térerősség növekedésével eleinte gyorsan nő, később azonban a növekedés üteme lassul, majd állandóvá válik. Ekkor mondjuk, hogy az anyag mágnesesen telítődött. Igen érdekes továbbá az is, hogy a mágne-

szettség a térerősség függvényében nem folytonosan, hanem kicsiny ugrásokban, szakaszosan változik.

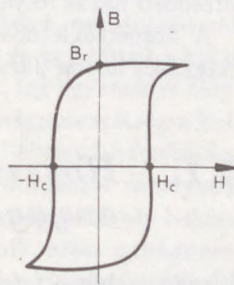
Ezt a felfedezőjéről Barkhausen-effektusnak nevezett jelenséget egyszerűen szemléltethetjük pl. úgy, hogy egy vasmagos tekercset erősítőn keresztül hangszóróra kapcsolunk, majd a vasmag felé állandó mágnezt közelítünk. A vasmagban lezajló változások hatására a hangszóróból sístergő zaj hallatszik.



III.9. ábra

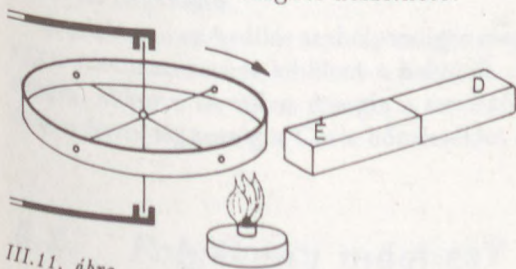


III.10. ábra



Csökkentsük most a mágneses teret! Amint várható, a mágneszettség is csökken. A csökkenés üteme azonban nem azonos a növekedésével! Egy teljes átmágnesezési ciklus alatt – míg a mágneses tér a telítési mágneszettség eléréséhez szükséges H_t értékről $-H_t$ -re csökken, majd újra H_t -re nő – a mágneszettségi görbe egy, a III.10. ábrán látható ún. hiszterézishurkot alkot.

A hurok tágassága a különböző vasanyagokra eltérő. A könnyen mágnesezhető ún. "lágy" mágneses anyagok esetén a hiszterézishurok lapított, fel-, illetve lefutó ága közel halad egymáshoz. A nehezen átmágnesezhető "kemény" mágneses anyagok esetén a hurok széles, a közbezárt terület nagy. A mágneses anyagok fontos jellemzője a külső mágneses tér kikapcsolása után is fennmaradó mágneszettség, az ún. remanens mágnesség. Ez határozza meg ugyanis, hogy az adott anyagból milyen erős állandó mágnes készíthető.



III.11. ábra

A ferromágneses anyagokban a hőmérséklet emelkedésével jellegzetes változás megy végbe. Minden ferromágneses anyagra létezik egy olyan T_C kritikus hőmérséklet (Curie-hőmérséklet), amelyet túlhaladva a mágneszettség értéke ugrásszerűen csökken.

Egyszerűen illusztrálja ezt az ún. Curie-kérkkel végezhető kísérlet (III.11. ábra). Nikkel-króm ötvözetből készült kereket helyezünk jól csapágyazott függőle-

ges tengelyre. Tegyük a kerék mellé az ábrán látható módon állandó mágnes és a mágnes közelében hevítsük a kereket gázlánggal. A kerék forgásba jön. A forgás azzal magyarázható, hogy a melegedés következtében a kerék kicsiny darabjának mágnesezettsége lecsökken, így a mágnes a keréknek ezt a darabját kevésbé vonzza. Ezért a kerék erősebb mágnesezettségű részei a mágnesrúd felé mozdulnak. Ekkor azonban a lángba kerülve mágnesezettségük ugrásszerűen lecsökken, így a forgást létrehozó hatás folyamatosan fennmarad.

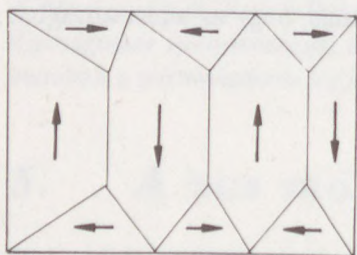
A hőmérsékletnövekedés hatására bekövetkező hirtelen változás során a ferromágneses anyag paramágnessé válik.

5.1. Hosszú távú rend a ferromágneses anyagokban

Mi okozza hát a ferromágneses anyagok különlegesen erős mágnesezettségét?

A Curie-hőmérsékleten végbemenő hirtelen változás olyan erős, sok atomra kiterjedő rendeződésre utal, amelyet alacsony hőmérsékleten a hőmozgás nem tud szétzilálni. Valóban, a kísérleti tapasztalatok azt mutatják, hogy a ferromágneses anyagok nagy tartományaiban, az ún. doménekben az atomi mágnesek egy irányba állnak be. A szomszédos domének mágnesezettsége azonban ellentétes. A domének mérete általában $0,001 \text{ mm}^3$ és $0,1 \text{ mm}^3$ közé esik, s közöttük keskeny, kb. $0,1 \mu\text{m}$ szélességű falak találhatók. Ezekben a falakban az elemi mágnesek iránya folyamatosan fordul át a szomszédos domének megszabta irányba (III.12. ábra).

A doménszerkezet kísérletileg olajban elkevert finom mágnespor segítségével mutatható ki. Ha ezt a keveréket mágneses anyag polírozott felületére kenjük, akkor a mágnespor a doménfalak mentén gyűlik össze.



III.12. ábra

Felvetődik a kérdés, hogy miért nem válik azonossá az anyag teljes térfogatában az elemi mágnesek iránya. Képzeld el, hogy egy kristály egy darabjában az elemi mágnesek azonos irányban állnak be. Nyilvánvaló, hogy energetikailag a szomszédos zónában ezzel ellentétes mágnesezettség az előnyösebb. A szomszédos domének ekkor ugyanis kicsiny mágnesrudaknak tekinthetők, amelyek minimális energiájú helyzete az, amikor ellentétes pólusaiik találkoznak. Az atomi mágnesek rendezésére irányuló tendencia tehát nem érvényesülhet a kristály teljes térfogatában.

A fentiekben elmondottak lényegében egykristályokra, illetve a polikristályos anyagok szemcséire érvényesek. A szemcsehatárok általában a mágnesezettség irányán is változtatnak, mivel a szomszédos kristályszemcsék orientációja különböző, s a doménszerkezetet kialakító spontán mágneseződés minden szemcsében a könnyű mágneseződési irányokban megy végbe.

A doménszerkezet alapján jól érthető a ferromágneses anyagok mágnesezési görbéje. A spontán mágneseződéssel létrejött doménszerkezet makroszkopikusan általában zérus mágnesezettségre vezet. Bekapcsolva a mágneses teret, mindig lesznek olyan domének, amelyekben a mágnesezési vektor párhuzamos és egyirányú a külső térrel. Ezek a domének minimális energiájú állapotban vannak, így egyensúlyi helyzetük stabilis. A stabilis helyzetű domének szomszédjaiban a mágnesezettség a külső térrel ellentétes irányú, ezért a térben maximális energiájú helyzet biztosítására a labilis állapotú domén egyes atomjai átfordulnak, így a doménfal áthelyeződik, s az egyik domén növekedni kezd a másik rovására. A mágneses tér bekapcsolása után a doménfalarmozgás még viszonylag könnyen történik, ezért a mágnesezettség gyorsan nő. Ahogyan a mágneses tér nő, egyre több doménfal "akad" meg valamilyen kristályhibán (szemcsehatáron vagy diszlokációkötegen), s ezért a mágnesezettség növekedése lelassul. A kristályhibákon megakadó atomi mágnesek energiája azonban a mágneses tér növekedésével egyre nagyobbá válik, s elérve egy kritikus értéket a doménfal hirtelen keresztülszalad a hibán. Ez az oka a mágnesezési görbén észlelt kis lépcsőknek, a Barkhausen-effektusnak. Azonnal érthető ennek alapján a hiszterézis jelensége is, hiszen a mágneses tér csökkentésével a doménfalak nem tudnak eredeti helyükre visszaállni, mert a kristályhibák a visszafelé mozgást megakadályozzák. A lemágnesezés után tehát egészen más doménszerkezet marad vissza, mint ami a mágnesezés előtt létezett.

A mágnesezettség akkor kezd telítésbe menni, amikor az egyes kristályszemcsékben valamennyi domén beállt a mágneses tér irányával legkisebb szöget bezáró könnyű mágnesezési irányba. A további mágnesezés ilyenkor már csak a doméneknek a tér irányába forgatásával lehetséges, s ehhez általában igen nagy mágneses tér szükséges.

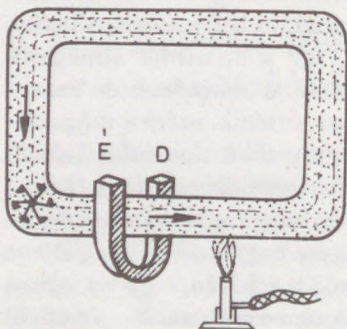
A párhuzamos beállítás szabályosságát megzavarja a hőmozgás, amely időről időre egyes momentumokat kibillent a helyéről. Amennyiben a hőmérséklet elegendően magas, akkor a termikus energia a rendeződést is lehetetlenné teszi. Ezért szűnik meg a ferromágnesség a Curie-hőmérséklet felett.

5.2. *Folyékony mágnes?*

A ferromágnesek erős mágneseességét a nagy tartományokban azonos irányban álló elemi mágnesek okozzák. Elképzelhetetlennek tűnik tehát, hogy a könnyen gördülő folyadékrészecskék is ferromágnesekké állhatnak össze. Az 1940-es években merült fel először, hogy ez mégis lehetséges, ha kicsiny mágneses részecskéket kevernek el egy megfelelő folyadékban. Az első ilyen folyadékok azonban mágneses térben szilárd anyaggá álltak össze. Igazán folyékony mágnes csak 1960-ban készült. Ekkor

Stephen Papell finom magnetitport (a magnetit kétféle vas-oxid, FeO és Fe_2O_3 molekuláris keveréke) kevert össze olajsavas kerozinban. Az így nyert kolloid oldat amellett, hogy folyékonyágát mindvégig megtartotta, mágneses térben ferromágnesként viselkedett. Ezt elsősorban az bizonyította, hogy az anyag erős mágnesességét melegítés hatására egy jól meghatározott hőmérsékleten elvesztette.

Az első kísérletek óta a ferrofolyadékok tulajdonságait tovább javították, s már néhány gyakorlati alkalmazásuk is megjelent. A mágneses folyadékok kiváló kenő-, illetve tömítőanyagok lehetnek mágneses forgó alkatrészek között. Ez a folyadék ugyanis mágnesessége miatt még az alkatrészek között levő kissé szélesebb résekből sem folyik ki. Az egyik folyékony mágneseket gyártó cég, a Ferrofluid Egyesülés



III.13. ábra

szakemberei jó hatásfokú erőgép létrehozását is remélik. A gép lényegében a Curiekerék elvét felhasználva működne. Ezt szemlélteti sematikusán a III.13. ábra. A zárt csőben a mágneses folyadék folyamatos áramlásba hozható egy mágnes segítségével, ha az ábrán *A*-val jelzett részén a Curie-pont fölé melegítjük. Ekkor ugyanis a *B* mágnes csak az előtte elhelyezkedő hideg folyadékot vonzza, a melegebb részekre gyakorlatilag nem hat erő. Az áramlásba hozott ferrofolyadék energiája egy kis turbinakerék alkalmazásával mechanikai úton is hasznosítható. Ígérteesebbnek tűnik azonban, ha a mozgó folyadék mágneses terével egy indukciós tekercsben közvetlenül elektromos áramot feljesztünk. A folyadékgenerátor – ha megvalósul – igen jó hatásfokkal, s hosszú ideig hibamentesen működhet, hiszen forgó, súrlódó alkatrészeket nem tartalmaz.

5.3. Mi okozza a hosszú távú rendet a ferromágnesekben?

A ferromágnességet a doménszerkezet hosszú távú rendje alapján értettük meg. Felvetődik azonban a kérdés, hogy miért rendeződnek az elemi mágnesek az egyik anyagban, és miért nem alakul ki ez a rend a másikkban.

Nos ez valóban nehéz kérdés, s igazán pontos megválaszolásához mély kvantummechanikai ismeretek szükségesek. Ennek részletezésébe semmiképpen sem akarunk

belemenni. Annyit azonban mégis megemlítünk, hogy az elemi mágnesek párhuzamos beállása a szomszédos atomok elektronjai között fellépő speciális az ún. kicserélődési kölcsönhatás következménye. Érdekes, hogy ez a kölcsönhatás igen érzékenyen függ az atomok közötti a távolságnak és a mágnességért atomi szinten felhő d alhéj d -vel jelölt átmérőjének a/d arányától. Ha ez az arány túlságosan kicsiny, akkor ferromágnesség nem alakul ki. Amennyiben a/d nagyobb mint 1,5, akkor az anyag ferromágneses. a/d növekedésével a ferromágneses tulajdonság egy darabig erősödik, majd fokozatosan gyengül. Ez az oka annak, hogy a vas két megismert módosulata közül a lapcentrált köbös szoros illeszkedésű rácsban kristályosuló γ -vas nem mágnes, a tércentrált köbös rácsot alkotó α -vas pedig mágneses tulajdonságú. A szoros illeszkedésű szerkezet esetén ugyanis az a/d arány kisebb, mint 1,5, míg a lazább tércentrált szerkezetben már meghaladja ezt az értéket.

Sokkal érdekesebb ennél, hogy ezt az összefüggést felismerve nem mágneses elemek összeötvöztetésével mágneses anyagot nyerhetünk. A mangán harmadik elektronhéján öt d elektron van, így atomjai stabilis elemi mágnesek. Az a/d arány azonban kisebb, mint 1,5, így a mangán nem mágneses elem. Csekély mennyiségű nitrogén hatására azonban a mangán kristályrácsa torzul, a rácsállandó megnő, s az anyag ferromágnessé válik. Hasonló módon egyes mangán-réz-alumínium ötvözetek is ferromágnesek, bár egyetlen összetevőjük sem az.

5.4. *A felmágnesezhetetlen anyag – az antiferromágnesség*

Kamerlingh Onnes, a szupravezetés felfedezője 1925-ben fém-kloridok mágneses tulajdonságait vizsgálta, és arra a következtetésre jutott, hogy egyes anyagok viselkedése para- vagy ferromágneses tulajdonságok feltételezésével sem értelmezhető. Léteznie kell tehát valamilyen más mágneses rendnek is.

A jelenségre elméleti magyarázatot a Nobel-díjas fizikus, Landau adott. Felfigyelt arra, hogy a szomszédos rétegekben az elemi mágnesek ellentétesen állnak be. Ezek az anyagok tehát nem mágnesezhetők, hiszen a szomszédos rétegek mindig lerontják egymás hatását. Ezért nevezzük az ilyen anyagokat antiferromágneseknek. Ma már sok olyan anyagot ismerünk, amelyben a szomszédos elemi mágnesek ellentétesen állnak be. Az ilyen anyagok legáltalánosabban egymásba csúsztatott ellentétes mágnesezettségű ferromágneses rácsként képzelhetők el. Az ellentétes rendet ugyanaz a kvantummechanikai kölcsönhatás állítja be, amely a ferromágnesek elemi mágneseit doménekbe rendezi.

A ferromágnesekhez hasonlóan tehát az antiferromágnesség is a mágneses momentumok szabályos rendjének a következménye. Ez a rendezettség is csak addig maradhat fenn, míg a termikus mozgás szét nem zilálja. Az antiferromágnesség kritikus hőmérsékletét Néél-hőmérsékletnek nevezzük. A Néél-hőmérséklet felett az antiferromágneses anyagok paramágnesessé válnak.

IV. FOLYADÉKOK ÉS MAKRO-MOLEKULÁS ANYAGOK

1. Óriás láncmolekulák

A XX. századot sok egyéb találó jelző mellett joggal nevezhetjük a műanyagok korának. A korábbi századokban az ember az ásványi nyersanyagok mellett a természetben található minden alkalmas anyagot igyekezett felhasználni. Használati tárgyak készültek fából, csontból, szaruból, bőrből. Legtöbbször az állatok gyapja és növényi rostok (gyapot, len, kender) szolgáltatták az alapanyagot a textiliparban, de a legfinomabb kelmék hernyóselyemből készültek. Századunkban ezek mellett a továbbra is használt anyagok mellett egyre nagyobb szerepet kapnak a szintetikus úton, óriási vegyi gyárakban előállított műanyagok. A műanyagok részben a hagyományos anyagokat helyettesítik (pl. műszálak, műszövet), de egyre több olyan műanyagunk van, amelynek nincs természetes "mintája". Ez utóbbiak közül elég, ha a háztartásokban, mezőgazdaságban, iparban sokféleképpen felhasznált műanyag fóliákra utalunk, vagy például a "teflon" nevű műanyagot emeljük ki. Közismert, hogy teflonbevonattal ellátott edényben nem sült le az étel, a teflon azonban nemcsak a háziasszony munkáját könnyíti meg. A teflon és a vele érintkező fémek közt alig van súrlódás, ezért az olyan csúszó gépalkatrészeknél, ahol a súrlódás csökkentésére hagyományosan használatos zsírzás nem alkalmazható (pl. több száz fokos hőmérséklet miatt) a teflonból készült súrlódáscsökkentő bevonatok, csúszógyűrűk jól felhasználhatók.

Az első műanyagok feltalálásában nagy szerepet kapott a véletlen, a kísérletező vegyész érdeme "csak" annyi, hogy észrevette milyen lehetőségeket rejt a lombikjában talált új anyag. Ma az új műanyagok kutatása, egy-egy speciális célú anyag előállítása egyre inkább aprólékos elméleti munka eredménye. A molekulák szerkezetét papíron megtervezik, az adott szerkezetet feltételezve kiszámítják az anyag paramétereit, s ezt követik a laboratóriumi kísérletek, majd az optimális tulajdonságok beállítása után az ipari gyártás.

Mi tette lehetővé ezt a minőségi változást, ami miatt századunk valóban joggal nevezhető a műanyagok korának?

Az ásványokat alkotó vegyületek, a víz, az alkohol, a savak és a lúgok, a gáz halmazállapotú anyagok mindössze néhány atomos molekulákból állnak. A műanyagok molekulái ezekhez képest valóságos óriások, több tízezer atom összekapcsolódásával jönnek létre.

A természetben az óriásmolekulák állati és növényi szervezetekben találhatók meg.

Az első ipari felhasználású műanyagot a celluloidot az 1870-es években készítették az Egyesült Államokban. A fejlesztést egy 10 000 dolláros díj váltotta ki, melyet egy, az elefántcsontot helyettesítő anyag gyártására tűztek ki. J. W. Hyatt sok próbálkozás után rájött, hogy a kámfor jól oldja, ugyanakkor alakíthatóvá teszi a cellulóz-nitrátot, majd az így kapott anyagot megfelelően hőkezelve alakítható rugalmas termékhez juthatunk. A celluloid hosszú évtizedig volt pl. a filmgyártás alapanyaga, míg a kevésbé gyúlékony cellulóz-acetát-propionát ki nem szorította. A természetes eredetű és mesterségesen előállított anyagok óriásmolekulái (gyakran nevezik őket makromolekuláknak is) a kis molekulákhoz képest egészen új tulajdonságokat mutatnak.

Míg a kis molekulájú anyagok felépítésében a periódusos rendszer szinte valamennyi eleme részt vesz, addig az óriásmolekulájú anyagok alig nyolc-tíz elemből épülnek fel, ennek ellenére a vegyületek száma szinte korlátlan.

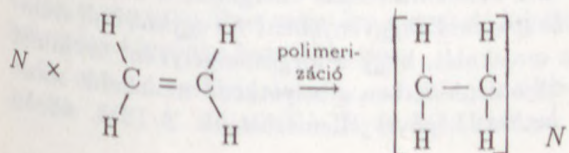
Az óriásmolekulák kisebb molekulacsoportok szabályos összekapcsolódásával épülnek fel. Az anyagok kémiai tulajdonságait az őket alkotó molekulacsoportok anyagi minősége mellett, összekapcsolódásuk módja és sorrendje határozza meg.

Érdekes azonban, hogy kémiai szempontból lényegesen különböző szerkezetű makromolekulájú anyagok a fizikai tulajdonságok szempontjából megtévesztésig hasonlóak lehetnek. Így például a természetes hernyóselyem kémiaiilag a gyapjúsálhoz hasonlóan a fehérjék közé tartozik. A műselyemgyártás alapanyaga, a fa cellulóz rostja kémiai szempontból poliszacharid, melynek szerkezete alapvetően különbözik a fehérjék szerkezetétől. Fizikai tulajdonságai szempontjából a két anyag nagyon hasonló, mindkettő könnyen megkülönböztethető azonban a gyapjútól. Ennek az az oka, hogy az óriásmolekulájú anyagok fizikai – elsősorban mechanikai – tulajdonságai szempontjából nem a molekulák kémiai összetétele, hanem az óriásmolekulák térbeli alakja a döntő.

Néhány óriásmolekulájú anyag jó példát kínál arra, hogy megmutassuk a térszerkezetet és a fizikai tulajdonságok közti alapvető kapcsolatot.

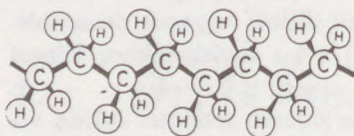
1.1. A láncmolekula alakja

A legegyszerűbb szerkezetű makromolekula a polietilén. A polietilén N számú (esetünkben N nagyon nagy szám, akár több ezer is lehet) etilénmolekula egymáshoz kapcsolódásával épül fel. Az ilyen összekapcsolódást, amelynek során az óriásmolekula egy alapegység ún. monomer (példánkban az etilén) megsokszorozásával jön létre, *polimerizációnak* nevezzük. A polietilén képződésének kémiai folyamata képletekkel a következő alakban írható le:

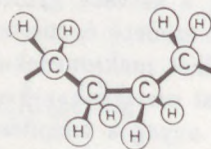


A molekula egymás után kapcsolódó szénatomjai úgy építik fel a molekulát, mint a láncszemek a láncot. Az ilyen egyetlen sorba összekapcsolódó szénatomokból álló óriásmolekulát láncmolekulának is nevezzük.

A láncba kapcsolódó minden szénatom négy egyenrangú, kovalens kötéssel (sp^3 hibridizáció) kapcsolódik két másik szénatomhoz, illetve további két hidrogénatomhoz. Így minden szénatomot egy olyan tetraéder középpontjában lévőnek kell elképzelnünk, amelynek két csúcsában a szomszédos két szénatom a másik két csúcsban pedig hidrogénatomok helyezkednek el. A láncba kapcsolódó szénatomok tehát

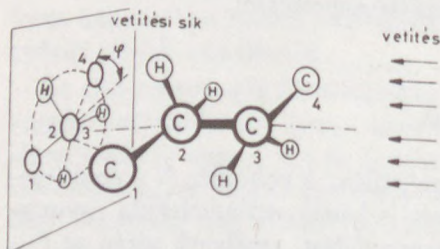


IV.1. ábra



IV.2. ábra

valójában nem esnek egy geometriai egyenesbe. Egy ideálisan "egyenes" molekulalánc ziczacszerű vonalát szemlélteti a IV.1. ábra. A molekula a valóságban azonban sohasem ilyen szabályosan "egyenes". A szénatomokat összekötő kovalens kötés ugyanis lehetővé teszi, hogy a molekula két fele a kötés mint térbeli tengely körül elforduljon egymáshoz képest. A IV.2. ábra a polietilénlánc négy szénatomot tartalmazó darabját mutatja. A középső két szénatom közötti kötés körül a molekulaszakasz két fele elfordulhat egymáshoz képest. Az elfordulással előálló molekulaalakok azonban nem teljesen egyenértékűek. Ennek oka az atomoknak, atomcsoportoknak mérete és helyigénye. Azok a molekulaalakzatok, amelyeknél az atomok nem zavarják egymás elhelyezkedését, alacsony energiájúak. Azokban a molekulahelyzetekben, amelyekben az egyes atomcsoportok akadályozzák egymás elhelyezkedését, az egész molekulaszakasz egy kissé megfeszül, deformálódik, az ilyen helyzetekben a molekula energiája nagy.

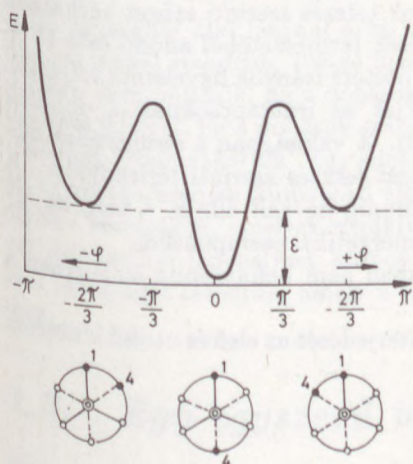


IV.3. ábra

Vizsgáljuk a négy szénatomból álló molekulaszakasz energiáját a középső két szénatom közötti kötés körüli elfordulás szögének függvényében! Az egyszerűbb szemléltetés kedvéért fordítsuk el úgy a molekulát, hogy a forgástengelyként tekintett kötés a papír síkjára merőlegesen álljon! A térben elhelyezkedő molekulát most az atomoknak a papír síkjára való vetített képével jellemezhetjük. A IV.3. ábrán

a négy beszámozott szénatom közül a 2. és 3. egymást fedve középen helyezkedik el, az 1. és 4. szénatom relatív helyzetét és ezzel a molekula alakját a φ szöggel jellemezhetjük. A IV.4. ábrán a polietilénmolekula négy szénatomból álló darabjának energiáját tüntettük fel a φ szög függvényében. Az energiagörbén három határozott minimumhelyzet van. A legalacsonyabb energiájú állapot az, amelyben az 1. és 4. szénatom a lehető legtávolabb kerül egymástól; $\varphi = 0$. Ha a lánc mentén végig ez az elrendeződés valósul meg, akkor a molekula alakja a IV.1. ábrának megfelelő. További két minimumhelyzet adódik a $\varphi = +120^\circ$ -os elforgatások esetén. Az ilyen elforgatott helyzet következtében a molekulalánc "egyenes" vonala megtörik. Az egyenes és az elforgatott helyzet energiakülönbsége a IV.4. ábrán bejelölt $\epsilon = 5 \cdot 10^{-21} \text{J}$. A környezet hőmérsékletén múlik, hogy a szénatomok egymáshoz viszonyított három helyzete közül melyik milyen gyakorisággal fordul elő a lánc mentén. A hőmozgás miatt a csuklószerűen hajló kötések egyik minimális energiájú helyzetből a másikba billenhetnek át.

Ha a hőmérséklet alacsony, a hőmozgás átlagos energiája ($E \approx kT$) lényegesen kisebb, mint $5 \cdot 10^{-21} \text{J}$, így az átbillenés ritka, a polietilénmolekula döntően egyenes darabokból áll, és a molekula térbeli alakja nem változik.



IV.4. ábra

Nem túl alacsony hőmérsékleten, azaz ha a hőmozgás átlagos energiája ($E \approx kT$) eléri, vagy meghaladja ϵ értékét, az átbillenések gyorsan követik egymást, és így a szénatomok gyakorlatilag tetszőleges helyzetben helyezkedhetnek el. A különböző helyzetek közti csekély energiakülönbséget a termikus energia bőségesen fedezi. A hőmozgás hatására a láncban hol itt, hol ott fordul el egymáshoz képest véletlenszerűen két szénatom, és ezzel változik az egész lánc alakja. Az ilyen molekulák makroszkopikus méretűre nagyított képét egy hosszú, összevissza hajladozó, tekergőző kígyóhoz hasonlíthatjuk.

Ha a hőmérséklet alacsony, az átlagos termikus energia jóval kisebb, mint ϵ értéke: $kT \ll 5 \cdot 10^{-21} \text{J}$. Ilyen körülmények közt a polietilénmolekula lénye-

gében kiegyenesedik. A csekély hőmozgás ugyanis esetenként egy-egy hajlékony csuklót átbillent a legalacsonyabb energiájú állapotba. Ebből a helyzetből azonban lényegesen ritkábban mozdul el a molekula, hiszen a potenciálgát ekkor még magasabb, s a hőmozgás energiája nem fedezi az átmeneti magasabb energiaszükségletet.

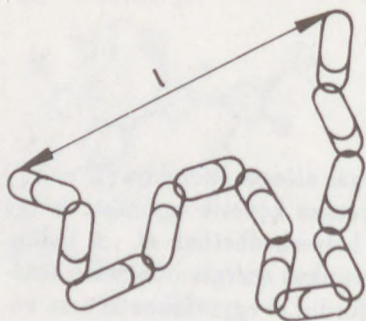
1.2. Törvényszerűség az összevisszaságban

Az eddigiekben megmutattuk, hogy a sok ezer atomból felépült láncmolekulának nincs határozott alakja. Érdekes azonban, hogy a molekulagubanc átlagos méretét éppen abból kiindulva határozhatjuk meg, hogy a molekulalánc szomszédos atomcsoportjai véletlenszerűen helyezkednek el egymáshoz képest. Vizsgáljuk meg, hogy hogyan vezet a véletlenszerűség összevisszasága egy jellegzetes átlagmérethez!

A hosszú láncmolekulát első közelítésben jól modellezhetjük, pl. egy összefűzött iratkapcsokból álló láncsal. Egy lazán az asztalra dobott lánc alakja az óriásmolekula egy lehetséges alakját mintázza. Az így adódó egyszerű modellben a molekulalánc monomer elemeit modellező iratkapcsok tetszés szerinti szöveget zárhatnak be egymással. Eltekintünk tehát a kémiai kötések természetéből adódó és a IV.4. ábra szerinti energiaminimum helyzetekkel kitüntetett irányok figyelembevételétől. A molekulalánc hőmozgás során változó alakját az iratkapcsoknak a dobások következtében egyre változó helyzete szemlélteti. A valóságban a szomszédos monomer egységek nem állhatnak egymáshoz képest tetszés szerinti térirányban. A szénatomok közti kb. 120° -os kötésszögnek mindig be kell állnia, s még az így adódó lehetőségek sem teljesen egyenértékűek energetikai szempontból.

A modellben alkalmazott egyszerűsítés azonban nem befolyásolja lényegesen a molekulaméretre adódó becslést.

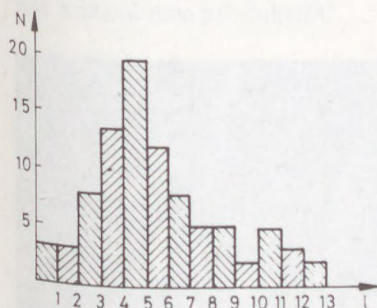
A szabálytalan alakú iratkapocslánc térbeli kiterjedését az első és utolsó láncszem távolságával jellemezhetjük (IV.5. ábra)



IV.5. ábra

Készítsünk 25, (esetleg 16) iratkapocsból összefűzött láncot! Rázzuk össze marunkban és dobjuk lazán az asztalra, majd ismételjük meg ezt kb. százszor! Minden dobás után mérjük meg és jegyezzük le hány iratkapocs-hossznyi távolságra ke-

rült egymástól az első és az utolsó láncszem! Mérési eredményeinket gyakoriságdigramban foglalhatjuk össze. Ilyen diagramot mutat a IV.6. ábra. A vízszintes tengelyen az első és utolsó láncszem távolságát mértük fel iratkapocs-hossz egységeiben. A függőleges tengelyen pedig azt ábrázoltuk, hogy az egyes távolságok hány-szor fordultak elő a száz dobás során. A diagram érdekes szabályszerűséget mutat. A különböző nagyságú láncvégtávolságok előfordulási gyakorisága nem azonos.

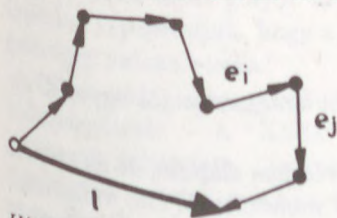


IV.6. ábra

A 25 egységből álló láncnál a kb. 5 iratkapocs-hosszúság fordul elő leggyakrabban, az annál rövidebb, illetve hosszabb értékek előfordulása jóval kisebb. Ez az összkép nem változik, ha a dobások számát tetszőlegesen növeljük, de elveszti határozott jellegét, ha a dobások száma túl kevés. Kísérletünk eredményét a következőképpen értelmezhetjük. Egy adott molekula kezdető és végpontja közötti távolság az egyes láncszemek különböző elhelyezkedései során változik. Vannak azonban olyan l távolságok, amelyek rendkívül sokféle lánchelyzettel valósíthatók meg. Mivel valamennyi lánchelyzet azonos valószínűséggel fordulhat elő, legtöbbször azt az l távolságot észleljük, amely a legtöbbféle láncszem-elrendeződéssel valósítható meg.

1.3. Egy egyszerű becslés

Vizsgáljuk most a fenti modellánc tulajdonságait kísérletezés nélkül, általánosított formában a matematika módszereivel!



IV.7. ábra

A modellánc egységeinek most egységnyi hosszúságú vektorokat (e_i) feleltetünk meg. A kapcsolódó monomer egységek helyzetét az egymás után kapcsolódó egységvektorok rögzítik (IV.7. ábra). A molekulalánc két végpontjának távolsága az

első egységvektor kezdőpontjából az utolsó végpontjába húzott l vektor abszolút értékével adható meg. N db láncszem esetén az l vektort a vektorösszeadás szabályai szerint az

$$l = e_1 + e_2 + \dots + e_N = \sum_{i=1}^N e_i$$

formula adja meg. Az l vektor abszolút értéke

$$|l| = \sqrt{(e_1 + e_2 + \dots + e_N)(e_1 + e_2 + \dots + e_N)}.$$

A négyzetgyökjel alatt elvégezve a beszorzást az

$$|l| = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + 2(e_1 e_2 + \dots + e_{N-1} e_N)}$$

összefüggéshez jutunk. Minthogy az egyes láncszemek hosszát egységnyinek választottuk:

$$e_1^2 = e_2^2 = \dots = e_n^2 = 1.$$

A két vektor szorzatát tartalmazó skalárszorzatok értékét a láncszemek egymással bezárt szöge határozza meg, hiszen

$$e_i e_j = |e_i| |e_j| \cos(e_i, e_j) = \cos(e_i, e_j).$$

Átlagoljuk most a különböző láncelhelyezkedések esetére a láncvégek távolságát! Az egységvektorok négyzetét tartalmazó tagok összege az átlagolástól függetlenül N . A vegyesszorzatokból adódó koszinuszok értékei -1 és $+1$ közt szabadon változhatnak. Mivel két láncszem egyforma valószínűséggel zárhat be egymással α és $\alpha + \pi$ szöget, és mert $\cos \alpha = -\cos(\alpha + \pi)$, azért ezeknek a tagoknak az átlaga zérus.

Az átlagos láncvégtávolság tehát:

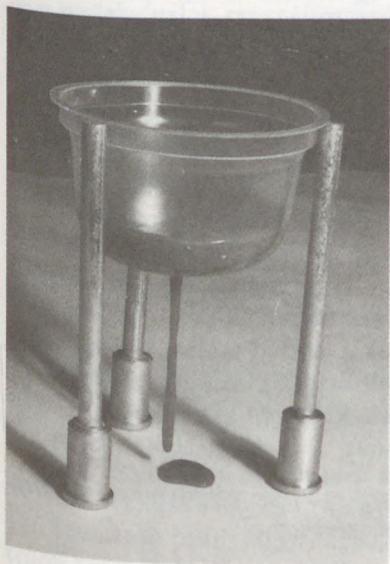
$$l_0 = \overline{|l|} = \sqrt{N}.$$

25 iratkapocsból összeállított láccal végzett kísérlet eredménye jól egyezik az általánosabb matematikai levezetés eredményével.

Az egyszerű modellkísérletből, illetve a hasonló feltevéseken alapuló, de általános számítások alapján arra következtethetünk, hogy az N monomerből álló molekula-lánc esetén a véletlenszerűen összegubancolódott óriásmolekula méretét jellemző átlagos láncvégtávolság a monomerek számának négyzetgyökével arányos ($l \sim \sqrt{N}$). Kísérletileg az óriásmolekulák átlagos térbeli mérete híg oldatokon végzett fényszórásmérésekkel határozható meg. A mérési eredmények jól egyeznek az egyszerű modell alapján kapott eredménnyel.

1.4. Egy különös anyag: az ugrógitt

Az ugrógitt egy láncmolekulákból álló, igen meglepő tulajdonságokat mutató szilikongumi-fajta; tulajdonságai a műanyag korának emberét is ámulatba ejtik. Az anyagot külföldön játékszerként is árusítják "Silly-putty", "Bouncing-putty" fantázianeveken. (Természetesen más fontosabb felhasználási területe is van.) Nézzük hát a látványos produkciót!



IV.8. ábra



IV.9. ábra

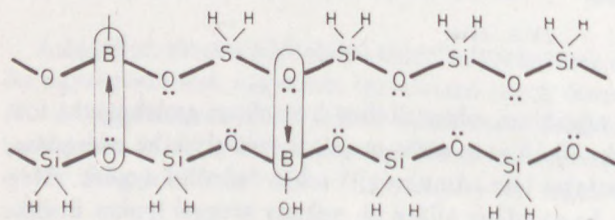
Az ugrógittet a közönséges agyaghoz, plasztilinhez hasonlóan gyúrhatjuk, formálhatjuk. Ha edénybe tesszük, 10-15 perc alatt magától szétfolyik az edényben, felszíne tökéletesen sima és vízszintes lesz. Az ugrógitt tehát "sűrű" folyadék. Még meggyőzőbben bizonyítható ez, ha az edény aljára pl. vékony szeggel lyukat ütünk. A lyukon át az anyag néhány óra alatt kifolyik (IV.8. ábra, fotó).

Gyúrjunk most golyót az ugrógittből és ejtsük kemény vízszintes lapra! Meglepődve tapasztaljuk, hogy a golyó rugalmas gumilabdaként csaknem az ejtési magasságig pattan vissza.

Helyezzük most a golyóvá gyúrt anyagot egy üllőre és mérjünk rá hirtelen erős kalapácsütést! – A "labda" üveggolyóként rideg töréssel szilánkokra hasad. Ugyancsak ridegségét, törékenységét tapasztaljuk, ha az anyagból gyúrt rudacskát kezünkkel hirtelen meghúзва kettétörjük. Ilyen kettétört anyagot mutat a IV.9. ábra (fotó).

Kísérleti bemutatónk eredménye valóban meglepő. Hétköznapi tapasztalataink alapján ugyanis nehezen tudjuk elképzelni, hogy ugyanaz az anyag egyszerre legyen képlékeny, rugalmas és rideg törékeny. Az ugrógitt különös viselkedésének magyarázatát az anyag szerkezetében kell keresnünk.

Az ugrógitt – kémiai nevén dimetil-poli(bór-sziloxán) – egymásba gubancolódott hosszú láncmolekulák kusza szövevénye. A molekulaláncokat egymást váltogatva szilícium- és oxigénatomok építik fel. A szabályos rendet itt-ott megbontja, hogy néhány szilíciumatom helyére bóratomok épülnek be (IV.10. ábra). A bór mellett, hogy a láncban helyettesíti a szilíciumot, a szomszédos láncmolekulák oxigénatomjaival is kapcsolatba lép. A bóratomok a láncban a helyettesített szilíciumhoz hasonlóan négy kötés kialakítását biztosító molekulapályákkal rendelkeznek. A négy molekula közül azonban egyre nem jut vegyértékelektron, hiszen a bór a szilícium négy vegyértékelektronjával szemben csak hárommal rendelkezik. A bóratom üres molekulapályájára a szomszédos láncmolekula egy oxigénatomjának két elektronja épülhet be. Az így létrejövő ún. "koordinatív" kötés ha nem is olyan tartós, mint a láncok atomjait egymáshoz fűző kovalens kapcsolat, mégis erős kötést biztosít a különböző láncmolekulák között. Az ugrógitt tehát nem csak egyszerűen egymásba gubancolódott molekulaláncok halmaza. A bóratomok közvetítésével a molekulaláncok egy összecsomózott fonalakból álló hálózathoz hasonlóan egymással is összekapcsolódnak. Ez a hálószerkezet azonban lényegesen különbözik a képzeletünkben megjelenő "halászhálótól"; a molekulaháló ugyanis egyrészt semmilyen szabályosságot sem mutat, másrészt laza térbeli háló. A molekulákat egymáshoz rögzítő kötéspontok közti láncszakaszok a szabad molekulalánchoz hasonlóan folytonos hőmozgást végezve állandóan változtatják alakjukat. A hőmozgás minduntalan próbára teszi a molekulákat összekapcsoló kötéseket is. Mivel a bór-oxigén kötés nem túl erős ($\Delta E \approx 15 \text{ kJ/mol}$), a molekulaláncok közti kötések időről időre felszakadnak ott, ahol a hőmozgás erőssége véletlenszerűen megnő. Ez a kulcs az ugrógitt furcsa viselkedésének megértéséhez.



IV.10. ábra

Tartós igénybevétel esetén a molekulaláncok lassan elcsúsznak egymáshoz képest, hiszen a hőmozgás hol itt, hol ott szakítja fel a láncokat rögzítő kötéseket. Ott, ahol a kötés éppen felszakad a molekulaláncok a mechanikai feszültség irányában elcsúsznak egymáson. A felszakadt kötések helyett a bóratomok a közelükbe kerülő újabb oxigénatomokkal ismét kialakítják a kötést. Ezzel a mechanizmussal magyarázható az ugrógitt folyadékszerű viselkedése, plaszticitása.

Gyors, lökészerű igénybevétel esetén az anyag gumiszerűen rugalmas. Az erőhatás rövid időtartama ilyenkor nem elegendő ahhoz, hogy a hőmozgás olyan sok kötést tépjén fel, ami már lehetővé teszi, hogy a molekulaláncok maradandóan elcsúszzanak egymáshoz képest. A molekulaláncokat tehát a bór-oxigén kötések egy-

máshoz rögzítik. A hirtelen erőlkés csak az összegubancolódott molekulalánc-szakaszokat egyenesíti ki többé-kevésbé, ezeket az egyenes szálakat azonban a hőmozgás ismét összekuszálja.

Az ugrógitt nagyerejű, gyors kalapácsütésre bekövetkező rideg törésének magyarázata a következő. A láncmolekula alakjának megváltozása az egyes molekulaszakaszok egymáshoz képest történő elfordulásának eredménye. Minden ilyen elfordulás energiabefektetést igényel. Amíg ezt az energiát a hőmozgás energiája fedezi, a molekulalánc alakja könnyen változik, ha azonban a hőmozgás nem biztosítja a molekulalak megváltoztatásához szükséges energiát, a láncmolekula merev. A nagyon gyors erőhatások esetén nincs elegendő idő arra, hogy a hőmozgás közvetítésével a molekulagubanc alakja megváltozzon. Ilyenkor a molekulák merevnek tekinthetők, és mivel sem rugalmas, sem képlékeny alakváltozás nem jöhet létre, a nagy erő hatására az atomok közötti kötések szakadnak fel a legjobban igénybevett helyeken.

1.5. *A mechanikai tulajdonságok és a szerkezet*

Az ugrógitt speciális példája jó alkalmat kínál arra, hogy általánosságban keressük a kapcsolatot a láncmolekulájú anyagok szerkezete és mechanikai tulajdonságai között.

A láncmolekulájú műanyagok kisebb hányada szabályosan egymás mellé rendeződött molekulákból épül fel. Az ilyen anyagok rendezett szerkezete és ennek megfelelően anizotrop (irányfüggő) fizikai tulajdonságai a kismolekulájú kristályos anyagokéhoz hasonlóak. Ez a kristályos polimerek csoportja; szerkezetükkel és tulajdonságaikkal a továbbiakban még foglalkozunk.

A láncmolekulájú anyagok döntő többsége rendezetlenül elhelyezkedő molekulagubancok halmaza. Az ilyen anyagot amorf szerkezetűnek nevezzük. Az amorf polimerek esetén a láncok szabálytalan kusza szövedékében az egyes molekulák térben nem különíthetők el egymástól.

Alacsony hőmérsékleten (ennek értéke anyagonként eltérő) a hőmozgás energiája nem elegendő ahhoz, hogy a molekulák alakja változzék. A mozdulatlanságba dermedt kusza láncmolekulákból álló anyagot üvegállapotúnak mondjuk. Üvegállapotban a polimer rideg, törékeny. Egyes műanyagok szobahőmérsékleten is üvegállapotúak (ezeket nevezzük polimer üvegeknek), mások csak erős hűtés hatására dermednek üveggé. Az ide-oda tekerődő egymást minduntalan keresztező molekulaszálak közt több-kevesebb ponton kölcsönhatás alakul ki. Ezen kötések erőssége, és így élettartama a különböző anyagok esetén változó.

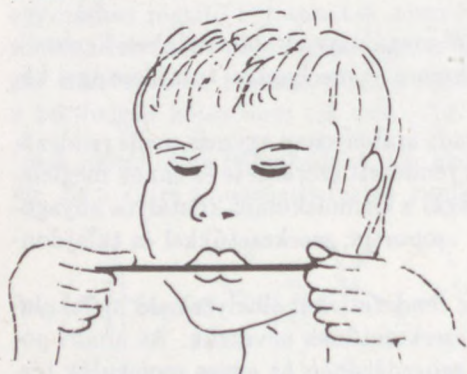
Magasabb hőmérsékleten a hőmozgás állandóan változtatja a molekulaszálak alakját. A kötéspontok közé eső molekulaszakaszok mozgását a kötések és a szomszédos molekulák alig szabályozzák, ezek a szakaszok gyakorlatilag úgy viselkednek, ahogyan azt a szabad láncmolekulára vonatkozóan megállapítottuk. A molekulaláncok közt kialakuló kötések erősségétől függően az ilyen polimerek folyadékként vagy gumyszerűen rugalmas anyagként viselkedhetnek.

Ha a kötések gyengék, és a hőmozgás időről-időre felszakítja azokat, a molekulaláncok már kis deformáló hatásra is maradandóan elcsúsznak egymáshoz képest, az anyag folyik. Ha a kötések a hőmozgás nem szakítja fel, a molekulaláncok egymáshoz rögzítettek. Ilyenkor a deformáló erő csak a kötéspontok közti molekulaláncok alakját változtathatja meg, az ilyen anyagok gumyszerű rugalmas viselkedést mutatnak.

Végezetül az ugrógitt példája jól illusztrálja, hogy a mechanikai tulajdonságok szempontjából általában nem elegendő pusztán a hőmérsékletet figyelembe venni, mert többnyire a deformáció sebessége is lényeges.

1.6. - A gumi

A gumi közismert anyag, amit igen sok helyen és igen sok formában használunk. Széles körű alkalmazása különlegesen nagy rugalmasságának köszönhető. Mielőtt a gumi szerkezeti tulajdonságainak részletes leírásába kezdenénk, ajánljuk, hogy egyszerű befőttesgumi segítségével az Olvasó maga is végezzen el néhány egyszerű kísérletet.



IV.11. ábra

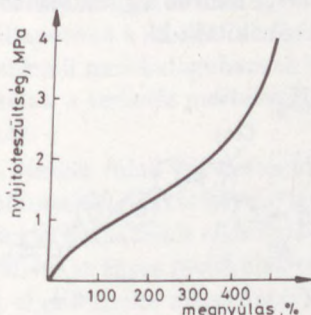
- Vágjunk fel egy befőttesgumi-karikát, és az így kapott gumiszálat nyújtjuk meg, ameddig csak tudjuk!
(Tapasztalhatjuk, hogy a gumiszál aránylag könnyen eredeti hosszának négy-öttszörösére nyújtható. Ezután azonban a további nyújtáshoz szükséges erő ug-rásszerűen megnő, és a szál hamarosan elszakad.)
- A befőttesgumiból készített szálat érintsük finoman az ajkunkhoz és közben gyors mozdulattal nyújtjuk meg, majd kis várakozás után hirtelen engedjük vissza (IV.11. ábra)! (Az ember az ajkával már kis hőmérséklet-változásokat is jól érzékel. Hirtelen nyújtás során a gumiszál érezhetően felmelegszik, elengedéskor pedig lehül.)
- Befőttesgumi-karikára egy drótból hajlított horog segítségével akasszunk kb. 100-200 g súlyt, ami a szálat mintegy kétfél-háromszorosára megnyújtja. Az így megterhelt gumiszálat melegítsük fel gyertyalánggal (IV.12. ábra). (A melegítés hatására a gumi nem kitágul, ahogyan ezt általában megszoktuk, hanem összehúzódik és a súlyt felemeli.)

A leírt egyszerű kísérletek során tapasztalt jelenségeket célszerű néhány kvantitatív mérési eredménnyel is kiegészíteni. A IV.13. ábra grafikonja a gumiszál nyújtásához alkalmazott nyújtó feszültség (σ) és a relatív megnyúlás kapcsolatát tükrözi.

Egy kis ügyeskedéssel ezt a mérést is elvégezhetjük "házilag". A felfüggesztett gumiszál végére egyre nagyobb súlyokat akasztunk, és mérjük a gumiszál hosszát.



IV.12. ábra



IV.13. ábra

Az egyes mérések között célszerű kis ideig várni, hogy a nyújtás hatására kissé felmelegedő gumiszál újra felvegye a környezet hőmérsékletét. Nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy a σ feszültség a szálra akasztott G súly és a szál A keresztmetszete segítségével a

$$\sigma = \frac{G}{A}$$

összefüggésből határozható meg. A szál egyre növekvő nyújtásakor a keresztmetszet fokozatosan csökken. A pillanatnyi keresztmetszet kiszámítható, ha figyelembe vesszük azt a kísérletileg igazolt tényt, hogy nyújtás során a gumi térfogata nem változik. A keresztmetszet az

$$A = \frac{V}{l}$$

formulával számítható, ahol V a gumiszál térfogatát l a pillanatnyi hosszát jelöli.

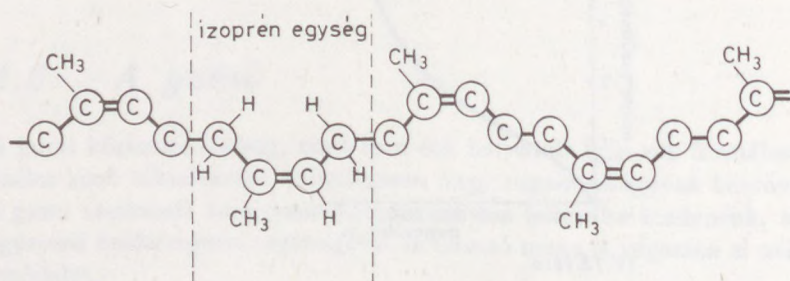
A IV.13. ábra grafikonjáról leolvasható, hogy a gumiszál igen nagymértékben megnyújtható. A nagy megnyúlásokra nem érvényes a Hooke-törvény, azaz nagy nyúlások esetén az erő nem arányos a megnyúlással.

1.6.1. A gumimolekula szerkezete

A gumigyártás természeti eredetű alapanyaga a kaucsuk (caoutchouc). Ez a nyúlósragacsos anyag a trópusokon élő kaucsukfa felhasított kérge alól kifolyó tejszerű nedvből, az ún. kaucsuktejből savak hatására csapódik ki.

A hevea braziliensis vagy para rubber, a "gumifa" Dél-Amerikában őshonos, de Ceylonban és Indonéziában is termesztik. A gumifák nedvéből füstöléssel készített

gumi igen régóta ismert. Bár Európába csak Amerika felfedezése után jutott el, számos adat utal arra, hogy már a mayák és az aztékok is játszottak gumilabdával. Tudományos érdeklődést a gumi iránt azonban csak 1736 után mutat a Francia Akadémia, amikor egy Peruba küldött expedíció vezetője Charles de la Condamine felhívja a figyelmet a gumi felhasználására. Majdnem egy évszázadnak kell azonban eltelti, míg az első jelentős, gumiból készült ipari termék is elkészül. (Thomas Hancock 1820-ban ruhagumit gyárt.) Ezután a gumi térhódítása egyre gyorsabbá válik, s a műanyagok jelenleg sem szorították ki.



IV.14. ábra

De térjünk vissza a kaucsuk mikroszerkezetéhez. A kaucsuk hosszú, több mint százezer szénatomot tartalmazó molekulaláncokból álló anyag. A láncok több tízezer izoprén egységből épülnek fel. A IV.14. ábra egy ideálisan egyenes láncszakaszt mutat a papír síkjára vetítve. A rajzon szaggatott vonalakkal közrezárva emeltük ki a láncot építő monomert (izoprént). A valóságban a molekulalánc sohasem ilyen egyenes, hanem szabálytalan alakú molekulagombolyag, amelynek alakja folytonosan változik. A természetes kaucsuk sokszorosan egymásba gubancolódott molekulákból áll, a láncok közt azonban nincs számottevő kötés. A gumi-gyártás során az egymást átjáró molekulagombolyagokat erős kémiai kötésekkel egymáshoz kapcsolják. Ezt az eljárást nevezik vulkanizációnak. Vulkanizáláskor a kaucsukot több-kevesebb hozzáadagolt kénporral együtt hevítik. A magasabb hőmérsékleten az izoprén egységekben lévő kettős kötések felszakadnak, és kémiai kötés jön létre az izoprén és a kénatomok közt. A kétvegyértékű kén egyszerre két izoprén egységhez kapcsolódik, és így összekapcsolja a szomszédos láncmolekulákat. A kaucsukmolekulát összekapcsoló kénatomokat, összekötő szerepükre utalva kénhidaknak nevezzük. A gumiban tehát a láncmolekula-gubancokat a kénhidak közvetítésével erős kovalens kötések kapcsolják össze, amelyek megakadályozzák, hogy a szomszédos molekulaláncok szabadon elmozduljanak egymáshoz képest.

A kaucsukfa nedvéből készített természetes gumit, ma már egyre inkább háttérbe szorítja a vegyi gyárakban mesterségesen előállított szintetikus poliizoprénből készült sokféle műgumi. A szintetikus gumik kémiai összetételüket tekintve általában kissé eltérnek a természetes gumitól, a kénhidakkal összekapcsolt molekulaláncok fizikai tulajdonságai azonban a mű- és természetes gumik esetén teljesen hasonlóak.

1.6.2. A gumi rugalmassága

A legelterjedtebben használt gumit kevés kén hozzáadásával vulkanizálják. Az ilyen, gyengén vulkanizált gumiban a kénhidak száma csekély, csak arra elegendő, hogy a molekulaláncokat egymáshoz rögzítse, nem befolyásolja azonban a kénhidak közé eső láncszakaszok szabad hőmozgását. Jó közelítéssel elfogadható, hogy a kénhidak közé eső molekulaszakaszok pontosan úgy viselkednek, mint egy szabad láncmolekula. Terheletlen állapotban a molekula hőmozgását semmi nem gátolja, a molekula a legvalószínűbb méretű molekulagubancná ugrik össze. Deformációkor a felgombolyodott molekulaszálak a terhelés mértékétől és a hőmérséklettől függően többé-kevésbé kiegyenesednek.

A terhelés növekedése a láncok mind tökéletesebb kinyújtása irányában hat. A növekvő hőmérséklet a hőmozgás élénkülésével jár, ami a molekulaláncok összekuszálását eredményezi, a két hatás tehát ellenkező értelmű változást okoz a gumimolekula szerkezetében. Mivel az egyes molekulaláncok a kénhidak rögzítő hatása miatt nem mozdulhatnak el, a terhelés megszűntével a gumiszál visszanyeri eredeti alakját.

Az elmondottak ismeretében egyszerű méréssel megbecsülhetjük, hogy a befőttesgumiban két kénhíd között átlagosan hány izoprén egységből áll a lánc. Meggondolásunkat arra a közelítésre alapozzuk, hogy a kénhidak közti láncszakaszok szabad molekulaláncként kezelhetők. E szerint nyújtatlan állapotban két kénhíd átlagos távolsága arányos $\sqrt{N}$ -nel, ahol N jelöli az izoprén egységek keresett számát. Mivel a befőttesgumi-szál adott számú szabad láncszakaszból áll, a nyújtatlan gumiszál hosszára is felírható a

$$l_0 \sim \sqrt{N}$$

arányosság. Nyújtsuk meg a gumiszálát egészen addig, amíg egyáltalában nyújtható. Modellünk szerint ekkor az összes láncot kiegyenesítettük, azaz minden molekula teljes hosszával a gumiszál hosszirányában fekszik. A megnyújtott gumiszál l hossza most az izoprén egységek számával egyenesen arányos:

$$\frac{l}{l_0} = \sqrt{N}.$$

Ha tehát a nyújtatlan és a teljesen kinyújtott gumiszál hosszát megmérjük, a két adat hányadosa éppen a két kénhíd közé eső izoprén egységek átlagos számának négyzetgyökét adja meg.

Befőttesgumival végzett kísérlet során 8 cm hosszú gumiszálát 36 cm hosszúságúra nyújtottunk. A fenti gondolatmenet szerint számolva tehát a gumiban az átlagos szabad lánc (ami két híd közé esik) közel 20 izoprén egységből áll.

Az egyszerű meggondolások alapján kapott becslés, bonyolult mérésekkel is igazolható reális eredménynek bizonyul. Ez az egybeesés is bizonyítja, hogy az óriásmolekulák szerkezetét értelmező láncmodell helyes. Az 1.2. fejezetben leírt, 25 ta-

gú iratkapocslánccal végzett modellkísérlet tehát a befőttesgumi molekuláinak szabad láncát is jól modellezi.

1.6.3. A gumiszál energiamérlege

Egy fizikai rendszer energiamérlegét a termodinamika

$$\Delta U = Q + W$$

első főtétele alapján adhatjuk meg. Az I. főtétel szerint a rendszer belső energiájának ΔU megváltozása, a rendszerrel közölt Q hő és a rendszeren végzett W mechanikai munka összegével adható meg. A befőttesgumival végzett bevezető kísérletek értelmezéséhez a termodinamika első főtételét a gumiszálra kell alkalmaznunk.

Vizsgáljuk először a gumiszál nyújtását állandó hőmérséklet mellett (ilyen a lassú nyújtás)! A nyújtás során a gumiszál belső energiája nem változik, $\Delta U = 0$. A gumiszál belső energiája a molekulák energiájából tevődik össze, ez pedig az egyes láncdarabok egymáshoz viszonyított elfordulási helyzetétől függ (lásd IV.4. ábra). A nyújtatlan gumiszál összegubancolódott molekuláiban mindhárom lehetséges elfordulási helyzet közel azonos számban szerepel. A gumiszálát megnyújtva a molekulák kiegyenesednek. Ez a kiegyenesedés a szomszédos "láncszemek" kedvezőbb helyzetbe fordulásával megy végbe. Mivel kezdetben a különböző elforgatott helyzetek a térben teljesen rendezetlenül, minden irányban egyenlő valószínűséggel találhatók, az erőhatás irányába való elfordulások azonos mértékben érintenek minden kötést. A kezdetben alacsonyabb energiájú helyzetben lévő molekularészek átfordítása a molekula energiáját növeli, míg a magasabb energiájú helyzetek alacsonyabb energiájú konfigurációba történő átbillenése a molekula energiáját ugyanilyen mértékben csökkenti. A gumiszál belső energiája nyújtás során valóban nem változik meg.

Jogos tehát a kérdés: Mire fordítódik a nyújtás során befektetett munka?

A válasz a következő: A gumiszál nyújtása során befektetett munka hő formájában átadódik a környezetnek, miközben a rendezetlen molekulaláncokban rendeződési folyamatok is lejátszódnak. Ez a rendeződés mennyiségileg a rendszer entrópiájának változásával adható meg.

Az entrópia (S) a fizikai rendszerek mikroszerkezeti rendezetlenségének mértéke. Állandó hőmérsékleten, reverzibilis módon bekövetkező lassú folyamatok (lassan, csupa egyensúlyi állapotokon keresztül történő folyamatok) esetén az entrópia megváltozása a felvett hő és a hőmérséklet hányadosaként adható meg. A termodinamika első főtétele szerint tehát esetünkben $\Delta U = 0$ miatt

$$T\Delta S = W,$$

amiből a szál nyújtása során bekövetkező entrópiaváltozás közvetlenül megadható.

Bevezető kísérletünkben a gumiszál hirtelen nyújtáskor felmelegedett, visszaengedéskor lehűlt. Hogyan értelmezhető ez a jelenség?

A gyors deformáció során nincs elegendő idő arra, hogy a gumiszál és környezete közt hőcsere menjen végbe. Az ilyen folyamatokat, amelyek során az első főtételben szereplő Q hőmennyiség értéke zérus, adiabatikus folyamatoknak nevezzük. Adiabatikus folyamatokban a rendszer entrópiája sem változik meg.

Alkalmazzuk az első főtételt a hirtelen megnyújtott gumiszálra! A szál belső energiája nem változik: $\Delta U = 0$, hőcsere nincs: $Q = 0$, a nyújtásra fordított munkavégzés: $W \neq 0$; látszólag ellentmondásra jutottunk az első főtétellel! Az ellentmondás feloldódik, ha figyelembe vesszük, hogy a szál nyújtásakor fellépő ΔS entrópiaváltozás két részből tevődik össze. Az egyik rész, nevezzük ΔS_k konfigurációs entrópiaváltozásnak, a molekulaláncok rendezetlenségét jellemzi, és értéke nyújtás esetén negatív. A másik rész az atomok folytonos rezgéséből adódó rendezetlenséget írja le. Gyors nyújtás során a $Q = 0$ feltétel csak úgy teljesülhet, ha a konfigurációs entrópia csökkenését az atomok rezgésével kapcsolatos entrópiatag növekedése kompenzálja. A hirtelen megrántott gumiszálban a láncok rendeződése az atomok hőmozgásának élénkülésével jár. A szál felmelegedésére tehát a fokozódó atomi rezgéssel adhatunk magyarázatot. A megfeszített gumiszál hirtelen elengedésekor a molekulaláncok rendezetlensége nő, a konfigurációs entrópia, ΔS_k megváltozása pozitív. Ezt kompenzálандó az atomi hőmozgás intenzitása csökken, a gumiszál lehül.

A fenti gondolatmenet alapján a gumiszál nyújtása során várható hőmérsékletváltozás nagysága is megbecsülhető.

A probléma megoldásához modellezzük a gumiszálát egy N egységből álló láncsal, és határozzuk meg, hogy mennyivel változik a lánc konfigurációs entrópiája, ha teljesen kifeszítjük!

A statisztikus fizika szerint az entrópia megváltozása a

$$\Delta S = k \ln \Delta Y$$

formulával adható meg, ahol ΔY a rendszer mikroállapot-számának (Y) megváltozása.* Mennyit változik a mikroállapotok száma, miközben a gumiszálát megfeszítjük? A kifeszített szál egyetlen mikroállapottal valósítható meg. Y tehát azonos a nyújtatlan szál mikroállapotainak a számával. A statisztikus fizika szerint az összes mikroállapotok száma nagyságrendileg megegyezik a legvalószínűbb állapothoz tartozó mikroállapotok számával. Első feladatunk tehát az, hogy meghatározzuk a nyújtatlan gumiszál esetén a mikroállapotok számát. Okoskodjunk egy dimenzióban! Ilyen egyszerűsítés esetén a mikroállapotok száma $Y = 2^N$, hiszen minden láncszem az előzőhöz képest kétféleképpen (előre vagy hátra) helyezkedhet el. Ez az eredmény a térbeli molekula mikroállapotaira is elfogadható közelítés, így a keresett entrópiaváltozás a

$$\Delta S_k = -kN \ln 2$$

összefüggéssel adható meg.

* A mikroállapot a rendszer teljes részletességgel leírt állapota. Esetünkben azt jelenti, hogy minden izoprén láncszem pontos helyzetét ismerjük.

A konfigurációs entrópia csökkenését a rezgési entrópiánövekmény kompenzálja, ennek értéke tehát

$$\Delta S_r = kN \ln 2.$$

A molekuláris rezgés intenzitása a ΔS_r entrópiaváltozáshoz rendelhető,

$$T\Delta S_r = kNT \ln 2$$

hőnek megfelelően növekszik. A $kNT \ln 2$ hőmennyiséget elosztva a gumiszál hőkapacitásával (egységnyi hőmérsékletváltozáshoz szükséges energia) megkaphatjuk a hőmérsékletváltozás értékét.

Ha egy monomer egység n lineáris oszcillátorral helyettesíthető, akkor az N egységből álló lánc rezgési energiája

$$E_{\text{rezgési}} = nNkT,$$

mert egy lineáris oszcillátor 2 szabadsági fokkal rendelkezik, s az egy szabadsági fokra jutó energia $\frac{1}{2}kT$.

Ebből a lánc

$$C = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

hőkapacitására

$$C = \frac{nNk(T + \Delta T) - nNkT}{\Delta T} = nNk,$$

egy molekula hőkapacitására pedig

$$C_{\text{mol}} = nk$$

adódik. Az utóbbi összefüggések segítségével a gumi makroszkopikusan mért fajhőjéből megbecsülhetjük a monomer egységre jutó lineáris oszcillátorok számát. Mérési adatok szerint a gumi fajhője $C \sim 2 \text{ kJ/kgK}$, a monomer egység tömege kb. 10^{-25} kg , vagyis a monomer hőkapacitása

$$nk = 2 \cdot 10^{-25} \text{ kJ/K},$$

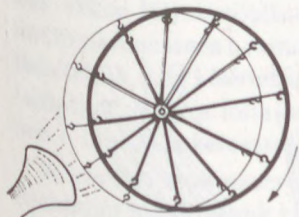
ahonnan az oszcillátorok számára $n \sim 15$ adódik. (Ez közelítőleg a monomer egység atomjainak számával egyezik meg.)

A hirtelen nyújtásnál a gumi melegeledését a fentiek alapján felülről becsülve kb. $10\text{-}15^\circ \text{C}$ -nak várhatjuk.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy termoelemes mérésekkel ennél az értéknél jóval kisebb, 5-6 K hőmérsékletváltozást sikerült csak mérnünk. A modell egyszerűsítései tehát 50-60%-os hibát okoztak.

1.6.4. Egyszerű hőerőgép gumiszálakból

A termodinamika egyik alapkérdése az, hogy hogyan alakítható át a hő mechanikai munkává. Az energiaátalakítás ilyen formáját megvalósító hőerőgépek vizsgálata elméleti és gyakorlati szempontból is egyaránt fontos. Bár gyakorlati jelentősége nincs, elméleti szempontból mégis érdekes, hogy a gumiszál hőmérsékletváltozásra bekövetkező hosszváltozását kihasználva is készíthetünk működőképes hőerőgépet.* A gép elkészítése egyszerű. Vágjuk ki egy 26-os kerékpár első kerekének küllőiből a középső kb. 15 cm-es részt, és a megmaradt küllőcsavarokból hajlítsunk kampókat! Az eredeti küllőből készült két kampó közé feszítsünk néhány modellező gumiszálát! Ilyen módon a kerék eredeti küllőit "gumiküllőkkel" cseréljük fel. A kerékagyat vízszintesen állványba fogva egyensúlyozzuk ki a kereket az abroncsra cseppentett gyertyával! Ezzel hőerőgépünk elkészült. A gép üzembeállítása sem bonyolult. Helyezzük a kerék mellé aszimmetrikus helyzetben (IV.15. ábra) egy hősugárzó infralámpát és kapcsoljuk be – a kerék lassú forgásba jön.



IV.15. ábra

A gumigép működési elve a következő. Az infralámpa melegétől a kerék egyik oldalán a gumiszálak megrövidülnek és a kerékabroncsot a tengely felé elhúzzák. Így elromlik a kezdeti tengelyszimmetria, és az abroncs tömegközéppontja áttolódik a lámpával ellenkező oldalra. A tömegközéppont eltolódása miatt forgatónyomaték lép fel, amely a kereket elfordítja. A kerék elfordulásával a megrövidült gumiszálak kikerülnek a lámpa sugárzási tartományából, lehűlnek és elernyednek.

Természetes ezzel egyidejűleg új "hideg" gumiszálak kerülnek a lámpa elé, és felmelegedve összehúzódnak. Ez biztosítja a további forgáshoz szükséges forgatónyomatékot. A gép természetesen nem örökmozgó, a forgás csak addig tart, míg a gumiszálak között hőmérsékletkülönbség van.

* A gumigép működésének leírása megtalálható Feymann: Mai Fizika sorozatának 4. kötetében is.

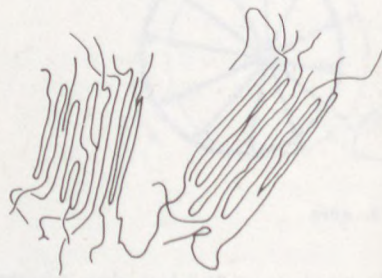
1.7. Rendeződött óriásmolekulák – kristályos polimerek

Az eddigiekben olyan makromolekulájú anyagokkal foglalkoztunk, amelyekben a molekulák térbeli rendeződése semmiféle szabályosságot sem mutatott. A rendezetlenség oka, hogy a molekulák között ható kötőerők általában gyengék. A szomszédos láncmolekulák atomjai között fellépő erők a dielektromos polarizáció következtében jönnek létre, oly módon, hogy a közeli szomszédságba került atomok megváltoztatják egymás töltéseloszlását úgy, hogy a két, eredetileg semleges atom kölcsönösen ellentétes elektromos töltést mutat a másik felé, és így vonzani kezdik egymást. A molekulák közt néhány pontban kialakuló kötés elhanyagolható. Ha azonban egyszerre sok atom kerül egymás közelébe, akkor az egyenként gyenge kötések megsokszorozódott hatása szilárd kapcsolatot hoz létre a molekulaszakaszok között. Ekkor a láncok szorosan egymás mellé illeszkedve rendeződnek, a polimer kristályos szerkezetűvé válik.

A rendeződés általában egy-egy lánc fölhajtogatásával indul meg, majd egyre újabb molekulák csatlakozásával az egész anyagra kiterjedhet. A "kristályos" szerkezetű műanyagokban a molekulaláncok rendezettsége azonban sohasem tökéletes, viszonylag nagy tartományokat rendezetlen, kuszált molekulaláncok töltenek ki. A kristályos polimerek szerkezetét a IV.16. ábra szemlélteti.



IV.16. ábra



IV.17. ábra

A kristályosodásnak elsősorban szerkezeti feltételei vannak. A láncoknak olyan, általában kis méretű atomcsoportokból kell állniuk, amelyek jól egymás mellé illeszkedhetnek a szomszédos láncszakasz hasonló atomjaival.

Lényegesek azonban a kristályosodás körülményei is. Vizsgáljuk ezt néhány egyszerű példán!

A háztartásban használt celofánfólia rendeződött óriásmolekulákból áll – kristályos szerkezetű. A kristályosodás a fóliagyártás során következik be. A gyártás során az óriásmolekulákat tartalmazó sűrű oldatot keskeny résen préselik át. A résen átjutó molekulaláncok, mint a húsleves cérnametéltszálai a leves öntésekor, kinyúlva egymás mellé rendeződnek. A rendeződött szálak közül az oldószerrel párologtatják, és kész a fólia.

A csomagolóanyagként, kertészetben stb. használt polietilénfólia szintén kristályos szerkezetű. A fóliát olvadékból állítják elő. Az anyag kristályosodása már az olvadéban megindul, néhány molekulalánc felhajtogatódásával kötegszerű kristályok, ún. "micellák" képződnek (IV.17. ábra). A fóliagyártás során ezek a kristályok hossztengetyűkkel párhuzamosan rendeződnek.

1.8. Színpompás fóliacsíkok

A kristályos szerkezet következménye, hogy az anyag számos fizikai sajátossága irányfüggővé válik. Ilyen anizotrop fizikai tulajdonság az 1.6. fejezetben tárgyalt optikai kettős törés is. A kettős törés a celofán- és a polietilénfólia esetén is megfigyelhető. Az alábbi egyszerű kísérleteket bárki megismételheti két fotózáshoz használt polárszűrő segítségével.

Keresztezett állású polárszűrők közé helyezünk celofánfóliát! A keresztezett szűrőkön keresztül nem jut fény a szemünkbe, a látótér sötét. Ha azonban a szűrők közé celofánréteg kerül, a látómező kivilágosodik és meglepő módon a hártát színesnek látjuk. Forgassuk el most a fóliát a szűrők közt úgy, hogy közben a polarizátorok eredeti keresztezett állása ne változzék. A forgatás közben a fólia fényáteresztése megváltozik, egyszeri körbeforgatás alatt négy helyzetben (ezek 90° -onként követik egymást) a képmező teljesen elsötétül. Megfigyelhető, hogy a fóliát akkor látjuk sötétnek, amikor a hártya húzási iránya (ezt a fólián látható finom párhuzamos nyomok jelzik) megegyezik valamely szűrő polarizációs irányával. Ismételjük meg kísérletünket több rétegben egymásra helyezett fóliával is. Tapasztalhatjuk, hogy a fólia színe a rétegek számától függ és sajátosan változik, miközben a mintát a keresztezett állású szűrők közt forgatjuk.

A kísérlet értelmezésénél az 1.6. fejezetben a csillámlemez kettős töréséről mondtakból indulhatunk ki. A celofánfólia a kristályos csillámlemezhez hasonlóan optikailag kettős törő anyag. A fóliára eső fény az anyag belsejében két egyásra merőlegesen polarizált fénysugárban terjed tovább. A két sugár haladási iránya azonos, terjedési sebessége azonban különböző. A fény terjedését a fóliában az anyag szerkezete szabja meg. Kísérletünk szerint az egymás mellé rendeződött kinyújtott molekulák hossztengetye, illetve az erre merőleges irány felel meg a két fénysugár polarizációs irányainak. A különböző vastagságú rétegek színeltérésének magyarázata megegyezik a csillámlemez kettős törésekor már elmondottakkal.

Ismételjük meg polietilénfóliával a fenti kísérletet! Megállapítható, hogy ez az anyag is kettős törő, valamint, hogy az anyagban terjedő két poláros fénysugár közül az egyik polarizációs iránya a fólián megfigyelhető nyomok irányába esik, a másik pedig arra merőleges. A polietilénfóliával azonban érdemes tovább kísérletezni!

Vágjunk ki kb. 1 cm széles, 10 cm hosszú csíkot egy polietilén uzsonnászacskóból úgy, hogy a fólián észrevehető hengerlési nyomok kb. 45° -os szöget zárjanak be a kivágott szalag hossztengetyével. Nyújtsuk meg óvatosan a szalagot! Azt tapasztaljuk, hogy a húzás során a szalagon hirtelen befűződés képződik, és ez a keskenyedés fokozatosan kiterjed a szomszédos tartományokra (IV.18. színes fotó). Amíg a befűződés végigfut a szalagon, a fóliát gyakorlatilag változatlan erővel, eredeti

hosszának többszörösére nyújthatjuk. A teljes hosszában elvékonyodott szalag már csak elhanyagolható mértékben és egyre nagyobb deformáló erő kifejtésével nyújtható tovább, sőt hamarosan el is szakad.

A fólia elvékonyodásakor a felhajtogatódott molekulaláncokból álló kristályos szerkezet megváltozik. A hajtogatott szerkezet lebomlik és a láncok kiegyenesedve, a húzás irányában rendeződnek. Ez a mikroszerkezeti átalakulás gyakorlatilag állandó erő hatására következik be. A deformáló erő rohamos növekedése azt jelzi, hogy már valamennyi molekula kinyújtva "irányban áll". A molekulaláncok megváltozó irányítottságáról megbizonyosodhatunk, ha a fólia nyújtását keresztezett polárszűrők között megismételjük. Kiinduláskor forgassuk a nyújtatlan fóliát olyan helyzetbe, hogy a csík hosszstengelyével kb. 45° -os szöget bezáró hengerlési nyomok az egyik szűrő polarizációs irányával essenek egybe! Ilyen helyzetben az egész látómező sötét. Nyújtsuk meg most óvatosan a fóliát anélkül, hogy helyzetét a polárszűrők közt megváltoztatnánk! A húzás hatására befűződő fóliaszakasz hirtelen színesen kivilágosodik. Teljesen nyújtott állapotban a szalag homogén egyszínű. Forgassuk el most a megnyújtott fóliát a polárszűrők között addig, míg az elvékonyodott szalag sötétté válik. Tapasztalhatjuk, hogy ehhez kb. 45° -os elfordítás szükséges, és ilyen helyzetben a fóliacsík hosszstengelye valamelyik szűrő polarizációs irányába esik.

Az óriásmolekulák orientálódását, poláros fénnel, a fröcsöntéssel készülő átlátszó műanyag tárgyakban is kimutathatjuk. Helyezzük például keresztezett polárszűrők közé a kereskedelembe kapható legolcsóbb egyenes vonalzó. Az átvilágítás során az anyag inhomogenitása főként a 11 cm-es osztórész környékén szembetűnő (IV.19. színes fotó). Alaposabban megvizsgálva a vonalzó, 11 cm-nél látható, illetve kitapintható egy kis műanyag csonk. Itt csatlakozott az öntőformához az a kis cső, amelyen keresztül a viszkózus műanyagfolyadék a formába jutott. A beömlőnyílás környékén a molekulák irányítódnak, ezt bizonyítja a polárszűrők segítségével kimutatható kettős törés. A műanyagvonalzó "fogyéscső", minden kisiskolás tudja, hogy a vonalzó 11 cm-nél igen könnyen eltörik. Ez a tapasztalat arra hívja fel a figyelmünket, hogy a rendezett láncmolekulákból álló anyag mechanikai tulajdonságai lényegesen különböznek a rendezetlen molekulákból felépíthető amorf anyag tulajdonságaitól.

Rendezett láncmolekulákból állnak a különböző műszálak is. A láncok itt a szál hosszstengelyének az irányában rendeződnek. Nagyrészt kristályos szerkezetű azonban a legtöbb olyan mindennapos használatú műanyag tárgy is, amely nem rideg törekeny, melegítve pedig lággyá, képlékennyé válik. Ezek közül a legismertebbek a fröcsöntött polipropilén vagy PVC-edények, gyerekjátékok.

Miért törhetetlen?

Ezen anyagok széles körű felhasználása kedvező mechanikai tulajdonságaiknak köszönhető. A kristályos polimerekből álló tárgyak szilárdsága nagy, de e mellett ütésálló, "törhetetlenek". E két fontos tulajdonság közül a nagy szilárdság a szoros egymás mellé rendeződött erős kölcsönhatásban lévő molekulaláncokkal magyarázható. Az ütésállóság pedig annak a következménye, hogy a polimerek kristályosodása, a láncok rendezettsége sohasem tökéletes. A kristályosan rendezett tartományok közt viszonylag nagy a kuszált molekulákat tartalmazó gumyszerű álla-

potban lévő láncok térfogataránya is. Az anyagot érő hirtelen ütések hatására ezek a rendezetlen molekulaláncok könnyen elmozdulnak és ezzel felemésztik az ütés energiáját. Minél kevesebb az amorf, gumyszerű tartomány, és minél több a szabályosan rendezett kristályos rész, annál inkább csökken az ütésállóság és válik rideg-
gő a műanyag. Ugyancsak ide kívánczik, hogy amennyiben a hőmérséklet túl alacsony, úgy a műanyagok elvesztik kedvező "törhetetlen" tulajdonságukat. Ez egyszerűen azzal magyarázható, hogy ilyen körülmények közt a láncmolekulák már merevek, ezért a rendezetlen molekulaláncokat tartalmazó részek inkább üvegnek, semmint gumiállapotúnak tekinthetők.

2. Feszültségoptika

A rendezetlen összekuszálódó molekulaláncok mechanikai deformáció hatására több-kevesbé irányítódnak, rendeződnek. Számos átlátszó műanyagfajta esetén a molekulák rendeződésével az anyag optikai tulajdonságai megváltoznak; az eredetileg optikailag izotrop anyag kettős törővé válik. A kettős törés mértéke a láncok irányítódásától függ. Ezen a jelenségen alapszik az optikai feszültségvizsgálat, másképpen feszültségoptika.

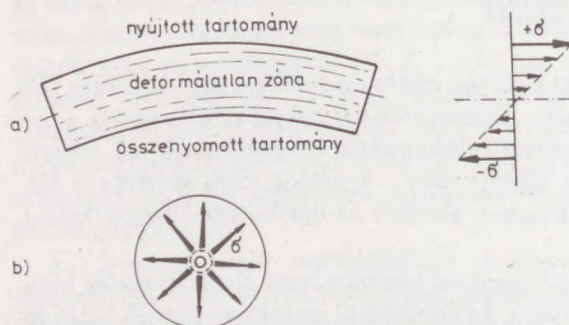
A gépalkatrészek, híd, épület vagy bármilyen tartószerkezet elemei terhelés hatására deformálódnak. A terhelő erőkkel a deformálódott anyagban ébredő belső feszültségek tartanak egyensúlyt. Az egyes alkotórészekben a feszültségállapot nem kizárólag a terhelés függvénye, hanem a test alakjától függően helyről helyre változik. A mérnöki gyakorlatban igen fontos, hogy ismerjék, hogy az egyes alkatrészek hol milyen igénybevételnek vannak kitéve, a test mely részén a legnagyobbak a belső feszültségek. Hiszen az anyag szilárdsága csak addig biztosított, míg ezek a feszültségek el nem érnek egy, az anyagra jellemző határfeszültséget. Bonyolult többirányú terhelés, illetve komplikált formájú alkatrész esetén a helyről helyre változó feszültségek elméleti úton, számításokkal történő meghatározása igen nehéz feladat még a számítógépek világában is. Ennél sokszor egyszerűbb, ha feszültségoptikai modellkísérletek segítségével oldják meg a problémát.

Az eljárás lényege, hogy valamely alkalmas átlátszó műanyagból elkészítik a vizsgálni kívánt gépelem modelljét. Ezt a modellt keresztezett polárszűrők közé helyezve átvilágítják, miközben a valóságos igénybevételnek megfelelően terhelik. A műanyagmodell a terhelés hatására a valódi alkatrészhez hasonlóan deformálódik. Az anyagban fellépő belső feszültségek a minta különböző pontjaiban eltérőek. Ennek megfelelően pontról pontra változik az eredetileg rendezetlen molekulaláncok irányítódása, illetve az ezzel együtt fellépő kettős törés mértéke is. Az átvilágított minta képe sötét-világos (fehér fényű átvilágítás esetén színes) sávokat, foltokat mutat. Ezt a sávrendszert vizsgálva meghatározhatók a műanyagminta belső feszültségviszonyai, majd a hasonlóság elve alapján visszaszámolhatunk a valódi gépelem igénybevételére.

Az optikai feszültségvizsgálat a fizikai vagy mérnöki tudományok más részterületeihez hasonlóan alapos elméleti felkészülést és kísérleti gyakorlatot kíván, ezért itt

nem vállalkozhatunk a témakör részletes leírására. A továbbiakban néhány egyszerű példán keresztül, azt szeretnénk érzékeltetni az Olvasóval, hogy a minta átvilágításával kapható színes sávrendszer – a feszültségoptikai kép – és a minta mechanikai feszültségállapota közt egyértelmű kapcsolat van.

Vizsgáljuk meg milyen feszültségállapot lép fel egy meghajlított téglalap keresztmetszetű hosszú egyenes rúdban (IV.20. ábra)! Osszuk fel gondolatban a rudat a hossz tengelyével párhuzamos rétegekre. A deformáció során a minta középső rétegének hossza nem változik, míg a fölötté fekvő rétegek hosszabbak, az alatta fekvők rövidebbek lesznek. A hajlított rúd deformációja tehát különböző mértékben nyújtott, illetve összenyomott rétegek deformációjára vezethető vissza. Ennek megfelelően a rúdban csak rúd irányú húzó- illetve nyomófeszültségek ébrednek.



IV.20. ábra

Legnagyobb a hosszváltozás a szélső rétegekben, majd onnan középfelé haladva egyenletesen csökken. Ennek megfelelően a középvonaltól távolodva mindkét irányban lineárisan, de ellenkező értelemben változik a feszültség (IV.20. ábra). A hajlítás növekedtével a feszültségváltozás üteme növekszik.

A IV.21. ábra színes fotósorozata egy kereszttezett polárszűrők között átvilágított műanyag lemez-csík feszültségoptikai képét mutatja, miközben a mintát a IV.20. ábrának megfelelően egyre jobban meghajlítottuk. A deformált test feszültségoptikai képe a minta középvonalával párhuzamosan futó színes sávokból áll. A deformáció növekedtével a sávok megsokasodnak és összesűrűsödnek, miközben a minta középvonala mentén mindvégig egy sötét csík húzódik.

Vessük össze a deformált minta fentebb értelmezett feszültségállapotát a feszültségoptikai képpel!

A feszültségoptikai képeken sötét sáv húzódik végig a minta középvonala mentén, ami mint láttuk, nem deformálódott. A középvonal alatt és felett húzódó színesávok mentén a feszültség értéke állandó. A deformáció fokozódásával a színesávok összesűrűsödnek, ez az egyes rétegek közti nagyobb feszültségkülönbségekkel áll kapcsolatban.

Második példaként vizsgáljunk egy kicsit bonyolultabb esetet! Gondoljuk meg, milyen feszültségviszonyok alakulnak ki egy nagy kiterjedésű körlemezben, ha a közepét kifúrjuk és a furatba egy annál nagyobb keresztmetszetű hengeres dugót erőltetünk bele!

Nyilvánvaló, hogy a dugó a lemez anyagát körszimmetrikusan, minden irányban egyenlően feszíti szét. A lemez a dugó környezetében deformálódik a legjobban, távolodva a centrumtól a deformáció rohamosan csökken, egészen addig, míg a körlemez kerülete mentén zérussá nem válik. A deformáló feszültség változását sugárirányban a centrumtól mért távolság függvényében a IV.20. ábra mutatja.

Vizsgáljuk meg a fenti példának megfelelő műanyagmodell feszültségoptikai képét! A IV.22. ábra (színes fotó) fehér fényű átvilágításban, keresztezett polarizátorállás mellett készült.

A felvételen két jelenség figyelhető meg, két egymást merőlegesen keresztező sötét sáv, illetve a feszítő dugót koncentrikusan környező színes gyűrűrendszer. Ha módunk lenne folyamatos kísérletezésre, megfigyelhetnénk, hogy keresztezett polárszűrők közt forgatva a mintát a kép nem változik. Ha a minta áll, de a két polárszűrőt elforgatjuk úgy, hogy közben keresztezett viszonyuk ne változzon, a keresztalakzat együtt fordul a polárszűrőkkel. A színes gyűrűk, akárhogyan is végezzük a forgatást, változatlanok maradnak.

A koncentrikus gyűrűket formázó színsávok értelmezése az előző példánk után egyszerű. A színek a feszültség szempontjából egyenértékű helyeket jelölik ki a mintában. A centrum körül a színsávok sűrűbbek, kifelé haladva ritkulnak, jelezve, hogy a feszültség kezdetben erősebb ütemben, majd távolodva egyre lassabban változik.

A kereszt alakú sötét sávok értelmezése új feladat. A meghajlított rúd példájában ilyen jelenség nem volt, ott a sötét zóna a feszültségmentes és ezért nem kettős törő tulajdonságú középvonalat jelezte. Esetünkben a sötét keresztet formázó sávok helyén az anyag deformálódott.

A sötét sávokat iránsávoknak nevezik és a mintának azon helyein figyelhetők meg, ahol a molekulaláncok rendeződésének iránya egybeesik valamelyik szűrő polarizációs irányával. A molekulaláncok rendeződésének iránya, illetve az erre merőleges irány a deformáció két, úgynevezett főfeszültségi irányával egyezik meg. A főfeszültségek meghatározása egyik legfontosabb feladata a feszültségállapot vizsgálatának.

Feszültségoptikai vizsgálatokra igen sokféle műanyag alkalmas, vannak olyanok, amelyek már a legkisebb deformáció hatására kettős törővé válnak, mások viszont jóval kevésbé érzékenyek. A vizsgálatokat végző szakember a vizsgálandó probléma ismeretében választja ki az adott esetben legalkalmasabb anyagot. Az önálló kísérletezést kedvelő olvasók számára egy igen érzékeny és könnyen hozzáférhető modellanyagot ajánlunk. Ez az anyag a glicerintartalmú zselatinkocsonya, ami kb. 15% zselatint, 25% glicerint és 60% vízből áll. A zselatint forró vízben feloldjuk, majd ehhez a meleg oldathoz keverjük hozzá a glicerint. Az elkészült anyagot lapos, sík aljú üvegtálba melegen öntjük ki úgy, hogy a réteg vastagsága 0,5-2 cm legyen. Lehűtve átlátszó, rugalmas anyagot kapunk, amelynek feszültségoptikai érzékenysége olyan nagy, hogy már a saját súlyának hatására is kettős törővé válik. (Ezt a modellanyagot használják a talaj- és kőzetmechanikai vizsgálatokban, illetve a gumialkatrészekben fellépő feszültségek vizsgálatára, ahol a saját súly hatására bekövetkező feszültségi állapot meghatározása az egyik legfontosabb feladat.)

3. Biopolimerek

A polimer óriásmolekulák nemcsak a szintetikus előállított műanyagok építőkövei, hanem a természetben is előfordulnak. Azt is mondhatnánk, az óriásmolekulák az élet molekulái. A növényi és állati szervezet óriásmolekulákból áll. Ezek alkotják a sejtfalakat, a növények rostanyagát, ott vannak az állatok szőrében, a csontokban, izmokban, kötőszövetekben, de még a vérben is. Óriásmolekulák biztosítják az élet önreprodukáló fennmaradását, megsokszorozódását. A következőkben néhány egyszerű példát ragadunk ki a sok közül, hogy ezeken keresztül érzékeltesük az anyag mikroszerkezetének és a közvetlenül tapasztalható fizikai tulajdonságainak kapcsolatát.

3.1. Legőszibb szerkezeti anyagunk: a fa

A fa hosszú évezredek óta egyik legfontosabb anyaga az emberiségnek. Alapvető jelentőségét még ma is tartja. Sokféle felhasználását kedvező tulajdonságai indokolják. Szilárd, rugalmassága nagy, ütésálló, könnyű, sűrűsége kisebb a víznél ($0,2-0,8 \text{ g/cm}^3$), könnyen megmunkálható; tartós, jól ellenáll a környezet roncsoló hatásainak stb.

Kémiai-fizikai értelemben a fa nem egységes anyag. Különböző kémiai összetételű, eltérő mikroszerkezetű anyagokra választható szét. A fa előnyös tulajdonságai nem tulajdoníthatók kizárólag egyik vagy másik komponensnek, hanem azok sajátos együttesének. Az ilyen anyagokat akár természetes, akár mesterséges eredetűek, a tudomány *kompozit* anyagnak nevezi. (A kompozitokról részletesen szövegtünk a II.8.3. pontban.) Az élő fa szöveteiben a sejtek fala szilárd. A kivágott és elhalt fában a sejtfalak szilárd rendszere tartósaan megmarad, ez határozza meg a fának mint szerkezeti anyagnak a tulajdonságait. A sejtfalak párhuzamosan rendeződött hosszú rostokból állnak. A rostok anyaga láncmolekulájú cellulóz. A cellulózzrostok a lignin és a kémiaiilag nem egészen egységes ún. hemicellulóz-félék amorf állapotú óriásmolekulái közé ágyazódnak be. A fa mechanikai sajátosságai irányfüggőek. A legfontosabb ezek közül a hasíthatóság: a fa "szá irányban" könnyen hasítható, erre merőleges irányban azonban nem. Érdekes, hogy a cellulóz-láncmolekulák éppen a könnyű hasítás irányába rendeződtek. Vizsgáljuk meg kicsit részletesebben, hogyan!

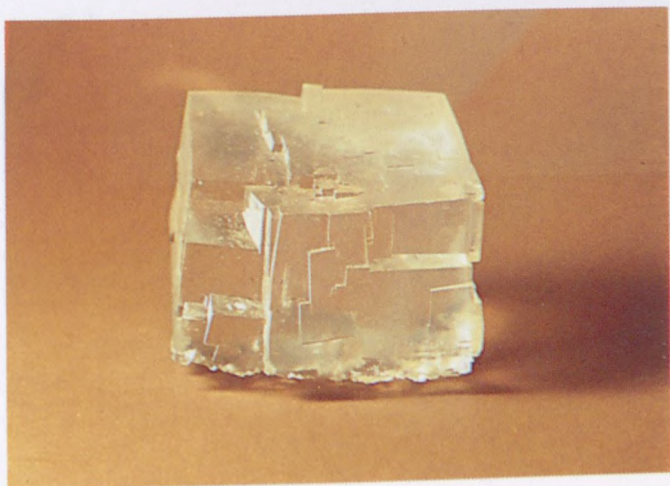
A cellulóz-láncmolekulák szabályosan ismétlődő szőlőcukor-molekulákból (β -D-glükóz) állnak. Minden β -D-glükóz-egység 6 szénatomot tartalmaz. Ezek közül öt egy oxigénatom közvetítésével gyűrűvé kapcsolódik össze, a hatodik oldalról tapad a gyűrűre. A szénatomokhoz hidrogénatomok és poláros OH-csoportok kapcsolódnak. A szőlőcukor-molekulák ún. polikondenzációval kapcsolódnak láncba. (A polikondenzáció során minden újabb β -D-glükóz-egység csatlakozásakor egy H_2O -molekula válik szabaddá.) A két kapcsolódó molekula közt a kötés azáltal jön létre, hogy a két szomszédos egységhez tartozó egy-egy -OH-csoportból, egy önálló vízmolekula kilépésekor egyetlen oxigén marad vissza, amelyik egyik vegyér-

MELLÉKLET

I.1/a. ábra

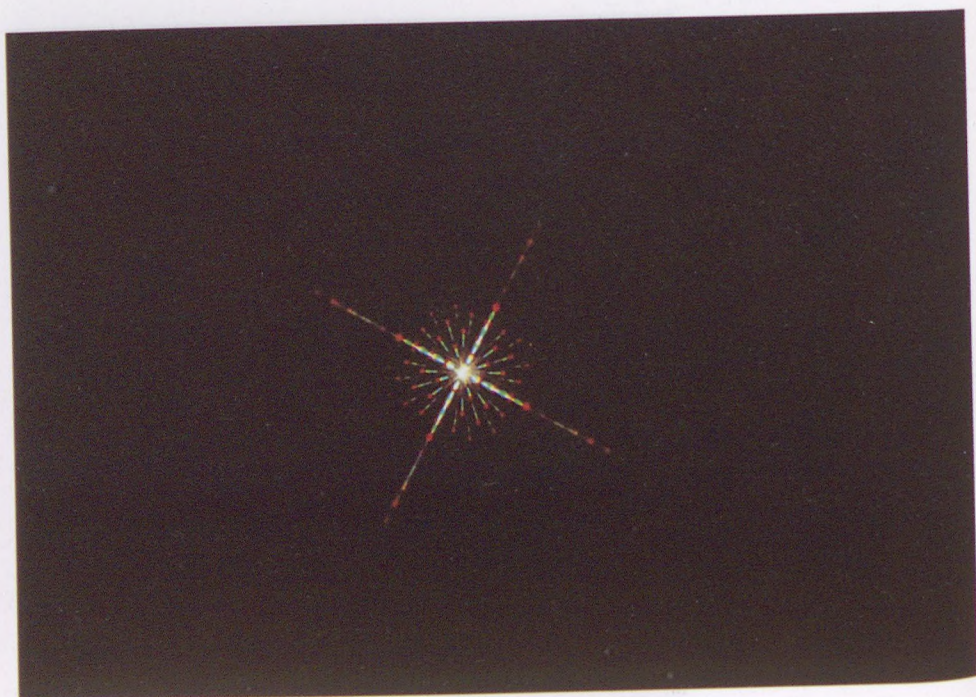


I.1/b. ábra

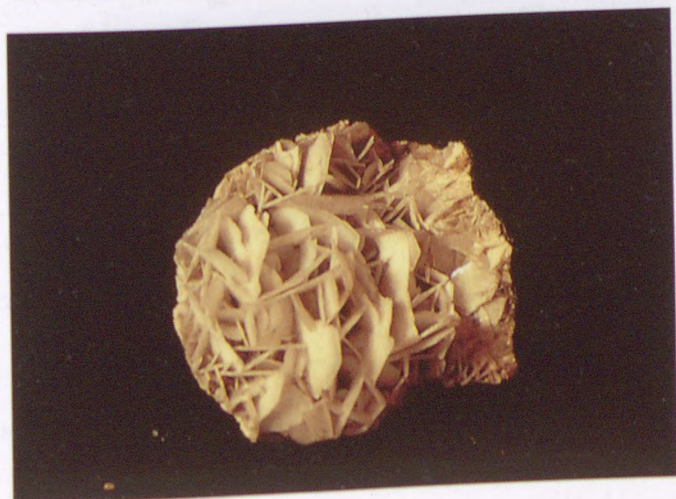


I.1/c. ábra

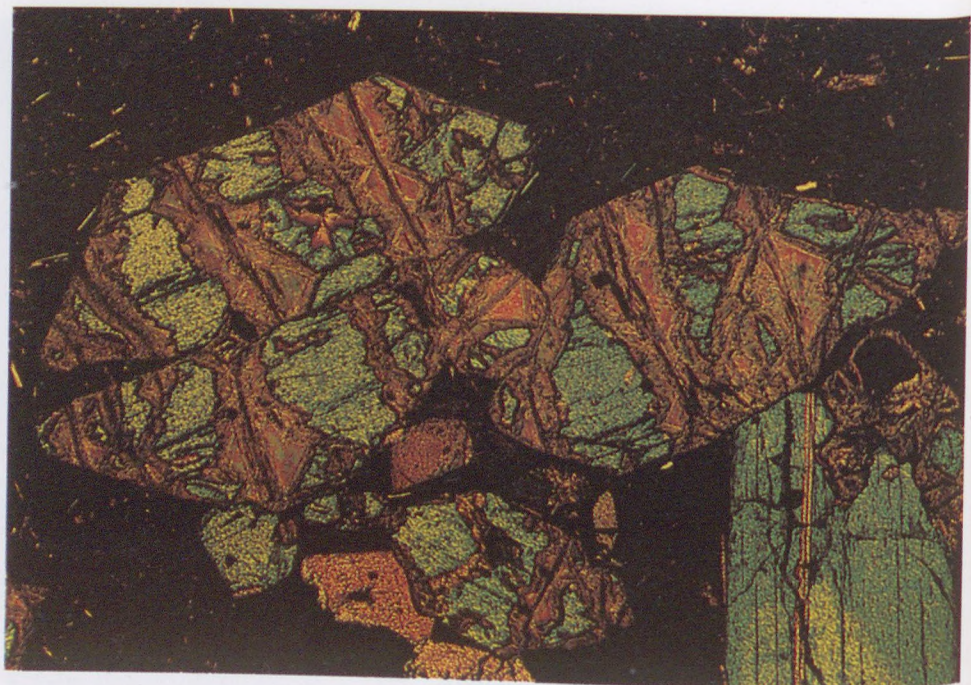




I.4. ábra



I.31. ábra

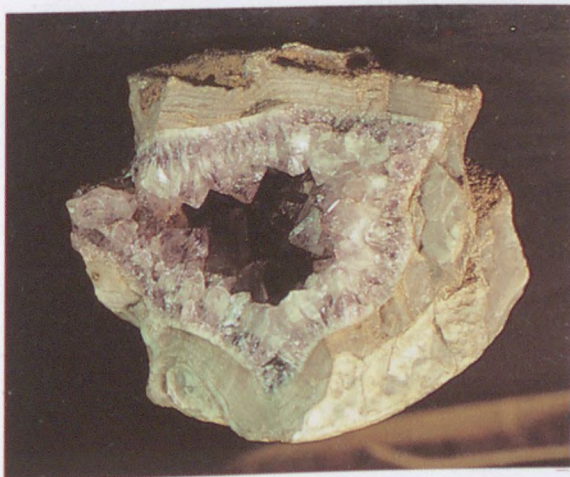


I.38. ábra

I.41/a. ábra

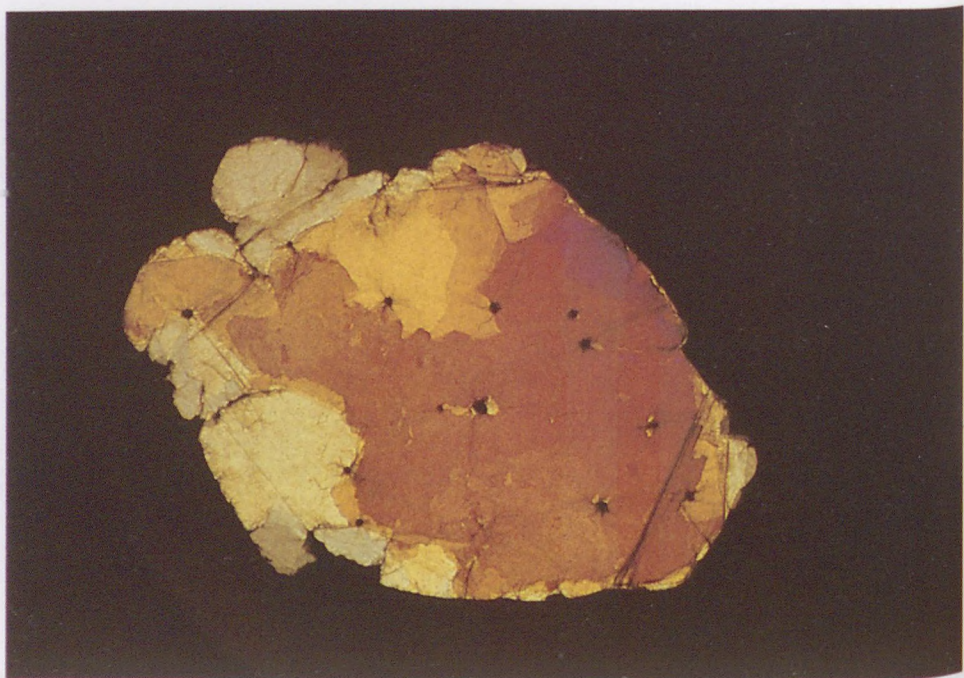


I.41/b. ábra

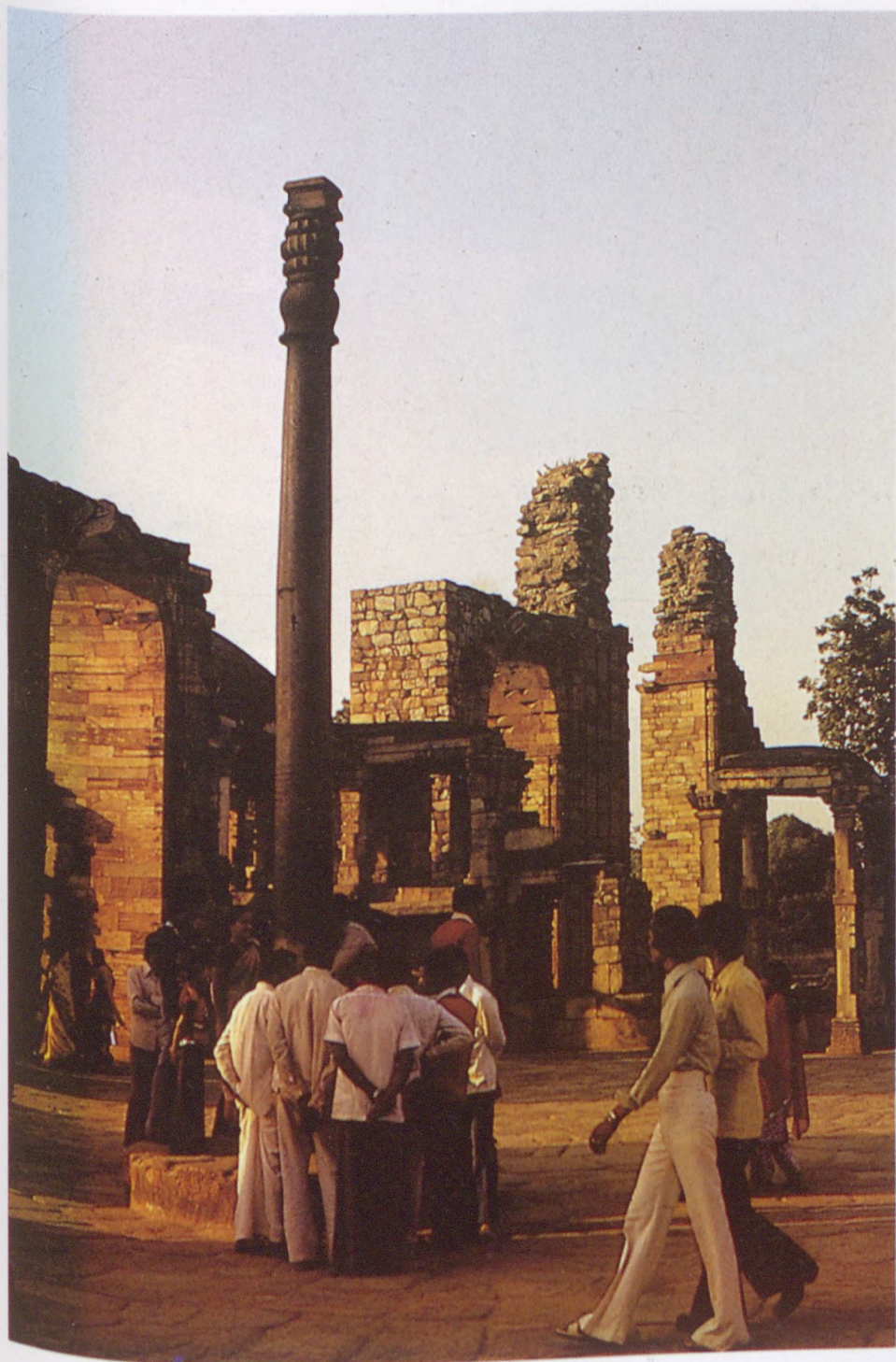


I.41/c. ábra

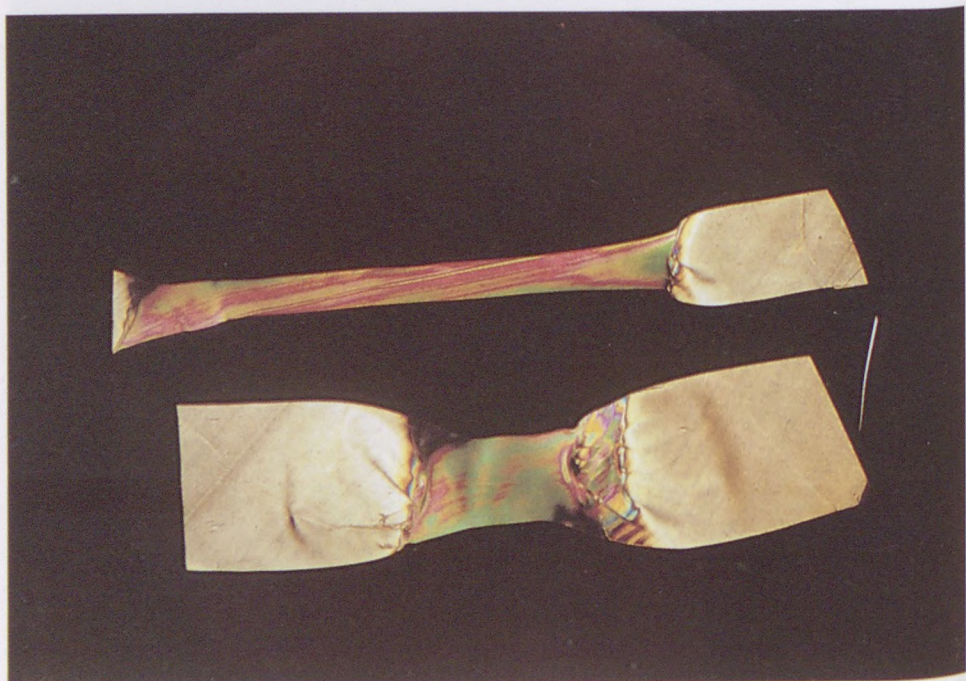




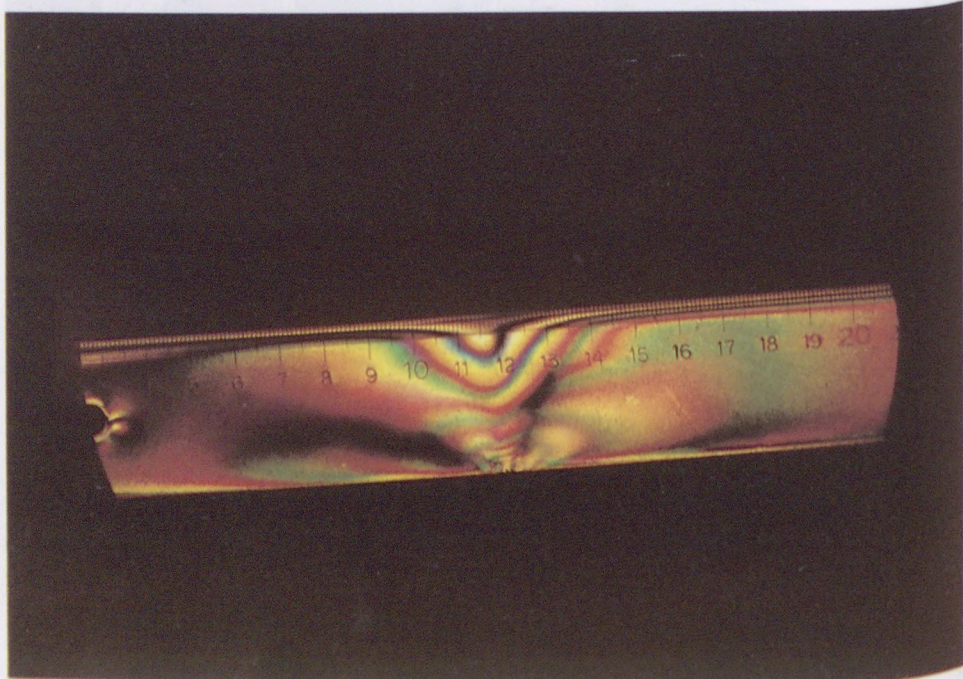
I.48. ábra



II.19. ábra

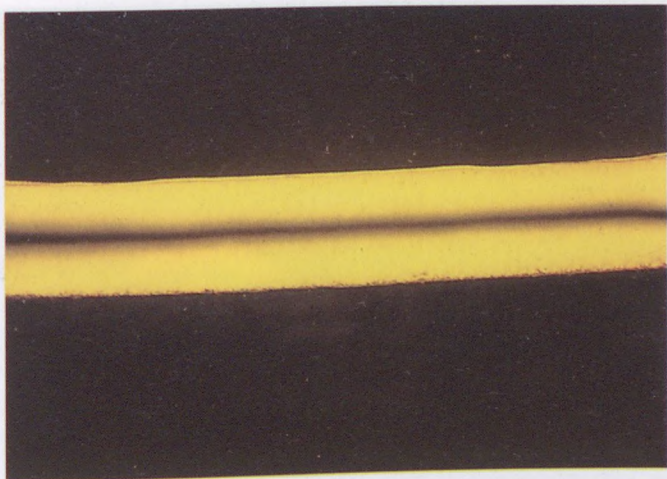


IV.18. ábra

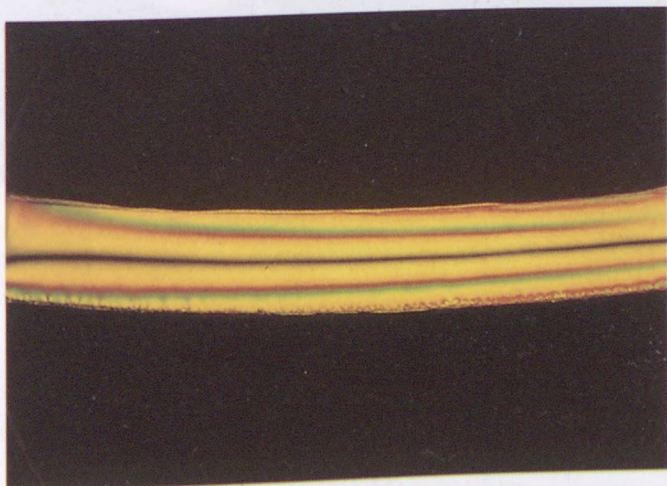


IV.19. ábra

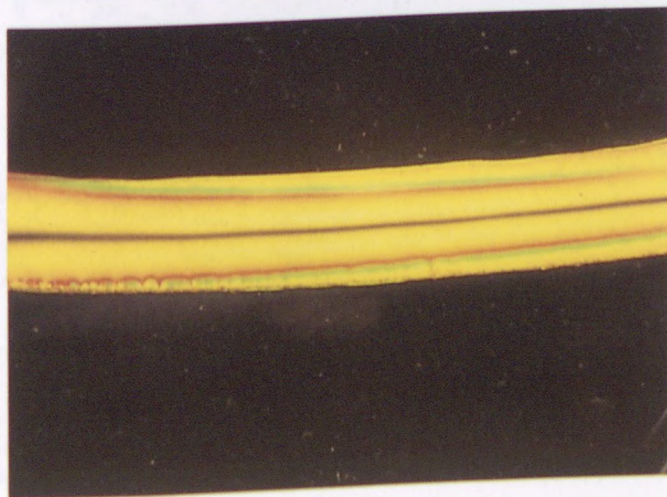
IV.21/a. ábra

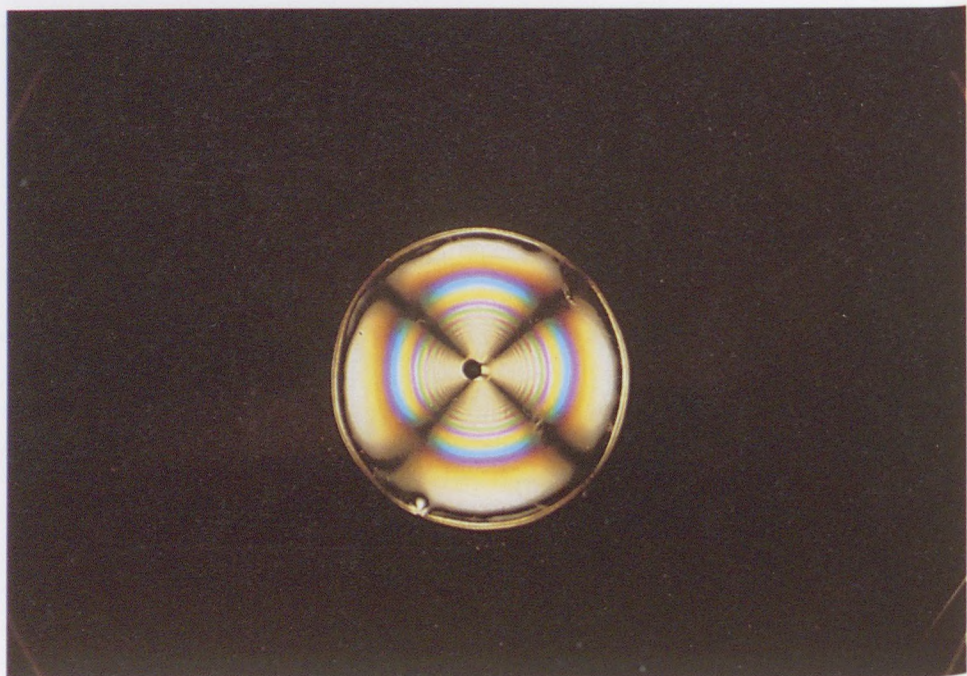


IV.21/b. ábra



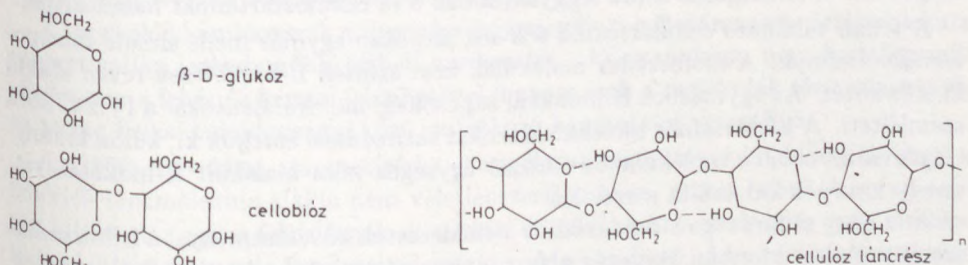
IV.21/c. ábra





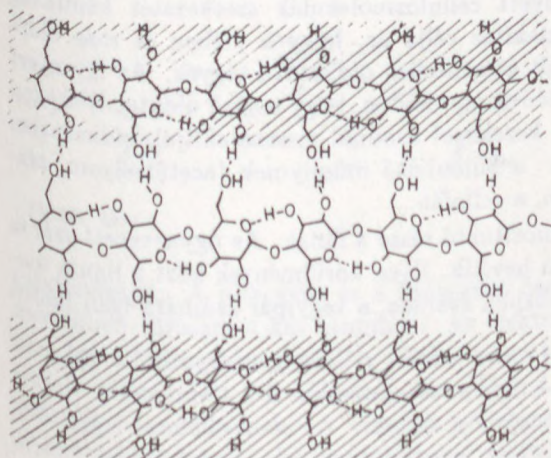
IV.22. ábra

tékével az egyik, másikkal a másik glükózegységhez kapcsolódik. A IV. 23. ábra kémiai képletekkel illusztrálja a cellulózmolekula felépülését a β -D-glükóz-egységekből. Az óriásmolekula oxigénatomoktól összekapcsolt "láncszemei" a térben nem véletlen diktálta rendezetlenséggel helyezkednek el egymáshoz képest (mint ahogy ez a polietilén vagy a gumi esetén volt), hanem szabályosan egyenes sorban követik egymást, ahogy azt a IV.23. ábra utolsó képlete mutatja. Mi lehet az oka a mo-



IV.23. ábra

lekulalánc eddigiekben sohasem tapasztalt merevségének? A kérdésre a magyarázatot a molekulagyűrűkhöz oldalról kapcsolódó -OH-csoportok adják. Az erősen poláros -OH-csoportok közt, mint ahogy ezt a víz, illetve a jég szerkezetének esetében láttuk, H-hídkötések alakulhatnak ki. A cellulózlánc egyenes alakját a szomszédos láncszemek közt kialakuló H-hídkötések rögzítik. (IV.23. ábrán a H-hídkötéseket szaggatott vonallal jelezzük.) A kötések kialakulásával a molekulalánc energiája lényegesen lecsökken.*



IV.24. ábra

* Cellulózrostok a fán kívül minden növényben találhatók. A gyapot szálai szintisza cellulózból állnak, de cellulóz adja a len és a kender rostjait is.

lekula alakja könnyen megváltozik, ezzel egyrészt energiát emészt fel, másrészt biztosítja, hogy az erős cellulózzrostok egyenletesen elosztva és ne lokálisan kapják meg a terhelést.

A fa közvetlen felhasználási területe az utóbbi évtizedekben csökkent, kiszorították a műanyagok, a mesterséges kompozitok. Nem csökkent azonban a fának mint alapanyagának jelentősége. A papíripar, a vegyipar, a műanyagipar egyre több fát dolgoz fel. A feldolgozás során leggyakrabban a fa cellulóztartalmát hasznosítják.

A fában található cellulózzrostok sok-sok szorosan egymás mellé simuló láncmolekulából állnak. A szomszédos molekulák közt szintén H-hidkötések révén alakul ki erős kötés. Az egymáshoz H-hidakkal kapcsolódó molekulaláncokat a IV.24. ábra szemlélteti. A párhuzamos molekulaláncokat satírozással emeljük ki, külön kihangsúlyozva az azonos molekulához tartozó egységek közt kialakult H-hidkötéseket, amelyek a molekulaszálat merevítik.

A fa nagy szilárdsága a rendeződött cellulózzrostok következménye, a felhasználás szempontjából azonban lényeges a fa rugalmassága, szívóssága is. Ezek a tulajdonságok a cellulózzrostok közti tartományokat kitöltő amorf anyagnak köszönhetők. Ennek döntő része lignin. A lignin molekulaszervezete jóval bonyolultabb, mint a cellulózé. Óriásmolekulái a tér mindhárom irányába többszörösen elágazó láncok, amelyek sok nagy térigényű benzolgyűrűt tartalmaznak. A molekula bonyolult térszerkezete miatt lehetetlen bármilyen rendeződés. Erő hatására a mo-

A cellulózzrostokat minden kémiai változtatás nélkül használják fel a papírgyártásban. A papír vékony rétegben kiterített, összekuszált cellulózzrostokból áll, amelyeket összeragasztanak, miközben a rostok közti hézagokat különböző adalék- és festékanyagokkal töltik ki.

A műanyagiparban a fából kinyert cellulózmolekulák szerkezetét kémiaiilag többé-kevésbé átalakítják. Az átalakítás célja az, hogy a vízben és más oldószerekben oldhatatlan óriásmolekulát átmenetileg oldhatóvá tegyék. Az így nyert anyagból műszálakat, fóliákat készítenek oly módon, hogy a sűrű oldatot lyukakon vagy résen préselik át, majd vegyi kezeléssel azonnal visszaalakítják oldhatatlan szilárd anyaggá. Így készülnek pl. a különböző műselymek (acetátselyem, rézselyem, viszkózselyem) az acetátfilm, a cellofán.

A cellulóz mellett a lignin is hasznosítható része a fának. Az úgynevezett száraz lepárlás során a fát levegőtől elzárva hevítik. Ilyen körülmények közt a lignin molekulái részlegesen elbomlanak, miközben számos, a vegyipar számára igen fontos anyagot szolgáltatnak.

3.2. Fehérjék

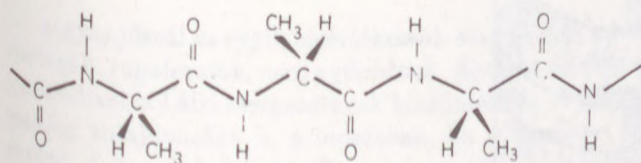
Az élő anyag legfontosabb anyagai a fehérjék. A fehérje elnevezés gyűjtőfogalom, igen sokféle molekulaszervezetű fehérjét ismerünk. A tojásfehérje több különböző molekulájú, de rokon szerkezetű vegyület keveréke, a *keratin* nevű *fehérje* a haj és a gyapjú, a kollagén a bőr és a csontok alkotórésze. Fehérjék alkotják az izmok anyagát (miozin, aktin), fehérje a vér hemoglobinja, az inzulin, a különböző enzi-

mek stb. Ezekben a vegyületekben az a közös, hogy valamennyi többé-kevésbé hasonló tulajdonságú kisebb molekulák, aminosavak összekapcsolódásával épül fel. A különböző fehérjék húszféle aminosavat tartalmazhatnak. Ezek közül az egyes fehérjékben több-kevesebb fordul elő egyszerre. Az óriásmolekulákat az aminosavak periodikusan ismétlődve építik fel. Egy-egy óriásmolekula kb. száz aminosav-egységet tartalmaz. Az egyes fehérjék tulajdonságait a felépítő aminosavak minősége és kapcsolódási sorrendje határozza meg.

A kapcsolódó aminosavak milyensége és sorrendje meghatározza az óriásmolekula energetikailag legkedvezőbb térbeli szerkezetét. Könyvünkben nem foglalkozunk részletesen a fehérjék kémiai felépítésével, hanem csak a molekulák térszerkezete és az anyag fizikai tulajdonságai közt mutatkozó kapcsolatot vizsgáljuk.

Az 1950-es években alapos kísérleti vizsgálatok eredményeként kiderült, hogy a fehérjék láncmolekula-alakja nem véletlenszerű gubanc, amint ezt pl. a gumi esetén láttuk. Az egyes fehérjéknek szigorúan állandó térbeli szerkezete van, a molekula alakja a geometria fogalmaival egzakt módon leírható. Az eddig tárgyalt láncmolekulák esetén a molekulák közötti, illetve egy azonos lánchoz tartozó atomcsoportok között a kölcsönhatás elhanyagolhatóan kicsi. A fehérjék esetén ez a kölcsönhatás döntővé válik és szigorúan meghatározza a molekula térszerkezetét. Vizsgáljuk meg egy konkrét egyszerű példán, hogyan is történhet ez!

A legegyszerűbb fehérje is többféle aminosavegységből épül fel. Az egyszerűség kedvéért mi egyetlen fajta aminosavból (a legegyszerűbb szerkezetű alaninból felépülő láncmolekulát, a polialanint vizsgáljuk). A polialanin jó modellanyag a fehérjék térszerkezetének megértéséhez. A polialanin láncmolekula kémiai szerkezetét a IV.25. ábra mutatja. A láncban lévő N-H-atomcsoport erősen poláros

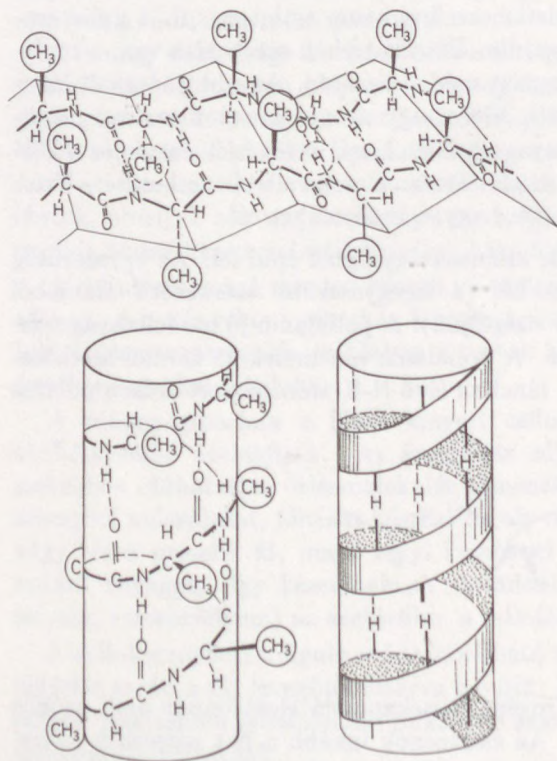


IV.25. ábra

tulajdonságú. A nitrogént és a hidrogént összekapcsoló elektronpár nem azonos mértékben tartozik a két atomhoz. Az elektronok inkább a N-t részesítik előnyben, így a hidrogénmag pozitív töltése nincs kellő mértékben árnyékolva. Az erős pozitív töltés miatt a H kölcsönhatásba léphet olyan atomokkal, amelyek elektronfőléssel rendelkeznek. A vizsgált polialanin, illetve a többi fehérje esetén, az óriásmolekula lokális elektrontöbblettel rendelkező oxigénatomokat tartalmaz. A molekulák kedvezőbb energiaállapotba kerülnek, ha az N-H-csoportok hidrogénje és a C=O-csoportok oxigénje közt kötés alakul ki. A kialakuló kötést, amely a H-atom segítségével teremt kapcsolatot két különböző láncszakasz közt, hidrogénhid-kötésnek nevezzük. A H-híd nem olyan erős, mint a kovalens kötés, de mégis jelentős. Minden újabb H-híd létrejöttével a rendszer energiája kb. $7 \cdot 10^{-20}$ J-lal csökken.

A láncmolekulákból álló rendszer energiája akkor válik a legalacsonyabbá, ha valamennyi N-H-, illetve C=O-csoport hidrogénkötést létesített. Ez kétféle módon valósulhat meg:

1. Kinyúlt molekulaláncok rendeződnek egymás mellé úgy, hogy a szomszédos molekulák N-H- és C=O-csoportjai közt kialakuljon a kötés. Az így egymás mellé rendeződött láncok kétdimenziós rétegeket képeznek. A molekulaláncok atomjai azonban nincsenek egy síkban. A rétegek egymáshoz képest dőlt síkokból illeszthetők össze. Ezt a térszerkezetet a szakirodalomban β -rétegnek nevezik.
2. A molekulalánc spirállá tekeredik úgy, hogy a lánc minden C=O-csoportja fölé egy távolabbi láncszakasz N-H-csoportja kerüljön. Ilyen esetben a H-hídkötések egyetlen molekulán belül alakulnak ki, rögzítve a lánc spirális alakját. A spirális alakú molekulát α -hélixnek nevezzük.



IV.26. ábra

A polianilinmolekula híg oldatokban α -hélix szerkezetű. Ez érthető, hiszen az egyes molekulák az erős hígítás miatt messze vannak egymástól és a H-hídkötések egyetlen molekulán belül alakulhatnak ki. Tömény oldatban, ahol a szomszédos láncok közvetlen egymás mellett vannak, β -rétegek képződnek.

A polianilin modellánc kétféle térszerkezetét a IV.26. ábra szemlélteti. A rajzon jól megfigyelhető, hogy a β -rétegszerkezet esetén a molekula nagy térigényű -CH₃ oldalcsoportjai a síkok törésvonalában váltakozva le-, illetve felfelé irányítódva he-

lyezkednek el. Az α -hélix esetén ezek az oldalcsoportok a hélix tengelyére merőlegesen, sugar irányban kifelé állnak.

A fehérjemolekulák térszerkezete a polialaninhoz hasonlóan β -réteg vagy α -hélix lehet. Hogy a két lehetőség közül melyik valósul meg, azt részben a láncot felépítő aminosavak atomcsoportjai, részben a külső körülmények határozzák meg. A következőkben néhány ismert anyag fehérjemolekuláinak térszerkezetét ismertetve megmagyarázunk néhány jellemző fizikai tulajdonságot.

3.3. A gyapjú és a haj építőanyaga: a keratin

Az emberi haj és az állatok gyapja közel azonos szerkezetű. A szálak a keratin nevű fehérjemolekulákból épülnek fel. A molekula közel húszféle aminosavat tartalmaz. A molekula α -hélix szerkezetű. A spirál alakú molekulák sajátosan rendeződnek egymás mellé. Először a molekulák hármásával épülnek össze, a három spirális molekula egymásba tekeredik, hasonlóan egy hárommerű sodrott kábelhez (IV.27. ábra). Az így kialakult szálak kötegekbe rendeződnek. Egyetlen vékony hajszálunk sok-sok ilyen kötegből áll. Az összetekeredett hélixeket, illetve ezeket szálakká, majd kötegekké H-hídkötések, illetve ún. kénhidak rögzítik.

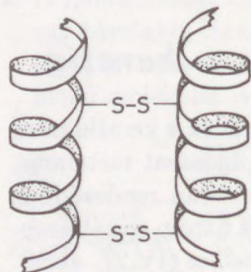


IV.27. ábra

A gyapjúsál az egyik legértékesebb alapanyaga a textiliparnak. A gyapjúholmik melegek, rugalmasak, nem gyűrődnek. Ezek az értékes tulajdonságok a szálak molekulahélixekből álló szerkezetének köszönhetők. A gyapjúnak van azonban egy kellemtelen tulajdonsága is, a mosásban, ha a mosószer túl "erős", vagy ha a víz túl meleg, a gyapjúholmi könnyen összemegy. Mi történik ilyenkor? A szál bonyolult szerkezetét rögzítő kötések a meleg, illetve az erős mosószerek kémiai hatására tömegesen felszakadnak. A hélixeket alkotó molekulaláncok szabályos nyújtott spirálszerkezete megszűnik, és a láncok összegubancolódnak. A lehűléskor, öblítéskor ismét kialakuló kötések ezt a szabálytalan molekulaszervezetet rögzítik, az anyag többé már nem nyeri vissza eredeti szerkezetét és az ezzel járó előnyös tulajdonságokat.

Az emberek, különösen a hölgyek megjelenését döntően meghatározza hajviseletük is. A frizurának egyik leglényegesebb része a haj megfelelő esését biztosító hullámosság. A hajszálak természetes hullámossága a molekulahélix-kötegek összekapcsolódásától függ. Ezt azonban könnyen meg lehet változtatni. A legegyszerűbb módja ennek a haj "besütése". Ilyenkor felmelegített sütővassal a kívánt alakú hullámokat belenyomják a hajba. A meleg hatására a fehérjemolekulákat egymáshoz rendező kötések egy része felszakad és a hélixkötegek a deformáló erő hatására elcsúsznak egymáshoz képest.

A hajszál hasonló szerkezetváltozása – durva mechanikai hatásra – melegítés nélkül is bekövetkezhet. Ujjunkra tekerve rögzítsünk egy hosszú hajszálat, majd húzzuk végig a hajszál szabad végét két körünk közt! A deformált hajszál rugószerűen karikába göndörödik. A jelenség magyarázata az, hogy a két körünkkel meghúzott hajszál egyenetlenül deformálódik. Amelyik oldalon a deformáció nagyobb, a molekulakötegek közti kötések felszakadnak, és a kötegek maradandóan elcsúsznak egymáshoz képest. Az egyik oldalán megnyúlt szál jellegzetesen meg-
gömbül.



IV.28. ábra

A frizurát "daueroló" fodrász a kémia segítségét is igénybe veszi, a hajszálak alakjának megváltoztatásához. A keratinmolekula hélicei közt jellegzetes kötés alakul ki két kénatom közvetítésével (IV.28. ábra). A dauervíz kémiai változást okoz, felszakítja a kénhidakat. Ezzel a két hélix közti kapcsolat gyengül, és a becsavarás során a molekulák elmozdulnak egymáshoz képest. A szárítás, illetve öblítés során a kénhidak újból kialakulnak, és ezzel a hajszál új alakját rögzítik.

3.4. A kötőszövetek fontos alkotórésze: a kollagén

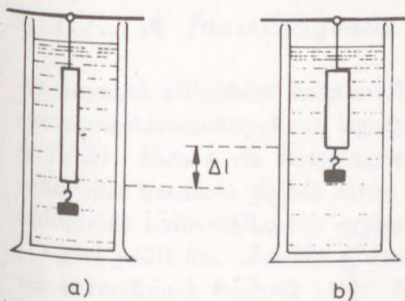
A bőr, a csontok, az inak, a porcogók fontos alkotórésze a kollagén nevű fehérje: kissé módosult formája a közismert zselatin. A kocsonyafőzéskor a porcos, bőrös részekből kioldódik a kollagén, ez teszi rugalmas-szilárdá a kihűlt kocsonyát.

Természetes állapotban a kollagénmolekulák spirális szerkezetű héliceket alkotnak. A hélicek hármásával összetekeredve, a keratinhoz hasonlóan szálat képeznek. A H-hídkötések nem egyetlen molekulán belül alakulnak ki, hanem a három összetekeredő lánc összekapcsolásával a hármasspirális alakját rögzítik. Ennek a szerkezetnek a következménye, hogy ha felbontjuk a molekulák közti kötéseket, a szabaddá váló láncok elvesztik hélix alakjukat és a gumimolekulához hasonlóan gubancú ugranak össze. Szemléletes bizonyítéka ennek a IV.29. ábrával illusztrált egyszerű kísérlet.

Desztillált vízben áztatott kollagénszalag, ha kis súllyal terheljük (IV.29/a ábra) kissé megnyúlik. Emeljük át most a szalagot egy másik edénybe, amit kb. 5 mólos töménységű LiBr-oldattal töltöttünk meg! A megnyúlt kollagénszalag né-

hány másodperc alatt látványosan összehúzódik. Hossza lényegesen kevesebb, mint kezdeti, terheletlen állapotban (IV.29/b ábra).

A jelenség magyarázata a következő: a vízben áztatott kollagén természetes állapotú; hármass molekulahélixekből áll. Terhelés hatására a hélixszálak megfeszülnek és kissé átrendeződnek, de lényeges molekulaszervezeti változás nem történik. A tömény LiBr-oldat hatására a hármass hélixszerkezetet rögzítő H-hídkötések felszakadnak, és az addig nyújtott molekulaláncok gumiszerűen összeugranak.



IV.29. ábra

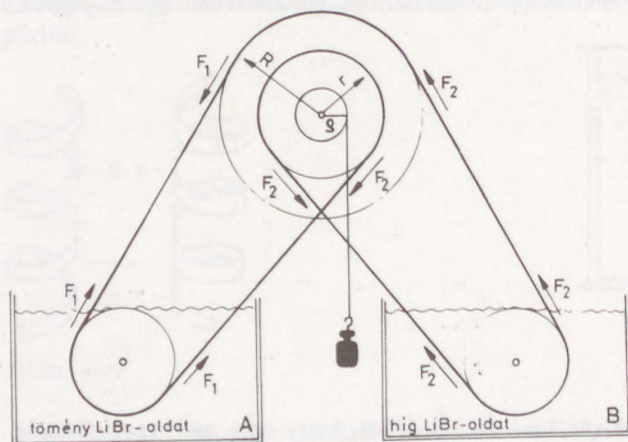
Ez okozza a szalag hirtelen hosszváltozását. Érdekes, hogy ez a szerkezetváltozás nem megfordíthatatlan, ha a tömény oldatból a szalagot ismét vízbe helyezzük, a szalag ismét megnyúlik. A víz "kimossa" a szalagból a H-hídkötések kialakulását megakadályozó lítium-bromidot, a molekulaszálak közt ismét visszaalakulnak a természetes hélix szerkezetet beállító kötések.

3.5. A kollagéngép

A kollagén LiBr hatására bekövetkező sajátosan reverzibilis szerkezetváltozását felhasználva három kutató (Z. Steinberg, A. Opletka, A. Katchelsky) érdekes gépet szerkesztett. A gép működését a IV.30. ábrán bemutatott sematikus rajz alapján érthetjük meg.

Egy végtelenített kollagénszalag egy differenciálcsigán van átvetve úgy, hogy a szalagot alul feszítő két csiga egy-egy folyadéktartályba merül. Ha az *A* tartályban tömény, a *B* tartályban egészen híg LiBr-oldat van, a rendszer a nyíllal jelzett irányban mozgásba jön, a csigák forognak, a szalag "körbejár". Vizsgáljuk meg, hogyan jön létre a mozgás! Kezdjük megfontolásainkat az *A* tartállyal! A tömény LiBr-oldatban a kollagén hirtelen összehúzódik, ami a szalag mindkét ágában F_1 erő eredményez. Mivel a szalag egyik fele a differenciálcsiga kisebb r sugarú tárcsájához csatlakozik, a másik pedig a nagy R sugarú tárcsához, az azonos nagyságú két erő forgatónyomatéka különböző, a csiga forogni kezd. Az elforduló csiga magával viszi a kollagénszalagot, így az összehúzódott szakasz kilép a tömény oldatból, miközben egyre újabb még hélix szerkezetű szalagrészek merülnek bele az oldatba, ahol azok is denaturálódnak. A mozgás során az összegubancolódott szála-

kat tartalmazó szalagrész a B tartályba jut, ahol a tiszta vízben a hélix szerkezet regenerálódik, a szalag megnyúlik. A hosszváltozás hatására a B tartályban lévő csiga két oldalán F_2 erő ébred a szalagban. Az F_2 erőből a differenciálcsigára gyakorolt eredő nyomaték a forgás irányával egyező értelmű, azt tovább segíti. Ha a differenciálcsigára ρ sugarú tengelyén fonalat vetünk át és arra súlyt akasztunk, a lassan forgó gép felemeli a súlyt, munkát végez.



IV.30. ábra

A bemutatott gép bár működik, számottevő munkavégzésre nem használható. Elméleti jelentősége azonban annál nagyobb. Olyan gépet sikerült ugyanis szerkeszteni, amely az emberi izmokhoz hasonlóan kémiai energiát alakít át mechanikai munkává. A kollagéngép tehát hasonló elven működik mint izmaink, segítségével a tudomány kicsit közelebb jutott az emberi szervezet működésének megértéséhez.

4. A legközöségesebb folyadék – a víz

Mindannyiunk számára valóban a víz a legközöségesebb, legismertebb folyadék. Víz nélkül nem létezhet sem növényi, sem állati élet. Az ember táplálék nélkül viszonylag sokáig kibírja, víz nélkül azonban csak egy-két napig élhet. A táplálkozásán túl is naponta nagyon sokszor kerülünk kapcsolatba a vízzel, tulajdonságait ismerjük, megszoktuk. Szinte hihetetlenül hangzik, hogy a víz fizikai, kémiai sajátosságainak tudományos igényű megismerése és a közismert tulajdonságok értelmezése mennyi munkát adott és ad még ma is a kutatóknak. A víz a tudomány szempontjából nem tartozik az egyszerűen leírható anyagok közé, tulajdonságait jóval nehezebb megérteni és megmagyarázni, mint például a fémoldatok vagy akár a cseppfolyós nemesgázok sajátosságait.

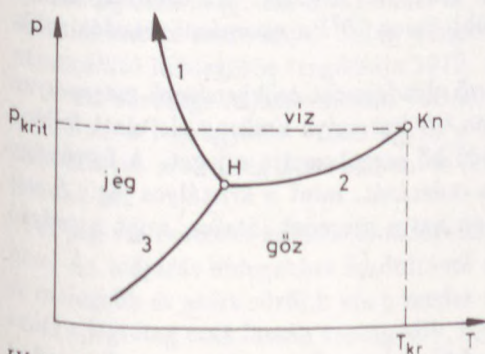
Ebben a fejezetben először felidézzük és rendszerezük a víz fizikai tulajdonságait, majd anyag szerkezeti szempontból értelmezzük azokat.

4.1. A víz fizikai tulajdonságai

A víz 1 atmoszféra (10^5 Pa) nyomáson 0°C és 100°C hőmérséklet határok között folyadék, 0°C alatt jégkristály, 100°C felett gőz. Nagyobb nyomáson a cseppfolyós állapot hőmérséklet-tartománya megnő, a forráspont megemelkedik, a fagyáspont pedig lecsökken.

4.1.1. A fázisdiagram

Az anyagok különböző halmazállapotainak megjelenését a különböző hőmérséklet- és nyomástartományokban legegyszerűbben az ún. fázisdiagramon tekinthetjük át. A IV.31. ábra a víz fázisdiagramját mutatja. A fázisdiagramon az egyes tartományokat határoló görbék olyan állapotokat jelentenek, amelyekben az anyag két különböző halmazállapota egyszerre létezik egyensúlyi körülmények között. Az (1)-gyel jelölt ún. olvadási görbe pontjai a folyadék és szilárd fázis, azaz a jég és víz keverékének felelnek meg. A (2) számú telítési gőznyomás görbe által meghatározott hőmérséklet- és nyomásértékek esetén vízgőz és víz keverék alakul ki. Az elnevezés abból származik, hogy amennyiben a vízfelszín felett elhelyezkedő vízgőz nyomása a telítési gőznyomás fölé emelkedik, akkor megindul a lecsapódás. A (3) szublimációs görbe pontjaiban jég és vízgőz létezik együtt. Ha vízgőz-jég keveréket úgy hűtünk, hogy közben a nyomás állandó marad, és az izobár átmetszi a szublimációs görbét, akkor a vízpára folyadékállapot kialakulása nélkül közvetlenül jéggé fagy. (Ezt a jelenséget depozíciónak nevezzük, fordítottja a szublimáció, melynek során egy szilárd anyag gázzá alakul.)



IV.31. ábra

A három görbe közös metszéspontjában a hármaspontban a három halmazállapot együtt lehet egyensúlyban. A víz hármaspontjában $t_h = 0,01^\circ\text{C}$, $p_h = 602,6 \text{ Pa}$. Jellemző és az anyagi minőségre jellemző ún. kritikus nyomást és hőmérsékletet jelöl ki a telítési gőznyomás görbe felső pontja. Ezen értékek felett a vízgőz nem cseppfolyósítható. A víz kritikus adatai: $t_k = 374^\circ\text{C}$, $p_k = 221 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Megemlítjük, hogy a kísérleti tapasztalatok szerint az olvadási és szublimációs görbéknek ilyen végpontja nem létezik.

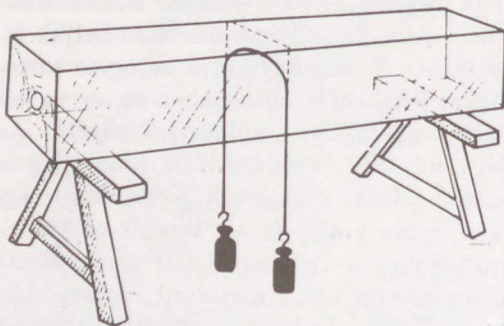
4.1.2. Az olvadáspont csökkenésének bemutatása

A fagyáspont csökkenését az alábbi egyszerű kísérlettel érzékeltethetjük.

Támasszuk alá egy jégtömböt IV.32. ábrán látható módon, majd vessünk át rajta egy vékony drótszálat. Terheljük a drótvégeket elegendően nagy súlyokkal! A drót lassan keresztülhatol a jégen, anélkül azonban, hogy a jégtömböt kettévágná.

A jelenség magyarázata a következő:

A vékony drót nagy nyomást gyakorol a jégre, ennek hatására a jég megolvad és utat enged a drótnak, majd jéggé fagy, hiszen hőmérséklete nem emelkedett 0°C fölé.



IV.32. ábra

Meg kell azonban jegyezni, hogy a szobahőmérsékleten végzett kísérletben a drót hővezetésének is jelentős szerepe van. Műanyagszállal, fagypon alatti hőmérsékleten végezve a kísérletet az eredmény általában negatív. Az olvadáspontnak már 1°C -kal történő csökkentéséhez is több mint 10^7Pa nyomásnövekedés szükséges.

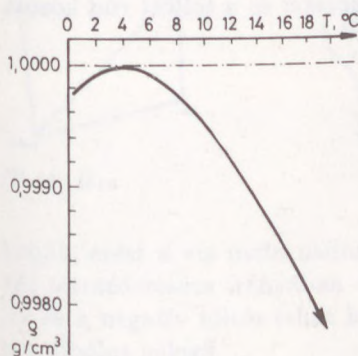
A nyomásnövekedés hatására bekövetkező olvadáspont-csökkenésnek szerepe van a korcsolya, sí, szánkó könnyű csúszásában. A korcsolya keskeny éle alatt fellépő nagy nyomáson, a súrlódás során termelődő hő megolvasztja a jeget. A folyékony víz jóval kevésbé akadályozza a korcsolya csúszását, mint a kristályos jég. A vékony vízfilm a korcsolya éle alatt pontosan azt a szerepet játssza, mint a csúszó gépalkatrészek közé cseppentett kenőolaj.

4.1.3. A víz néhány további tulajdonsága

A nyomásnövekedés hatására a víz forráspontja is megemelkedik. Légköri nyomáson ($1\text{ atm} = 10^5\text{ Pa}$) a tiszta víz 100°C -on forr; 2 atmoszféra nyomáson a víz forráspontja 120°C , 10 atmoszférán közel 180°C . Ezt a jelenséget hasznosítjuk a konyhában, amikor "kukta" fazékban főzzük az ételt. A légmentesen lezárt edényt melegítve a belső nyomás megnő (a túlzott nyomásnövekedést a "fűtőülő" biztosítószелеp akadályozza meg), a víz csak 100°C fölött forr. A magasabb hőmérsékleten hamarabb megfő az étel.

Érdemes megemlíteni, hogy más anyagok esetén a nyomásnövekedés általában fordított hatású, mint a víznél. Így például a fémek esetén a fagyáspont emelkedik, a forráspont lecsökken.

A legtöbb anyag sűrűsége a szilárd kristályos állapotban nagyobb, olvadt állapotban kisebb. A folyadékok sűrűsége rendszerint az olvadásponton a legnagyobb és a hőmérséklet emelésével monoton csökken. A víz nem követi ezeket az általános szabályokat.



IV.33. ábra

A 0°C-os jég sűrűsége kb. 9%-kal kisebb, mint a 0°C-os vízé. A jég ezért úgy úszik a víz felszínén, hogy mindössze 1/9 része emelkedik a vízszint fölé. Ez a jelenség szomorú hajókatasztrófákat okozott. A hajó kormányosa csak a sodródó jéghegy csúcsát látta, a vízben rejtőző nagyobbik rész alakját, kiterjedését nem. Látszólag biztonságosan elhajózhattak volna a jéghegy mellett, mégis összeütközés és halál lett az eredménye. Talán a legismertebb az ilyen balesetek közül a Titanic utasszállító luxuszőcs tragédiája 1912. április 15-én.

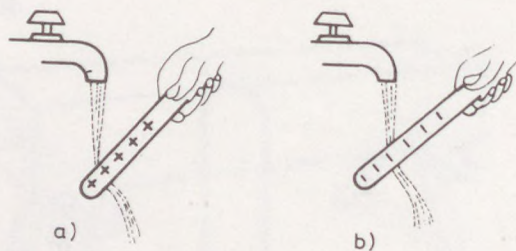
A víz sűrűsége sajátos módon változik a hőmérséklet függvényében. A sűrűség +4°C-on a legnagyobb: 1000 kg/m³. Ennél alacsonyabb, illetve magasabb hőmérsékleten a sűrűség kisebb, pontos értékeket a IV.33. ábra grafikonjáról olvashatunk le.

A jég-víz rendszer sajátos sűrűségviszonyainak fontos szerepe van a természetben. Az időjárás hidegebbre fordultával a folyók és tavak felszíni rétege fagy jéggé. A melegebb és ezért sűrűbb víz a meder alján helyezkedik el. A jég rossz hővezető, ezért a jégréteg csak lassan vastagodik, így igen ritkán fordul elő, hogy egy tó fenéig befagy. A vastag jégpáncél alatti melegebb vízben, laza iszapban a halak és más vízi élőlények rendszerint károsodás nélkül túlélnek a telet. Ha a víz sűrűsége például az olvadt fémekéhez hasonlóan változna, a folyók, tavak "alulról" fagynának be, és ezt az élővilág nem vészelné át.

A víz melegítéséhez viszonylag sok energia szükséges. A víz fajhője 4,18 kJ/kg, duplája a jég fajhőjének, közel tízszerese a vas és harmincszorosa a platina fajhőjének. A víz 2,25·10³ kJ/kg forráshője szintén figyelemreméltóan magas.

A tiszta (desztillált) víz szintelen, szagtalan, átlátszó folyadék. Az elektromos áramot – gyakorlatilag – nem vezeti. Dielektromos állandója nagy, elektromos tér

A fázishatárokon az anyag jellegzetesen reagál a térfogatváltozásra. A nyomás és hőmérséklet változása helyett a különböző fázisok tömegének aránya változik meg. Ha pl. egyensúlyi víz és gőz keverék térfogatát csökkentjük, akkor a gőz egy része lecsapódik, a keverék nyomása és hőmérséklete azonban nem változik. hatására jól polarizálódik. Ez utóbbit bizonyítja a következő kísérlet is: nyissuk meg a vízcsapot úgy, hogy a víz vékony folytonos sugárban folyjon. Közelítsünk a vízszugárhoz elektromos állapotba hozott (megdörzsölt) ebonit- vagy üvegrudat. A vízszugár a rúd felé kitér, bizonyítva, hogy a víz részecskéi és a töltött rúd között vonzerő működik (IV.34. ábra).



IV.34. ábra

A víz jó oldószer. A kristályos anyagok közül az ionkristályok jól oldódnak a vízben. A szalmiákszesz az ammóniagáz (NH_3) vizes oldata, a "szódavíz" a szén-dioxidé (CO_2). A vízben oldott oxigéngáz (O_2) biztosítja a vízi élőlények életműködését. Az oldódási folyamatok többségét hőeffektus kíséri. Ez arra utal, hogy az oldódáskor a víz és az oldott anyag részecskéi nemcsak egyszerűen "elkeverednek", hanem intenzív kölcsönhatásba is kerülnek egymással.

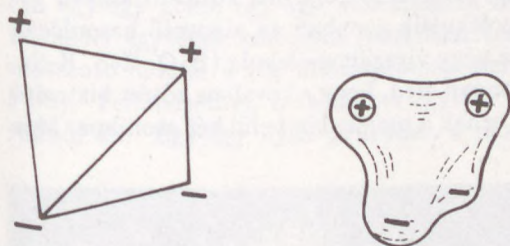
A vizes oldatok fizikai tulajdonságai eltérnek a tiszta (desztillált) víztől. Az eltérés mértéke az oldott anyag minőségétől és az oldat töménységétől függ. Az oldatok fagyáspontja 0°C alá süllyed, forráspontja 100°C fölé emelkedik. Az oldatok tehát nagyobb hőmérséklet-tartományban cseppfolyósak, mint az oldószer. Az oldott anyagok hatására megváltozik a sűrűség, a felületi feszültség, a viszkozitás, az elektromos vezetőképesség.

A víz itt összegzett tulajdonságainak megmagyarázásához látszólag igen meszsíró - a vízmolekula szerkezetéből - kell kiindulnunk.

4.2. A vízmolekula

A vízmolekula két hidrogén- és egy oxigénatomból áll (H_2O). A két hidrogénatom kovalens kötéssel kapcsolódik az oxigénatomhoz. Az oxigénatom külső elektronhéján ekkor 4 elektronpár található. Ezek közül két elektronpár kizárólag az oxigénatomhoz tartozik, míg a másik két elektronpárból az egyik az oxigénhez és az egyik kapcsolódó hidrogénhez, a másik az oxigénhez és a másik hidrogénatomhoz tartozik. Az oxigén atommagjának erős elektronvonzó hatása miatt a kötő elektronpárok elhelyezkedését döntően az oxigén határozza meg.

A négy elektronpár egy olyan tetraéder csúcsának irányában helyezkedik el, amelynek középpontjában az oxigénatom magja található. A két hidrogénatommag két szomszédos tetraédercsúcs irányában kapcsolódik az oxigénhez. A két hidrogénatommag pozitív töltését azonban a kötő elektronpárok csak kevésbé árnyé-



IV.35. ábra

kolják, ezért a víz molekuláinak ezek a részei pozitív töltést mutatnak. A másik két tetraédercsúcs irányában a molekula negatív töltésű (IV.35. ábra). A pozitív és a negatív töltés tehát helyileg elkülönül egymástól, vagyis a molekula erősen dipólus jellegű.

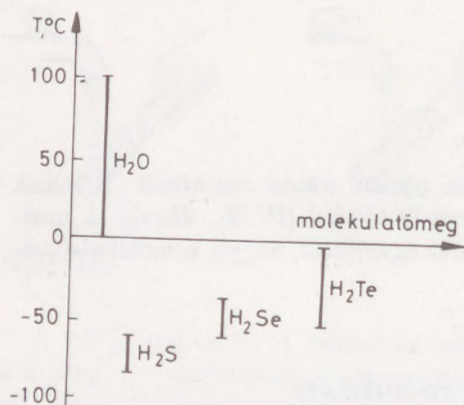
4.3. A vízmolekulák kapcsolódása

A dipólusmolekulák (ellentétes pólusaikkal) vonzzák egymást. A vízmolekulák közötti kötés azonban mégsem dipólusok kölcsönhatásából származik. Erre a következtetésre jutunk, ha a vízhez hasonló molekulaszervezetű vegyületek kén-hidrogén (H_2S), szelén-hidrogén (H_2Se), tellur-hidrogén (H_2Te) olvadás- és forráspont adatait a víz megfelelő paramétereivel összehasonlítjuk. Az összehasonlítást az teszi indokolttá, hogy az oxigén, a kén, a szelén, és a tellur legkülső elektronhéjukon azonos számú elektront tartalmaznak, hidrogénnel alkotott vegyületeik a vízhez hasonlóan dipólus-molekulájúak.

Általános tapasztalat, hogy az azonos szerkezetű, de különböző tömegű és méretű dipólusmolekulák közt az összetartó erő a molekulák tömegével együtt nő. A IV. 36. ábrán a víz és a hasonló szerkezetű molekulák olvadás- és forráspont értékeit foglaltuk össze a molekulatömeg függvényében. Az ábrán bejelölt szakaszok azt a hőmérséklet-tartományt jelzik, amelyben 1 atm (10^5Pa) nyomás esetén ezek a vegyületek cseppfolyósak. A kén-, a szelén- és a tellur-hidrogén adatai megfelelnek a várakozásnak. A növekvő molekulatömeggel együtt nő a szóban forgó anyagok olvadásponjtja, illetve a forráspontja, az összetartó erők növekedése miatt pedig a vegyületek egyre szélesebb hőmérséklet-tartományban cseppfolyósak. Az ábráról leolvasható az is, hogy a legkisebb molekulatömegű víz "kilóg" a sorból. Ha a vízmolekulák a rokon vegyületekhez hasonlóan dipóluskötésekkel kapcsolódnának egymáshoz, akkor a víz olvadásponjtja -120°C , forráspontja kb. -90°C lenne. A víz viszonylagosan magas olvadás- és forráspontja arra mutat, hogy a molekulák között a dipólusok elektrosztatikus vonzásánál erősebb kapcsolat van.

Vizsgáljuk meg, hogy mi lehet az oka a víz és a vele rokon vegyületek molekuláinak kötődése közötti nagy eltérésnek. Vizsgálatainkhoz a periódusos rendszert hívjuk segítségül.

Az oxigén, a kén, a szelén és a tellur a periódusos rendszer hatodik oszlopában egymás alatt helyezkedik el. Mind a négy elem a hidrogénnel kovalens kötésű vegyületet képez. Hidrogénnel alkotott molekuláik azonban az alapvető hasonlóság ellenére is eltérő tulajdonságúak. Mind a négy vizsgált molekula (H_2O , H_2S , H_2Se , H_2Te) dipólus jellegű, s dipólus jellegük onnan ered, hogy a kovalens kötést biztosító elektronjaik nem egyenlő mértékben tartoznak a molekulán belül két atomhoz. Más



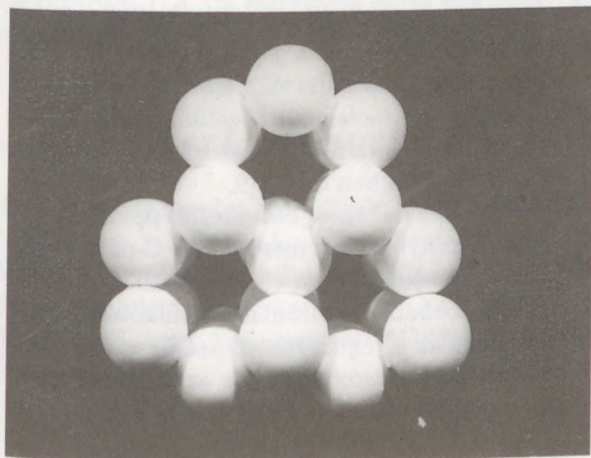
IV.36. ábra

szóval: az elektronok megtalálási valószínűsége kisebb a H-atommag körül, mint a másik (az O, S, Se, Te) atom környezetében. A szóban forgó molekulák között a döntő különbség éppen abból ered, hogy az oxigénatom jóval erősebben húzza magához az elektront, mint a többi három. (Emlékeztetünk arra, hogy a periódusos rendszer oszlopaiban lefelé haladva az atomok kötőelektronokra kifejtett vonzó hatása – elektronegativitása – csökken. Az oxigén elektronegativitása különösen nagy, ebben csak a fluor múlja felül.) Az oxigén nagy elektronegativitása miatt a vízmolekula hidrogénje szinte árnyékolatlan protonnak tekinthető. Így aztán az egymáshoz közel került, ellentétes pólusaikkal egymás felé fordult vízmolekulák alig árnyékolt pozitív hidrogénjei a szomszédos vízmolekulák oxigénjeinek magányos elektronpárjait mintegy "magukra szívják". Ily módon egy-egy hidrogénmag, két molekula elektronrendszerében kapva szerepet, szinte összekapcsolja (áthidalja) a két molekulát. A hidrogénatom révén kialakult kötést "*hidrogénhídkötés*"-nek nevezik. A vízmolekulák tehát hidrogénhídkötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A hidrogénhídkötés lényegesen erősebb az egyszerű dipólus kötésnél, hiszen itt az elektrosztatikus kölcsönhatásból származón túl kovalens jellege is van a kötésnek. A dipóluskötés átlagos energiája kb. 10^{-20}J , hidrogénhídkötése ennek kb. ötszöröse, $5 \cdot 10^{-20}\text{J}$. (Összehasonlításként megjegyezzük, hogy a kovalens kötésre jellemző energia kb. $50 \cdot 10^{-20}\text{J}$.)

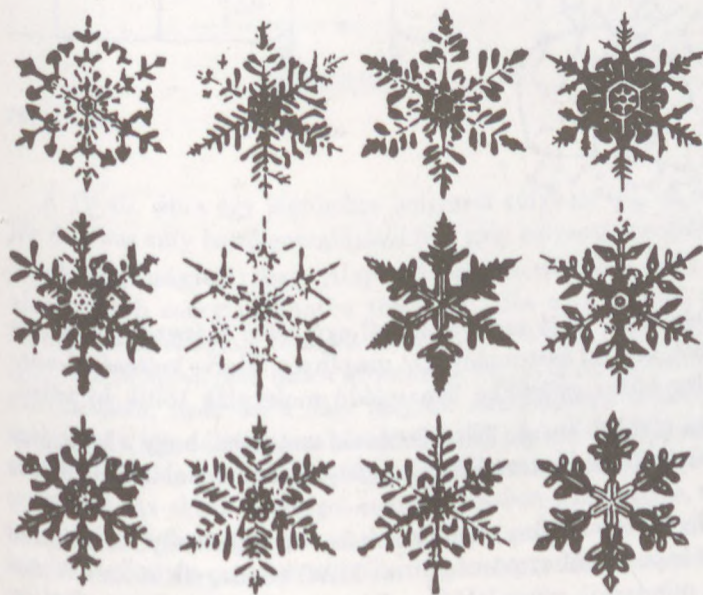
A H-hídkötéssel kapcsolódó H_2O -molekulákból álló halmaz szerkezeti tulajdonságait elsőnek a jégkristályon célszerű tanulmányozni.

4.4. A jég szerkezete

A jégkristályban minden vízmolekula 4 másik vízmolekulához kapcsolódik. A kötési irányok a IV. 34. ábrához hasonló tetraéderes szimmetriát mutatnak. Az ábrán egy-egy gömb egy-egy molekulának felel meg. A jég kristályszerkezete ilyen tetraéder egységek szabályos összeillesztésével adódik. A IV.37. ábrán (fotó) bemutatott modell a jég kristályrácsát szemlélteti (minden gömb egy H_2O -molekula). Felülnézetben a szerkezet egymás fölé rendeződött hattagú molekulagyűrűkből áll. Egy-egy ilyen gyűrűben a molekulák nem egy síkban fekszenek, ha-



IV.37. ábra



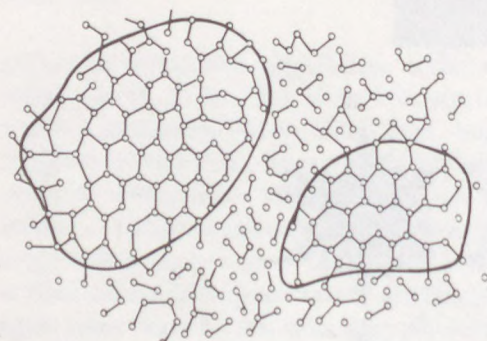
IV.38. ábra

nem felváltva a gyűrű síkja alatt és felett helyezkednek el, ahogyan ezt a tetraédres kötési irányok diktálják. A IV.37. ábrán bemutatott modell jól szemlélteti, hogy jégkristályban a molekulák milyen lazán, sok kihasználatlan "üres" helyet hagyva épülnek össze. A IV.38. ábra jégkristályokat, hópelyheket mutat. A hópelyhek lapos, felülnézetből jellegzetes hatszöges szimmetriát mutató kristályok. A kristályok alakjában a kapcsolódó vízmolekulákból kialakuló hatos gyűrűk szimmetriája tükröződik.

4.5. A víz szerkezete

A cseppfolyós víz szerkezete sok szempontból hasonló a jég szerkezetéhez. Ezt egyértelműen bizonyítják a diffrakciós szerkezetvizsgálatok. Ezek a vizsgálatok azt mutatják, hogy a cseppfolyós vízben egy-egy molekulát közelítően négy másik molekula fog közre. A közvetlen szomszédok száma a hőmérséklet növekedésével ugyan kissé nő, de ez a szám még 80°C-on is átlagban csak 4,9.

A víz szerkezetét a jég szerkezetének ismeretében a következőképpen kell elképzelnünk: a vízben a H_2O -molekulák viszonylag nagyméretű (20°C-on kb. 80-90 molekulát tartalmazó) csoportokba szerveződnek. Ilyen csoportokhoz tartozik a molekuláknak mintegy 70%-a. A csoportokban a molekulák H-hídkötéssel kapcsolódnak össze. Az összekapcsolódó molekulák a jég szerkezetéhez hasonlóan tetraédres irányokban helyezkednek el egymáshoz viszonyítva, de az az eset is gya-



IV.39. ábra

kori, hogy egy-egy molekulának négy szomszédjából egy-kettő hiányzik. A nagyméretű molekulacsoportok közötti tartományokat magányos, illetve kettesével-hármasával összeálló, esetleg hatos gyűrűkbe kapcsolódó molekulák töltik ki véletlenszerű elrendeződésben (IV.39. ábra). Feltehetően az sem ritka, hogy a laza, jég szerkezetű rajok belső üregeiben, csatornáiban magányos vízmolekulák helyezkednek el.

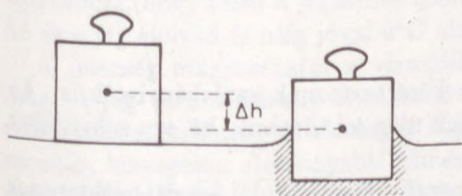
Érdemes felhívni a figyelmet néhány számadatra is. A jégkristályban minden molekula négy H-híddal kapcsolódik szomszédaihoz. Mivel mindegyik kötés két molekulához tartozik, így mindegyik vízmolekulára átlagosan két H-hídkötés jut. A

forrásponton egy-egy molekulára átlagosan jutó H-hidak száma 1,2. Ez a két adat mennyiségileg is érzékelteti, hogy a molekulák között – még 100°C -on is – erős a kölcsönhatás.

A víz szerkezetét azonban nem szabad statikusnak képzelnünk. A H-hídkötés ugyanis 0°C fölött – a molekulák hőmozgása miatt – csak igen rövid élettartamú. Egy-egy kötés másodpercenként átlagosan 10^{10} -szer felbomlik, majd újjá alakul. A molekulacsoportok ennek megfelelően állandó változásban vannak, részlegesen vagy teljesen felbomlanak, átszerveződnek. (A csoportok felbomlásában szerepet játszanak a rendezett tartományok között lévő magányos molekulák is. Ezek ugyanis kis tömegük következtében gyorsan mozogva szüntelenül "bombázzák" a csoportokat.) A víz szerkezete tehát folytonos változásban lévő dinamikus egyensúlyi szerkezet.

4.6. Miért könnyebb a jég a víznél?

A jégkristály, amint azt láttuk, rossz térkitöltésű, sok belső üreget tartalmaz. Olvadáskor a kristályrács "összetöredezik", felaprózódik. A vízben a kisebb molekulacsoportok jobb helykihasználással illeszkedhetnek egymás mellé. Az anyag térfogata tehát olvadáskor csökken, a sűrűség megnő. Emiatt olvasható meg a jég anélkül, hogy hőmérséklete 0°C fölé emelkedne. Vizsgáljuk meg ezt egy kissé részletesebben!



IV.40. ábra

A IV.40. ábra egy jégtömbre helyezett súlyt mutat. A rendszer összenergiája a jég és a vas súly belső energiájától és a súly helyzeti energiájától (tömegközéppontjának magasságától) függ. Alapvető természettörvény, hogy a rendszer a lehető legalacsonyabb energiaállapotba törekszik. Ha a súly alatt a jég megolvad, a molekulák által elfoglalt térfogat lecsökken és a súly ennek megfelelően lejjebb süllyed. Ez azonban csak akkor következik be, ha az egész rendszer energiája ennek során csökken, azaz ha a súly helyzeti energiájának csökkenése nagyobb, mint a megolvadt (de változatlan hőmérsékletű) jég belső energiájának növekménye. Az olvadás belsőenergia növekedéssel jár, hiszen a H-hídkötések jelentős részét fel kell szakítani. Az ehhez szükséges energiát részben a hőmozgás, részben a külső nyomás mechanikai munkája fedezi. A hőmérséklet csökkenésével a hőmozgás hatása egyre kisebb, így a jég megolvasztásához egyre nagyobb nyomásra (nagyobb súlyra) van szükség.

4.7. A víz 4°C-on a legsűrűbb

A vizet 0°C-ról melegítve, sűrűsége eleinte nő, 4°C-on maximális, majd fokozatosan csökken. A sűrűségváltozást a melegítés során bekövetkező szerkezeti változások okozzák. A melegítés hatására egyrészt csökken a vízben lévő szervezett molekulacsoportok mérete, másrészt élénkül a molekulák hőmozgása. Az előbbi növeli, az utóbbi csökkenti a makroszkopikusan mérhető sűrűséget.

0°C-on a H-hídkötéssel összekapcsolódott H₂O-molekulák viszonylag nagyméretű szabálytalan alakú csoportokat alkotnak. Ezek a nagy molekulacsoportok még rossz helykihasználással, hézagosan illeszkednek egymás mellé. (Bár ez a térkitöltés a jégkristály szerkezetéhez viszonyítva már sokkal jobb.) A hőmérséklet növekedésével egyre több H-hídkötés szakad fel, így a nagy molekulacsoportok felaprózódnak. A kisebb méretű csoportok egyre jobb térkitöltéssel illeszkednek egymáshoz. Ugyancsak lényeges, hogy magasabb hőmérsékleten a magányos vízmolekulák száma is növekszik, és ezek kitölthetik a molekulacsoportok illeszkedési hézagait, belső üregeit. Ezek a szerkezeti változások növelik a víz sűrűségét. A részecskék hőmozgása azonban melegítéskor erősödik, és így az egy molekula által elfoglalt térfogat megnő. A hőtágulás a víz sűrűségcsökkenését okozza. A két ellentétes értelmű hatás közül a 0-4°C tartományban az első a domináns, magasabb hőmérsékleten a második válik meghatározóvá.

4.8. A víz jó oldószer

A víz igen sok anyagnak jó oldószere. Ezek közé tartoznak az ásványi sók is. Az oldódás folyamatának megértésekor vizsgáljuk meg mi történik, ha egy sókristályt vízbe dobunk!

A kristály felületén lévő ionok és a környező víz molekulái között elektromos vonzás lép fel. Az ionok az erősen dipólus tulajdonságú vízmolekulákat ellentétes töltésű pólusaikkal magukhoz vonzzák. A kristály felülete csak a szemünk számára tűnik simának. Atomi mértékkel nézve a felületeket számtalan lépcső, terasz, kiszögelés mintázza. Ezeken a helyeken sok vízmolekula kerülhet az ionok közelébe. A H₂O-molekulák az ilyen szélső ionokra olyan nagy erőt fejthetnek ki, amely kiszakítja az iont a kristályrácsból. A kiszakított iont a vízmolekulák azonnal teljesen körülveszik, ún. "hidrátburkot" alakítanak ki körülötte. Ez a burok erősen leárnyékolja az ionok töltését és ezzel megakadályozza, hogy azok visszaépülhessenek a kristályrácsba. Amint a hidrátburokkal védett ion a hőmozgás révén elsodoródik a kristályfelülettől, máris újabb vízmolekulák támadják a felszínre került ionokat, és így lassan lebontják az egész kristályt. Meglepő, hogy az oldódás során milyen nagy energia szabadul fel! Vegyük példaként a kálium-klorid (KCl)-kristályt. A KCl a kősóhoz hasonló szerkezetű kristály. Ionjai között akkora vonzóerő hat, hogy 1 molnyi kristály ionokra bontásához 717,4 kJ energia szükséges. Ekkora energiát a hőmozgás csak magas hőmérsékleten képes fedezni, a kristály olvadáspontja 772°C. Ugyanezen kristály 1 molnyi tömegének feloldásához

(az oldás is ionokra bontás!) azonban csupán 38,4 kJ energiát kell az oldat melegítésére fordítanunk. Ez a tény azt bizonyítja, hogy az ionokra bomláshoz szükséges további 717,4 kJ-38,4 kJ=679 kJ energiát a vízmolekulák és az ionok kölcsönhatása szolgáltatja. A kölcsönhatási energia pontos számértéke a kristály (anyagi) minőségétől függ. A kálium-hidroxid (KOH) vízben oldásakor pl. nem-hogy kívülről kell (hő formájában) energiát közölni az oldattal, hanem maga az oldat melegszik fel az oldódási kölcsönhatás következtében. Ez azt jelzi, hogy a kölcsönhatási energia meghaladja a kristályrács szétbontásához szükséges energiát.

Az oldott ionok hatására az oldat tulajdonságai eltérnek a tiszta víztől. Így például változik az oldat sűrűsége, viszkozitása, felületi feszültsége, olvadás- és forráspontja, elektromos vezetőképessége stb. A megváltozott tulajdonságok magyarázatát a víz megváltozott szerkezetében kell keresnünk. A különféle oldott ionok hatását lehetetlen egyetlen szemléletes képbe sűríteni. Általánosságban csak annyit mondhatunk, hogy az ionok hatására megváltozik a víz molekulacsoportjainak számossága és átlagos mérete. Az oldott ionok minden oldalról magukhoz vonzzák a vízmolekulákat. A hidrátburok vízmolekulái tehát nem tetraédres rendben, hanem az ion körül gömbszimmetrikusan helyezkednek el. A H_2O -molekuláknak ez a lekötése akadályozza a tiszta vízre jellemző molekulacsoportok kialakulását.

4.9. *Miért sózzák télen az utakat?*

Köztudott, hogy télen a jegesedés ellen sózzák az utakat. A kiszórt só hatására a hó és a jég elolvad és még jóval 0°C alatt sem fagy jéggé.

A jelenség magyarázatát a vízmolekulák és az ionok erős kölcsönhatása adja meg. A jég- és a sókristály érintkezési pontjain a H_2O -molekulák és az ionok kölcsönhatásba kerülnek. A hőmozgás segítségével (0°C környezetében jelentős a hőmozgás, lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten pedig a sózás sem hatásos) a vízmolekulák kilépnek a jégkristályból és az ionok köré rendeződnek. Egy-egy ion a hidrátburokában sok vízmolekulát köt meg, s ezek a "fogságba esett" molekulák nem tudnak újból jéggé rendeződni. A sózott jég megolvad, ha az ionok valamennyi H_2O -molekulát maguk köré vonták. A sóoldat magfagyásához töménységétől függően $0-21^\circ\text{C}$ hideg szükséges. E hőmérséklet alatt a só már nem olvasztja meg a jeget.

4.10. *Egy meglepő kísérlet, víz és alkohol elegyítése*

Egyszerű, de igen meglepő kísérletet végezhetünk tömény alkohol és tiszta víz segítségével.

Víz és alkohol összeöntésekor a két folyadék részecskéi nemcsak egyszerűen összekeverednek, hanem erős kölcsönhatásba is lépnek egymással. (Ezt meggyőzően bizonyítja, hogy az elegy felmelegszik.) A kölcsönhatás értelmezéséhez tudnunk kell, hogy az alkoholmolekula ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) a benne lévő OH atomcsoport révén

szintén képes H-hídkötés kialakítására. (Szélsőségesen úgy is tekinthetjük az alkoholemolekulát, mint olyan vízmolekulát, amelynek egyik hidrogénatomját a $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}$ (etil)-csoport helyettesíti.) Az alkoholemolekula tehát egy H-hídkötéssel hozzákapcsolódhat a víz molekuláihoz, többirányú kapcsolódásra azonban nem képes. Ha tiszta vízhez alkoholt adagolunk, akkor az alkoholemolekulák többsége a H_2O molekulacsoportok felületén kötődik meg. Az alkohol OH-csoportja H-hídkötéssel valamelyik vízmolekulához kapcsolódik. A $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}$ csoport részére kedvező elhelyezkedési lehetőség adódik a molekulacsoportok illesztési hézagaiban. Így az alkoholemolekula alig igényel több helyet annál, mint amennyi eddig "üresen" maradt a tiszta vízben.

Érdemes megemlíteni, hogy az alkohol-víz elegyekben az alkoholemolekulák eloszlása nem egyenletes. A felszínen az alkoholkoncentráció nagyobb, mint a folyadék belsejében. Ez, továbbá, hogy az alkoholemolekula csak egyetlen H-hídkötéssel kapcsolódik a vírzészecskékhez, okozza, hogy az alkohol könnyen párolog a vízből. Így például a rosszul záródó üvegben tartott pálinka fokozatosan elveszíti "erejét", miközben térfogata alig változik.

4.11. Fázisátalakulások nagyon tiszta vízben

A tapasztalat azt mutatja, hogy a víz fázisátalakulása egyes esetekben a IV.31. ábra fázisdiagramjától eltérő nyomás- és hőmérsékletviszonyok mellett megy végbe. Bizonyos körülmények között a víz túlhevíthető, azaz pl. 10^5 Pa nyomás mellett 100°C felett is folyadékalapotban marad. Előfordulhat azonban az is, hogy a vízgőz jóval a telítési gőznyomás felett sem csapódik le! Hasonlóképpen, megfelelő körülmények között a víz túlhevülhet és -30°C körül sem fagy meg.

A tapasztalat szerint a víz, ill. a vízpára mindig tartalmaz idegen anyagokat (a folyadék vízben mindig van oldott levegő, a vízpára többnyire tartalmaz porszemeket stb.). Ezek az idegen anyagok jelentős szerepet játszanak a fázisátalakulási folyamatok megindulásában. A túlűtés, ill. túlűtés többnyire akkor következik be, ha a víz nagyon tiszta, szennyezésmentes. A következőkben ezeket a jelenségeket vizsgáljuk meg kissé részletesebben.

4.11.1. A forrás

Melegítsünk egy nyitott üvegedényben vizet és figyeljük meg a folyadék melegezése során észlelhető jelenségeket. A víz felszíne párolog, ezt a párolgást már nem túlságosan magas hőmérsékleten is jól mutatja a felszálló gőz. A hőmérséklet növekedtével az edény falain apró buborékok jelennek meg, amelyek a melegedéssel gyorsan növekednek és az edény faláról leszakadva a felszínre emelkednek. Ezek a buborékok főként vízben oldott levegőt és kevesebb bepárolgott vízgőzt tartalmaznak. A buborékok tömeges felszállásakor a víz felülete szinte habzik. Az elsőként megnövekvő buborékok távozása után az edény falain még mindig apró buborékok maradnak vissza, s további melegítés hatására gyorsan növekednek. A buboré-

koknak ez a "második generációja" döntő részben már vízgőzt tartalmaz. Akkor beszélünk a víz forrásáról, ha belsejéből folyamatosan távoznak a falakról leszakadó buborékok. Érdekes, hogy a buborékok leggyakrabban a fal meghatározott pontjairól szakadnak le és gyöngysorszerűen követik egymást felszállás közben.

Hosszas lassú forralás után azonban a buborékképződési helyek és a leszakadó buborékok száma is csökken, a folyadék látványos forrása megszűnik. Ezzel egyidejűleg a víz hőmérséklete néhány fokkal 100°C fölé emelkedik. Ez a változás jól mutatja, hogy a megszokott forráshoz elengedhetetlenül szükségesek a kicsiny légbuborékok. A forrás megszűnését ugyanis az okozza, hogy a forralás során a vízből az oldott gázok szinte teljes mértékben eltávoztak.

A buborékoktól nagymértékben megtisztított víz melegítéskor túlhevül (hőmérséklete magasabb lesz, mint az adott nyomáshoz tartozó forráspont), és felforrása kis "robbanásokkal" megy végbe. A gőz ekkor kevés számú buborék formájában távozik a folyadékból, s ezek kilépéskor jellegzetes csattanó hangot adnak.

4.11.2. A lecsapódás

A következő, a vízpára lecsapódására vonatkozó egyszerű kísérlet, akár otthon is elvégezhető. Egy 4-5 literes üvegpalack aljára töltünk kevés vizet, majd zárjuk le a IV.41. ábrán látható módon egy átfúrt gumidugóval, melybe csappal ellátott meghajlított üvegcsövet illesztettünk! Nyissuk ki a csapot, fújjunk bele erősen



IV.41. ábra

az üvegcsőbe, és a csappal zárjuk le az összesűrített levegőt tartalmazó edényt! Várjunk rövid ideig, majd nyissuk ki a csapot! Miközben az üvegből sziszegő hang kíséretében kiáramlik a levegő, enyhe ködképződést észlelhetünk. A ködképződés oka az, hogy a hirtelen kitáguló levegő lehűl, és páratartalmának egy része igen kicsiny, a levegőben lebegő cseppek formájában lecsapódik. A fény szóródik a párányi vízcseppeken, ezért látjuk a ködöt.

Ha azt is meg akarjuk érteni, miért gyakoribb a sűrű köd a nagyvárosokban, ismételjük meg a kísérletet egy kis változtatással! Vigyünk először a palackba apró koromszemcséket! Ehhez először szívjunk ki a palackból levegőt és zárjuk a csapot! Ha ezután a csővéghez éppen elfűjt, de még füstölgő gyufaszálat tartunk, és a csapot megnyitjuk, akkor a füstöt a palack beszívja. Ezután járunk el a korábban már leírtak szerint, azaz befújással növeljük meg a palackban a nyomást, majd a csap hirtelen nyitásával csökkentjük le! A palackban ebben az esetben vastag köd képződik. A kísérlet azt mutatja, hogy a vízpára lecsapódását az apró szennyezések, a "kondenzációs magvak" nagymértékben elősegítik.

Mérőkísérletek tapasztalatai szerint a nagy tisztaságú levegőben csak 470 százalékos a relatív páratartalom, tehát igen erős túltelítettség mellett jön létre ködképződés. A levegő nedvességét az ún. relatív páratartalommal (e) mérhetjük, ami százalékosan megegyezik azzal is, hogy a p pillanatnyi gőznyomás hány százaléka az adott hőmérséklethez tartozó p_0 telítési gőznyomásnak:

$$e = 100p/p_0.$$

A képletből látható, hogy ha a levegő túltelített, akkor a pillanatnyi gőznyomás nagyobb, mint a telítési gőznyomás. A légkörben a vízpára túltelítettsége még az öt százalékot sem éri el.

Így nyilvánvaló, hogy a felhők – amelyek apró lecsapódott vízcseppekből állnak – csak azért jöhetnek létre, mert a légkörben rengeteg kondenzációs mag található. (A számítások szerint a légköri kondenzációs magvaknak mintegy fele a tengervízből származó sószemcse, a többi természetes, ipari és kozmikus eredetű por.)

4.11.3. A fagyás

A tapasztalat azt mutatja, hogy a forráshoz és a lecsapódáshoz hasonlóan a fagyáshoz is szükségesek a szilárd fázis csíráiként szolgáló idegen anyagok. A nagy-tisztaságú víz akár -40°C -ig túlhűthető. Ha az erősen túlhűlt vízbe egy jég szemcse vagy egyéb jégképző mag kerül, akkor a fagyás gyorsan végbemegy. Míg a túltelített vízpára lecsapódását szinte minden porszem elősegíti, a túlhűlt víz megfagyása csak speciális, a jég szerkezetéhez hasonló mikroszerkezetű magokon megy végbe. Ez a magyarázata annak, hogy a jég szemcsék létrehozására legalkalmasabb idegen anyag az ezüst-jodid. Az ezüst-jodid kristályrácsának méretei ugyanis alig térnek el a jég kristályrácsának méretétől.

A lecsapódás és a fagyás folyamata ún. csíráképződéssel indulhat meg. A vízben, ill. a vízpárában a vízmolekulák rendezetlenül mozognak és időről időre összetapadva csoportokat is létrehoznak. Egy bizonyos kritikus méret alatt ezek a csoportok gyorsan feloszlanak. Néhány csoport azonban a kritikus méret fölé növekedve stabilizálódhat, és az új fázis csírájává válhat. A fázisátalakulási hőmérsékleten mindig képződnek ilyen csírák, keletkezésük és növekedésük azonban olyan lassú, hogy a fázisátalakulás folyamata gyakorlatilag nem észlelhető. Érthető tehát, hogy a molekulacsoportok képződését elősegíti, ha olyan magok vannak az anyagban, amelyek a hozzájuk ütköző vízmolekulákat megkötik.

A forrást megelőző buborékképződési folyamat, bár kissé más jellegű, szintén csíráképződésnek tekinthető. A gőzfázis magjai ebben az esetben az edény falain megtapadó levegőbuborékokkák.

4.12. *Víz a légkörben*

Nyári napokon pihentetően kellemes megfigyelni a tornyosodó gomolyfelhők fejlődését, folyamatos változását. A hatalmas zivatarfelhővé növekvő gomolyok azonban már félelmetes látványt nyújtanak.

A félelmetes vagy gyönyörködtető felhők látványa mellett a légköri víz fontos szerepet játszik életünkben is. Némelyik hatása mint pl. a növények vízszükségletének fedezése közismert. Hasonlóképpen fontos, de talán kevésbé ismert, hogy a vízpára döntően befolyásolja a légkör hőháztartását is.

A méretek érzékeltetésére nézzünk először néhány számadatot a légköri víz mennyiségével kapcsolatban. A Föld össztömege $5,98 \cdot 10^{21}$ tonna, ennek körülbelül 0,24 ezredrésze ($1,46 \cdot 10^{18}$ tonna) a víz, amelynek 94%-a az óceánokban található. A légkör össztömege is hatalmas ($5,6 \cdot 10^{15}$ tonna), azonban ez a földi vízmennyiségnek csak ezredrésze. Ehhez képest szinte elhanyagolhatónak tűnik a légköri víz $14,4 \cdot 10^{12}$ tonnányi mennyisége. A víz a légkör teljes tömegének csak 0,0025-öd része! Ez azt jelenti, hogy még az igen nagy nedvességtartalmú levegő sem tartalmaz 5-10 g-nál több vizet köbméterenként.

A légköri víz azonban igen aktív mozgást mutat! A Földön naponta kb. $1,44 \cdot 10^{12}$ tonna csapadék hullik, a légkörben lévő víz tehát gyakorlatilag tíznaponként kicserélődik.

A Föld felszínén a víz párolgása óriási energiát emészt fel, ami aztán a légkörben szabadul fel újra, amikor a pára vízcseppekké vagy jég szemekké kondenzálódik. A légkörnek alig ezredrészét kitevő víz a Napból érkező összenergia 23%-ának forgalmát bonyolítja le a Föld felszíne és a légkör között. Érthető tehát, ha a csapadék keletkezésének kérdései rendkívüli fontosságúak.

4.12.1. *A felhők és a csapadék keletkezése*

Felhők általában a viszonylag nagy nedvességtartalmú meleg légtömegek felemelkedése során képződnek. Felemelkedés közben ugyanis a levegő lehül és túltelítetté válik, emiatt páratartalma vízcseppek, esetleg jég szemek formájában kicsapódik. A kicsiny vízcseppek és jég szemek azért nem esnek le azonnal a Földre, mert a feláramló levegő ezt megakadályozza.

A vízcseppek mérete állandóan változik, a kezdetben igen különböző méretű cseppek közül a nagyok a kicsik rovására híznak. Ennek egyik oka az, hogy amint azt Kelvin bebizonyította, a telítési gőznyomás nemcsak a víz hőmérsékletétől, hanem a folyadékfelszín alakjától is függ. A kis sugarú, tehát nagy görbületű cseppek közelében a telítési gőznyomás nagyobb, mint a nagyobb suga-

rú cseppek közelében. (Ennek részletesebb magyarázatát a következő pontban adjuk meg.) A nyomáskülönbség a vízpára egy részének lassú áthelyeződésével fokozatosan kiegyenlítődné. A kiegyenlítődné azonban nem mehet végbe, mert a kicsiny cseppek párolgása és a vízpárának a nagy cseppekre történő lecsapódása ezt megakadályozza. Ily módon a kis cseppekből a folyadék lassan "átpárolog" a nagyokra.

A nagy cseppeket a légáramlás már nem képes megakadályozni abban, hogy a Föld felé essenek. Ha a lefelé mozgó nagy cseppek a még felfelé mozgó kis vízcseppekkel ütköznek, elnyelik azokat, és még tovább nőnek, majd eső formájában a Földre hullanak.

A nagy zivatarfelhőkben a csapadék ettől kissé eltérő módon keletkezik. Ezeknek a felhőknek a felső részében az erősen túlhűlt vízpárából jégsemcsék képződnek. A nagy cseppek növekedéséhez hasonló mechanizmussal a túlhűlt vízcseppek át párolognak a jégsemcsékre. Ennek most is az az oka, hogy a telítési gőznyomás a túlhűlt vízcseppek felett nagyobb, mint a jégsemcsék közelében. Az át párolgás miatt a jégsemcsék tömege gyorsan nő, ezért esni kezdenek a Föld felé. Ütközben aztán a melegebb légrétegekbe érkeve újra elolvadnak és általában eső formájában érkeznek a Földre. Amennyiben azonban a jégsemcsék elég nagyra nőttek, akkor az olvadás nem következik be és jégeső hullik.

4.12.2. Miért függ a telítési gőznyomás a felszín görbületétől?

A telítési gőznyomás, mint már említettük, a domború vízfelszín felett nagyobb, a homorú felett pedig kisebb, mint a sík vízfelszín felett. A Kelvin-féle gondolatmenet ismertetése helyett a következőkben ezt egy szemléletes képpel támasztjuk alá.

Gondoljuk végig először a telítési gőznyomás kialakulásának folyamatát. Ha egy tökéletesen páramentes légüres edénybe hirtelen víz kerülne, a vízfelszín felett hamarosan kialakulna a telítési gőznyomásnak megfelelő páramomás. A hőmozgás



IV.42. ábra

miatt ugyanis a vízből a leggyorsabb molekulák mindig kilépnek. Ugyanakkor természetesen a gőztérből a vízfelszín közelébe kerülő részecskék egy része ismét lecsapódik. Egy idő múlva azután a kilépő és lecsapódó részecskék száma éppen kiegyenlíti egymást, és ekkor a pára mennyisége és nyomása állandóvá válik. Ezt a nyomást nevezzük telítési gőznyomásnak.

Miért befolyásolja a gőznyomást a felszín alakja? Ennek megértéséhez vegyük figyelembe, hogy a folyadékban a részecskék között csak rövid hatótávolságú erők működnek. Ezért a folyadék belsejében egy molekula csak az őt körülvevő kicsiny gömbben, a hatásgömbben elhelyezkedő többi molekulával lép kölcsönhatásba. A felszínen elhelyezkedő molekulák "hatásgömbje" amint azt a IV.42. ábra mutatja, asszimetrikkussá válik, hiszen lényeges kölcsönhatás csak a folyadékrészecskék között lehetséges. Kézenfekvőnek tűnik tehát az a következtetés, hogy a domború felszínből, ahol a hatásgömbnek csak kis részét tölti ki folyadék, a vízmolekulák könnyebben lépnek ki, mint a sík, ill. homorú felszínből, ahol a hatásgömbnek egyre nagyobb része esik a folyadékba.

Amennyiben a molekulák kilépése könnyebb, akkor a párolgás és lecsapódás dinamikus egyensúlyával kialakuló páramennyiség, s ezzel együtt a telítési gőznyomás is nagyobb lesz.

A fenti szemléletes elképzelés kvalitatíve helyesen adja a Kelvin által felfedezett törvényt. A törvény pontos matematikai alakjának meghatározása természetesen kissé bonyolultabb gondolatmenetet igényelne.

V. FOLYÉKONY VAGY SZILÁRD?

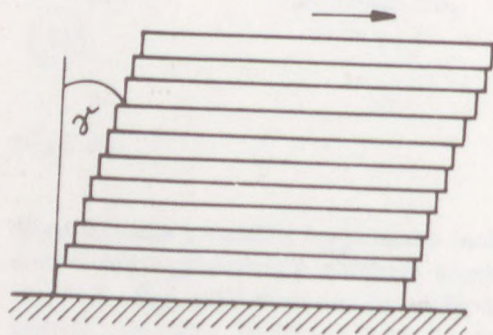
1. Mi a folyadék?

A folyadék kifejezésről szinte mindig a vízre asszociálunk, hiszen napjaink leggyakoribb folyadéka a víz. Kissé tovább gondolkozva azonban megállapíthatjuk, hogy a mindennapi életben folyadékok sokasága vesz körül bennünket. Folyadék a víz, a benzin, a vér stb. De folyadék-e a szurok vagy a tojásfehérje? Folyadéknak tekintsük-e a IV.1.4. fejezetben tárgyalt különleges anyagot, az ugrógittet? Ezekre a kérdésekre hétköznapi szemléletünk alapján a körülményektől függően adunk esetenként ugyanazon anyagot tekintve is más és más választ. Az ugrógittet pl. nyúlós folyadéknak tekintjük, amikor lassan kifolyik az edényből, de szilárdnak amikor gumilabdaként pattogtatjuk.

A víz szerkezetével és tulajdonságaival foglalkozva már megállapítottuk, hogy a folyadékok alapvető tulajdonsága molekuláik gördülékenysége. Makroszkopikusan ezt úgy fogalmazhatjuk, hogy a folyadékokban nem léphetnek fel nyíróerők.

1.1. Mit jelent a nyíró igénybevétel?

Legismertebb példája az ilyen erőhatásnak a papírvágás. Az olló élei a papírlap szomszédos rétegeit elcsúsztatják egymáson. A nyíró igénybevétel jól szemléltethető pl. egy kártyacsomaggal. Húzzuk szét az asztalra helyezett kártyacsomag lapjait!



V.1. ábra

A lapok egymáson elcsúszva válnak szét. A nyírás mennyiségi jellemzésére az V.1. ábrán jelölt γ szöveget használjuk, míg a nyírási igénybevételt a nyírófeszültséggel, a nyíró erő és a nyírt felület hányadosával adjuk meg. Szilárd anyagokban a felső terhelt réteget az alulról visszafelé húzó molekuláris erők egyensúlyban tartják. Így az anyagban statikus állapotban is létezhetnek nyíróerők. Ez lehetetlen a folyadékokban! Nyírási igénybevételnek kitett folyadékok sohasem maradhatnak nyugalomban.

Hétköznapi tapasztalataink jól alátámasztják ezt. Két egymáson fekvő nedves üveglapot szinte lehetetlen elhúzni egymástól. Csúsztatva azonban könnyen szétválaszthatók.

1.2. Nyíróerők a mozgó folyadékokban, a viszkozitás

A statikus állapot vizsgálatánál azonban jóval érdekesebb a mozgó folyadékok egymáson elcsúszó rétegei között fellépő erők vizsgálata.

A mozgó folyadékokban fellépő nyíróerőkre vonatkozóan 1867-ben Newton alapított meg egyszerű törvényt. Ha két párhuzamos, egymástól x távolságban elhelyezkedő A felületű lemez közé folyadékot töltünk, majd a felső lemezt az alsóval párhuzamosan v sebességgel mozgatjuk, akkor a két lemez közötti folyadék elnyíródik (V.2. ábra). A nyírás során a folyadékrészecskék között fellépő belső súrlódás legyőzésére erőt kell kifejteni. A Newton-féle viszkozitási (belső súrlódási) törvény szerint ez az erő az

$$F = -\eta A \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

összefüggéssel adható meg, ahol A a szemben fekvő lemezek területe, Δy a lemezek távolsága, Δv pedig a két lemez sebességének különbsége. Az η állandó a folyadék belső súrlódását jellemző adat: a viszkozitás. A törvénynek megfelelően az egymáson elcsúszó rétegek között működő nyírófeszültséget az

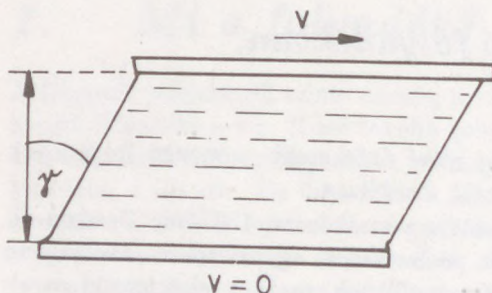
$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

összefüggés határozza meg.

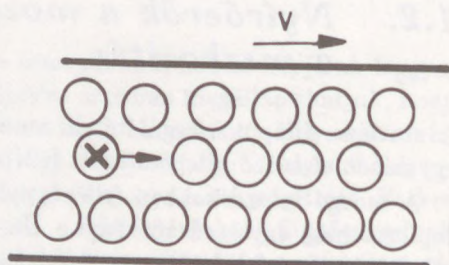
A Newton-féle viszkozitási törvény "modellanyaga" a víz volt, jól működik azonban sok más, kis molekulasúlyú részecskéből álló folyadéokra is. Hamarosan észrevették azonban, hogy az η "anyagi állandó" az anyagi minőség mellett a deformáció körülményeitől is függ.

η már a víz esetén is szembetűnően változik a hőmérséklettel. A tapasztalat szerint sok folyadék (víz, olaj stb.) viszkozitása a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan csökken.

A Newton-féle belső súrlódási törvény, illetve az η viszkozitás hőmérsékletfüggése anyagszerkezeti alapon is egyszerűen megérthető. A folyadékokban és a szilárd anyagokban a molekulák egyensúlyi helyzetük körül rendezetlen hőmozgást végeznek. A molekulák egyensúlyi helyzete olyan minimális energiájú állapotot jelent, amelyből egy másik – szomszédos – egyensúlyi helyzetbe csak egy viszonylag magas energiájú átmeneti állapot után kerülhet át a részecske. Ha a folyadék nyugalomban van, akkor a termikus energia hatására az egyensúlyi helyzet megváltozása minden irányban azonos valószínűségű. A tényleges ugrások természetesen annál gyakrabban következnek be, minél magasabb az átlagos termikus energia ($\sim kT$). Ismeretes az is, hogy az egyik egyensúlyi helyzetből a másikba átjutó molekulák száma a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan nő.



V.2. ábra



V.3. ábra

Az ugrás csak akkor jöhet létre, ha a molekula mellett üres vagy szabad térfogat található. Szabad térfogat azonban a folyadékokban mindig van, és aránya a hőmérséklet emelkedésével nő. A molekulák elmozdulásához szükséges aktiválási energia tehát lényegében két részből tevődik össze, egyrészt a szabad helyek képződéséhez szükséges energiából, másrészt a potenciálját legyőzéséhez szükséges energiából.

Vizsgáljuk most a nyírásnak kitett folyadékot! Az x -szel jelzett részecske mellett a nyírás irányában üres hely van. A nyíróerő hatására a részecske könnyebben ugrik át erre az üres helyre, mint vissza, s ugyanez a helyzet minden olyan részecskével, amelynek szomszédságában üres hely van. A nyírás irányában megkönnyített elmozdulások miatt végeredményben a folyadék felső rétegei gyorsabban mozognak, mint az alsók (V.3. ábra).

Mivel a ténylegesen végbemenő ugrások száma a hőmérséklet emelkedésével nő, érthető, hogy a viszkozitás magasabb hőmérsékleten alacsonyabb.

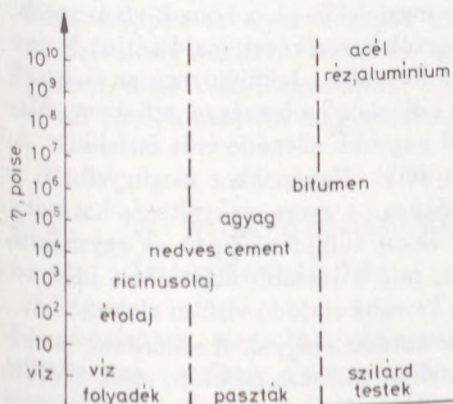
A belső súrlódás hőmérsékletfüggése igen nagy jelentőségű a kenőolajok esetében. A tengelyek, csapágyak stb. súrlódását csökkentő kenőanyagoknak ugyanis egyrészt elég viszkózusnak kell lenniük ahhoz, hogy ne szoruljanak ki a csúszó felületek közül, másrészt a viszkozitás túlságosan nagy sem lehet, mert ez feleslegesen növelné a súrlódási erőt. Szükséges követelmény továbbá, hogy η viszonylag széles hőmérséklet-tartományban megfeleljen a fenti követelményeknek. A kenőanyag felhasználhatóságát pl. megszabja az is, hogy a használat közben bekövetkező melegedés hatására milyen mértékben hígul. Általában a kenőolajok és zsírok visz-

kozítását üzemi hőmérsékletnek megfelelően kell beállítani, gondolni kell azonban arra is, hogy a berendezés hideg állapotban is indítható legyen.

A viszkozitás erős hőmérsékletfüggése miatt a különböző anyagok belső súrlódását általában 20-25°C-on szokás összehasonlítani. A kísérleti tapasztalatok szerint a különböző anyagok viszkozitása igen széles tartományban ($0-10^{20}$) változik. A nagyságrendek érzékeltetésére gondoljuk meg, hogy egységnyi viszkozitású az az anyag, amelynek egymástól 1 m-re elhelyezkedő 1 m² felületű rétegei 1 N nyíróerő hatására 1 m/s sebességgel csúsznának el egymáson. A viszkozitás mértékegysége a Newton-törvényből leolvashatóan $1 \frac{Ns}{m^2}$. Az alábbi táblázatban néhány anyag 25°C-on mért viszkozitását tüntettük fel.

Anyag	Ideális folyadék	Víz	Alkohol	Hg	Tej	60% cukor-oldat	Ét-olaj	Ricinus
10^3	0	1	1,2	1,6	2	57	100	1000

A táblázat mutatja, hogy a hétköznapi értelemben is folyadéknak tekintett anyagok viszkozitása is több nagyságrendnyi értéktartományt fog át. A polimer oldatok, festékek, gumiszármazékok, vagy például a bitumen viszkozitása még továbbbi nagyságrendekkel nagyobb lehet. Hozzávetőleges összehasonlítást tesz lehetővé az V.4. ábra, amelyen a viszkozitást logaritmikus léptékben ábrázoltuk. Az ábra jól érzékelteti, hogy egyes anyagokról miért is oly nehéz eldönteni, hogy szilárdak vagy folyékonyak. A nagy viszkozitású szurok- vagy aszfalttömb észrevehető módon szinte nem deformálható, hiszen már kicsiny alakváltozási sebesség mellett is óriási nyíróerők ébrednek. Néhány hónap alatt azonban még a szurok is elfolyik.



V.4. ábra

Ilyen értelemben tehát a szilárd és folyékony között nem húzható egyértelmű határ, hiszen a nyugvó és lassan folyó anyag között nincs szerkezeti különbség. Megállapodás szerint folyadéknak a $0 \leq \eta \leq 10^3$, szilárd testnek pedig az $\eta \geq 10^8$ viszkozitású anyagot tekintjük. Ezzel természetesen a gázokat is a folyékony anya-

gok közé soroltuk, ugyanakkor a szilárd és folyékony anyagok között széles átmeneti tartományt hagytunk.

A kategóriába sorolást lényegében a Newton-féle viszkozitási törvény alapján végeztük. A természet azonban sokszínűbb annál, hogy akár ez a laza csoportba sorolás működhesen. Az ugrógitt példája mutatja, hogy az anyagi viselkedés szempontjából döntő lehet az alkváltozás sebessége is. Valóban, a viszkozitás a hőmérséklet mellett a deformációsebességnek is függvénye lehet.

1.3. Nyírásra lágyuló és keményedő anyagok

Mintegy száz évvel ezelőtt Osborne Reynolds egyszerű kísérletet végzett; egy bőrtáskát játékgolyókkal rakott meg, majd vízzel csurig töltötte. Ezután a táskát megcsavarta. A nyíró igénybevétel hatására, a vízszint csökkent, mert a csavarás miatt egymáson elcsúszó golyók közé a víz be tudott hatolni, a deformáció hatására tehát a golyósokaság térfogata megnőtt. A kísérlet a nyírási tágulást modellezi, ami a kolloid oldatok jellegzetes tulajdonsága. (Kolloid oldatoknak nevezzük az olyan két- vagy többféle anyagból álló rendszert, amelyben az egyik anyag igen finom részecskék formájában keveredik el a másikkban. Kolloid oldatot képez pl. a nescafé.)

A kolloid oldatok belső súrlódási tulajdonságai jellegzetesen eltérnek a víz belső súrlódásától. A nyírási tágulás jelensége mellett fontos sajátosságuk, hogy viszkozitásuk erősen függ a deformáció sebességétől. Azokat a folyadékokat, amelyek belső súrlódása a nyírási sebességgel nő *nyírásra keményedőnek*, azokat pedig, amelyek belső súrlódása a nyírási sebességgel csökken *nyírásra lágyulónak* nevezzük.

A Reynolds-féle modellkísérletnek tökéletes megfelelője pl. a homok-víz keverék. Töltsünk meg egy mosószeres flakont víz és homok keverékével, majd zárjuk le egy lyukas dugóval, amelyen át üvegcső nyúlik a flakonba. Jelöljük meg az üvegcső oldalán a víz szintjét. Nyomjuk össze ezután különböző sebességgel a flakont. Minél nagyobb az összenyomás sebessége, annál nagyobb ellenálló erőt érzünk. A homok-víz keverék a nyírás hatására keményedik! Ugyanakkor megfigyelhető a nyírási tágulás is, az üvegcsőben a vízszint csökken. A gyors alakváltozás hatására fellépő keményedés azzal indokolható, hogy ekkor tulajdonképpen az egymással érintkező homokszemek súrlódnak egymáson, míg a lassúbb deformáció időt ad arra, hogy a homokszemek között lényegesen kevésbé súrlódó vízfilm alakuljon ki.

Igen sok olyan anyag létezik, amely a nyírás hatására lágyul. A szilárdnak látszó fogkrém viszkozitása a tubus szélén fellépő nyírás hatására csökken, ezért tudjuk kinyomni a tubusból, de hasonló módon lágyul a vaj vagy a margarin a kenéskor bekövetkező nyírás hatására.

A nyírás miatt bekövetkező viszkozitásváltozás érdekes esete az ún. tixotrópia. A tixotrop anyagokban a nyírás miatt fellépő lágyulást késve követi az eredeti állapot visszaállása. Tixotropikus anyagok például az olajfestékek, amelyek az ecsettel gyakorolt nyíróerő hatására könnyen kenődnek, az erőhatás megszűntével egy idő után azonban a folyósság megszűnik.

Az alakváltozási sebesség és a viszkozitás közötti kapcsolat mikroszerkezeti magyarázata anyagonként más és más lehet. A különböző anyagok esetén jellegzetes közös vonása azonban ezeknek az anyagszerkezeti modelleknek, hogy a viszkozitás megváltozása többnyire a finoman eloszló diszperz fázis és a közötté áramló "hordozó" folyadék kölcsönhatásával értelmezhető.

A legegyszerűbb esetben a folyadékban eloszló finom részecskék gömb alakúnak tekinthetők, s ekkor lényegében a Reynolds-féle vizes golyó elképzelést használhatjuk a keményedés magyarázatára.

Bonyolultabb esetekben a diszperz részecskék alakját, illetve szerkezetét is figyelembe kell vennünk. A nyírás hatására mozgásba jövő folyadék a megnyúlt diszperz részecskéket megforgatja és hossz tengellyel az áramlás irányába rendezi. Az ily módon rendezett részecskék már kevésbé befolyásolják a köztes folyadék áramlását, mint a kezdetben véletlenszerű beállással szétszórt részecskék. Érdekes következménye ennek, hogy az ilyen oldatokban a viszkozitás a hőmérséklet emelkedésével nő. A élénkülő hőmozgás ugyanis szétzilálja az alakváltozás hatására beálló rendet.

Tovább bonyolódik a helyzet, ha a diszperz részecskéket a folyadék mozgása rugalmasan deformálja. A deformáció következtében a részecskék kicsiny megszártott rugókká válnak. A deformáció mértéke azonban a részecskék forgása miatt állandóan változik, így a részecskék rezgésbe jönnek. A rezgés áttevődik a köztes anyagra is, s ezáltal növeli az anyagtól felvett energiát, ami végeredményben a viszkozitás növekedéséhez vezet.

Igen nagy nyírófeszültség hatására a diszperz részecskék széttöredezhetnek. A feldarabolódás hatására a részecskék gömbszerűbbé válnak, s ez csökkenti az oldat viszkozitását. A megfelelő helyzetben egymás mellé sodródó töredékek természetesen újra egyesülhetnek. Ennek valószínűsége azonban általában csekély. Következésképpen az ilyen anyagok másképpen viselkednek növekvő és csökkenő nyírófeszültség mellett. Tipikusan így viselkedik pl. a jól ismert ketchup, amely hosszabb állás után megszilárdul, keveréssel, rázással azonban ismét folyékonnyá tehető. Ezzel a modellel magyarázhatjuk egyes anyagokban a tixotrópia jelenségét.

1.4. A makromolekulás folyadékok tulajdonságai

Az eddigiekben tárgyalt különleges folyadéktulajdonságok fokozott mértékben jelentkeznek a polimer oldatok esetén. Hasonlítsuk össze az V.5. sematikus ábrák segítségével a víz és a polimer oldatok tulajdonságait néhány jellegzetes kísérleti szituációban.

Az V.5/a), b), c) ábrákon rúddal, illetve alul és felül elhelyezett keverőtárcsákkal forgásba hozott folyadékok láthatók. Az a) és b) esetben látványos különbséget tapasztalunk. A forgó polimer folyadék meglepő módon felmászik a keverőrúdra (Weissenberg-effektus), illetve váratlan módon domború felületet alkot a víznél megszokott homorú felülettel szemben. Kevésbé meglepő, mert kevésbé ismert és

nehezen megfigyelhető a c) ábrán vázolt jelenség. A forgásba hozott folyadékokban ún. másodlagos áramlások is kialakulnak. A tapasztalat szerint a newtoni folyadékokban és a polimer oldatokban a másodlagos áramlás iránya éppen ellentétes.

A d) ábra csövön át pumpált folyadék viselkedését mutatja. A mozgást egy, a folyadékban elhelyezett, kezdetben a cső tengelyére merőleges festéksáv alakváltozását figyelve követjük. Az első három határfelület a pumpálás közben felvett négy pillanatfelvételt. Amikor a festékcsoík a negyedik helyzetbe jutott, a pumpálást megszüntettük. A vízfelület ezután mozdulatlan marad, a polimer folyadék azonban meglepő módon visszahúzódik.

Az e), f), g) ábrákon áramló folyadékok tulajdonságait hasonlítjuk össze. A legismertebb, ugyanakkor talán legváratlanabb jelenség a polimer folyadék duzzadása. A hengeres csőből kilépve a newtoni folyadékok keresztmetszete csökken, a polimer azonban akár ötszörösére is duzzadhat. Lényegében ugyanezt a hatást mutatja az f) ábra is, csak sokkal kevésbé észlelhető módon. A félhenger alakú csatornában áramló víz felülete a csőfaltól távol sík, ezzel szemben a polimer folyadék enyhén kidomborodik.

A g) ábrán egy hirtelen leszűkülő csőben végbemenő lassú áramlás látható. A polimer folyadékban már akkor is örvény képződik, amikor a víz még szabályosan (laminárisan) áramlik.

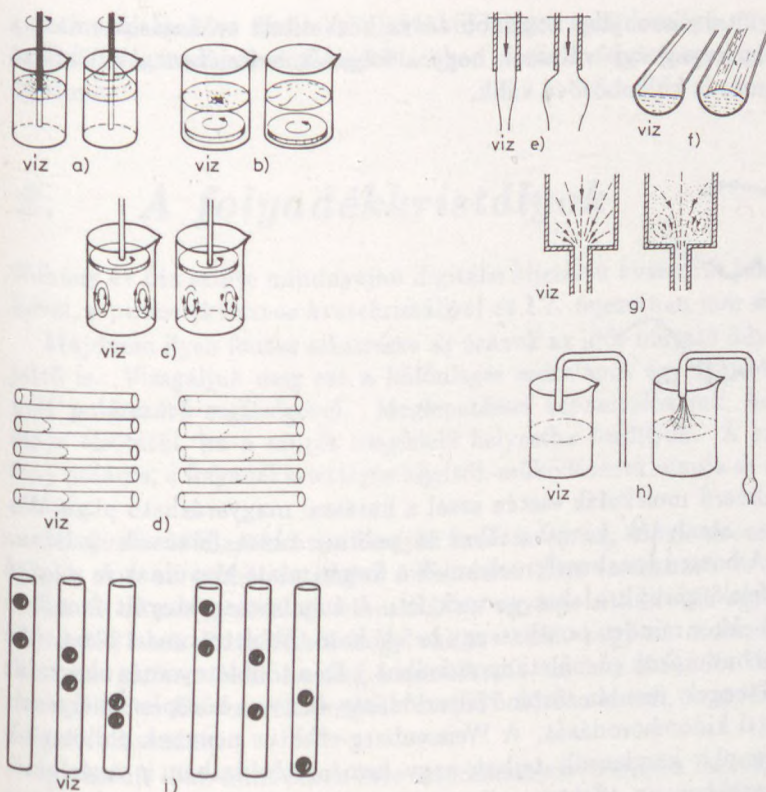
A h) ábra a polimerek esetén tapasztalható különleges szifonhatást mutatja. Mindnyájan tudjuk, hogy a víz vagy bor egy gumicső segítségével egyik edényből "átszívható" a másikba úgy, hogy a cső egyik végét a folyadékba merítjük, majd a másikat megszívjuk. A szifonhatás a polimer folyadékokban akkor is működik, ha a szívócső vége nem merül a folyadékba, hanem annak felszíne felett néhány centiméterrel helyezkedik el.

A viszkozitás mérését gyakran alapozzuk az adott folyadékban eső gömbök mozgásának vizsgálatára. Az i) ábra egy folyadékkal teli csőről készült pillanatfelvételeket szemlélteti. A csőben egymás után elejtett két gömb mozog. A tapasztalat szerint vízzel teli csőben a második golyó mindig utoléri az elsőt és ütközik vele. Hasonlóan viselkednek a polimer folyadékokban mozgó golyók is, ha a két testet gyors egymásutánban ejtjük a csőbe. Amennyiben azonban várunk kissé, akkor az eső golyók távolsága egyre nő.

A felsorolt jellegzetes különbségek mutatják, hogy a polimer folyadékok viselkedése döntően eltér a megszokott "vízszerű" folyadékok viselkedésétől. A magyarázat a makromolekulák szerkezetében és a hatalmas molekulaláncok között kialakuló kapcsolódásban rejlik. Az elmélet azonban bonyolult, nehéz, és talán még nem is végleges, hiszen a polimer folyadékokat csak 1930 óta ismerjük, s a szisztematikus kísérleti vizsgálatok is csak az 50-es években kezdődtek.

A polimer oldatok tulajdonságainak megértéséhez a már tárgyalt láncmodellre kell használnunk. A polimer folyadékok különleges tulajdonságai a hosszú molekuláknak az áramlási körülményekkel szemben történő különleges reakcióiból származnak.

A polimer oldatok áramlásának molekuláris magyarázatára nyilvánvalóan nem használhatjuk a newtoni folyadékokra alkalmazott egyszerű képletet. Ez azon-



V.5. ábra

nal belátható, ha gondolatban kiválasztunk a folyadékban egy, az áramlás irányára merőleges keresztmetszetet, és megvizsgáljuk a felület két oldalán a molekulaelrendeződést. Az V.6. ábra a határfelület két oldalán elhelyezkedő atomcsoportok között lehetséges kölcsönhatásokat szemlélteti. Az önkényesen felvett határfelület nagy valószínűséggel egyazon makromolekulához tartozó atomokat is elválaszt egymástól, ezért erős kölcsönhatás lép fel a két oldalon elhelyezkedő atomok között. Ezt szemlélteti, hogy ezeket a részecskéket az ábrán rugóval kötöttük össze. A további három kölcsönhatás típus már jóval gyengébb vonzerőket jelent. Vonzás lép fel az oldószér, a makromolekula és az oldószér, valamint a különböző makromolekulák közel kerülő atomjai között. A határfelület elnyírása közben egyrészt le kell győzni ezeket az erőket, másrészt fedezni kell a különböző sebességű mozgathoz szükséges impulzust.

Ebben az esetben tehát a folyadék belső feszültségállapotát a newtoni folyadékokra érvényes egyszerű törvénnyel szemben egy bonyolult, sok tagból álló kifejezéssel adhatjuk meg. Anélkül, hogy a számításokat részleteznénk, fizikai szemléletünkkel hagyatkozunk, ami azt diktálja, hogy az oldatban a belső erők a láncok beállásától függően anizotroppá, irányfüggővé válnak. Nyilvánvalóan befolyásolja az eredményt az is, hogy a hosszú molekulák között kialakulnak-e erős kötések.

A láncmolekulák által viszonylag hosszabb távra közvetített erőhatások miatt a külső nyíróerőre az anyag úgy válaszol, hogy a folyadék belsejében a különböző irányokban a nyomás is különbözővé válik.



V.6. ábra

A hosszú fonalszerű molekulák esetén ezzel a hatással magyarázható pl. a Weissenberg-effektus, amelynek következtében a polimer oldat felkúszik a benne forgatott rúdra. A hosszú fonalszerű molekulák a forgás miatt kinyúlnak és a forgó áramlásnak megfelelő görbült alakot vesznek fel. A rugalmasan kinyúlt fonalban fellépő feszítő erő ekkor minden pontban egy befelé ható többletnyomást okoz. (Az effektus hasonló a buborékok görbületi nyomásához.) Ez a többletnyomás okozza az anyagnak a forgó tengely mentén történő feltorlódását, illetve a középen elhelyezett keverőtárcsa feletti kidomborodását. A Weissenberg-effektus nemcsak polimer oldatokban, hanem pl. kondenzált tejben vagy keményítőoldatban is észlelhető. Ezekben az anyagokban az effektus mikroszerkezeti magyarázata természetesen más.

A d) és f) ábrán látható áramlási rugalmasság és a különleges szifonhatás is annak a következménye, hogy a mozgás következtében kinyúló polimer molekulák megfeszülnek, ezek a molekuláris rugók a külső hatás megszűnte után összeugranak. Az oldat laza szerkezete miatt a rugalmas összehúzódás nem lehet tökéletes, egy részleges rugalmasság azonban észlelhető. A szifonhatás esetén éppen ez emeli át a molekulagubancot a cső szája és a folyadék felülete közötti hézagon.

Az áramlási rugalmasság sem kizárólag a kémiai tisztaságú polimer oldatok sajátja. Észlelhető a jelenség pl. a megkevert paradicsomlevesben is. Keverjük meg a paradicsomlevest, majd vegyük ki belőle a kanalat! Azt tapasztaljuk, hogy a mozgás lecsillapodása után a leves kissé visszaforg.

Végül néhány szót a kiömlési duzzadás jelenségéről. A hatás molekulárisan az erő iránya mentén rendezett molekulák gubancolódásával értelmezhető. A cső által egymás mellé préselt hosszú molekulák a cső száján átjutva a hőmozgás hatására ismét felgubancolódnak és ez az oldalirányú méret növekedésével jár.

A fentiekben használt molekuláris modellek természetesen erősen leegyszerűsített képet adnak a makromolekulák viselkedéséről. A részletekbe azonban már csak azért sem mehetünk bele, mert a makroszkopikusan azonos viselkedésért anyagoként más és más mikroszerkezeti hatás lehet a felelős. A makromolekulák viselkedése jelenleg is erősen foglalkoztatja a fizikusokat és vegyészeket, s szinte na-

ponta születnek az újabb és újabb különleges tulajdonságú anyagok. Így a polimerek világának sokszínűségéből ebben a rövid fejezetben legfeljebb ízelítőt adhattunk.

2. A folyadékkristályok

Néhány év óta szinte mindnyájan digitális kijelzésű kvarcórát hordunk. Az óra lekével, a piezoelektromos kvarckristállyal az I.7. fejezetben már foglalkoztunk.

Majdnem ilyen fontos alkatrésze az órának az időt mutató folyadékkristályos kijelző is. Vizsgáljuk meg ezt a különleges számlapot egy fényképezőgéphez használt polárszűrő segítségével. Meglepetéssel tapasztalhatjuk, hogy az óra számlapja elsötétül, ha a szűrőt megfelelő helyzetbe fordítjuk. A számlapot elhagyó fény poláros; a folyadékkristályos kijelzők működésének alapja ez a polarizáló tulajdonság.

Menjünk azonban sorba, s kezdjük ismét az anyag felfedezésével. A folyadékkristályok nem az utóbbi évtizedek felfedezései közé tartoznak. A tudományos felismerés és annak gyakorlati felhasználása ugyanis ritkán esik egybe. Ezért mondhatta 1927-ben Rutherford, hogy aki azt hiszi, hogy az atommagfolyamatok valaha energiatermelésre lesznek használhatók, az hiú ábrándot űz. Hasonló okból nevezték Pol Duwez fémüvegeit "stupid" ötvözeteknek, s az értetlenség példáit még sorolhatnánk.

Így került több mint ötven évre a tudományos lomtárba Reinitzer, osztrák botanikus felfedezése is. Reinitzer egy szerves anyagot, a koleszteril-benzoátot vizsgálva felfedezte, hogy az 145°C -on zavaros folyékony anyaggá olvad és csak 179°C -on válik tiszta, átlátszó folyadékká. Az ugyancsak osztrák Lehman polarizációs mikroszkóppal vizsgálta az érdekes anyagot és megállapította, hogy a zavaros folyadékban optikailag anizotrop tartományok találhatók. Ezek a tartományok egymáshoz képest rendezetlenül helyezkednek el és a fényt igen különböző mértékben szórják. Ez teszi zavarossá a folyadékot. Az optikai anizotrópia azt jelenti, hogy az anyagban a fény a különböző irányokban más és más sebességgel terjed. Ez a tulajdonság a kristályos anyagokban szokott jelentkezni, a szabálytalan szerkezetű homogén folyadékokban merőben szokatlan. A kristályos anyagokra emlékeztető optikai anizotrópia és a jól látható folyékonyosság kettősségének kifejezésére adta Lehman az új fázisnak a folyadékkristály nevet. Mint általában mindig, a folyadékkristályok felfedezésekor is csak az első lépés volt nehéz, hama-mindeg, a folyadékkristályok felfedezésekor is csak az első lépés volt nehéz, hamarosan kiderült, hogy igen sok anyagnak van folyadékkristály fázisa. Az eleinte nagy intenzitással folyó kutatások a folyadékkristályok sok tulajdonságát felderítették, a furcsa sajátosságok elméleti magyarázata azonban nem sikerült. A különleges anyag iránti érdeklődés is egyre inkább lanyhult, s az 1930-as évekre a folyadékkristályok mellékesen említendő kuriózzummá váltak.

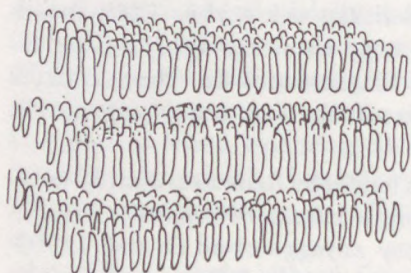
Az ötvenes években Angliában, Franciaországban, Amerikában és a Szovjetunióban szinte egyszerre kezdtek el kutatócsoportokat szervezni a folyadékkristályok tulajdonságainak meghatározására és gyakorlati felhasználására.

A folyadékkristályok diadalútja 1968-ban kezdődött, amikor G. H. Heilmeyer amerikai kutató rájött arra, hogy ez az anyag kijelzőként használható. Azóta került szinte mindnyájunk karjára folyadékkristály-számlapú kvarcóra. Ugyancsak folyadékkristályok mutatják számításaink eredményeit a zsebszámológépeken, sőt japán cégeknek sikerült kifejleszteni a folyadékkristályos televízió-képernyőket is.

2.1. A folyadékkristályok szerkezete

Az eddig követett módszerhez hasonlóan megpróbálunk rövid anyagszerkezeti magyarázatot adni a folyadékkristályok speciális tulajdonságaira.

A tapasztalat szerint folyadékkristályok többnyire olyan anyagokból keletkezhetnek, amelyek hosszúkas pálcikaszerű és elektromosan polarizált molekulákból állnak. Kristályos állapotban ezek a molekulák úgy rendeződnek szabályos rácsba, hogy egyúttal a molekulák hossz tengelye is párhuzamos egymással. A részecskék helyét megszabó kristályrács mellett ezeket az anyagokat tehát egy irány szerinti rendezettség is jellemzi.



V.7. ábra

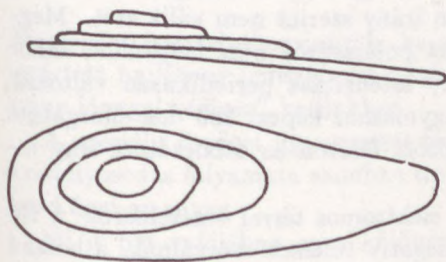
A hőmérséklet növelésével a hőmozgás a molekulatengelyek és a kristályrács rendjét is fokozatosan szétrázza. A folyadéktulajdonságok megjelenésének első lépése többnyire az, hogy a kristály párhuzamos rétegei között annyira meggyengül a kapcsolat, hogy azok könnyen elcsúsznak egymáson (V.7. ábra). Az egyes rétegeket a hosszú párhuzamos molekulák közötti kötőerők ekkor még szilárdan együtt tartják. Érdekes igazolása ennek a ténynek az, hogy ha ilyen folyadékkristályt síma felületre cseppentünk, akkor lépcsős csepp képződik (V.8. ábra). A lépcsők kialakulása a réteges szerkezet következménye. Egy-egy lépcső vastagsága azonban mindig az atomi rétegvastagság többszöröse.

További melegítés hatására a hőmozgás a rétegek irány szerinti rendjét is fel lazítja. Bár az egyes rétegekben a molekulatengelyek még párhuzamosak maradnak, a különböző rétegekben ez az irány már nem azonos. Gyakran előfordul, hogy a molekulák iránya az egymás utáni rétegekben periodikusan változik (V.9 ábra).

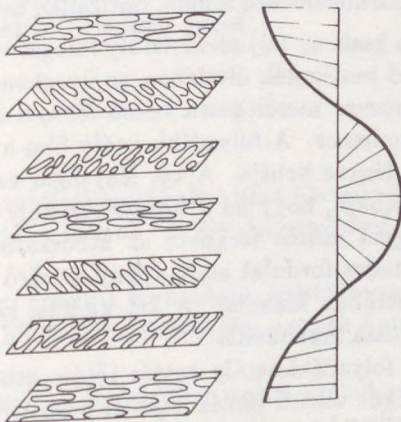
A hőmozgás azonban nemcsak az irány szerinti rendezettséget csökkentheti. Szétrázódhat a molekula-középpontok szabályos rendje is. Először csak az egyes

párhuzamosan álló tengelyű molekularétegekben válik véletlenszerűvé a molekula-középpontok elhelyezkedése, később azonban a rétegek is összekeveredhetnek. Érdeemes megjegyezni, hogy a kristályrács bomlásával a molekulatengelyek ismét párhuzamosan rendeződnek (V.10. ábra).

A hosszú molekulákból álló kristályokban a rend tehát sokféleképpen és fokozatosan bomolhat fel. Természetesen a fentiekben leírt lépések mindegyike nem válik szét minden anyagban. A vázolt sorrend azonban nagyjából minden folya-



V.8. ábra



V.9. ábra



V.10. ábra

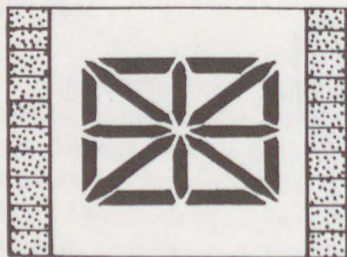
dékkristály olvadására érvényes, legfeljebb egy-egy stádium kimarad. Az olvadási folyamat végeredménye minden esetben a hosszú távú rend teljes megszűnéséhez, azaz igazi folyadékállapothoz vezet. Mindaddig folyadékkristály állapotról beszélünk azonban, amíg az anyagban a molekulák valamilyen irányban rendezettek. Ez a rendezettség mint láttuk létrejöhet egy atomi síkban a molekulák szabályos elhelyezkedésével vagy a molekulatengelyek irány menti beállításával is.

2.2. Mire használhatók?

A folyadékkristályok felhasználása elsősorban különleges optikai sajátosságaiknak köszönhető. A folyadékkristály hosszú molekulái mentén az elektronok általában könnyen mozgásba hozhatók. Így a fény hatására ezek a molekulák kicsiny, irányítottan sugárzó fényforrásokká válnak. A rezgésbe hozott elektronoktól kibocsátott fény interferenciája a kristályokhoz hasonló különleges tulajdonságokat mutat. Azok a folyadékkristályok, amelyekben a hosszú molekulák az egész anyagban párhuzamosan állnak, optikailag kettős törők.

Ha keskeny folyadékkristály réteget viszünk két üveglap közé, akkor az anyagot alkotó molekulák általában az üveglemezre merőlegesen állnak. Ez a réteg az üveglemezre merőlegesen beeső fénnel szemben úgy viselkedik, mint a kristályos csillámlemez. A folyadékkristály film a fényt két egymásra merőleges, síkban poláros fényre bontja. A két fénysugár azonban irány szerint nem válik szét. Megállapítható, hogy ha a folyadékkristály réteget polárszűrők közé helyezzük, akkor az egyik szűrőt forgatva az átbocsátott fény intenzitása periodikusan változik. Egy teljes fordulat alatt a fény a szűrő két egymáshoz képest 180° -kal elforgatott helyzetében kialszik. A két kioltási hely között félúton az átbocsátott fény intenzitása maximális.

A folyadékkristály kettős törése azonban elektromos térrel vezérelhető! A folyadékot alkotó molekulákban a pozitív és negatív töltések szétválnak, a hosszú molekulák elektromos dipólusként viselkednek. A molekulák irány szerinti beállása elektromos térrel megváltoztatható. A hosszú molekulák már 3-8 V-os feszültség hatására is kifordulnak a tér irányából. Ekkor a réteg kettős törő tulajdonsága megszűnik. Ha tehát a keresztezett polarizátorok közé helyezett folyadékkristályra



V.11. ábra

megfelelő irányú elektromos teret kapcsolunk, akkor a rendszer fényáteresztővé tehető. Lényegében ezen az elven működnek a kvarcórák és a számológépek folyadékkristályos kijelzői is. Ezekben a keskeny folyadékfilm alatt egy tükröző, fellette pedig egy átlátszó elektróda helyezkedik el. A folyadékkristály átlátszó és átlátszatlan (világos és sötét) helyeinek váltakozása az egyik elektródán elhelyezett rajzollal vezérelhető (V.11. ábra). Ez a rajzolat karóránkon is megfigyelhető, ha az órát kissé előredöntjük, azaz nem a számlapra merőleges irányból figyeljük.

A folyadékkristályok fényáteresztő képessége azonban nemcsak elektromos feszültség hatására, hanem a hőmérséklet emelkedésével is változhat. Megfelelően választott folyadékkristály keverék színe már $0,1^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet-változás hatására is megváltozhat. Közismertek a gyógyszerárakban kapható homlokra helyezhető hőmérő csíkok, amelyek a test hőmérsékletét a színét változtató folyadékkristály jelzi. Léteznek olyan folyadékkristály keverékek is, amelyek színe a hőmérséklet függvényében folyamatosan változik, pl. a zöld és a vörös különböző árnyalatain keresztül. Egy széles folyadékkristály bevonatú műanyaglemez segítségével ily módon feltérképezhető pl. egy beteg testrész hőmérsékleteloszlása, s ezzel kijelölhető a környezetnél kissé magasabb hőmérsékletű gyulladt góccok.

3. Az üvegek

Meglepő tapasztalathoz jutunk, ha az egyesült államokbeli Allied Chemical által gyártott hajlékony fémszalagot gyufa lángjába tartjuk. A fém "meggyullad és kicsiny lánggal végigég" kezünkben.

A speciális ötvözet úgynevezett fémüveg, amely a hő hatására kristályosodik, a kristályosodás folyamata azonban további hőfelszabadulással jár, s ennek hatására kezd égni az anyag.

Mi is hát valójában ez a különös anyag? Könyvünkben sokat foglalkoztunk már a fémek képlékeny tulajdonságaival. Az ősidők óta felhasznált martenzites átalakulás példáján bemutattuk, hogy az ötvöztetés és a magas hőmérsékletre való alakulás példáján bemutattuk, hogy az ötvöztetés és a magas hőmérsékletre való gyors hűtés hatására olyan metastabilis fázisok alakulnak ki, amelyek a fém szilárdságát nagymértékben növelik. Az anyagok többsége megszilárdulás után kristályos állapotú. Jól tudjuk azonban, hogy ez nem szükségszerű, léteznek ún. üvegtápláló anyagok is, amelyek olvadáskor lehűtve nem alakul ki kristályszerkezet. Ezek az anyagok folyadékalapotban dermednek meg. Szerkezetük üvegállapotban őrzi az olvadék atomi elrendezését.

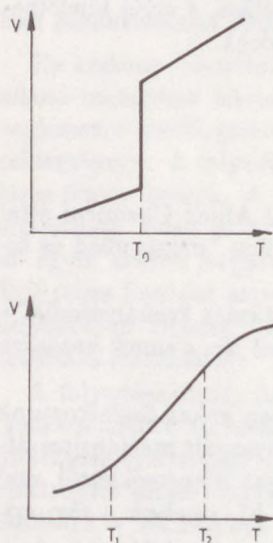
3.1. Az üvegek szerkezete és fizikai tulajdonságai

A szilárd állapotú anyagok alakja, térfogata állandó, illetve csak nagy erő hatására változik. A mechanikai értelemben szilárd anyagok azonban szerkezeti szempontból erősen különbözhetnek egymástól. A mechanikai értelemben szilárd anyagok többsége kristályos szerkezetű, de vannak olyanok is, amelyek nem kristályosak. Ez utóbbiak az üvegek.

Az "üveg" szó itt nem kizárólag a köznapi értelemben vett üveget (szilikátüveg) jelenti, hanem a nem kristályos szerkezetű fémeket (fémüveg) és a műanyagokat is. Az üvegek – szerkezeti szempontból – folyadékok, amelyekben olvadékuk gyors lehűlése miatt nem következik be kristályosodás. A továbbiakban az üvegek tulajdonságaival és szerkezetével, az üvegállapot létrejöttével foglalkozunk.

Az üvegek tulajdonságait a kristályok és a folyadékok sajátosságai összehasonlításának tükrében érdemes összefoglalni.

A kristályos anyagok fizikai jellemzői (keménység, rugalmasság, törésmutató, dielektromos állandó stb.) általában irányfüggő mennyiségek. Röviden: a kristályos anyagok anizotropok. Az üvegek fizikai tulajdonságai azonban nem függenek az iránytól, az üvegek izotrop anyagok. Az anizotrópia a kristályszerkezetről, az izotrópia ennek hiányáról tanúskodik.



V.12. ábra

Az üvegek és a kristályok különbözősége jól megmutatkozik abban is, hogy paramétereik hőmérsékletfüggése erősen eltérő. Az V.12. ábra a kristályos anyagok és az üvegek térfogatváltozását szemlélteti a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a kristályok térfogata egy határozott T hőmérsékleten (az olvadásponton) ugrásszerűen megváltozik. (Hirtelen változást mutat az olvadásponton a kristály többi paramétere is.) A gyors változás azt jelzi, hogy az olvadással lényegesen megváltozott az anyag szerkezete. Az üvegeknek nincs határozott olvadáspontjuk, így térfogatváltozásuk sem ugrásszerű. A határozott T olvadáspont helyett itt egy $T_2 - T_1$ hőmérséklet-tartomány, az ún. lágyulási hőmérséklet-intervallum figyelhető meg. (Ez a tartomány az anyagi minőségtől függően tíz vagy száz fok nagyságrendű lehet.) A melegítés során az üvegek ebben az intervallumban egyre képlékenyebbek, lágyabbak lesznek, és a tartomány felső határán már sűrű folyadékként viselkednek. (A lágyulási folyamatot egyszerűen megfigyelhetjük, ha egy kb. 30 cm hosszú, vékony, kb. 5 mm átmérőjű üvegrudat vagy csövet két végénél fogva középen gázlánggal hevítünk.) Az üvegek tulajdonságainak folyamatos változása arra mutat, hogy az üveg részecskéinek helyhez kötöttsége nem egy határozott hőmérsékleten következik be, illetve szűnik meg.

Az anyag szerkezeti felépítéséről a diffrakciós vizsgálatok adják a legközvetlenebb információt. Az üvegekről készített diffrakciós felvételeken a folyadékokra jellemző elmosódó gyűrűrendszer figyelhető meg. A diffrakciós mérések egyértelműen igazolják, hogy az üvegek szerkezete a folyadékokéhoz hasonló.

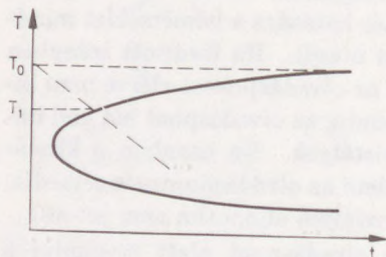
3.2. *Az olvadék túlűtése – az üvegállapot kialakulása*

A melegített kristályos anyag olvadása azonnal megindul, amint a kristály hőmérséklete az olvadáspontot eléri. További melegítés hatására a hőmérséklet mindaddig nem változik, míg az egész anyag meg nem olvadt. Ha fordított irányban járunk el – vagyis ha az olvadékot hűtjük –, akkor az olvadáspontot elérve nem indul meg azonnal a kristályosodás. Az olvadékot mindig az olvadáspont alá kell hűteni ahhoz, hogy megjelenjenek benne az első kristályok. Ha azonban a kristályosodás már megindult, akkor az anyag hőmérséklete az olvadáspontra emelkedik, s mindaddig nem csökken, amíg az egész anyag kristályos állapotba nem jutott.

A legtöbb olvadékban már néhány fokkal az olvadáspont alatt megindul a kristályosodás. Néhány anyag olvadéka azonban (pl. timol, fixírsó) jóval az olvadáspont alá hűthető, és ezen az alacsony hőmérsékleten is tartósaan folyadékalapotban tartható. A túlűtött folyadék kristályosodását egy apró kristálydarab bedobásával (esetleg az edény rázásával) indíthatjuk meg. A folyadékok túlűtését a következőképp értelmezhetjük.

A folyadékokban, mint ahogyan azt már láttuk, a részecskék kölcsönhatása nem nagyon különbözik a kristályos anyagra jellemzőtől. A lényeges eltérés abban van, hogy míg a kristályok egész térfogatában rendezettek a részecskék, addig a folyadékban az erős hőmozgás miatt ez a rendeződés csak kis tartományokra terjed ki. Ezek a tartományok csak a másodperc tört részéig változatlanok, minduntalan felbomlanak és újjáalakulnak. Az olvadékot hűtve a hőmozgás intenzitása csökken, a csoportok átlagos élettartama és mérete nő. Az olvadáspontra hűtött olvadékban azonban még a legnagyobb molekulacsoportok sem tekinthetők kristályoknak. Ezek a csoportok még mindig állandó változásban vannak. A folyadékot tovább hűtve egyes molekulacsoportok a kedvező véletlenek folytán akkorára nőhetnek, hogy a környező molekulák állandó "bombázása" már nem képes szétbontani őket. Ezt a kritikus méretet meghaladó molekulacsoportot, mivel szerkezete állandó, már apró kristálynak, ún. kristálykezdeménynek tekinthetjük. Ha az olvadék csak kicsit hűlt az olvadáspont alá, akkor csak a különlegesen nagy molekulacsoportokból válik kristálykezdemény. A túlűtés mértékének fokozásával a kristálykezdemény kritikus mérete csökken. Ha a kristálykezdemények kialakultak az olvadékban, az anyag kristályosodása ezek növekedésével már gyorsan végbemegy. A kristályosodás döntő feltétele tehát a kristálykezdemények, "csírák" képződése. Az V.13. ábrán a kristálycsíra kialakulásáig szükséges átlagos várakozási idő és a hőmérséklet kapcsolatát mutatjuk be. A grafikonról leolvasható, hogy a kristálygóc képződéséhez szükséges idő először csökken, majd ismét növekszik, ahogy az

anyagot egyre jobban és jobban az olvadáspont alá hűtjük. A görbe segítségével megmondható, hogy különböző sebességgel hűtve az olvadékot hány fokkal az olvadáspont alatt indul meg a kristályosodás. Ha például az olvadékot a szaggatott vonalnak megfelelően hűtjük, a kristályosodás a T_1 hőmérsékleten indul meg. A grafikonról azonnal látszik, hogy ha a hűtés sebessége elegendően nagy, akkor az olvadékban nem alakulnak ki kristálycsírák, ezért a kristályosodás elmarad. A folyadék hőmérsékletének csökkenésével a belső sűrűlódás rohamosan növekszik. A kristályosodás nélkül lehűlt olvadékok belső sűrűlódása olyan nagy, hogy az anyag mechanikai szempontból már szilárdnak tekinthető. Ilyen anyagok az üvegek.



V.13. ábra

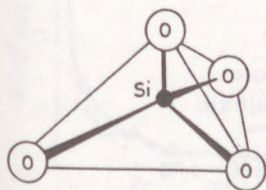
Az üvegek tehát nem különleges anyagok. Elvileg minden anyag olvadékából keletkezhet üveg, ha az olvadékot elegendően nagy sebességgel hűtjük. A mindennapi életben üveggént ismert anyag a szilikátüveg. Előállításuk könnyű, mert lassú hűtés hatására sem kristályosodik ki. Ugyancsak könnyen dermedszthető üveggé számos műanyag is. Ezzel szemben a fémolvadékokból készült ún. fémüvegek előállítása különlegesen nagy hűtési sebességet, bonyolult gyártási technológiát kíván.

3.3. A szilikátüvegek szerkezete

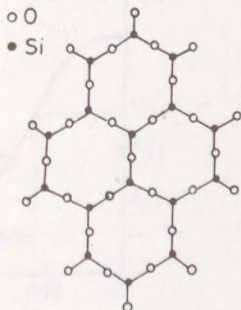
A közönséges üvegek – a szilikátüvegek – alapanyaga a kristályos szilícium-dioxid (SiO_2), a kvarchomok. A kémiai név (és az SiO_2 képlet) a szilícium és az oxigénatomok arányát tükrözi. Kristályos állapotában a SiO_2 szerkezete a jég kristályszerkezetére emlékeztet. A jégben a H_2O -molekulák tetraéderesen kötődnek egymáshoz.

A szilícium-dioxid kristályszerkezete szintén tetraéder egységekből épül fel. A tetraéder csúcsaiban négy oxigénatom helyezkedik el, a tetraéder közepén pedig – a nagyméretű oxigénatomoktól körülfogva – foglal helyet a kis szilíciumatom (V.14. ábra). Az ilyen " SiO_4^{2-} " tetraéderek szabályos összekapcsolódásával épül fel a kvarckristály. Az V.15. ábra a szabályos térbeli szerkezet egy síkbeli vetületét szemlélteti. A rajzon a fekete körök a szilícium-, a fehérek az oxigénatomokat jelölik. A síkban minden Si-atom 3 oxigénnel kapcsolódik. A térbeli szerkezetben a

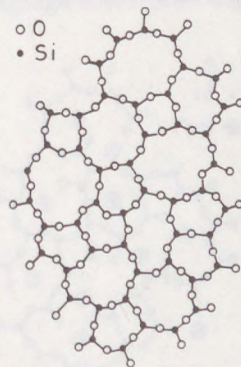
szomszédos Si-atomok felváltva egyszer a rajz síkja alatt, máskor a rajz síkja felett kapcsolódnak a negyedik oxigénhez, és így kötik össze a rétegeket. A kvarckristály 1710°C-on megolvad, de ha hűtjük az olvadékot, rendszerint nem kristályos anyag, hanem üveg keletkezik. A kvarc esetében ugyanis az egyszerű lehűlés is túl gyors ahhoz, hogy a szabályos kristályszerkezet alakuljon ki. Az V.16. ábra síkban szemlélteti a kvarcüveg szerkezetét. Az V.15. és az V.16. ábrákat összehasonlítva érzékelhetjük az üveg és a kristályos anyag közötti különbséget. A kvarcüvegben a szabályos rácsszerkezet helyett szabálytalan térbeli hálószerkezet alakul ki. Vegyük azonban azt is észre, hogy – a szerkezeti különbözőség ellenére is – az atomok kapcsolódási módja változatlan.



V.14. ábra



V.15. ábra



V.16. ábra

Az atomokat összetartó erő igen erős, kovalens jellegű. A kötést létrehozó elektronok energiája olyan alacsony, hogy közönséges fény hatására az elektronok nem gerjesztődnek – az üveg átlátszó. A térhálóba kapcsolódó atomok gyakorlatilag helyhez kötöttek, ezért az üveg szobahőmérsékleten rideg, törékeny. A hőmérséklet emelésével a növekvő kötéstávolság miatt a hálószerkezet fokozatosan felszakad,

miközben az üveg egyre inkább alakíthatóvá válik. A kvarcüveg lágyulása azonban csak olyan magas hőmérsékleten következik be, amely már rendkívül megnehezíti az üveg feldolgozását. A feldolgozhatóság javítására a SiO_2 olvadékhoz különféle fém-oxidokat adagolnak. (Az ablaküveg például nátrium-oxid adagolásával készül.)

A fém-oxidok hatására a kvarcüvegre jellemző térbeli hálószerkezet fellazul. Ennek az az oka, hogy az oxidokból származó oxigénionok csak egyetlen szilíciumatomhoz kötődnek. (A SiO_4 tetraéderek összekapcsolódásakor minden oxigén két Si-atommal létesít kötést.) Az oxigén negatív töltését a fém-oxidokkal bevitt fémionok töltése kompenzálja. A fémionok a felszakadozott háló üregeiben helyezkednek el. Az V.17. ábra nátrium-oxid (Na_2O) adagolásával kapható ún. nátronüveg szerkezetének kétdimenziós képét mutatja.

Mint ahogy az üvegeknek nincs meghatározott összetételük, fizikai tulajdonságaik különböző oxid adalékokkal folyamatosan változtathatók.

A mindennapi gyakorlatban a szilikátüvegekkel leggyakrabban építőipari anyagként vagy csomagolóanyagként találkozhatunk. Ezek az anyagok alkálifém, alkáli-

Diagram illustrating the chemical structure of a zeolite framework, showing a network of silicon (Si) and oxygen (O) atoms forming a cage-like structure. Sodium ions (Na^+) are shown as positive charges within the framework.

3.3.1. Az üveggyártás

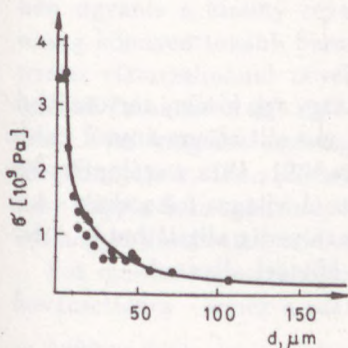
A normál táblaüveget (ablaküveg) húzással állítják elő. Ennek lényegét jól megérthetjük a következő példán keresztül. Ha egy kés élet mézbe mártjuk, majd kiemeljük, akkor a kés mézréteget húz magával. Hasonlóképpen alakítható az üveg is. A lassan, egyenletesen húzott üveglvadék a levegőn lehűlve üvegtáblává dermed. A függőlegesen emelkedő üvegtáblát két oldalról nekifekvő hengerek továbbítják több emeletnyi magasságba. A hatalmas lap legfelső részét nagy táblák formájában időről időre levágták. Az ilyen eljárással készített táblaüveg vastagsága – amit a húzás sebességével szabályoznak – elfogadhatóan egyenletes ahhoz, hogy pl. ablaküveggént használjuk.

204

üvegeket alkalmaznak a tükörgyártásnál és a bútoriparban. A gyártási eljárás azon alapul, hogy az üvegolvadék egy kb. 1000°C-os fémolvadék (ón) sík felszínén a nehézségi erő hatására egyenletes vastagságban terül szét.

A speciális célokra változatos felületi mintázattal készülő, esetleg belső dróthálójával erősített vastag táblaüveget formába öntéssel gyártják.

Érdeemes külön szólni az üvegszálgyártásról. Hasonlóan ahhoz, ahogyan egy mézből függőlegesen kiemelt pálcikával mézfonalat húzhatunk, az üvegolvadékból is igen finom, gyakorlatilag korlátlan hosszúságú üvegszálak húzhatók. A vékony üvegszál tulajdonságai erősen különböznek a vastag üvegtárgyakétól. A hajszálnál vékonyabb ($d \approx 10 - 50 \mu\text{m}$) üvegfonal rugalmasan hajlékony és meglepően nagy szakítószilárdságú. Terhelhetősége meghaladja a hasonló vastagságú acéldrótét. Az



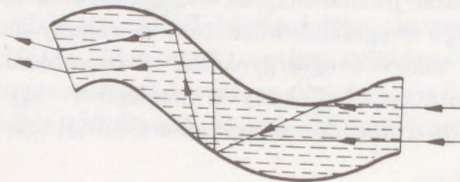
V.19. ábra

V.19. ábra különböző vastagságú üvegszálak szakítószilárdságát mutatja. A mérési eredmények a töréstechnika megalapozójától Alan Griffithtől (lásd II.6. fejezet) származnak. Az üvegszál készítés során az olvadékot sok egymás melletti platina csövecskén áramoltatják ki és húzzák nagy sebességgel vékony szálakká. A még folyékony szálát a felületi feszültség teljesen egyenletes keresztmetszetű, sima hengerre húzza össze. A már megdermedt, de még meleg szálra egy igen vékony (kb. $1 \mu\text{m}$ vastagságú) műanyag védőréteget visznek fel. Ez védi meg a később köteggé összefogott vagy szövetté font szálakat attól, hogy egymással súrlódva felületük megsérüljön, valamint attól, hogy a levegő páratartalmának hatására korrodálódjanak.

Az üvegszálakat igen elterjedten használják pl. a szálerősítésű kompozit anyagokban (lásd II.8.3. fejezet). A finom üvegszálakból készült hajlékony kötegek (száloptika) speciális felhasználási területe az orvosi diagnosztika. A száloptika néhány milliméter keresztmetszetű, sok száz vékony üvegszálból álló hajlékony köteg, amely viszonylag könnyen bevezethető az emberi test belsejébe is. Az üvegszálacon keresztül az orvos szinte belenézhet a vizsgált szervekbe.

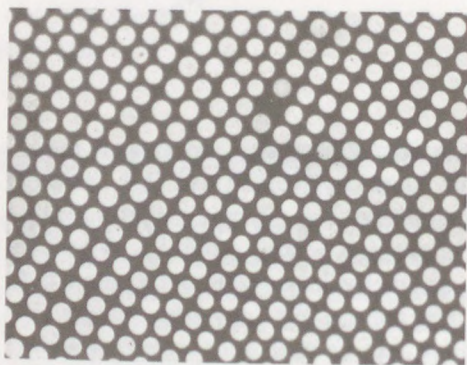
Az eszköz optikai működése igen egyszerű. Az üvegszálak egyik végén belépő fényt a hajlékony szál elvezeti a megfigyelőhöz. Meglepőnek tűnhet, hogy a fény sugarak egyenesvonalú terjedésével ellentétben a fény most a szálak kanyargós

alakját követi. Ennek magyarázata a teljes visszaverődés jelenségére támaszkodva adható meg. Ha a fény két közeg határára érkező optikailag sűrűbb közegből lép át optikailag ritkábbba, akkor egy meghatározott határszögnél nagyobb beesési szög esetén teljes visszaverődést szenved, azaz nem lép át a ritkább közegbe. A szál-optika esetén éppen ez valósul meg. Az V.20. ábra a fény visszaverődésektől szakaszolt pályáját illusztrálja az üvegszálaban.



V.20. ábra

A szál-optika egy-egy vékony üvegszálaban a vizsgált tárgy egy kicsiny tartományáról kiinduló fény terjed tova. Ily módon az eszköz a vizsgált tartományról szinte pontonként felvett képet továbbítja a megfigyelőhöz. Az V.21. ábra a szál-optika keresztmetszetéről készített mikroszkópi felvételt mutat. A világos foltocskák a kör keresztmetszetű üvegszálabak, a szálabak műanyag bevonata pedig alig látható. A felvétel jól mutatja, hogy az elemi üvegszálabak rendezett köteget alkotnak.



V.21. ábra

3.3.2. Az üveg törékenysége

Az üveg – annak ellenére, hogy mindannyiunk számára a törékenység jelképe – egyike a legerősebb anyagoknak. Nagy vákuumban a hibamentes üveg szakítószilárdsága $10^6 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$, ami az általában használt fémötvözetek szakítószilárdságának tízszerese.

A szilárdság és a törékenység furcsa kettősségét az okozza, hogy a mindennapok üvegtárgyai nem hibamentes anyagból készültek. A használat során még az ere-

detileg hibátlan üvegfelületeken is – kémiai és mechanikai hatások miatt – kicsiny, szemmel nem látható repedések keletkeznek. Az üveg törése végső soron e repedések növekedésének következménye. (A folyamat elvi leírására szinte tökéletesen alkalmazható a II.6. fejezetben nagy vonalakban ismertetett Griffith-féle elmélet.)

Az üveg törése és a mikrorepedések közötti kapcsolat már régóta ismert, az azonban, hogy a repedések minden körülmények között folyamatosan növekednek, csak az 1960-as években vált világossá. Az üveg törése tehát folyamatosan zajló folyamat, amely ha a repedés lassan terjed, évtizedekig is eltarthat. Amennyiben azonban a repedés terjedése valamilyen külső hatásra felgyorsul, akkor a törés a másodperc törtrésze alatt bekövetkezhet. Mindnyájunk számára természetes, hogy külső-terhelés, ütés hatására a repedés terjedése felgyorsul. A megfeszülő üvegben ugyanis a kicsiny repedések csúcsánál a feszültség megsokszorozódik, s az anyag könnyen tovább hasad. Meglepő azonban, hogy a repedés terjedését a környezet víztartalmának növekedése is elősegíti. Tapasztalati alapon az üveggel foglalkozó "szakemberek" már régen észrevették, hogy a víz elősegíti az üveg repedését. Az üvegesek az üvegvágó karcolatát gyakran benedvesítik, hogy a vágást megkönnyítsék. De a jelenség ősi ismeretére utaló emlékek is fennmaradtak. Tudjuk, hogy a louisianai indiánok, amikor kovaköböl (ez az üveghez hasonló anyag) nyílhegyet készítettek, a követ pattintás előtt egy szertartás keretében meggyőzték.

Sok más ősi tapasztalathoz hasonlóan – emlékezzünk csak a damaszkuszi pengék kovácsolására – ennek a jelenségnek a magyarázatát is csak évszázadokkal később, az 1980-as évek elején tudta megadni két amerikai kutató, Terry A. Michalske és Bruce C. Bunker.

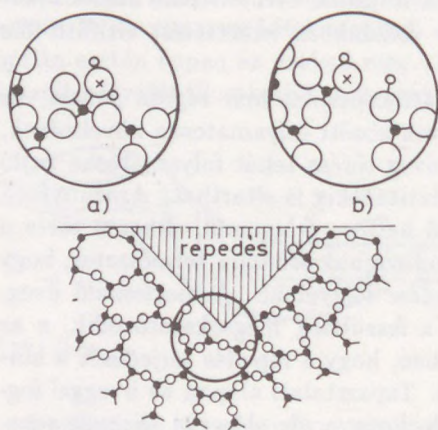
Michalske és Bunker kimutatta, hogy a repedés csúcsánál az üveget alkotó szilícium-dioxid tetraédereket összekapcsoló szilícium-oxigén kötés szakad fel. Mint-hogy az üvegben a szilícium-dioxid egységek 6-7 tagú gyűrűkké állnak össze, egy kötés felszakadása a repedést kb. egy gyűrű átmérőjével (0,4-0,5 nm) hosszabbítja meg. Közös körülmények között a szilikát tetraéderek rendkívül szilárdan csatlakoznak egymáshoz. Ennek érzékeltetésére megjegyezzük, hogy míg 1 g víz elforrálásához (a vízmolekulák közötti összes H-híd felszakításához) 415 J energia szükséges, 1 g kvarcüvegben az összes szilícium-oxigén kötés felhasításához 5460 J energia kell.

A víz jelenlétében azonban a vízmolekula kémiai reakcióba léphet a szilícium-oxigén kötéssel, s ilyenkor e kötések felhasításához már csak 327 J energia szükséges.

A kémiai reakció nagy vonalakban a következőképpen zajlik le: A repedésbe kerülő vízmolekula a repedés csúcsánál megkötődik azáltal, hogy az oxigénatom nem kötő elektrópárjai kötést létesítenek a szilíciumatommal.

Ugyanakkor a szilíciumlánc egy oxigénatomja és a vízmolekula között egy hidrogénhid jön létre. Ez a hidrogénhid azonban fokozatosan átbillen a lánc oxigénje felé, s a hidrogén teljesen a láncbeli oxigénatomhoz kerül át, miközben a szilícium-oxigén lánc elszakad. A folyamat befejezéséig pedig a vízmolekula és az eredeti szilícium-oxigén kötés elválik, a helyére két felületi szilánccsoport (a szilíciumhoz kapcsolódó hidroxilcsoport) kerül.

Ezzel a repedés egy szilíciumgyűrű ármérőjével tovább lépett. Ezt a folyamatot mutatja az V.22. ábra.



V.22. ábra

Pusztán a víz hatására a szilícium-oxigén kötések rendkívül lassan hasadnak. Mechanikai feszültség jelenlétében azonban a repedés csúcsánál a kötések rendkívüli mértékben megfeszülnek, a tetraédes kötésszög torzul, s így a vízmolekula már könnyen feltépi a kötést.

3.4. A fémüvegek

Térjünk vissza végül a bevezetőben említett különleges anyagokra, a fémüvegekre. Az V.3.2. fejezetben megállapítottuk, hogy a szokásos körülmények között kristállyá, illetve üveggé dermedő anyagok közötti különbség a kristályos szerkezet kialakulásának sebességében van. A szilikátkristályok szerkezete bonyolult, ezért a kristályosodáshoz szükséges csírák csak igen lassan alakulhatnak ki. Ha a szilikátolvadékot közönséges körülmények között hagyjuk lehűlni, az anyag rendezetlen atomelrendeződéssel, üvegállapotban szilárdul meg. A fémek esetén a kristálymagok kialakulása és növekedése nagy sebességgel megy végbe, ezért a fémek az olvadék normál sebességű hűtésekor kristályosodnak. A gondolatsor egyenes folytatásaként azonban várható, hogy a fémekben is megfagyasztható a folyadékállapot, ha elegendően gyors hűtést alkalmazunk.

A kristályszerkezet nélküli ún. "amorf" fém előállítására irányuló kísérletek azonban csak 1960-ban vezettek sikerre, mert a szükséges hűtési sebesség valóban óriási volt. Pol Duwez kaliforniai professzor és munkatársai 75% aranyat és 25% szilíciumot tartalmazó ötvözet olvadék cseppjeit hideg rézfelületre szórták, és ezzel $1\,000\,000^\circ\text{C/s}$ sebességű hűtést értek el. A gyors hűtés nem adott időt a kristályszerkezet kialakulására, az ötvözet megdermedt anélkül, hogy a kristályosodás megindult volna, a szilárd fém is amorf állapotú maradt.

Duwez úttörő munkássága nyomán egyre újabb ötvözeteket sikerült üvegállapotban előállítani. Megindult a kutatás az új anyag szerkezeti sajátosságainak, fizikai tulajdonságainak felderítésére. Ezekkel párhuzamosan keresni kezdték az új anyag gyakorlati felhasználásának lehetőségeit is. Ez a két évtizede indult intenzív munka napjainkban sem ért véget. Még bőven akad megmagyarázhatatlan jelenség, megoldásra váró probléma, de az eddig elért eredmények is igen érdekesek.

3.4.1. A fémüvegek szerkezete

A fémüvegek szerkezeti szempontból a IV. fejezetben tárgyalt egyszerű folyadékokra hasonlítanak. Az atomok mint a szabálytalanul egymáradobált csapágygolyók, ún. véletlen szoros illeszkedésű szerkezetben helyezkednek el egymás mellett. Lényeges különbség azonban, hogy amíg az egyszerű folyadékok egyféle atomot tartalmaznak, addig az üvegfémek ötvözetek, amelyekben többféle különböző atom található. Úgy látszik fontos gyakorlati feltétele az üvegállapot kialakulásának, hogy az ötvözet a fémösszetevők mellett számottevő mennyiségű ún. "metalloid" elemet, pl. szilícium (Si), bór (B), foszfor (P) stb. is tartalmaz. Ezek az anyagok a fémekkel bonyolult kristályszerkezetű vegyületfázisokat alkotnak, amelyek képződése viszonylag lassú, ezért az üvegállapot kialakulása szempontjából kedvező. A metalloid ötvözők szerepét a kétkomponensű üvegfémekben Bernal és Poltz egyszerű szemléletes modellel értelmezte. Feltételezésük szerint a fématomok üvegállapotban az egyszerű folyadékokra jellemző véletlen szoros illeszkedésű elrendezést valósítják meg. Az atomok közt kihasználatlanul maradt helyeket pedig a fématomoknál jóval kisebb metalloid-atomok foglalják el. A véletlen szoros illeszkedésű golyómodell alapján elméletileg meghatározható a golyó-atomok közti üregek összterfoglata és méreteloszlása. Ezek alapján az alapatomok számának kb. 20%-a az olyan méretű üregek száma, amelybe egy kisebb méretű ötvöző atom befér. Az egyszerű képet számos kísérleti eredmény valószínűsíti. Így például megfigyelték, hogy a kétkomponensű üvegfémek (Fe-B, Pd-Si stb.) kb. 20 atomszázalék metalloid tartalom esetén mutatnak optimális tulajdonságokat. Ilyen összetétel esetén a legnagyobb az anyag sűrűsége és legkönnyebb az üveggé dermesztése is.

Az üvegfémek többsége azonban igen sokféle anyag ötvözete. Ezek szerkezetét már nem lehet a fenti egyszerű kép alapján értelmezni. Meg kell elégednünk a diffrakciós szerkezetvizsgálatok kevésbé szemléletes elhajlási képeivel, amelyek egyértelműen bizonyítják, hogy az üvegfémek szerkezete az olvadék szerkezetéhez hasonló. A nyilvánvaló különbség az, hogy míg olvadékállapotban az atomok viszonylag szabadon mozognak, addig az üvegben ez a mozgás "befagyott", az atomok helyhez kötötté váltak.

A fémek jól ismert fizikai tulajdonságai pl. elektromos vezetőképességük, mechanikai szilárdságuk, mágnesezhetőségük stb. kristályszerkezeti alapon értelmezhetők. Érdekes összehasonlítani a kristályos és az üvegállapotú fémek tulajdonságait és választ keresni a különbségekre, egyezésekre.

3.4.2. Elektromos és mágneses tulajdonságok

A közönséges üvegekben az atomokat kovalens kötés elektronpárjai tartják együtt igen szilárdan. A kovalens kötésben az elektronok helyhez kötöttek, és igen nehezen gerjeszthetők. Ez az oka annak, hogy az üveg átlátszó, szilárd ugyan, de igen törékeny. A fény kicsiny energiájú részecskéi, a fotonok nem képesek arra, hogy az elektronok nyugalalmát megzavarják. Az ilyen anyag nem nyel el fényt, hanem azt változatlanul átengedi. Nagy erőhatásokra a kovalens kötés nem képes rugalmasan reagálni, az üveg ezért törékeny.

A fémüvegekben az atomokat összetartó erő a kristályokban is működő fémes kötés. A kötés azáltal jön létre, hogy az egyes atomokról elektronok válnak le, hogy azután az összes atomhoz közösen tartozzanak. Ez az egész fémre kiterjedő közös elektronrendszer kapcsolja össze az atomokat. A kémiai kötés hasonlósága miatt a fémüvegek igen sokban hasonlatosak a kristályos fémekhez és lényeges eltérést mutatnak a szilikátüvegekhez képest.

A fémes kötést létrehozó, a fémben szabadon mozgó elektronok az üvegfémeket is elektromos vezetővé teszik.

Elektromos ellenállásuk azonban jóval nagyobb, mint a kristályos szerkezetű fémeké. Az ellenállás növekedése durván a következőképpen magyarázható. A fémek periodikus kristályszerkezetében az elektronok, hullámszerű viselkedésük miatt, szinte magukra öltik a kristály periodicitását. Egy tökéletes kristályban az ilyen elektronok ellenállásmentesen mozognának. Az elektromos ellenállás éppen a kristályhibák következménye. Ezek a szerkezeti rendellenességek az elektronhullámok szabályosságát megzavarják, azt mondjuk: az elektronok szóródnak a rácshibákon. Nos, a fémüveg szerkezete úgy képzelhető el, mintha csupa ilyen rendellenességből állna. A nagyszámú szórócentrum természetesen nagyobb mértékben zavarja az elektron mozgását, mint a kristályos szerkezetben lévő jóval kevesebb.

Az üvegfém és a kristályos fémek elektronszerkezetének hasonlóságát bizonyítja, hogy a kétféle anyag egyaránt átlátszatlan, "fémfényű", ezüstösen csillogó.

Az elektromos tulajdonságoknál talán méginkább hasonlítanak az amorf és kristályos állapot mágneses sajátságai. Az olyan anyagok, amelyekben mágneses atomok is vannak, üvegállapotban is mágnesesek maradnak, és akár ferro- akár anti-ferromágnesek is lehetnek.

Az első ferromágneses ötvözetek előállítása ugyancsak Duwez munkacsoportjának sikerült. 1966-ban már 83% vastartalmú amorf ferromágnessel rendelkeztek. Az ötvözet elvi és gyakorlati szempontból is rendkívül jelentős volt. Az amorf mágnesek létezéséből és a bennük kimutatható doménszerkezetből világosan kiderült, hogy a mágneses rendeződéshez nem szükséges a kristályszerkezet szabályossága. A szomszédos elemi mágneseket egy irányba állító kvantummechanikai hatás ugyanúgy működik az amorf és a rendezett állapotban. Sőt! A kísérleti vizsgálatok szerint a fémüvegszalag könnyebben mágnesezhető, mint kristályos változata. A fémüvegben, homogén szerkezete miatt, ugyanis kevés az olyan "hibahely", ami a doménfalak mozgását megakadályozná. Természetesen eltérés a fémüvegek és

a kristályok mágneses tulajdonságaiban az is, hogy az amorf anyagban nincsenek könnyű, illetve nehéz mágnesezési irányok. A fémüveg minden irányban egyformán mágnesezhető. Ily módon a fémüvegek kiválóan alkalmazható lágy mágneses anyagok lehetnek, amelyek nagyobb elektromos ellenállásuk miatt jól alkalmazhatók nagyfrekvenciás áramkörökben is.

3.4.3. Mechanikai tulajdonságok

Rendkívül érdekesek a fémüvegek mechanikai sajátosságai is. A kísérleti vizsgálatok szerint a fémüvegek folyáshatára a tiszta polikristályos fémek folyáshatárának 30-50-szerese, és szilárdságuk is – a tűkristályokat kivéve – nagyobb, mint a szokásosan használt anyagoké.

A folyáshatár magas értéke miatt a fémüvegeken nagy (1%-nál nagyobb) rugalmas alakváltozások hozhatók létre. A magas folyáshatár és a nagy rugalmasság oka az amorf szerkezet. A kristályos anyag deformálódásakor atomsíkok csúsznak el egymás felett. Az amorf anyagban erre nincs mód, az alakváltozáshoz egyszerre sok atom között kell megláztani a kémiai kötést, s ez nagy erőt igényel.

A fémüvegek képlékenysége egyaránt mutat hasonlóságot, illetve eltéréseket az összehasonlításhoz szolgáló két anyag, a közönséges szilikátüvegek és a kristályos fémekhez képest. A fémüvegek nyújtás vagy összenyomás esetén üvegszerűen rideg anyagok, csupán 5% képlékeny alakítást viselnek el. Ezzel szemben 50%-os maradandó deformációnál nagyobb hajlításra sem törnek el, az ilyen nagyméretű deformáció a jól alakítható fémkristályokra jellemző.

A tapasztalat szerint a fémüvegekben az alakváltozás rendkívüli mértékben helyhez kötötten, lokalizáltan alakul ki. A kristályos anyagok csúszási sávjaira emlékeztető $1\ \mu\text{m}$ vastagságú tartományokban az anyag nagymértékben deformálódik, szinte folyik. A fémüveg képlékeny alakváltozását úgy képzelhetjük el, mintha az anyag keskeny sávokban megolvadna, s a szilárd tömbök ezen az olvadákon csúsznának arrébb.

A kristályos anyag alakváltozásához képest lényeges eltérés az is, hogy a deformáció növekedtével nem lép fel alakítási keményedés, továbbá az, hogy ellenkező irányú deformációval a deformációs sávok megszüntethetők. A deformáció nyírási sávokban való koncentrálódása eredményezi, hogy a fémüveg makroszkopikus képlékenysége nyújtás vagy összenyomás esetén csekély, míg nyírási igénybevétel során jóval nagyobb.

Az amorf szerkezet egyenletessége a fémüveg felületét is igen homogénné teszi. Ennek megfelelően az anyag rendkívüli mértékben korrózió- és kopásálló. A korrózió megindulását ugyanis a felületi inhomogenitások, hibák segítik elő. Jól mutatja ezt, hogy a kristályos anyagokban a felületre kifutó szemcsehatárok kémiai módszerek segítségével felfedezhetők, mert a lazább szerkezetű tartományokat a marószerek könnyebben megtámadják.

3.4.4. *Hogyan készülnek, mire használhatók?*

Az amorf fémekről sokáig csak mint Pol Duwez stupid ötvözetéről beszéltek, mert az elméleti érdekességen kívül gyakorlati hasznát nem remélték az üveggé dermedt fémfóliáktól. A nagy szilárdság, kopásállóság és az előnyös mágneses tulajdonságok azonban csakhamar felkeltették a gyakorlati szakemberek figyelmét is.

Az ipari felhasználáshoz meg kellett oldani a fémüveg nagyobb mennyiségben történő kontrollált és folyamatos gyártását. A régebben kidolgozott eljárásokban a megolvasztott fémcseppeket nagy sebességgel összezsapódó hideg fémtömbök közé ejtették. Az összezsapódó testek az olvadékcseppet fóliává préselték. A jó hővezető fémtuskók a fóliát nagy sebességgel hűtötték, így az amorf szerkezettel szilárdult meg. Hasonló, de a gyors hűtés szempontjából jobb technika volt, amikor az olvadékcseppet két egymással szemben forgó hűtött henger közé ejtették. Az olvadékot a gyorsan forgó hengerek fóliává lapították. Ezeket a laboratóriumi módszereket az iparban nem lehetett alkalmazni. Hamarosan sikerült azonban egy alkalmas eljárást találni. Gyorsan forgó, erősen hűtött fémhengert merítették egy olvadékkal teli kádba. Az olvadék hengerre tapadó részét a henger magával ragadta és egy erősen hűtött fémlемеzre "lőtte". A fémlемеzen az olvadék folyamatosan üvegállapotú szalaggá dermedt.

Az üvegesedéshez szükséges nagy hűtési sebesség azonban mindenképpen határt szab a gyártmány méreteinek, s jelenleg úgy tűnik, hogy így 0,1 mm-nél vastagabb szalag semmiképpen sem gyártható.

Vastagabb üvegfém előállításával próbálkoztak szovjet kutatók oly módon, hogy az olvadékot porlasztott állapotban vetették alá a gyors hűtésnek, majd az így nyert üvegport megfelelő hőmérsékletre melegítve nagy nyomással összepréselték.

Ugyancsak folynak a kutatások, hogy elektrokémiai úton, a galvanizáláshoz hasonló eljárással nyerjenek üvegfémet. Megfelelő adalékanyagokkal és alkalmas kísérleti feltételekkel ugyanis biztosítható, hogy az elektródokra a fém ne kristályos, hanem amorf szerkezetű formában váljon ki. Az elektrolitikus úton előállított üvegfémnek nincsenek méretbeli korlátai, tulajdonságai azonban úgy tűnik, nem olyan előnyösek, mint a gyors hűtéssel előállított szalagoké.

A gyors hűtéssel készített szalagok és huzalok felhasználása bár ma még kísérleti jellegű, sok lehetőséget rejt magában. Nagy szakítószilárdságuk és rugalmas tulajdonságaik miatt jól alkalmazhatók, pl. gumiabroncsok vagy meghajtószíjak megerősítésére. Üvegeképző ötvözetekből készített csapágygolyók vagy szerszámok felülete megolvasztható, majd gyors hűtéssel üvegállapotúvá tehető. Ezzel az eszközzel nagy szilárdságú kopásálló réteg keletkezik. Egyelőre megoldatlan problémát jelent, hogy ezek a mechanikai szempontból hatékony eljárások csak olyan alkatrészekre alkalmazhatók, amelyek a használat során nem melegednek. Nagymérvű melegedés ugyanis az üvegrészek átkristályosodásához, s ezáltal az anyag teljes tönkremenéséhez vezet.

Igéretesnek tűnnek a mágneses alkalmazások. Villantsunk fel néhányat ezek közül is. A nagy telítési mágnesezettségű fémüvegekből igen jó transzformátorok készíthetők. A jó mágneses tulajdonságok mellett a fémüvegek kopásállóságát hasz-

nálta ki a Hitachi cég, amikor fémüvegekből gyártott magnetofonfejeket fejlesztett ki.

Nagyfrekvenciás vezetékek árnyékolására kívánják a fémüvegeket felhasználni Japánban. A vékony amorf fémszalakat sikerült megfogni, s a fonatokból szőtték a kábel árnyékoló harisnyáját.

A fémüvegek új anyagok, amelyekben még nagy lehetőségek vannak. Talán ennek a felismerése is tovább sarkalta a kutatókat, hogy megpróbálkozzanak egyre újabb és újabb anyagok üvegállapotának előállításával. Így sikerült például amorf jeget és üvegállapotú szén is előállítani. Az amorf jég úgy készül, hogy a vizet keskeny fuvókán át 100-400 bar nyomással -197°C hőmérsékletű propánba lövik. A hűtés sebessége becslések szerint 10 milliárd (10^{10}) és 10 billiárd (10^{13}) fok/s között van.

Amorf jég azonban a természet laboratóriumaiban is keletkezik. Az üstökösök vagy az égitestek belsejében ugyanis oly nagy nyomás uralkodik (6000 bar), amelyen a jég amorf állapotúvá válik. Az amorf jég felfedezésével eddig érthetetlen jelenségekre kaptak választ a csillagászok. A Szaturnusz Enceladus nevű holdjának felszínén vízvulkanizmus nyomai láthatók. Érthetetlen volt, hogy a rendkívül alacsony hőmérsékletű holdon hogyan válhatott a víz cseppfolyóssá. Az energetikailag nem stabilis amorf jégfázis léte azonban érthetővé teszi a jelenséget. Amikor az amorf jég átkristályosodik, olyan sok hő szabadul fel, hogy a jég egy részét meg is olvasztja.

Az üvegszén térhálósított szerkezetű műgyanták levegőtől elzárt kihevítésével hozható létre.

Az üveges anyagok egy része – mint pl. az amorf jég – csak tudományos érdekesség, más részük pl. az üvegfém, máris mindennapi technikánk része, biztos azonban, hogy ezen a gyorsan fejlődő területen a közeljövőben is sok újdonsággal találkozhatunk.

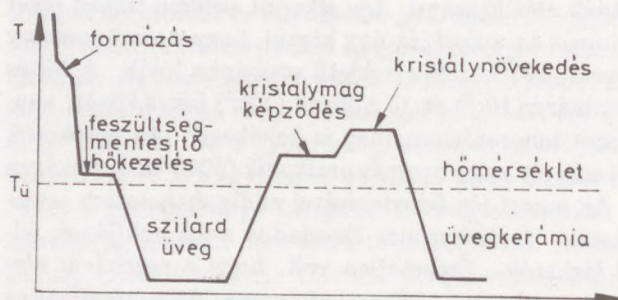
3.5. Az üvegkerámiák

A köznapi gyakorlatban a speciális üvegárúk közé sorolják az üvegkerámiákat is. (Ilyen anyagból készülnek például a vastagfalú, tűzálló jénai edények.) Az átlátszó vagy tejfehér anyag üvegnek tűnik, pedig valójában egy speciális kompozit, amely szilikátüvegbe ágyazott apró kristályokból áll. Ezek a kristályok nagyon kicsinyek, méretük a látható fény hullámhosszánál is kisebb, ezért nemhogy szabad szemmel, de még fénymikroszkóppal sem figyelhetők meg.

A különleges mikroszerkezet különleges anyagtulajdonságokkal jár. Az üvegkerámiák két legfontosabb tulajdonsága az elhanyagolhatóan kicsiny hőtágulás és a nagy szilárdság. E tulajdonságok mikroszerkezeti magyarázata előtt érdemes megismerkedni a speciális anyag előállításával.

Az V.23. ábra az üvegkerámia előállításának folyamatát illusztrálja. A gyártás első lépése az, hogy szilikátüvegből elkészítik a kívánt formájú tárgyat, amelyet azután két lépésben lehűtenek. Ez azt jelenti, hogy a folyamatos hűtést 5-600°C-nál megállítják, és a munkadarabot több órán keresztül ezen a hőmér-

sékleten tartják. A hőkezelés célja az üveg teljes feszültségmentesítése. A gyártás első szakasza a tárgy szobahőmérsékletre hűtésével fejeződik be. Ezt követi a tulajdonképpeni üvegkerámia készítése. A munkadarabot ismét a feszültségmentesítés hőmérséklete fölé melegítik, és itt addig hőkezelik, amíg a tárgy teljes anyagában egyenletesen megindul a kristályosodás. (Az üvegállapot termodinamikailag instabil, a kristályosodás megindulása az egyensúlyi állapot felé törekvés természetes következménye.) A hőkezelési hőmérsékletet és időt úgy állítják be, hogy a



V.23. ábra

anyagban köbcentiméterenként $10^9 - 10^{17}$ darab kristálymag képződjék, de a magok ne kezdjenek növekedni. Ezután a hőmérsékletet kissé megemelik, és a tárgyat ismét több órán keresztül hőkezelik. E hőkezelés mindaddig tart, míg a magok növekedése miatt a kristályszemcsék közötti üvegfázis térfogataránya 50-10%-ra nem csökken. Végül a kész tárgyakat lassan, egyenletesen szobahőmérsékletre hűtik.

Az évezredek óta ismert üvegyártással szemben az üvegkerámia-készítés mindössze 20-25 éves múltra tekint vissza. Ennek az az oka, hogy a fenti eljárással csak speciális anyagokból lehet kedvező tulajdonságú üvegkerámiákat előállítani. A siker feltétele az, hogy a hőkezelés második lépésében nagyon kicsiny és egyenletesen eloszló kristálymagok képződjenek. Ez akkor lehetséges, ha a kristálymagok maximális képződési sebessége alacsonyabb hőmérsékletre esik, mint a kristálynövekedés maximális sebessége. Az üvegkerámiák anyagában a legfontosabb adalékanyag az üvegolvadékban egyébként nehezen oldódó cirkónium-oxid és titán-oxid.

3.5.1. Az üvegkerámiák tulajdonságai és alkalmazásuk

Már említettük, hogy az üvegkerámiák különleges sajátossága az elhanyagolható hőtágulás. Ezeknek az anyagoknak a térfogata -200°C -tól $+500^{\circ}\text{C}$ -ig gyakorlatilag állandó! Az igen finom módszerekkel végzett mérések szerint térfogatváltozásuk a közönséges üvegek hőtágulásánál két nagyságrenddel kisebb, és egyes speciális összetételű kerámiák esetén ez a kis változás is negatív. A jelenség az anyag kompozítségével magyarázható.

nak rá. A nagyméretű felületi tükrök készítése nehéz és költséges művelet. A távcső csak akkor működik jól, ha a tükör alakja szigorúan állandó. Mivel a csillagászati megfigyeléseket szabadban, változó hőmérsékleti körülmények között végzik, gyakran okozhat problémát a tükör anyagának hőtágulása. A hőtágulás miatt kismértékben ugyan de megváltozik a tükör alakja is, s ez a képminőséget rontja. Az utóbbi években a nagy csillagászati távcsövek üvegkerámiából készülnek, s ezzel a hőtágulásból adódó hibák kiküszöbölhetők.

Az üvegkerámiák lényeges tulajdonsága a nagy mechanikai szilárdság és a repedés terjedésével szemben mutatott ellenállás is. E tulajdonságok magyarázata is az anyag kompozit szerkezetéből adódik. Egyfázisú kristályos anyagok vagy üvegek esetén a törési folyamat mindig az anyagban eleve meglévő hibákból, mikrorepedésekből indul ki. A rideg anyagokban (ilyen az üveg is) a húzó igénybevételre merőleges repedés csúcsánál a feszültség megsokszorozódik, és a repedés gyorsan terjedve törést okoz. Az üvegkerámiákban a mikrorepedések makroszkopikussá növekedését az üvegfázisba beágyazódó kristályszemcsék hatékonyan gátolják. A feszültség hatására az üvegben gyorsan tovaterjedő repedés előbb-utóbb beleütközik egy kristálydarabkába, amely a repedés csúcsának környezetében megváltoztatja a feszültségeloszlást, és ezért a repedés terjedése megáll.

A nem törékeny és rendkívül kopásálló üvegkerámiákat magas hőmérsékleti burkolóanyagként és nagy mechanikai igénybevételnek kitett gépalkatrészként egyaránt használják. Repedéssel szembeni ellenállásuk, kopásállóságuk, valamint az anyag szövetbarát jellege azonban egészségügyi alkalmazásukat is lehetővé teszi. Az utóbbi években gyakran használnak üvegkerámiát a szervezetbe beépített csontpótló protézisek alapanyagaként.

4. *A kvázikristályok ötös szimmetriája*

Könyvünket a kristályos anyag geometriai rendjének felderítésével kezdtük. Ettől a rendtől jutottunk a folyadékállapot szabálytalanságához, s foglalkoztunk a két állapot közötti átmenet szinte végtelen variációs lehetőségeivel. Befejezésül igen furcsa, a kristálytan alapvető törvényeit felrúgni látszó anyagokkal a kvázikristályokkal foglalkozunk.

Ahhoz, hogy megérthessük mi döböntette meg a kristálytan szakembereit, röviden térjünk vissza a kristályos anyag tulajdonságaihoz. Megállapítottuk, hogy a kristályok hosszú távú rendjét a végtelen sokszor egymás mellé illeszthető elemi cellák sokasága adja. Az ismétlődő elemi cellák azonban nem lehetnek tetszőlegesek. Bár a lehetséges kristályszerkezetek geometriai meghatározása rendkívül bonyolult feladat, az eredményt, tehát azt, hogy a kristályok csak véges számú szimmetria tulajdonsággal rendelkezhetnek, könnyen megérthetjük. Ennek lényegében az az oka, hogy a kristály végtelen sokszor ismételhető elemi cellái a teret hézagmentesen kell hogy kitöltsék. A hézagmentes térkitöltés következményei három dimenzióban bonyolult eredményre vezetnek, síkban azonban könnyen áttekinthetők. Még ennek részletezésével sem kívánjuk azonban untatni az olvasót. A gondolat lényegét ér-

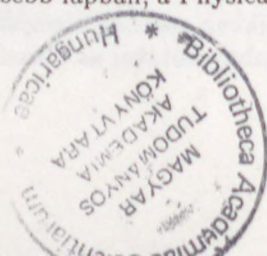
Az üvegbe ágyazott apró kristályok hőtágulása anizotrop. Bizonyos irányban a kristály erősen tágul, az erre merőleges irányokban azonban összehúzódik. A tágulás és összehúzódás együttes hatása azt eredményezi, hogy melegítés hatására a kristályok térfogata csökken. Az apró kristálydarabkák a kompozit anyagban egyenletesen oszlanak el és irányításuk is teljesen véletlenszerű. Melegítéskor a kristályok térfogatcsökkenése és az üvegfázis tágulása gyakorlatilag kompenzálja egymást.

A csekély hőtágulás lehetővé teszi, hogy üvegkerámiákból vastagabb és ennek megfelelően szilárdabb tűzálló edények, laboratóriumi berendezések készüljenek. A közönséges üvegből készült vastagabb falú edények melegítésekor igen körültekintően kell eljárni, mert az üveg rossz hővezető, és ha nem egyenletesen melegszik, akkor hőtágulása is egyenetlen. A különböző mértékű hőtágulás miatt pedig nagy mechanikai feszültségek keletkezhetnek az anyagban. Emiatt az egyenetlenül melegített üveg könnyen eltörik vagy megreped. Az üvegkerámiák nem tágulnak, tehát ez a probléma fel sem léphet.

Az előzőnél kevésbé közismert, de nem kevésbé érdekes alkalmazása az üvegkerámiáknak a csillagászati távcsövek készítése. A nagyméretű tükrös távcsövek gyakran több méter átmérőjű homorú tükrét vastag, öntött üvegkorongból csiszolják ki. A csiszolás után a felületét gondosan polírozzák (a felületi egyenetlenségek mérete nem lehet nagyobb $1\text{ }\mu\text{m}$ -nél), majd alumíniumréteget párologtat-zékelteti már az is ha meggondoljuk, hogy miért nem lehetnek pl. ötfogású szimmetriatengelyek egy síkbeli kristályban, másképpen megfogalmazva: miért nem fedhető le a sík szabályos ötszögekkel. A szabályos ötszög szögei 108 fokokak. A sík teljes lefedése csak akkor sikerülhetne, ha az egy csúcspan található ötszögek szögeinek összege 360 fok lenne. Ehhez azonban három ötszög kevés, négy pedig sok.

4.1. És mégis létezik?

A kristályszerkezetek szimmetriatulajdonságai kísérletileg röntgendiffrakciós módszerekkel mutathatók ki. A matematikai úton bebizonyított tételek és az elhajlási képből nyert kísérleti eredmények 1984 novemberéig teljes összhangban voltak. Ekkor Washingtonban a Nemzeti Szabványügyi Hivatal egyik laboratóriumában három kutató, D. Gratias, D. Schechtman és I. Blech megdöbbentő felfedezésre jutott. Alumínium-mangán ötvözetből akartak fémüveget létrehozni, fémüveg helyett azonban egy gyorsan kristályosodó anyaghoz jutottak, amelynek elektron-diffrakciós képe félreérthetetlenül mutatta a tiltott ötös szimmetriát. Tévedésre gyanakodván kísérletüket többször megismételték, s az eredmény mindig ugyanaz volt. Ezután próbálkoztak csak azzal, hogy a furcsa jelenségről egy rangos folyóiratban beszámoljanak. Az ötös szimmetria azonban olyannyira hihetetlennek tűnt, hogy a Journal of Applied Physics elutasította az eredmények közlését, s csak egy másik, talán még tekintélyesebb lapban, a Physical Review Letters-ben jelenhetett meg a közlemény.



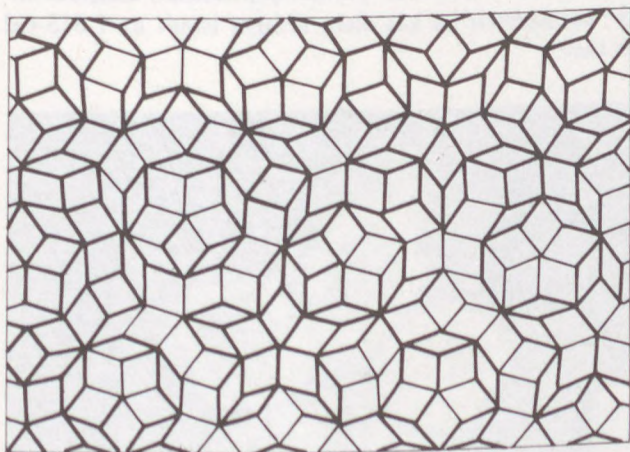
4.2. Milyen hát az új anyag szerkezete?

Természetesen a frissen talált ötvözet nem periodikus szerkezetű. A felfedezők modellje szerint azonban ún. triakontaéderekből (a triakondaéder egy 50 rombuszlap-pal határolt test) és a közéjük elhelyezett 60 rombuszlappal határolt lyukakból mindig felépíthető.

Az új anyag különlegessége az, hogy röntgendiffrakciós képe a kristályokéhoz hasonlóan diszkrét pontokból áll. Ez az elhajlási kép azonban világosan mutatja a tiltott ötös szimmetriát. Nyilvánvaló tehát, hogy ez az anyag nem lehet amorf, mert akkor az elhajlási kép gyűrűkből állna, de eddigi ismereteink szerint a tiltott ötös miatt kristályos sem.

A vitát az anyagszerkezet-kutatás egyik nagy öregje, a Nobel-díjas Linus Pauling azzal próbálta lezárni, hogy a kutatók egy nagyon bonyolult polikristályt vizsgálnak, s az ötös szimmetria a polikristályos szerkezet következménye.

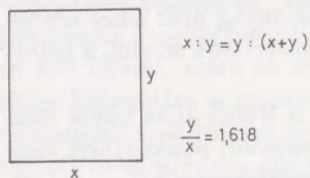
A kristálytant geometriailag megalapozó matematikai tételek felülvizsgálata azonban arra a meglepő eredményre vezetett, hogy bizonyos nem periodikus rácsok röntgendiffrakciós képe is állhat diszkrét pontokból. Ezeket a rácsokat nevezzük kváziperiodikus rácsoknak.



V.24. ábra

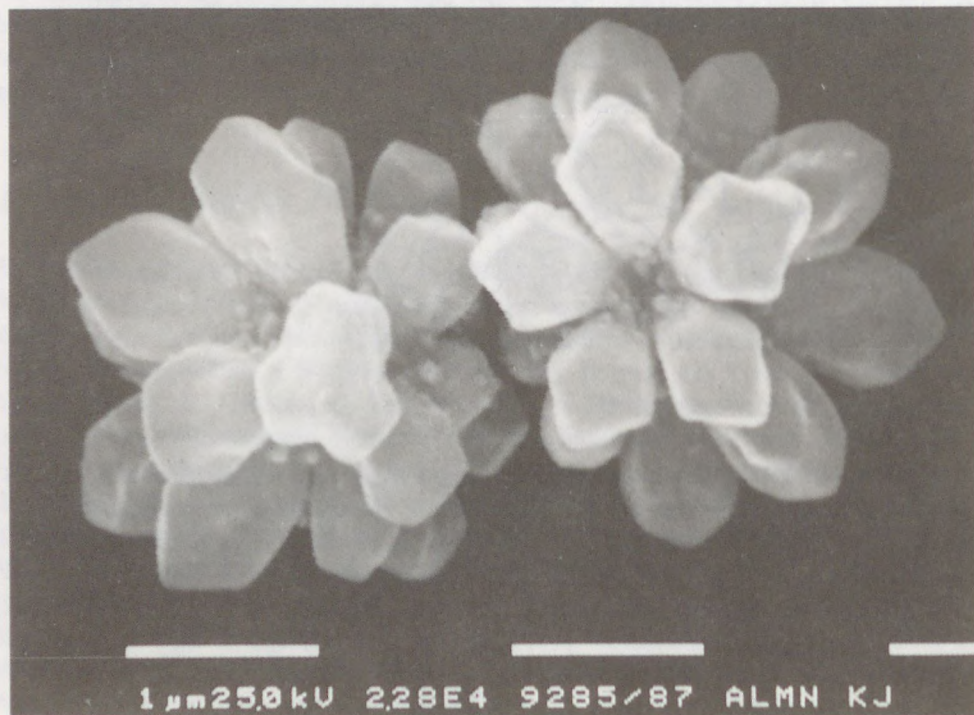
A kváziperiodikus rácsok illusztrációjaként a bonyolult térbeli szerkezet helyett egy síkbeli esetet mutatunk be. Az V.24. ábra a sík ún. Penrose csempézését mutatja. Ennek során a síkot kétféle rombuszsal (az egyiknek szögei 36 és 144 fokosak, a másikéi 72 és 108 fokosak) fedjük le hézagmentesen. A mintázat az első pillanatban periodikusnak tűnik, azonban nem az! Az eljárást Roger Penrose az oxfordi egyetem matematika professzora fedezte fel éppen úgy, hogy a sík az oxfordi egyetem matematika professzora fedezte fel éppen úgy, hogy a sík olyan hézagmentes lefedéseit kereste, ahol a lefedő idomokból nem alakul ki periodikusan ismétlődő elemi cella. Kimutatható, hogy egy végtelen nagy Penrose csempében a kétféle alapelem aránya egy irracionális számhoz tart $((1+\sqrt{5})/2 =$

= 1,618). Az, hogy ez az arány irracionális, éppen azt jelenti, hogy a csempében a két rombusz semmilyen véges kombinációja nem ismétlődhet periodikusan. Jól látható ugyanakkor, hogy a Penrose csempében egyes helyeken szabályos tízsögek, azaz a tiltott ötös szimmetriával rendelkező alakzatok is megjelennek. Felfedezhetők továbbá a rácssíkoknak megfeleltethető kisebb törésekkal rendelkező, egymással nagyjából párhuzamosan futó vonalseregek is. Ezeknek a vonalseregeknek az irányai éppen egy szabályos ötszög oldalaival párhuzamosak.



V.25. ábra

1984-ben Peter Kramer és Robert Neri megtalálták a Penrose csempézés térbeli változatát, és kiderült, hogy a kvázikristályok szerkezete jól modellezhető ezzel az eljárással. A tér ebben az esetben két különböző paralelepipedonnal tölthető ki. A végtelen kiterjedésű térbeli "csempében" a két elem aránya ismét az 1,618-cal közelített irracionális számhoz tart.



V.26. ábra

Furcsa játéka a természetnek, hogy a bűvös arányszám megegyezik az aranymetszés arányával. Ez a szám bizonyos értelemben véve a "szép" matematikai megfogalmazásával azonosítható. Már az egyiptomiak és a görögök is észrevették, hogy az emberi szem számára a legkellemesebb látványt az olyan téglalapok nyújtják, amelyeknek hosszabbik oldala úgy aránylik a rövidebbhez, mint a fél terület a hosszabbik oldalhoz (V.25. ábra). Ekkor a két oldal arányára éppen az 1,618-cal közelített irracionális szám adódik.

Az aranymetszés aránya amellett, hogy a művészeti alkotásokban számtalan helyen fellelhető, a természetben is gyakran előfordul. Nem véletlen, hogy erről az arányról Kepler így írt: "Hiszem, hogy ez a geometriai arány adta az ötletet a teremtőnek, mikor bevezette a hasonló dolgoknak hasonló dolgokból történő folytonos származtatását."

Elgondolkodtató, hogy a lehetetlennek hitt, de mégis létező nem periodikus szerkezetű anyag, amely mégis a kristályoktól megszokott diffrakciós képet adja, éppen ezen ismétlődés szerint szerveződik.

Az ötös szimmetriájú kristály szépsége az anyagvizsgálattal foglalkozó szakembereket is lenyűgözte. Reméljük, hogy olvasóink is gyönyörűségüket lelik az elektronmikroszkópban megfigyelhető "kvázikristály-virág" látványában (V.26. ábra, Csánádi Ágnes felvétele).

A kiadásért felelős: Zöld Ferenc,
az Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat igazgatója
Nyomás és kötés: Dürer Nyomda Kft., Gyula
Felelős vezető: Székely András
Budapest, 1992

Nyomdai táskaszám: 375

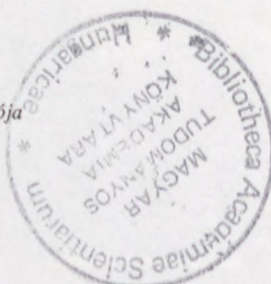
Felelős szerkesztő: Nagy Tibor

Műszaki szerkesztő: Kerek Imréné

A fedélterv Killer Marcella munkája

Kiadványszám: 2847

Megjelent 20,7 (A/5) ív terjedelemben + 12 oldal melléklet



Karóránkon folyadékkristályos kijelző mutatja az időt, a gáztűzhely lángját piezoelektromos kristályból pattintott szikrával gyújtjuk meg... Egyre újabb és újabb tulajdonságú anyagok jelennek meg hétköznapi környezetünkben, s mennyi mindent nem tudunk még a régiokról sem. Miért szilárdul meg a beton? Lehet-e cementből rugót készíteni... Miért hajlékony az acél, miért törekeny az öntöttvas, mi a damaszkuszi pengék titka? Mik azok a szupravezető kerámiák? Miért törik az üveg, s miért hajlik az üvegszál? Mi teszi a jénai edényeket hőállóvá?

Megannyi egyszerű kérdés, amelynek megválaszolása még a természettudományokban jártas olvasó számára is nehézséget jelenthet. E könyvben az anyagokkal kapcsolatos hétköznapi kérdésekre adható válaszokból gyűjtöttünk össze egy csokorra valót. Azt kívántuk megmutatni, hogy a környezetünkben található természetes és mesterséges anyagoknak sokféle tulajdonsága megérthető speciális előképzettség nélkül is.

Az anyagi tulajdonságok értelmezésekor általában egyszerű fizikai alapelvekből kiinduló, kvalitatív modellekre támaszkodunk. Reméljük, hogy sikerült olyan anyagszerkezeti összeállítást adnunk, amely indíttatást ad az olvasónak arra, hogy egyéb, a hétköznapi életben felvetődő kérdéseket is hasonló szellemben végiggondoljon.



507937

ERDEKES ANYAGOK, ERDÉGI ÉRDEKES ÉGÉK