

# Az alkalmazott anyagtudomány új elemei

*Dr. Bicsak Jenő*, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagok Technológiája tanszék

## 1. Új fémes szerkezeti anyagok

### 1.1. Bevezetés

**Az anyagtudomány** az anyagok előállításával, megmunkálásával, felhasználásával és tulajdonságaival foglalkozó tudomány. A történelem folyamán az emberi civilizáció fejlődése nagymértékben az anyagok fejlődésétől függött, a kőkorszaktól kezdve a bronzkoron és vaskoron keresztül a XVIII-XX századi ipari forradalmon át a jelenkori technika legújabb megvalósításáig (űrtechnika, számítástechnika, robotika, automatizálás, telekommunikáció stb.). A szerkezeti anyagok felhasználása tömegében, sokféleségében, mennyiségében állandóan nő. Az új gépek, berendezések, eszközök, igen változatos és új igényeket támasztanak a felhasználandó anyagokkal szemben. A mérnöki tevékenység, tervezés, gyártás, üzemeltetés ma már elképzelhetetlen az anyagok és azok tulajdonságai ismerete nélkül. Ezért ma már nem anyagfelhasználásról, hanem anyagtervezésről (material design) beszélünk, ami igen magas tudományos és gyakorlati felkészülést igényel, kezdve a fizikai, kémiai, technológiai ismeretektől, a gazdasági és piaci felkészültségig. Az utóbbi évtizedekben óriási fejlődésen ment keresztül az anyagok, főként a fémek metallurgiája és technológiája. Új eljárások, új anyagok, új alkalmazások jelentek meg jelentősen megnövelve a berendezések élettartalmát, kiszélesítve alkalmazási területüket és csökkentve a gyártási és felhasználási költségeket. Átalakultak az öntészetben, a képlékeny alakításban, a darabolásban, a forgácsolásban, a hegesztésben, a hőkezelésben stb. alkalmazott klasszikus technológiák. Új technológiák jelentek meg: a porkohászat, felületkezelés, termikus fémfelszórás, felrakó hegesztés, besugárzás stb.

Az iparban felhasználásra kerülő szerkezeti anyagok legnagyobb része még ma is fémötvözet (>1000 Mt), 96%-ban vas, alumínium és réz ötvözet. Mintegy 100 elemet ismerünk, amelyekből két-, három-, négy-, öt-, vagy többalkotós rendszereket lehet létrehozni, ezáltal a lehetséges előállítható ötvözetek száma óriási nagyságúra lehet ( $10^{25}$ - $10^{26}$ ). A szerkezeti anyagok jelenleg ismert sokassága előtt még óriási a jövő a fejlesztés, a kutatás és az alkalmazás terén.

A következőkben felsorolásra kerül néhány fontosabb anyag előállítási és felhasználási történelmi adatait soroljuk fel:

- i.e. 7000 - a réz és arany olvasztása;
- i.e. 3000 - az ón, ólom, ezüst előállítás;
- i.e. 1200 - első mesterségesen előállított vastermék;
- 1500 - nyersvas, előállítás 3-5% szénttartalommal;
- 1700 - lemezhengerlés;
- 1856 - Siemens-Martin acélgyártás;
- 1900 - vas-szén első teljes egyensúlyi diagramjának kidolgozása;
- 1903 - a gyorsacél első típusa;

1905 - a réz elektrolitikus tisztítása;  
1910 - elektroacél gyártás villamos ívkemencében;  
1912 - első rozsdamentes Cr-Ni acél előállítás;  
1920 - titán színtfém előállítás;  
1926 - WC-Co keményfém lapkák előállítás;  
1931 - PVC - előállítás kereskedelmi célokra;  
1935 - a nylon gyártástechnológiája;  
1940 - NiCoCr melegszilárd ötvözetek megjelenése;  
1948 - a tranzistor feltalálása;  
1949 - üvegszál-erősítésű kompozit anyag készítése;  
1951 - az acél folyamatos öntése;  
1954 - elektrosalakos átolvasztás;  
1957 - mesterséges gyémánt első előállítás;  
1960 - az amorf fémek megjelenése;  
1964 - szénerősítésű kompozit anyagok elkészítése;  
1969 - szupravezető anyagok;  
1970 - egykristály öntvények;  
1975 - gyengén ötvözött nagyszilárdságú (HSLA) acélok gyártása;  
1980 - biokerámia anyagok;  
1981 - nanokristályos anyagok;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  kompozit kerámiák;  
1982 - CD lemezek  
1984 - Floppy lemezek;  
1990 - szupravezető és alakemlékező ötvözetek előállítás;  
1996 - felületi bevonás több rétegben.

## 1.2. Az anyagok osztályozása

A szerkezeti anyagok két nagy csoportba oszthatók:

- **szervetlen anyagok** és
- **szerves anyagok.**

A **szervetlen anyagok** az atomok közötti kötés típusától és térbeli elrendezettségüktől függően lehetnek:

- **fémes anyagok;**
- **fémüvegek;**
- **üvegek;**
- **kerámiák;**
- **kompozitok.**

**A szerves anyagok** óriás molekulás vegyületek láncolata, hálós vagy szálas elrendezésű anyagok, amelyeket polimereknek neveznek. Lehetnek:

- **természetes polimerek** (cellulózok);
- **mesterséges polimerek** (műanyagok).

A műanyagok szintetikus, mesterségesen előállított anyagok, melyek lehetnek:

- **hőre lágyuló anyagok** (termoplasztok);
- **hőre keményedő anyagok** (duroplasztok);
- **műgumik, műkaucsukok** (elasztomerek).

**A fémes anyagok** tulajdonképpen térben geometrikusan elhelyezkedő, elektrosztatikus és Van der Waals vonzóerők által összekötött, negatív töltésű szabad elektronok felhőjében, kristályrács szerkezetbe rendeződött pozitív fémionok rendszere. Az atomok leggyakrabban térben középpontos, lapközepes köbös, vagy hexagonális térrácsot alkotnak, 0,1-0,4 nm atomtávolsággal. A fémes jelleg azon elemek tulajdonsága, amelyeknek az elektronegativitása kisebb, mint 2, 5 (egy 0, 7-4 számmal jellemzett skálán).

Több mint 40 fémes jellegű elemet ismerünk. Ezek közül kb. 20 fordul elő a mindennapos használatban. A természetben az elemek gyakorisága a következő:

O <sub>2</sub> -46%;	Mo-1,5.10 <sup>-3</sup> %;
Si-28%;	Ag-1.10 <sup>-5</sup> ;
Al-8,2%;	Au-5.10 <sup>-7</sup> ;
Fe-5,6%;	
Ca-3,6%;	
N-2,8%;	
K-2,6%;	
Mg-2,1%;	
Ti-0,5%;	
H-0,14%;	
Mn-0,1%;	
C-0,032%;	
Zr-0,022%;	
Cr-0,02%;	
V-0,015%;	
Zn- 0,013%;	
Ni-8.10 <sup>-3</sup> %;	
Cu-7.10 <sup>-3</sup> %;	
W-6,9.10 <sup>-3</sup> %;	
Co-2,3.10 <sup>-3</sup> ;	
Pb-1,6.10 <sup>-3</sup> %;	

A fémes anyagok a következő csoportokat különböztetjük meg:

- **színfémek;**
- **ötvözetek**, amelyek lehetnek:
  - **szilárd oldatos ötvözetek;**
  - **többfázisú ötvözetek;**
  - **intermetallikus ötvözetek (TiAl, Ni<sub>3</sub>Al, stb.).**

A **fémüvegek** üvegszerű, amorf szerkezetű anyagok, amelyek igen nagy lehülési sebességgel ( $10^6$  K/s) dermedt ötvözeteknél érhetőek el (például **Fe80B20; Cu60Zr40; Ni75Si8B17;** stb.). Nagy mechanikai szilárdságú tulajdonságokat mutatnak (**R<sub>m</sub>=2000-3700 MPa, HV=910-1750 kgf/mm<sup>2</sup>**), de nem stabil szerkezetűek, **390-906<sup>0</sup>C** közötti hőmérsékleten kikristályosodnak.

Az **üvegek** kovalens kötésű **SiO<sub>4</sub>** tetraéderekből álló amorf, szilárd, átlátszó anyagok. Az üvegekben nincs fényszóródás, mert az anyag nem tartalmaz szemcséket, az atomok nem gerjednek, és elmarad az interferencia jelensége. Ellenben nagyon rideg, törékeny, alakváltozásra képtelen anyagok.

A **kerámiák** ionos vagy kovalens kötéssel kapcsolódó elemekből álló szilárd testek, igen magas olvadásponttal és rugalmassági tényezővel. Kémiaileg rendkívül ellenállóak, nem alakíthatók, elektromosan szigetelők, tűz- és kopásállóak.

A **kompozitok** társított szerkezeti anyagok, amelyek különböző anyagfajták kombinálásával célirányosan megtervezett és kivitelezett szerkezeti anyagok. Attól függően, hogy az alapanyagba (matrixba) milyen erősítő (társító) anyag milyen formában van jelen, 4 féle kompozit típust különböztetünk meg:

- **részecske erősítésű kompozitok;**
- **szálerősítésű kompozitok;**
- **rétegelt (szendvics) kompozitok;**
- **felületi réteggel bevont kompozitok**

A matrix minősége függvényében a kompozitok lehetnek:

- **fém;**
- **kerámia**, vagy
- **műanyag** alapanyagú.

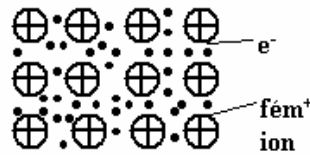
### 1.3. A fémes anyagok kristályszerkezete

Az atomok között 4 típusú kötés jöhet létre:

- ionos kötés (**Na<sup>+</sup>Cl**);
- kovalens kötés (**CO<sub>2</sub>**);
- poláris kötés (**Ne<sub>2</sub>**);
- fémes kötés.

Ezek közül a fémes kötés a legfontosabb, mert nagyon erős, stabil és meghatározza a fémes tulajdonságok nagy többségét: elektromos- és hővezetés, mechanikai szilárdság, fényvisszaverődés és elnyelés, mágneses tulajdonságok, az elektromos ellenállás növekedése a hőmérséklet függvényében, kationok formálása, erős bázikus oxidok alakítása stb.

A **fémek kötése** egy pozitív fémionokból álló, térben rács szerkezetben rendeződő háló és az atomok között megjelenő szabad elektronokból álló felhő (elektron köd) között megjelenő elektrosztatikus és Van der Waals vonzóerőkön alapul, úgy ahogy a mellékelt 1. ábrán megfigyelhető.



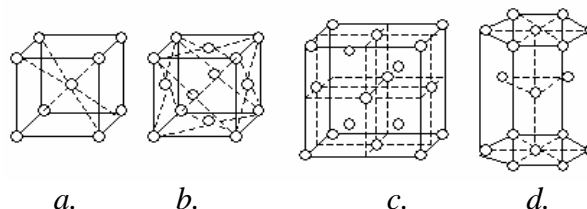
1. ábra.

A fémion atomok kristályrács rendszerbe rendeződnek, és ez minden fém és ötvözet saját tulajdonságú tényezője. A **kristálográfia** az anyagtudomány azon része, amelyik az anyagok kristály rendszereivel, azok leírásával, tanulmányozásával és kutatásával foglalkozik.

Általában 7 alapkristályrendszert és 14 származtatott kristályt különböztetünk meg. Alap kristályrendszerek: **köbös; tetragonális; rombusz; hexagonális; romboedrikus; monoklinikus és triklinikus** rendszerek. A derivált, származtatott rendszerek közül a fémeknél főként a következők találhatók meg:

- a.-térben központos köbös rendszer (Fe<sub>α</sub>, Cr, Mo, W, V, Ti, Zr, Nb stb.);**
- b.-lapközepes köbös rendszer (Al, Cu, Ni, Fe<sub>γ</sub>, Au, Ag, Pt, Pb, Co<sub>β</sub> stb.);**
- c.-gyémantrácsos köbös rendszer (C, Si, Ge, Sn<sub>α</sub> stb.);**
- d.-kompakt hexagonális rendszer (Zn, Mg, Cd, Co<sub>α</sub>, Hf, Be stb.).**

Ezen rendszerek elementáris kristálycellái az alábbi 2-es ábrán láthatók:



2. ábra.

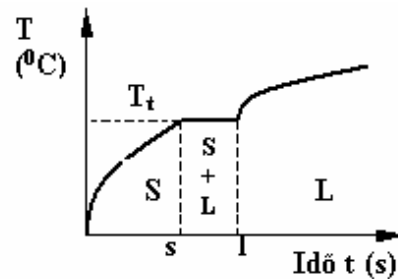
Az anyagok kristály szerkezetének tanulmányozására röntgen diffraktometrikus eljárást alkalmaznak. Az eljárás a 0,01-0,2 nm hullámhosszú X sugár visszaverődésén (reflexióján) és egymásra hatásán (diffrakcióján) alapszik. A kristályparamétert a Bragg törvény alapján számítják ki.

#### 1.4. A fémek olvadása és kristályosodása

**Az olvadás** a fématomok közötti kohéziós erők szakadása alapján történik. Melegítés hatására a fémion atomok rezgésbe jönnek a térrács rendszerbeli közép helyzetük körül, a rezgések kilengése a hőmérséklet függvényében addig nő, amíg egy adott ponton az összetartó elektrosztatikus erők felszakadnak, a kristályrács rendszer eltűnik és az atomok rendezetlen cikk-cakk mozgást végeznek a folyékony fémfurdóban.

A fémkötések felszakadása energiaelnyeléssel jár, és amíg az anyag teljesen megolvad a hőmérséklet állandó értéken marad.

A mellékelt 3. ábra a melegítési görbét mutatja az idő függvényében, ahol a  $T_t$  vízszintes rész az olvadási hőmérsékletet jelzi. Az olvadás alatt elnyelt energiát latens olvadáshőnek nevezzük, és ez - az olvadásponttal együtt - minden fémes anyag specifikus állandója.

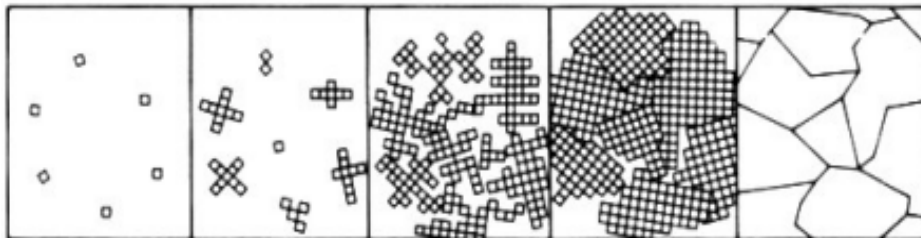


3. ábra.

**A kristályosodás** a fémfűdő lehülése alatt jön létre. Ekkor is a szabad fématomok termikus mozgása lelassul, amíg két atom közötti vonzási erő őket egymáshoz köti. Hozzájuk újabb atomok kötődnek, úgy rendeződve, hogy az első elementáris kristálycella megjelenjen. Ezek a cellák kristályosodási csirákat képeznek, amelyek aztán a főkristály irányába növekednek újabb atomok lekötésével. Mikor a kristályosodási frontok elérik egymást, az anyag szilárd állapotba kerül, és létrejön a szemcsés szövetszerkezet.

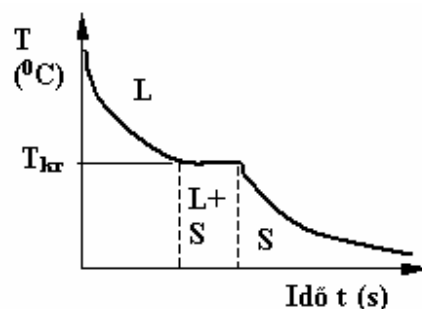
E folyamatot a 4. ábra illusztrálja, amelyen a kristályosodás három fő fázisa figyelhető meg:

- **kristálycsirák keletkezése;**
- **kristálycsirák növekedése;**
- **szemcsés kristalít szövet-szerkezet létrejötte.**



4. ábra.

A kristályosodás alatt az olvadáskor elnyelt hő felszabadul, ami által a hőmérséklet állandó marad, amíg az egész folyékony anyag megszilárdul. Így a lehülési görbén egy vízszintes lépcső keletkezik jelezve a  $T_{kr}$  kristályosodási hőmérsékletet (5. ábra).



## 5. ábra.

A folyamatok alapján létrejön az úgynevezett **elsődleges (primer) kristályosodási szövet**, amely lehet:

- **poliéderes szemcsés szövet**, vagy
- **dendritikus szövet**.

A poliéderes szövet szemcsenagysága - a **Tamman** féle elmélet szerint - a  $Q_{kr}$  kristályosodási kapacitástól (a formálódó kristályosodási csirák száma egységnyi olvadékból és időben) és a  $V_{kr}$  kristályosodási sebességtől (a kristálycsirák növekedési sebessége) függ, mindkettő a lehülési sebesség, vagyis az ún. alulhűtési mérték függvénye. Kicsi lehülési sebességnél kicsi az utóbb említett faktorok értéke, kevés csira keletkezik. Ezek lassan nőnek, és ennek következtében durva, nagyszemcsés primerszerkezet jön létre. Nagy lehülési sebességnél nagy lesz az alulhűlés mértéke és mindkét faktor értéke, sok kristályosodási csira keletkezik. Ezek hamar nőnek, ami által a szemcseszerkezet finom, kisszemcséjű lesz.

### 1.5. A fémalapanyagok gyártása

Az arany, ezüst és platina kivételével a fémek érc alakban fordulnak elő a természetben. A vasat például hematitből ( $Fe_2O_3$ ), vagy magnetitből ( $Fe_3O_4$ ) állítják elő redukcióval, az alumíniumot bauxitból ( $Al_2O_3 \cdot H_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$ ), a rézet szulfidokból ( $(Cu,Fe)S$ ), vagy oxidokból ( $Cu_2O$ ,  $Cu(OH)_2$ ,  $CuCO_3$ ), a titánt ilmenitből ( $FeTiO_3$ ) vagy rutilból ( $TiO_2$ ) nyerik, különböző metallurgiai folyamatokkal.

A **nyersvasgyártás** nagyolvasztóban végzett kohósítással történik a fent említett vasoxidok szénrel való redukálásával. A redukcióhoz koksot használnak és a reakciók fenntartásához forró levegőt fújnak be. Az így termelt nyersvas 4-5,5% szenet tartalmaz oldott és cementit ( $Fe_3C$ ) formájában. Magas a szennyezettségi foka különböző oxidok, szulfidok, szilikátok és más salakanyagok alakjában.

Az **acélgyártás** a nyersvas további finomítása révén, Siemens-Martin kemencékben (már nem nagyon használják), villamosív kemencékben, indukciós kemencékben, vagy oxigén befűvéses konverter kemencékben történik. Gyártás közben végbemegy a frissítés (dekarburálás, H és P csökkentése), dezoxidálás, finomítás-rafinálás (S,P lekötése), ötvözés, esetenként átolvasztás, vákuumozás, stb., míg az anyag eléri a megfelelő kémiai és szerkezeti összetételt. A megfelelő mértékben csillapított folyékony acélt **tuskókba**, vagy **öntecsekbe** öntik, és ezekben megy végbe a kristályosodás. A modern acélgyártás egyre szélesebb körben alkalmazza a folyamatos öntést (ma már eléri a 90% -ot), amikor folyamatosan acélszalakat, vagy rudakat öntenek, a dermedés és a lehülés pedig az elkövetkező hengerléssel egy folyamatos technológiát képez, nagymértékben növelve a termelékenységet és csökkentve a gyártási kiadásokat.

Az **alumínium gyártása** a bauxitból előállított timföld elektrolízisével történik, többfázisú tisztítási folyamat által.

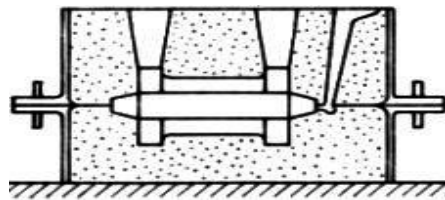
A **rézet** a dúsított és kiégetett ércből lángkemencékben dezoxidációval és gáztalanítással nyerik, majd elektrolízissel finomítják.

A **titánt** dúsított rutilból ( $TiO_2$ ) klóráramban, szén hozzáadásával titánkloriddá alakítják, majd metalotermikus eljárással, magnéziummal keverve készítik.

## 1.6. Öntészet

A formaadás egyik legrégebbi módszere az olvasztott fémekből vagy ötvözetekből, homokból vagy más tűzálló anyagokból alakított formákba való öntés által készült darabok előállítása. Az öntészetben használt főbb formázási és öntészeti módszerek:

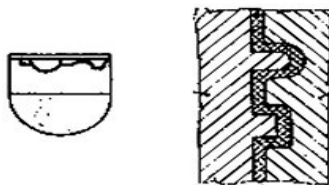
- **Homokformázás**, agyag kötőanyagú kvarc alapú formázókeverékből, vasrámákban, famodell után készített formákat használ, amelyekbe szárítás és előmelegítés után beöntik az olvadt, folyékony fémet. A 6-os ábrán egy öntésre kész homokforma metszete látható, vas keretben, középen egy hengeres formájú maggal. Láthatók a beöntő medence, a kanális, a légző- és nyomócsatornák is.



6. ábra.

- A **kötőanyaggal kevert homokformák** abban különböznek a fentitől, hogy a formázó homokot különböző szerves vagy szervetlen anyagokkal erősítették meg, megnövelve ezáltal a forma szilárdságát. E célból vízüveget, bentonitot, gyorskötésű cementet, vagy különböző műgyantákat (furan-, fenol- és karbamid gyanták) használnak fel.

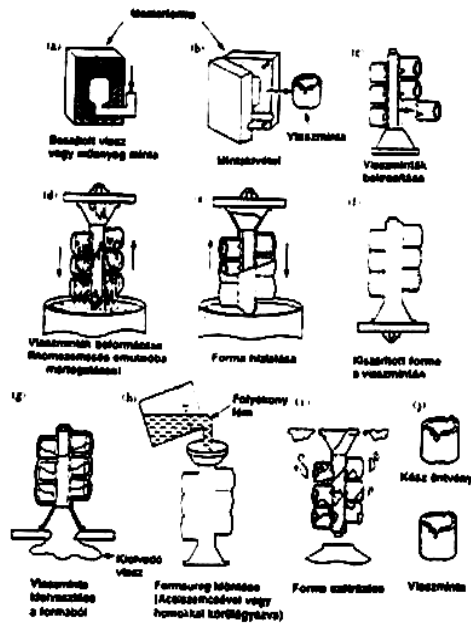
- A **héjformázás** méretpontos öntvények gyártására használt legfontosabb eljárás, mivel nagy az öntött darabok pontossága ( $\pm 0,1-0,2$  mm), felületi simasága, kicsi a szükséges forgácsolási ráhagyás. A formázó anyag finom, jó minőségű  $\text{SiO}_2$  homok, formaldehid novolak műgyanta és hexametilén tetramin térhálósító katalizátor. Legelterjedtebb formázó eljárása a billenőedényes módszer,  $200^\circ\text{C}$ -ra felmelegített fém mintalappal (7. ábra).



7. ábra.

- A **precíziós öntés** pontos, jó felületű, nagy bonyolultságú, de kis méretű, nehezen forgácsolható anyagú alkatrészek gyártását teszi lehetővé ( $\pm 0,05-0,1$  mm tűréssel). Kiolvadómintás (viaszmintás) formázó eljárást alkalmaznak, iszapszerű homokkeveréket használnak. Ennek megszáradása és megszilárdulása után kiolvasztják a viaszmintát. A formázás és öntés fázisait a 8-as ábra mutatja be.





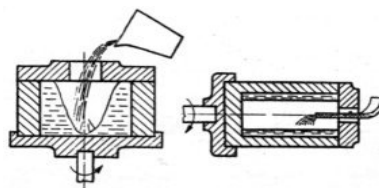
8. ábra.

- A **keramikus formázás** hasonló a fenti módszerhez, de a kész formát a viasz minta kioldása után lángkezeléssel stabilizálják, majd  $1000^{\circ}\text{C}$  -on kiégetik, hogy gázképző anyagok ne maradjanak.

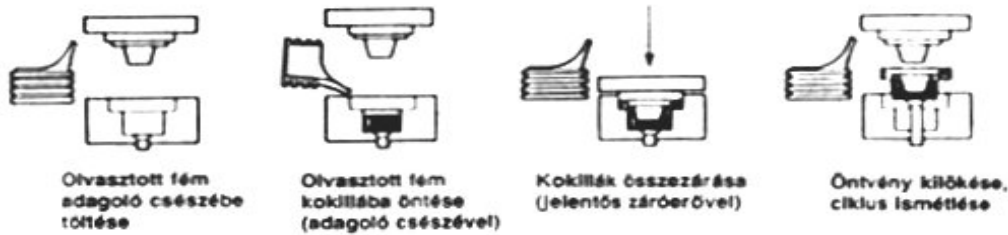
- A **kokillaöntés** tulajdonképpen fémformába való öntés, amely számtalanszor felhasználható. A kokillák anyaga öntöttvas, vagy Cr-Ni, Cr-Mo ötvöztött acél és főként könnyű fémekhez és ötvözetekhez alkalmasak. A kokillaöntés több változata ismeretes:

- **gravitációs kokillaöntés;**
- **pörgetőöntés;**
- **kiszorításos kokillaöntés;**
- **nyomásos öntés.**

A pörgető öntésnél a centrifugális erő egyenletesen nagy kompaktitású, főként forgástest alakú darabok előállítását teszi lehetővé. A függőleges és vízszintes változatokat a mellékelt 9-es ábra mutatja be. A kiszorításos öntés hasonlít a matricába való sajtoláshoz, a folyékony fém az alsó kokillába öntik, majd a felső nyomóbéllyeggel bepréselik (10-es ábra). A beöntőrendszer nem szükséges, így a költségek jelentősen csökkenthetők, a darabok minősége nagyon jó és magas a termelékenység is. Főként alumínium és ötvözei öntésére alkalmazzák.



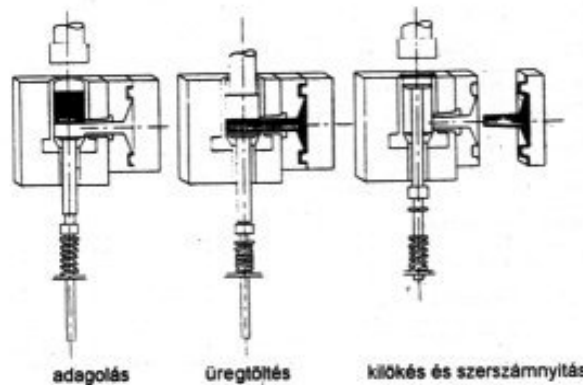
9. ábra.



10. ábra.

- A **nyomásos öntés** is egy kokillaöntés, de a folyékony fémet nyomóhengeres berendezéssel bepréselik a két részből álló kokillába (11. ábra). Az eljárásnak 3 változata ismeretes:

- kisnyomású melegkamrás eljárás;
- nagynyomású melegkamrás eljárás;
- nagynyomású hidegkamrás eljárás.



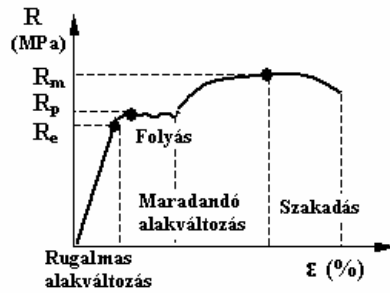
11. ábra.

## 1.7. Képlékeny alakítás

Külső erő hatására a fémek és ötvözetek rugalmas és maradandó alakváltozást szenvednek. A **rugalmas alakváltozás** az erő eltűnése után szintén eltűnik, a fém alkatrész visszakapja az eredeti formáját. E jelenség értékelésére használatos az E rugalmassági, vagy Young-féle modulusz.

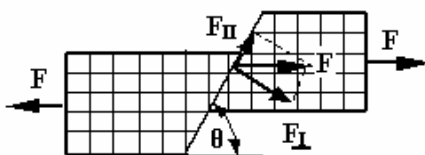
A **képlékeny alakváltozás** egy maradandó forma változása a fémeknek, amely akkor jelentkezik, ha a külső erő meghaladja a rugalmassági feszültség ( $R_e$ ) értékét. Ezt követően megkezdődik a fém folyása, az  $R_p$  feszültség állandó marad, a fém megkeményedik, megnő az erő és a feszültség, amíg eléri a legnagyobb értékét, az  $R_m$  szakító szilárdságot, majd létrejön az anyag szakadása. E jelenségeket legjobban a Hooke diagram ábrázolja (12. ábra,) amely az anyagban fellépő  $R$  feszültség változását mutatja a fajlagos alakváltozás  $\epsilon$  függvényében. Míg a rugalmas alakváltozás az atomtávolság (kristály paraméter) növekedésével jár, a maradandó alakváltozás a következő két mechanizmuson alapszik:

- **kristálycsúszás** vagy **transzláció** és
- **kristályikresedés**.

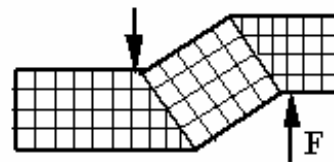


12. ábra.

A **csúszáson** (transzláción) alapuló, maradandó alakváltozás legjobban az egykristályokon figyelhető meg, amikor külső erő hatására, a rugalmas alakváltozás után a kristály két része egy bizonyos  $\theta$  szög alatt (leggyakrabban  $45^\circ$  alatt) levő legsűrűbb atomtartalmú sík mentén egymáshoz képest elcsúszik anélkül, hogy a kristály két része elválna egymástól (lásd a 13. ábrát). Ha a terhelést tovább fokozzuk, egyrészt folytatódik a csúszás az első síkon, másrészt azzal párhuzamos új csúszási síkok alakulnak ki. Az  $F$  húzóerő a csúszási síkon két alkotóra bontható: egy, a síkkal párhuzamos összetevőre ( $F_{II}$ ), amely a transzlációt segíti elő, és egy merőleges összetevőre ( $F_I$ ), amely a szakadást idézi elő.



13. ábra.



14. ábra.

Az **ikerképződés** főként nyíráshoz vagy csavarásos igénybevétel esetén jelentkezik, lapközpontos köbös vagy hatszögű kristályrendszerek esetében, amikor az ikerzónában a kristályrács iránya megváltozik (14. ábra).

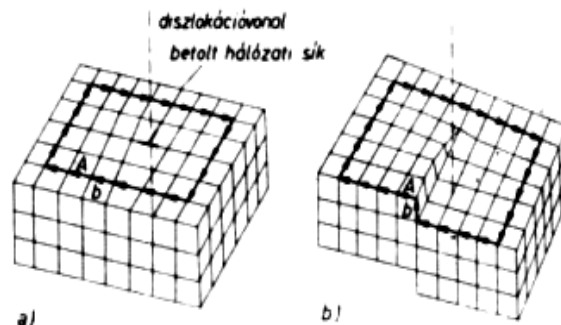
A **sokszemcsés valódi fémek és ötvözetek** esetében a maradandó alakváltozás szintén a két fent említett jelenség alapján történik annak függvényében, hogy a szemcsekristályrács milyen szöget zár be a külső alakító erővel. Először azok a szemcsék nyúlnak meg, amelyeknek a kristályrácsa  $45^\circ$  szöget zár be az erővel. Ezeket azok a szemcsék követik, amelyek csúszó síkjai kissé térnek el az optimális szögtől, majd a nagy szögeltérésű szemcsék jönnek. Utoljára a merőleges csúszássíki kristályok (15. ábra.) deformálódnak



15. ábra.

A maradandó alakváltozás után az anyagszemcsék megnyúlt formát kapnak, egy szális szemcseszerkezet alakul ki, amelyben a szövetalakulatok sorban rendeződnek és nyújtott kinézetet kapnak. A lágyabb, könnyebben alakítható fázisok (például a ferrit az acélokban) jobban kihúzódnak, míg a kemény szövetalakulatok csak kevésbé, vagy egyáltalán nem nyúlnak, vagy felaprózódnak és sorokat képeznek a nyúlás irányában.

A maradandó alakváltozás létrejötté szempontjából nagy szerepe van a **diszlokációknak**, amelyek jelenléte határozza meg a csúszási síkok kialakulását. A diszlokáció egy kristályrácshiba, amely lehet él- vagy csavar formájú és egy atomsor hiánya, vagy eltolódása a jellemzi. A 16-os ábra bal oldalán éldiszlokációt, jobb oldalán pedig egy csavardiszlokációt mutat be. A képlékeny alakítás szempontjából az éldiszlokáció a fontos, mert ennek a mozgása alakítja ki a csúszási síkok megjelenését. A diszlokációkon kívül még pont formájú rácshibák, **Schottky** vagy **Frenkel** típusú rácslukak is megtalálhatóak, amelyek főképpen a diffúzió szempontjából fontosak. A szemcsehatárokon, rétegződéseknél sík formájú, kétdimenziós felépítésbeli hibák jelentkezhettek.



16. ábra.

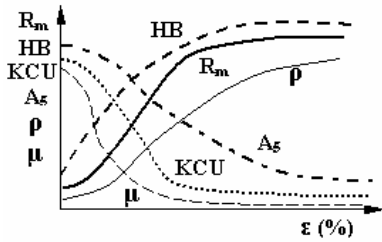
A **keményedés** a maradandó alakváltozás egyik következménye, amely az összes csúszási síkok maximális kihasználódását jelenti. Ekkor megnő az anyag keménysége, belső feszültségi állapot jön létre, és a további képlékeny alakítás már nem lehetséges. A keményedés az ún. **hidegalakítás** alatt jön létre, ami a szobahőmérsékleten való alakítást jelenti. A keményedés tulajdonképpen a rácstorzulás következménye csúszási síkok mentén, de ilyen hatása van a képlékeny alakítás alatt a csúszási síkok elfordulásának is.

A hidegalakítás alatt létrejövő keményedés megváltoztatja az anyag fizikai és mechanikai tulajdonságait a fajlagos alakítás  $\epsilon$  függvényében (17. ábra). A képlékeny alakítás folyamán növekedik az  $R_m$  szakító szilárdság, a  $HB$  keménység és a  $\rho$  elektromos ellenállás, míg az  $A_5$  fajlagos nyúlás, az ütésszilárdság ( $KCU$ ) és a mágneses permeabilitás csökken.

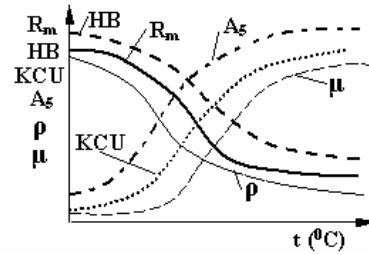
Az **ernyedés** (relaxáció) a maradandó alakítás rugalmas utóhatásának minősíthető. Az alakító terhelés eltűnése után a darab méretei kis mértékben megnőnek. A hidegalakítás által keményedett állapot a következő fémtani tulajdonságokkal jellemezhető:

- a kristályrác torzulása és az anyag megnövekedett energiatartalma;
- a kristályszerkezet megnyúlása, egyes keményebb fázisok felaprózódása.

A **melegalakítás** magasabb hőmérsékleten történik, amikor az atomok mozgása olyan nagy, hogy ezek a csúszási síkok mentén újrendeződnek és a keményedés csak kis mértékben, vagy egyáltalán nem jön létre.



17. ábra.



18. ábra.

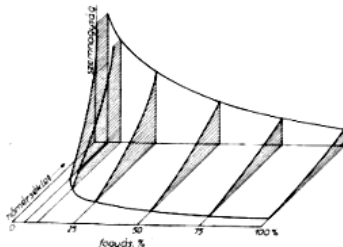
Az újrakristályosodás, a hidegen alakított keményedett fémek melegítésével létrejövő ellentétes jelenségek halmaza. A jelenség alatt csökken a keménység, a szakító szilárdság és az elektromos ellenállás, és az eredeti nagyságra nő a képlékeny alakíthatóság, az ütés szilárdság és a mágneses permeabilitás (18. ábra). Az újrakristályosodás folyamán - a hőmérséklet növekedésével - a következő jelenségek történnek:

- **megújulás** amellyel eltűnnek során a rácshibák és torzulások, a rácsszerkezet újrendeződik az atomok nagyobb mobilitása folytán;
- **kristálycsírásodás**, ami új, finom szemcsék megjelenését jelenti a megnyúlt szemcsehatárok mentén;
- **szemcsedurvulás**, ami az energiatartalom csökkenési tendencia folytán létrejövő szemcsekoaguláció és szekunder újrakristályosodás eredménye.

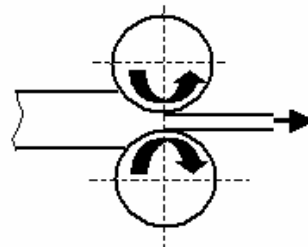
A szemcsedurvulás mértéke a következő három tényező összhatására történik:

- **t** melegítési hőmérséklet ( $200-800^{\circ}\text{C}$ );
- **$\tau$**  hőmérsékleten tartás ideje (0,5-6 h);
- **$\epsilon$**  fajlagos hidegalakítás mértéke (%).

Az újrakristályosodott szemcseméret változása a hőmérséklet és a fajlagos alakítás függvényében az úgynevezett **újrakristályosodási diagramban** látható (19. ábra). Kicsi fajlagos hidegalakítás esetén nagyon nagy mértékű szemcsedurvulás lép fel. Az újrakristályosodás kezdetén kevés szemcsecsira alakul, mert kevés a szövetszerkezetben a deformált szemcse. Ezt kritikus fajlagos alakításnak nevezzük ( $\epsilon = 3-10\%$ ).



19. ábra.



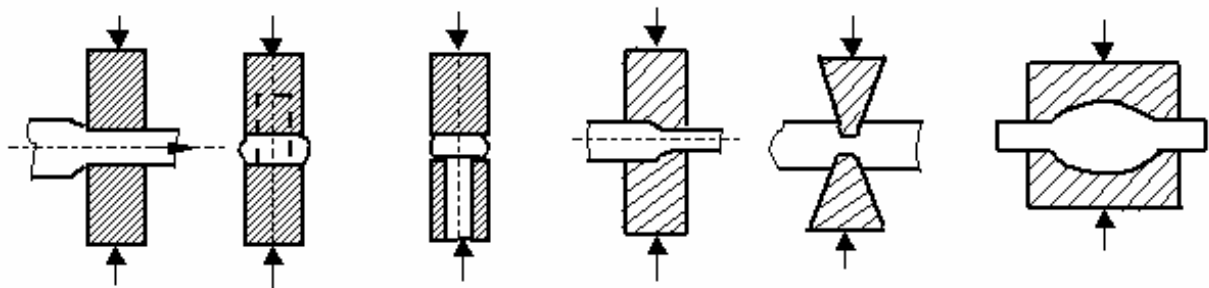
20. ábra.

A fémek képlékeny alakításának a következő technológiai alkalmazásai ismertek:

**a. Hengerlés:** két vagy több vízszintes (vagy függőleges) henger között átvezetett anyag vastagság csökkentési eljárása (20. ábra). Az öntött tuskóból előgyártmányokat (laposbuga, durvalemez, platinát stb.) és egyes késztermékeket melehengerléssel állítanak elő. A hideghengerlést ritkábban, csak finomlemezgyártás befejező műveleténél használják. A síkhengerlést lemezek, rudak, szalagok gyártásánál alkalmazzák. Idomhengerlést profilos hengerekkel végeznek, kör, háromszögű, hatszögű rudak, sínek, szögacélok vagy I, U, T, Z tartók gyártásánál. Csőgyártásra kúpos, hordós, vagy tárcsás ferdehengerlési eljárásokat alkalmazzák.

**b. Kovácsolás:** általában az újrakristallizációs hőmérséklet felett, ütéssel vagy nyomással végzett képlékeny alakítás. A kovácsolt fém mechanikai tulajdonságai, hasonlóan a hengerelt anyagokhoz, anizotrop viselkedést mutatnak, a szilárdsági tulajdonságuk szálirányban rendszerint jobb, mint keresztirányban. A **szabadalakító kovácsolás** lehet kézi, vagy gépi eljárás, utóbbi esetben mechanikus, gőz, vagy pneumatikus kovácsgépeket alkalmazzák.

A szabadkovácsolás alapműveletei a 21. ábra szerint a következők:



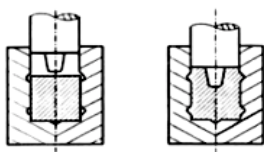
1-nyújtás; 2-zömítés; 3-fejzömítés; 4-hegyezés; 5-darabolás; 6-duzzasztás;

21. ábra.

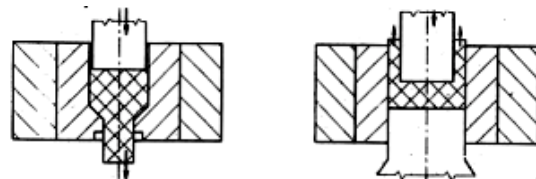
**c. A süllyesztékes kovácsolást** nagy darabszám, darabméret és bonyolult munkadarab esetén alkalmazzák. Alakításkor a kovácsolási hőmérsékletre felhevített munkadarabot fokozatosan beleverik, zömítik a süllyesztékbe, amíg annak üregeit teljesen kitölti. A süllyeszték (matrica) lehet nyitott (sorjacsatornával vagy anélkül), vagy zárt (sorjamentes). A 22. ábra zárt süllyesztékben való alakítást mutat be, nagy precizitású darabok előállítására.

Többször alkalmazzák a következő, speciális kovácsolási eljárásokat is:

- vízszintes kovácsolás;
- támolygó kovácsolás;
- kör és finomkovácsolás;
- hidegzömítés.



22. ábra.



23. ábra.

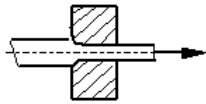
**d. Az extrudálás (folyatás)** a fémek süllyesztékben való alakításának különleges esete, amikor a süllyeszték falában levő nyíláson át kinyomják az anyagot (23. ábra). A szerszám

belsejében hidrosztatikus nyomófeszültség lép fel, ami az anyagot képlékeny állapotban - melegen vagy hidegen - kinyomja. Az acél melegfolytatásánál kenőanyagot kell alkalmazni (grafit, MoS<sub>2</sub>, olvadt üveg).

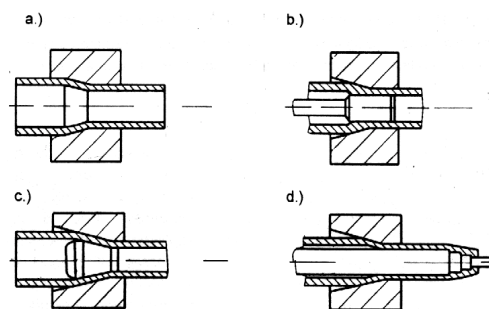
Megkülönböztetünk előre (a), hátra (b) vagy kombinált folytatást.

**e. A húzás** drótok és rudak előállítási eljárása, amikor az előhengerelt vagy elősajtolts nyersrudat vagy huzalt folyamatosan kisebbedő keresztmetszetű húzószerszámon húzzák át (24. ábra). Bizonyos számú keresztmetszet-csökkentés után az anyagot - hogy továbbhúzható legyen - lágyítani kell. Általában kis széntartalmú acéldrótokat húznak, de nagyobb karbon tartalmú, nagy szilárdságú patentírozott huzalokat is gyártanak izotermikus edzéssel kombinálva. A csövek húzása hasonló technikával történik.

A különböző eljárásokat a 25. ábra mutatja be.



24. ábra.



25. ábra.

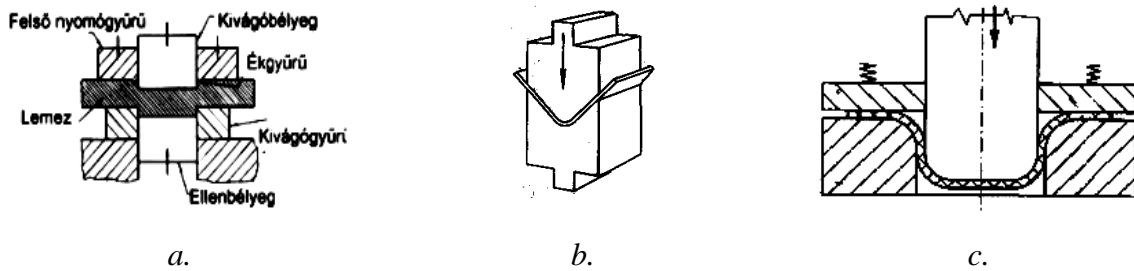
**f. A lemezalakító technológiák** a képlékeny alakításos eljárások külön fejezete. Megkülönböztetnek:

- vágás, kivágás, finomkivágás eljárásokat;
- hajlítás, élhajlítás műveleteket;
- mélyhúzás, mélynyomás, flexibilis szerszámmal való alakítást;
- robbantásos alakítást;
- víz alatti alakítást.

A **lemezek darabolása, leválasztása, kivágása** stb. speciális ollók felhasználásával, vagy vágóbélyeg és vágógyűrű segítségével történik. Általában a vágó szerszámmal nyíróhatásra kitétt anyag először rugalmas, majd képlékeny alakváltozást szenved, majd alakváltozó képessége kimerül, repedések jelennek meg, amelyek ha összeérnek, végbe megy a vágási folyamat (26.a ábra).

A **hajlítás** olyan technológiai művelet, amellyel a lemezek egyes felületeit egymáshoz viszonyítva adott szög alatt hajló felületekké alakítják át, az anyag szétválasztása nélkül (26.b ábra).

**Mélyhúzással** egy síklemezből - alakítóbélyeg nyomásának hatására - üreges testet alakítanak ki (26.c ábra).



26. ábra.

**Az alakítás rugalmas szerszámmal** bonyolult formájú termékek előállítására való, mikor néhány szerszámelemet flexibilis anyagra (gumi, poliuretán stb.) cserélnek ki. Így csökkennek a költségek, kisebb a szerszámkopás és kevésbé károsodik a lemezanyag.

### 1.8. A szerkezeti anyagok tulajdonságai és igénybevételei

Az anyagok tulajdonságai a következő főbb kategóriákba csoportosíthatók:

- mechanikai tulajdonságok;
- technológiai tulajdonságok;
- kémiai tulajdonságok;
- mikroszerkezeti tulajdonságok;
- termikus tulajdonságok;
- villamos tulajdonságok;
- mágneses tulajdonságok;
- optikai tulajdonságok;
- nagyfrekvenciás és röntgensugárzási tulajdonságok;
- anyagtulajdonság-változások az igénybevételek hatására.

#### a. A mechanikai tulajdonságok három csoportba oszthatók:

- statikus,
- dinamikus és
- fáradási anyagjellemzők.

A **statikus anyagjellemzők** közül megkülönböztetnek:

- szilárdsági;
- képlékenységi és
- szívóssági jellemzőket.

A **szilárdsági** jellemzők a következők:

- $R_m$  - szakítószilárdság (MPa);
- $R_p$  - folyáshatár (MPa),
- $R_{0,2}$  - konvencionális folyáshatár;
- $R_e$  - elasztikus deformáció határa (MPa);

A **képlékenységi** jellemzők közül a legfontosabbak:

- $A_5$  vagy  $A_{10}$  -fajlagos szakítási nyúlás (%), öt vagy tízszeres próbahosszra vonatkoztatva;
- $Z$  -fajlagos szakítási keresztmetszet kontrakció (%);
- $\varphi$  -maximális hajlítási szög az első anyagrepedés megjelenéséig ( $^\circ$ ).



A **szívósságot** a  $W_c$ -fajlagos törési munkával jellemzik ( $J/cm^3$ ), amely azt fejezi ki, hogy a vizsgált anyag egységnyi térfogata töréséhez mekkora energiára van szükség.

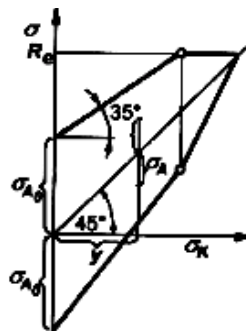
A **dinamikus anyagjellemzők** az ütéssel, vagy nagy sebességgel növekedő terheléssel szemben kifejtett ellenállást mutatják. E célból Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot végeznek el.

- **KCU** - fajlagos törési ütőmunka U alakú bevágású Charpy próbával ( $J/cm^2$ );
- **KV** - törési munka V alakú bevágású próba ütve hajlításnál Charpy kalapáccsal (J).

A **fáradási anyagjellemzők** az időben ciklikusan változó terhelésű igénybevétellel szembeni ellenállást fejezik ki. A ciklikus igénybevétel szimmetrikusan változó (lengő), vagy lüktető (pulzáló) lehet, előfeszítéssel vagy nélküle. E jellemzőket kisciklusú vagy nagyciklusú fárasztóvizsgálatok segítségével lehet meghatározni.

A **kisciklusú** fárasztóvizsgálatnál a váltakozó igénybevétel szintje a folyáshatárt meghaladja, a törés már viszonylag kevés igénybevételi ciklus után következik be (kb.  $10^3$ - $10^4$ ).

A **nagyciklusú** fárasztóvizsgálatnál az anyag kifáradási határát határozzák meg,  $R_e$  -nél kisebb feszültségnél, nagyszámú igénybevétel esetén ( $>2 \cdot 10^6$ ). A vizsgálat eredményét az úgynevezett Smith-diagramm fejezi ki, amely a törési szilárdságot a változó feszültség középértéke ( $\sigma_k$ ) függvényében ábrázolja. Amennyiben az üzemi igénybevételre jellemző pontok az egyenesek által behatárolt biztonsági területen belül esnek, nem kell fáradásos töréstől tartani (27. ábra).



27. ábra.

**b. A kémiai tulajdonságok** főként a korróziós igénybevételekkel szembeni ellenállást jelenti. A korrózió a fémek és a környezet között fellépő kémiai vagy elektrokémiai reakció, amely az alapanyag mérhető méretcsökkenését okozza. Behatolva az anyag belsejébe, annak leromlását, porladását, mechanikai tulajdonságai lecsökkenését okozva.

A **kémiai korrózió** a fémek száraz gázokkal (füst), vagy elektromosan nem vezető folyadékokkal (szerves oldószerek, kéntartalmú kőolajipari termékek) való érintkezés útján jön létre. Ebben az esetben általában a fémek oxidációja a jellemző, és ha az oxidréteg tömör, összefüggő és jól tapad az alapanyagra, nagymértékben csökken a korrózió sebessége.

Az **elektrokémiai korrózió** alapfeltétele, hogy a fém felülete olyan - általában vizes - elektrolittal érintkezzen, amelyben a fémionok oldódni képesek. Az elektrolit és az abba merülő fémek potenciálkülönbsége meghatározza az oldási potenciált, amely minél nagyobb, annál kisebb a korrózióval szembeni ellenállás.

A korrózió megjelenési formái különbözőek lehetnek az általa okozott elváltozások alaki jellegzetességei szerint:

- egyenletes korrózió;
- helyi korrózió (pont-, lyuk-, túszerű korrózió);

- kristályhatármenti korrózió;
- szelektív korrózió;
- feszültség korrózió (repedések);
- különleges korrózió (pácolási hólyagosodás, mikrobiológiai,
- gőzbomlásos, réteges, lemezes korrózió stb.).

A korróziós közegek vegyipari gázok, füst, levegő, széndioxid, kéngázok, nitrózus gázok, porok, csapadék, pára, gőz, ivóvíz, tengervíz, vízbázisú szilárd és folyékony anyagok, szerves folyadékok és oldatok, folyékony fémek és ötvözetek, sóömlédek, talajok, mikroorganizmusok, élelmiszerek lehetnek. A korróziót számos tényező befolyásolhatja: koncentráció, hőmérséklet, nyomás, mechanikai feszültség, villamos áram, tribológiai hatások stb.

**c. Termikus tulajdonság** a hőhatásnak kitett anyagok viselkedését határozza meg. Az anyagok az energiát hő formájában elnyelik, ennek következtében megnő a hőmérsékletük, méreteik megváltoznak. A szilárd anyagok termikus igénybevételénél a következő tulajdonságok a legjellemzőbbek:

- **hőkapacitás**, amely azt az energiamennyiséget fejezi ki, amely az egységnyi anyag hőmérsékletét egységnyi értékkel emeli:  $C = dQ/dT$ , (J/mol.K);

- **fajhő**: ugyanaz, mint a hőkapacitás, de egységnyi tömegre vonatkoztatva  $c$  (J/kg.K);

- **hőtágulás**: az anyag hő hatására történő térfogat növekedését jelenti. Ha ezt csak egy irányba vizsgálják, lineáris hőtágulásról beszélünk:  $\Delta l = l_0 \cdot \alpha_t \cdot \Delta T$ , ahol  $\alpha_t$  a lineáris hőtágulási együttható.

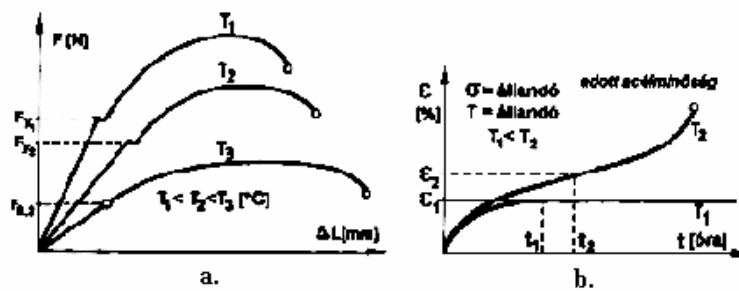
- **hővezetés**: az a folyamat, amikor a hő egy adott közegben a nagyobb hőmérsékletű helyről a kisebbbe áramlik. A hővezetés tulajdonképpen a fononok és elektronok közegében való mozgási energia továbbadása. A szilárd anyagokban a rácsrezgések és a szabad elektronok is résztvesznek a hőszállításban. A hővezetést a  $\lambda$  - hővezetési együtthatóval (J/cm.s.K), vagy  $a = \lambda/c$  (cm<sup>2</sup>/s) hőterjedési (difuzibilitási) együtthatóval jellemzik.

- **termikus feszültség**: a hőmérsékletváltozás vagy inhomogén hőmérséklet elosztással hőtágulás akadályoztatása alapján létrejövő belső mechanikai feszültség. Képlete:  $\sigma = \alpha_t \cdot E \cdot \Delta T$ , ahol  $E$  - a rugalmassági modulusz.

- **hősokk**: főként a rideg anyagoknál jelentkezik (kerámiák), amikor a gyors hőmérsékletváltozás okozta feszültségek megnövelik a ridegtörés lehetőségét, az anyagban a képlékeny helyi alakváltozás útján nem egyenlítődnek ki a folyási határt meghaladó termikus feszültségek. Ennek következtében a darabok felületén húzófeszültségek keletkeznek, és ezek repedések formájában egyenlítődnek ki. Ezt a tulajdonságot hősokkkal szembeni ellenállásnak nevezet **TSR** faktórral jellemzik.

- **melegszilárdság, időtartam-szilárdság, tartós folyási határ**: a fémes anyagok hőmérséklettel csökkenő szilárdságát jellemzik. Ez főként a magas hőmérsékleten dolgozó berendezések esetében (kazánok, hőcserélők, gázturbinák, pompák, erőművi gőzvezetékek repülőgépmotorok stb.) fontos. 400-450<sup>0</sup> C hőmérsékletig az anyag melegszilárdságát használják, ami egy bizonyos magasabb hőmérsékleten megmért szakító szilárdságot jelent. Magasabb hőmérsékleten az időtartam szilárdság a fontosabb, ami alatt azt a feszültséget értik, amely  $\tau_2$  idő alatt  $\epsilon_2$  előírt alakváltozást hoz létre. Tartós folyási határ az a feszültség, amely végtelenül hosszú  $\tau_1$  idő alatt sem okoz egy előírt  $\epsilon_1$  értéknél nagyobb alakváltozást. Mindezek grafikai ábrázolása a 28. ábrán látható (**a.** melegszilárdság, **b.** időtartam szilárdság és tartós folyáshatár).

- termikus fáradás** akkor jelentkezik, ha a hirtelen hőmérsékletváltozás gátolt dilatációnál változó feszültségeket hoznak létre, amik időben mikrorepedéseket okoznak.



28. ábra.

**d. Villamos tulajdonságok** a fémek alapvető jellemzői, hogy jó elektromos és hővezetők. Ez a tulajdonságuk a szabad elektronfelhő mozgásán alapszik. A szabad elektronok mozgását több hatás - külső elektromos tér, mágneses tér, anyagi minőségben történő változás, hőmérséklet különbség stb. - befolyásolja. A villamos tulajdonságok legfontosabb jellemzői a fajlagos ellenállás  $\rho$  ( $\Omega\text{m}/\text{mm}^2$ ) és a fajlagos villamos vezetőképesség  $\sigma$  (ami a fajlagos ellenállás reciprok értéke). Az elektromos ellenállás a hőmérséklet függvényében növekszik, mert növekednek a kristályrács ionatomjainak rezgései, ami akadályozza által a szabad elektronok áramlását. A rácshibák, szemcsehatárok, különböző ötvözőelemek, anyagszennyező zárványok stb. növelik az elektromos ellenállást. A képlékeny alakítás mértékével növekedik a fémek és ötvözetek ellenállása is.

A villamos tulajdonságok szempontjából az anyagok a következő főbb csoportokba sorolhatók:

- vezetékanyagok;
- ellenállásanyagok;
- szupravezető anyagok;
- félvezető anyagok.

A **vezetékanyagok** fontosabb kategóriái a következők:

-**vezetékek** (huzalok, kábelek, drótok, tekercsek stb.), amelyek nagyon kicsi villamos ellenállással kell rendelkezzenek, hogy a veszteségek minél kisebbek legyenek. E célból nagyon tiszta réz-, alumínium- vagy aranyhuzalokat használnak. Ötvözve mechanikai szilárdságuk nő, vezetőképességük pedig csökken.

- **érintkező anyagok:** elektromos kapcsolók kontaktjai számára készülnek, Ag, W, Pt, Au vagy ezek ötvözei (Cu-Ag, Cu-Ag-Au, Ag-W, Cu-Ag-Ni, Ag-CdO stb.) felhasználásával.

- **hőelemek:** anyagai elektromos áramot szolgáltatnak a hőmérséklet emelkedése függvényében, ha két különböző anyaghuzal hegesztési pontja melegítve van. Ilyen elemek a Ni-NiCr, Cu-CuNi, Fe-CuNi, vagy Pt-PtRh huzalpárból készülnek.

- **kettős fémek** (bimetáll anyagok): két eltérő hőtágulású, egymással összehengerelt fémlemezről készülnek, amelyek hőmérsékletváltozásra elhajlanak, így villamos kontaktus zárására vagy nyitására alkalmazhatók. A kis hőtágulási lemez ún. Dumet anyag, míg az aktív lemez minél nagyobb hőtágulású ötvözet (MnCu18Ni10, FeMn6Ni20).

- az **ellenállás-hegesztés befogó-elektroda** anyagok jó villamos és hővezető képességgel rendelkező, nagy szilárdságú réz, vagy rézötvözetek (CuCr1, CuCo2Be0,5, CuZrCr stb.)

- **lágyforraszanyagok** villamos és mechanikai kötést biztosítanak elektromos és elektronikai berendezésekben. Leggyakrabban ón alapú eutektikus ötvözeteket használnak (Sn62Pb38, Sn60Pb37Sb35 stb.).

- **olvadóbiztosító betétanyagok** rézhuzalok, fóliák vagy lemezek SnPb cseppel lomhásítva.

**Ellenállásanyagok:** kemencékben, melegítőekben használatos fűtőellenállások FeCrSi, FeCrAlCo (kantál), Ni80Cr20 (cekász), Ni62Cr16Fe22 (kromel) ötvözetek, amelyek nagy fajlagos ellenállással, hőszilárdsággal és oxidációs ellenállással rendelkeznek. Precíziós és mérőellenállásokat (Cu55Ni45-konstantán, CuMnNi-manganin), ellenállás-hőmérő huzalokat (Pt, Ni), nyúlásmérő bélyegek anyagait (NiCu, NiCr), vastagréteg ellenállás pasztákat (Pd, Ru ötvözetek), vékonyréteg ellenállásokat (CrNi, Ta, SnO<sub>2</sub>, CrSiO<sub>2</sub>) is használnak.

A **szupravezető anyagok** fajlagos ellenállása egy kritikus hőmérséklet alatt ( $T_{krit}$ ) nulla lesz. Általában Nb alapú ötvözeteket használnak (Nb<sub>3</sub>Sn - 18K; NbZr -10,8K; NbGeAl -23K), vagy nemfémek, kerámia anyagokat (LaB<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> - 30K; Ti(CaBa)Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> - 125K).

**Félvezető anyagok:** diódák, tranzisztorok, integrált áramkörök (CIP), fényérzékelők, fotodiódák stb. készítésére használandó speciális, nagy tisztaságú, ionplantációval készült ötvözetek. Leggyakrabban Si és Ge alapanyagú félvezetőanyagokat használnak, de az utóbbi időben egyre inkább elterjedt a GaAs egykristály alapú vegyület.

### **Irodalomjegyzék:**

- 1] Verő József, Káldor Mihály: *Fémtan*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
- 2] Káldor Mihály: *Fizikai metallurgia*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.
- 3] Szakács György, Dévény Miklós: *Keményfémek és szuperkemény anyagok alkalmazása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- 4] Artinger István, Kator Lajos, Ziaja György: *Új fémes szerkezeti anyagok és technológiák*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- 5] Artinger István, Csikós Gábor, Krállics György, Németh Árpád, Palotás Béla: *Fémek és kerámiák technológiája*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.
- 6] Ginsztler János, Hidasi Béla, Dévényi László: *Alkalmazott anyagtudomány*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.

# Keményfém, kerámia és kompozit anyagok a jövő gépgyártásban

*Dr. Bicsak Jenő*, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagok Technológiája tanszék

## 1. Kerámiák

A kerámia a görög kiégetett szóból ered. A kerámiákat az különbözteti meg a fémektől, hogy hiányzik a villamosvezetést és a képlékeny alakíthatóságot lehetővé tevő elektronfelhő. Nagy a villamos ellenállásuk, e tulajdonságuk azonban - a fémekkel ellentétben - a hőmérséklet emelkedésével csökken. A kerámiák nagyon ridegek, de jól ellenállnak a korróziónak, jól bírják a kopást és a magas hőmérsékletet. Kristályos anyagszerkezetük van, ami az atomok szabályos térbeli elrendeződését jelenti.

A kovalens és ionos jelleg, valamint a kis atomtávolság következtében a kerámiákban nagyon erős az atomok közötti kötés.

A kerámiákat két nagy csoportba sorolhatjuk:

- **Egyatomos kerámiák;**
- **Vegyület kerámiák.**

Az egyatomos kerámiák színállapotban alkalmazható anyagok, mint például a grafit és a gyémánt, vagy az egykristály alakban előállított szilícium és germánium.

A kerámiák óriási többsége valamely vegyületből áll, amit nagyobb méretű fématomok és egy, vagy több kis rendszámú nemfémes elem (O, C, N, B, H) kombinációja alkot. Ezek **oxidok, karbidok, nitridek, karbo-nitridek, boridok, hidrátok, szilicidok, szulfidok stb.** lehetnek.

Az oxidkerámiák lehetnek:

- **műszaki, kristályos finom oxidkerámiák** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ );
- **kristályos, durva oxidkerámiák** (cserép, téglá, porcelán);
- **kristályos hidrátok** (cement, beton, üvegek, kőzetek).

A kerámiák főbb mechanikai és fizikai tulajdonságai:

- **kis sűrűség; nagy rugalmassági határ; ridegség;**
- **nagy olvadáspont; nagy nyomószilárdság; törékenység;**
- **nagy keménység; nagy kémiai stabilitás; mikrorepedések;**
- **nagy kopásállóság; nagy melegsilárdság; kis hősokkállóság;**
- **nagy korrózióállóság;**
- **nagy villamos ellenállás; nehéz gyárthatóság;**
- **jó polarizálhatóság; nagy dielektromos állandó; magas ár.**

A műszaki kerámiák jellegzetes felhasználási területei:

- **forgácsoló szerszámok:** BN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiAlON;
- **csapágyanyagok:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, AlN, BN;
- **biokerámiák:**  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiB}_2$ ;

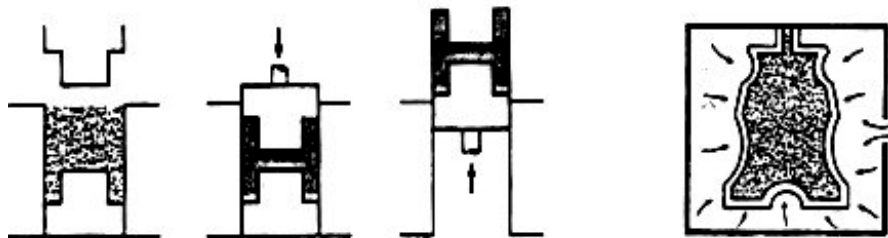
- **hőcserélők:**  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiC}$ ;
- **elektrokerámiák:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2\cdot\text{MgO}$ ;
- **diesel-motor, turbinák:**  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{ZrO}_2\cdot\text{MgO}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\cdot\text{SiC}$ ;
- **űrtechnika:**  $\text{BeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- **kerámia páncélzat:**  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiB}_2$ ;
- **villamos szigetelők:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- **félvezetők:**  $\text{Ge}$ ,  $\text{Si}$ ;
- **kondenzátorok:** oxidok;
- **hőszigetelők:**  $\text{ZrO}_2$ ;
- **mágnesek:**  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnMnFeO}$ ,  $\text{CrFeO}$ ;
- **szupravezetők:**  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $\text{LaBaCuO}$ ;
- **nukleáris anyagok:**  $\text{UO}_2$ ,  $\text{PuO}_2$ ;
- **érzékelők:**  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ;
- **optikai anyagok:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cr laser,  $\text{BaNaNbO}$ .

### A kerámiák előállítása és gyártása

A kerámiák előállítása és gyártása oxid alapú természetben található ásványok tisztításán és aprításán alapul. Kiinduló anyagként kvarchomokot, kaolint, földpátot, bauxitot stb. használnak fel. A jó minőségű kerámiát portechnológia alkalmazásával, nagy tisztaságú alapanyagokból, különleges eljárásokkal gyártják és alakítják darabokká. Olvasztásos technológiával csak kis olvadáspontú ( $<1700^\circ\text{C}$ ) kerámiákat lehet készíteni (üveg). Az oxidok és más kerámia alapanyagok olvadáspontja igen magas, így csak porkohászati technológiákkal lehet megmunkálni. A gyártási technológiák iszapöntéses, vagy sajtolásos eljárások lehetnek.

Az **iszapöntést** hidráttartalmú kerámiáknál alkalmazzák, gyúrható, vagy hígán folyó massa formájában, a szokásos öntő eljárások alkalmazásával: hagyományos, nyomásalatti-, fröccs-, vagy centrifugál öntéssel. A termékeket lassan szárítják, majd magas hőfokon égetik ki.

A **portechnológia** a porgyártás, osztályozás, adalékolás után sajtolás és zsugorítás (szinterelés) útján gyártja a legjobb minőségű kerámiákat. A sajtolást szárazon, nedvesen, hidegen, vagy melegen lehet elvégezni fa- vagy fémsüllyesztékben. A legjobb minőséget meleg izosztikus sajtolással (HIP) lehet elérni  $900-1700^\circ\text{C}$ -on. A szinterelést  $1400-1900^\circ\text{C}$  között végzik a kerámia anyagminősége függvényében. A porkeverék hagyományos (a) és HIP (b) sajtolását az 1. ábra illusztrálja.



1. ábra.

**Kerámiaszálak és túkristályok (whiskerek), szemcsék** különleges eljárásokkal készülnek és kompozit anyagokban használják fel. A  $0,02-2$  mm átmérőjű és néhány mm hosszú

tűkristályok igen kedvező tulajdonságokkal rendelkeznek: nagy a szakítószilárdságuk ( $R_m = 1450-20000 \text{ MPa}$ ), kicsi a fajsúlyuk ( $1,45-4 \text{ g/cm}^3$ ).

**Kerámia bevonatok** nagy keménységű, hő és korrózióálló réteget képeznek, szerszámok, turbinalapátok, úrberendezések stb. felületén. E célból TiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiN, TiAlN,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , vagy gyémánt anyagokat használnak. A bevonatok egyrétegűek vagy többrétegűek lehetnek, 1-100  $\mu\text{m}$  vastagságban.

Az **üvegek** nem kristályos kerámiák  $\text{SiO}_2$  alapú  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , CaO, MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , PbO,  $\text{B}_2\text{O}_3$  adalékú összetétellel. Előállításuk olvasztásos és öntési technológiákat alkalmaz. Az üveg törésmutatója az elektronsűrűségtől függ, amit az atomok rendszáma és helykitöltése határoz meg. Ólomoxid (PbO) hozzáadásával nagy sűrűségű, könnyen csiszolható, nagy sugárelnyelő és fénytörésű ólomüveg készül. Szintelen üveget nehéz gyártani a szennyező anyagok miatt. A vas zöld, a króm kék, a mangán lila színt ad az üvegnek. Üvegszálakat egyre nagyobb mértékben a telekommunikációban (műanyagba burkolt hajszálvékony üvegszálakból kötegelt fénykábelek), és az üvegszál-erősítésű kompozit anyagok gyártásában használnak fel.

**Kristályos hidrátok**, mint a cement és a beton, szintén oxidokból álló termékek, amelyeket agyagtartalmú meszek  $1400^\circ\text{C}$  feletti hőmérsékleten történő kiegészítésével, majd e massa porrá őrlésével gyártanak. Összetétele:  $50\%\text{CaO} + 36\%\text{SiO}_2 + 11\%\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Természetes kerámiák** közé az agyagot, mészkövet, homokkövet, gránitot, csillámot és földpátot sorolják. Ezek közül a gránit a legellenállóbb, ezt gépállványok, kémiai edények gyártására használják fel.

## 2. Kompozitok

A kompozit, vagy társított anyagok két vagy több különböző anyag egyesítésével előállított szerkezeti anyagok (fém-kerámia, kerámia-kerámia, műanyag-kerámia, műanyag-üveg, fém-üveg, vas-beton stb.). A kompozit anyagok szerkezete két részre bontható: mátrixra (alapanyag) és az erősítő adalékanyagra. A **mátrix** körbefogja az erősítőanyagot, átadja és elosztja az igénybevételt, megnövelve az anyag szilárdságát, szívósságát, keménységét. Felhasználásuk ma már igen széleskörű: a repülőgép konstrukcióktól a turbinalapátokon át egész a sporteszközökig. A kompozitoknál meghatározó szerepe van a mátrix és az erősítőanyag közti kémiai és fizikai kapcsolatnak, a fázisok közötti átmeneti rétegnek.

A kompozitanyag négy típusát gyártják (2. ábra):

- szemcsés, vagy részecske erősítésű;
- szálal (rövid, vagy hosszú) erősítésű;
- lemezes (rétegelt, szendvics) szerkezetű;
- felületi réteges, bevonatos.



2. ábra.

A kompozit anyagok tulajdonságai részecskeerősítés esetén iránytól függetlenek, míg a szál-erősítésűeknél, valamint a rétegeltknél irányítottság áll fenn. Az erősítő anyagok elosztása véletlenszerű, vagy szabályos lehet. A kompozit anyagok létrehozásával a következő tulajdonságok érhetőek el:

- szilárdságnövekedés;
- törési biztonság növelése;
- rugalmassági modulusz növekedése;
- hőtágulási együttható csökkenése;
- tömegcsökkentés;
- mágneses és elektromos tulajdonságok javítása;
- kopásállóság növelése;
- szupravezető szerkezet előállítása;
- hőszigetelő képesség növelése.

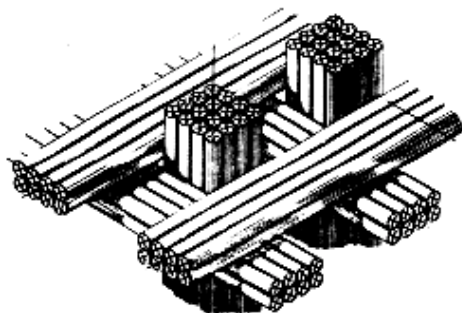
**Részecske erősítésű kompozitok** alapanyaga lehet fém, kerámia, vagy műanyag (polimer), amelybe finomra őrölt, apró, diszperz 0,1-10  $\mu\text{m}$  átmérőjű kerámia-, fém-, vagy műanyagrészecskéket ágyaznak be nagy szilárdság, vagy különleges tulajdonságok elérése céljából.

Az alumínium szilárdsága növelhető  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vagy  $\text{Al}_4\text{C}_3$  részecskékkel. A diszperziósan erősített kompozitok a magasabb hőmérsékleten is megtartják szilárdságukat. A részecske erősítés 1 m-nél nagyobb szemcsékkel is történhet, amikor az erősítő szemcsemennyiség elérheti a 90 %-ot. Ilyen kompozitok például a 70-94% WC, TiC karbid + Co mátrixkészítésű keményfém forgácsoló és alakító szerszámok. A szívósság növelésére ma már nanokristályos karbid szemcséket ágyaznak be a Co mátrixba.

**Szál-erősítésű kompozitok** nagy szakítószilárdság és szívósság érdekében készülnek, fémek, kerámiák vagy polimerek esetében. A szálak grafit, szén üveg,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vagy SiC -ből készültek, 1-4 átmérővel, 30-50 mm hosszúsággal. Folytonosak vagy rövidek lehetnek. A szilárdság elérheti 20000 MPa, a rugalmassági modulusz a 700 GPa értékeket. Jellegzetes szál-erősítésű kompozit anyagok a következők:

- |   |   |
|---|---|
| - üvegszál-erősítésű poliészter (sílécsek stb.);        | - kerámia szál-erősítésű titán-ötvözetek (űrhajók); |
| - karbonszál-erősítésű epoxi (légcsavaros repülőgépek); | - zafírszál-erősítésű szuperötvözetek (turbinák);   |
| - acéldróttal erősített gumi (gumiabroncs);             | - kerámia-kerámia tűkristály (szerszámok);          |
| - karbonszál-erősítésű alumínium ötvözet (repülőgépek); | - SiC szálakkal erősített bórszilikát üveg.         |

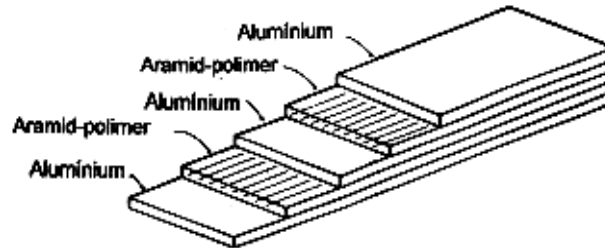
**Folyamatos szálakkal erősített fém mátrixú kompozitok** szálkötegek folyadékos infiltrációjával készülnek. A szálkötegek tipikus 3D rendszerbe vannak beágyazva (3. ábra).



3. ábra.



**Lemezes (szendvics) kompozitok** egymáshoz síkok mentén kapcsolt rétegekből állnak Ezek őse a funérlemez, de használnak alumíniummal bevont papírt, lakkal bevont alumínium csomagoló fóliát, poliészter-réz nyomtatott áramköri lapot, inver-réz bimetált, CuNi10 ötvözzel borított réz pénzérmeket, alumíniumötvözet-grafitszál-epoxigyanta-alufólia repülőgép ajtót, alumíniummal borított acéllemezt, saválló NiCr, acéllal borított ötvöztelen acéllemezt stb. A 4. ábrán egy szendvics szerkezetű Al-polimer kompozit anyag látható. A rétegelt kerámia kompozitokkal kiváló mechanikai tulajdonságok érhetők el, különösképpen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{ZrO}_2$  rendszerekben.



4. ábra.

**Felület réteges, bevonatos kompozitok** főképpen korrózió, hőhatás, kopás, vagy különleges igénybevétel ellen használják. Gyakran alkalmazott bevonatok a műanyagok különböző fém alkatrészekben:

- akril, vagy alkid acélon (autókarosszéria);
- szilikon fémeken (hőnek kitett alkatrészek);
- nylon fémeken (siklócsapágók).

A kerámia bevonat példája a zománc, a fémbevonat meg lehet ón, ólom, cink, vagy alumínium rétegmártó tűzi bevonással, vagy galvanizálással készítve. Szintén használják a kémiai lecsapatásos (CVD), vagy fizikai lecsapatásos (PVD) eljárásokat. Különböző felszóró eljárások (láng, plazma, laser stb. termálszórás) szintén használatosak fém vagy kerámia rétegek felvitelére.

## Irodalomjegyzék

- 1] Szakács György, Dévény Miklós: *Keményfémek és szuperkemény anyagok alkalmazása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- 2] Artinger István, Csikós Gábor, Krállics György, Németh Árpád, Palotás Béla: *Fémek és kerámiák technológiája*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.