Funktionella material – KOO095

Sammanfattat av Kajsa Dahlin N10

Innehåll

FRIED 2
Kap 1 - Introduktion 2
Kap 2 - Polymersyntes 2
Kap 4 – Fasta tillståndets egenskaper 5
Kap 5 – Viskoelasticitet och gummielasticitet 8
Kap 7 – Tillsatser, blandningar och kompositer 8
Kap 11 – Polymerprocesser och reologi 11
ASKELAND & FULAY 14
Kap 2 - Atomstruktur 14
Kap 3 - Atomisk och joniska ordningar – kristallstruktur 14
Kap 4 - Defekter i atomiska och joniska ordningar 17
Kap 5 - Atom- och jonrörelser 20
Kap 6 - Mekaniska egenskaper 21
Kap 7 – Brottmekanik, utmattning och krypning 24
Kap 8 – Härdning och glödning 25
Kap 9 – Stelning 28
Kap 10 – Fasta lösningar och fasjämvikt 29
Kap 11 – Urskiljningshärdning och eutektiska fasdiagram 31
Kap 12 – Fastransformation och värmebehandling 34
Kap 13 - Järnlegeringar 36
Kap 14 – Icke-järnhaltiga legeringar 38
Kap 15 – Keramer 39
Kap 18 – Magnetiska och elektriska material 42

FRIED

Kap 1 - Introduktion

Indelningar av polymerer

Bearbetningsegenskaper

Termoplaster
- tryck och temperatur gör att de kan formas om
- ex: polystyren, polyolefiner (polyetylen...)

Härdplaster
- inviduella kedjor bundna kovalent under polymerisationen gör att de bl a motstår värme
- Bra till bl a kompositer, beläggningar

Polymerisationsmekanism

Addition
- ofta från etylen-monomerer

Kondensation
- slumpmässig reaktion mellan två molekyler
- uppstår vid frisättande av liten molekyl (t ex H_2O)

Polymerstruktur

Homochains
- kolatomer genom hela ryggraden

Heterochains

Polymerstruktur

Co-polymerer
- består av två olika repeterade enheter
- viktigaste kommer ifrån vinylmonomerer

Takticitet
- är stereokemiska arrangemanget för polymerer
- konformation vs konfiguration

Molekylegenskaper

$\bar{M} = \frac{\sum_i N_i M_i^{\alpha}}{\sum_i N_i M_i^{\alpha-1}}$ — $\bar{M}$ – medelmolekylvikt, N_i – antal mol, M_i – molekylvikt, α - viktningsfaktor

$W_i = N_i M_i$ — W_i – vikt av ett antal molekyler med given molekylvikt

$\bar{M}_n$ – medelantal ($\alpha = 1$)
$\bar{M}_w$ – medelvikt ($\alpha = 2$)
$\bar{M}_z$ – medelz ($\alpha = 3$)

Amorf – Ingen molekulär ordning eller struktur på individuella kedjor
Under en viss temperatur, ***T_g*** *(glass transition tempterature)*, sker inte längre stora molekulärrörelser. Dock sker sk *Secondary-relaxation processes* på så låga temperaturer som 70 K.
Crystalline melting temperature – Kristallation då kedjor veckas kräver en temperatur över T_g. En för hög temperatur å andra sidan gör att vecken blir instabila och en oordning skapas. En kristallin-amorf övergång börjar ske vid en temperatur kallad ***T_m*** *(crystalline-melting temperature)*

Kap 2 - Polymersyntes

Polymerisationsmetoder

Step-growth polymerisation

De flesta involverar klassisk kondensationsreaktion såsom esterfiering, esteutbyte eller amidering. Det resulterande utseendet på kedjan blir A~A, B~B eller A~B.

Kräver:

- högt utbyte (frånvaro av någon form av sidreaktion som kan deaktivera polymerisationen)
- hög renhet
- hög monomeromvandling
- stökiometrisk ekvivalens av funktionella grupper (i A~A- resp B~B-polymerisation)

Man kan uttrycka en polymers vikt genom dess polymerisationsgrad $\bar{X}$ som representerar det normala antalet repeterade enheterna i kedjan.

$$\bar{X}_n = \frac{1}{1-p} \qquad \bar{X}_w = \frac{1+p}{1-p}$$

p – fraktionerad monomerkonversion. Dessa gäller ej gränsytan eller för monomerer med en funktionalitet över 2. $\bar{X}_w$ är medelvikts-polymerisationsgraden och $\bar{X}_n$ medelantal-polymerisationsgraden.

Kinetik: R_0 – polymerisationshastighet som kan uttryckas som tid per förändring av monomerkonc. För A~A- resp B~B-polymerisation kan den uttryckas som försvinnandehastighet av monomeren.

$$R_0 = -\frac{d[\mathrm{A{\sim}A}]}{dt} = k[\mathrm{B{\sim}B}][\mathrm{A{\sim}A}]$$

Vid balans mellan A och B kan man göra approximeringen $[\mathrm{B{\sim}B}] = [\mathrm{A{\sim}A}]$ vilket leder till att

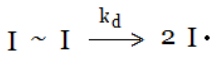
$\bar{X}_n = \frac{[\mathrm{A{\sim}A}]_0}{[\mathrm{A{\sim}A}]}$ där $[\mathrm{A{\sim}A}]_0$ är vid *t* = 0, dvs $\bar{X}_n = [\mathrm{A{\sim}A}] \cdot \mathrm{kt} + 1$

Chain-growth polymerisation

Kräver en initierande molekyl som kan fästa vid en monomer vid polymerisationsstart, t ex en radikal, en katjon eller en anjon. Gemensamt för dessa är att alla chain-growth polymerisationer har *initiering* (genom aktiv monomer), *propagering* (tillväxt genom addition av monomerer) och *terminering*(avslutar polymerisering genom t ex tillsats av terminant ämne).

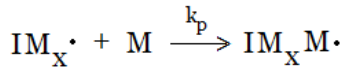
Fri radikalpolymerisation

Initiering:



k_d – association monomer rate constant

Propagering:

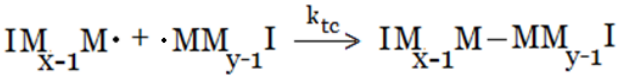


k_p – propagation monomer rate constant

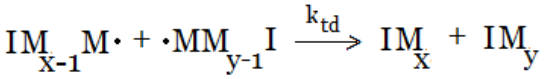
Terminering:

Genom kombinering eller disproportionering, eller eventuellt kedjeöverföring. (ex. S 34)

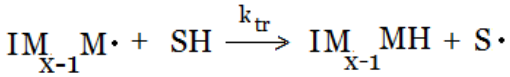
Kombinering (2 kedjor möts i radikaländarna och skapar kovalent bindn.):



*Disproportionering (*En terminerad kedja har en otillfredsställd kolgrupp medan den andra har en motsvarande tillfredsställd):



Kedjeöverföring:



Jonisk polymerisation

Anjonisk polymerisation – initiator är en stark nukleofil. Kan propagera i en ”evighet” om provet är rent och rensat från särskilt O och H_2O tills alla monomerer är förbrukade. Termination sker endast vid tillsättning av H_2O, CO_2, CH_3OH eller O.

$\bar{X}_n = [M]_0/[I]_0$

Katjonisk polymerisation –har en katalysator vid initiering som återbildas vid terminering (ibland krävs en co-katalysator som t ex H_2O. Kan ej termineras genom kombination men genom kedjeöverföring (chain transfer). Polymerisationen görs ofta i lösningsmedel och vid låg temperatur för att få en god polymerisationshastighet.

Polymerisationstekniker

Bulkpolymerisation
Lösningspolymerisation
Suspensionspolymerisation
Emulsionspolymerisation

Modifiering av polymerer

Polymerer kan modifieras för att förbättra en egenskap, tex vidhäftning och brandbeständighet, och vissa polymerer kan endast skapas genom dessa.

Kemisk modifiering

Klormetylering –
Ytmodifikation – För att t ex bereda plats för fixering av enzymer eller för att förbättra motståndskraften för lösningar eller biokompabiliteten. Man kan göra dett genom exempelvis direkt fluorering, sulfonering, nitrering eller oxidering. Används för gummihandskar, bensindunkar.
Jonbytarmassor (ion-exchange resins) – Katjonbytarmassor har en fix negativ laddning och anjonbytarmassor motsvarande positiv då anjoner byts. Skapas oftast genom suspensionspolymerisation. KOMPLETTERA

Beredning av polymerderivat

Exempel på polymerderivat:
Cellulosa – en av naturens rikligaste biopolymer, och är mycket olöslig och osmältbart. Därför kan fiber och film erhållas endast genom kemisk modifiering och skapa olika cellulosederivat beroende på modifieringsteknik av dess hydroxylgrupper - viktigast är cellulosaacetat.
Polyvinylalkohol – PVAL skapas genom direkt hydrolys av polyvinylacetat som skapats genom friradikal-emulsions- eller –suspensionspolymersiation. PVAL används som stabilisationsagent i emulsionspolymerisation och är en gelningsmedel.
Polyvinylbutyral – PVB skapas genom att reagera PVAL med butyralaldehyd och används som mellanlager mellan två glasskivor i vindrutor.
Polyorganofosfener – Oorganiska polymerer med en huvudkedja byggd av kväve-fosfor som skapas genom kemisk modifikation av en polymerföregångare. Det finns väldigt många kombinationer och därigenom varianter av denna polymer. De har mycket hög permeabilitet för gaser och organiska vätskor, och kan ev användas i membranapplikationer. Polymerföregångaren är *polydiklorfosfen* som är instabil och känslig för hydrolys, men dessa grupper kan lätt bytas ut mot nukleofiler som gör dem mer stabila.

Bestämning av kemisk struktur

Det finns flera analytiska metoder för att bekräfta rätt polymer och för att identifiera olika särskilda egenskaper som komposition, sekvens, förgrening, kristallinitet och orientering. Tillsatser och orenheter kan också lätt identifieras

Vibrationsspektroskopi

Den troligen den mest använda metoden är ***IR*** (infraröd spektroskopi) särskilt *FTIR* (Fourier Transform Infrared Spectoscopy). Proven kan ha varierad form, t ex smal film, lösning, pellet med blandning av prov och IR-transparent pulver. Stora prov kan undersökas genom reflektion eller ATR.
En polymers IR-spektra är unikt och kan jämföras mot bibliotek med resultat, funktionella grupper är ofta enkla att urskilja – vissa motsvarar ett särskilt absorptionsband.

Ramanspektroskopi – relaterad till IR och är ett resultat då man inducerar dipolmoment eller polarisation vid bestrålning. I Ramanspridning återvänder molekylerna oelastiskt till en annan energinivå, och spridningsljuset kommer att vara förändrat. Starkast band uppkommer vid låga frekvenser. Den största fördelen med denna teknik är att ingen särskild provförberedelse krävs,och proven kan därför studeras utan att skadas.

Kärnmagnetisk resonansspektroskopi NMR

Används för att avgöra takticiteten, förgrening, sutrukturella defekter, sekvens av co-monomerer och kemiska förändringar som oxidationstillstånd. Även om NMR ofta används, har vissa mätningar som använder vissa NMR-aktiva kärnor som t ex H(1), C(13), O(17) och F(19) magnetiska moment som har fördel i studien av vissa polymerer.

Bred-linje NMR-metoder – Ofta protonavslappning, kan användas för att bestämma amorft innehåll och kedjeorientering i semikristallina polymerer.
Högupplösta NMR-metoder – För information om sekvens för repeterande enhet, vilket möjliggör bestämning av tackticitet och co-monomerdistribution.

Kap 4 – Fasta tillståndets egenskaper

Termiska övergångsrelationer

Principer för olika mättekniker

Termiska övergångar kan t ex upptäckas genom förändring av brytningsindex, linjebredd på s.k. *NMR* och genom att mäta dess dubbelbrytning som en funktion av temperaturen, men den vanligaste metoden är *dilatometri* – då särskilt olika *DSC* (skanningskaliometri). Det finns även andra viktiga metoder för att upptäcka termiska överångar. En ytterliggare fördel med dynamisk-mekaniska och dielektriska mätningar är förmågan att detektera låg-temperatur-sekundära relaxationer. Som en kontrast är dilometriska och kaliorimetriska mätningar okänsliga för sekundära relaxationsprocesser. Även glas- och smältövergångar kan bestämmas genom att mäta elasticitetsmodulen hos ett material.

Dilatometri – Ett litet polymerprov placeras i en glaskolv med en ansluten glaskapillär. Vi låter fylla kolven och en del av kapillären med kvicksilver eftersom vi känner till ämnets termiska expansion. Konstruktionen sänks ned i ett vattenbad med kontrollerad temperatur, och höjden av kvicksilver i kapillären mäts. Vi kan genom detta hämta polymerens volym som en funktion av temperaturen. Genom att titta på diagrammet kan man också avgöra var T_m och T_g är. Den första lutningsförändringen är T_g, och T_m är en diskontinuitet.
Kaliorimetri –Här används två individuella värmeplattor för att hålla identisk temperatur på två behållare, varav den ena innehåller provet och den andra är en tom referens. Temperaturen kontrolleras av Pt-sensorer. Kaliorimetri innefattar uppvärmning av provet vid en kontrollerad hastighet och registrering av värmeflödet antingen in i eller från provet, skillnaden i hur mycket energi som krävs för behållarna registreras. Avvikelser i diagrammet är beroende på T_g och T_m.
Värmebeständighetstempreatur *HDT (*eng: *heat-distortion temp.)* – HDT är definerat som den temperatur där ett prov med standarddimensioner böjs under standardbelastning i dess center. Denna metod är utmärkt för att se till vilken gräns polymeren kan appliceras inom strukturer eller som lastuppbärande.

Förhållande struktur-egenskaper

T_g och T_m beror starkt på den repeterade enhetens kemiska struktur. Rent allmänt ökar båda med minskande flexibilitet, vilken i sin tur minskar med ökande aromatisk komposition i huvudkedjan eller om man inkorporerar skrymmande eller otillfredsställda substituenter i huvudkedjan. Flexibilitet är särskilt viktigt för att bestämma T_g. Flexibla kedjor kan genomföra mycket större molekylrörelser vid mycket låga temperaturer och har därför låg T_g. Skrymmande substituenter hindrar rotation vilket ökar T_g. *Trans*-isomerer har högre T_g än *cis*-isomerer. För ungefär lika stora grupper ökar dess polaritet T_g, vilket innebär att *Cl:s* är mycket högre än *CH_4:s*.

Viktens, kompositionens och T_g-tryckets effekt

Molekylviktsberoende. T_g ökar med molekylvikten när vikten är låg, men när den är tillärckligt stor når den en punkt där T_g inte längre förändras lika mycket, ett begränsande förhållande (*limiting-property relationship*) med den aktuella medelvikten $\overline{M_n}$. T_m har ett liknande mönster.

$$T_g = T_g^{\infty} - \frac{K}{\bar{M}_n}$$

T_g^{∞} är det begränsade värdet vid hög molekylvikt, K är en konstant för varje given polymer. K är dock inte helt säkert konstant för vikter under 10 000[20].

Kompositionsberoende. När vi har en homogen mix av två polymerer kommer T_g för kompositionen bero på mängden av varje komponent och på den andra komponentens T_g.

$$T_g = W_1 T_{g,1} + W_2 T_{g,2}$$

W_1 är viktandel och $T_{g,n}$ är glasövergångstemperaturen för den n:te kompositionen. För många komponenter:

$$T_g = \sum_{n=1}^{N} W_n T_{g,n}$$

Detta är en god approximation för två eller flera polymerer i blandning men stämmer inte riktigt lika bra för lågmolekylära blandningar med organiska komponenter som t ex estrar då den hamnar lite för högt.
Om T_g för polymeren och ett använt spädningsmedel inte är för olika kan vi genom en förkortad Taylorutveckling utrrycka den omvända regeln för blandningar, den s.k *Fox-regeln*:

$$\frac{1}{T_g} = \frac{W_1}{T_{g,1}} + \frac{W_2}{T_{g,2}}$$

Mekaniska egenskaper

Deformationsmekanismer

Vid låg töjning är deformationen hos de flesta polymerer elastisk, men vid högre töjning kan deformation hos glasartade polymerer ske genon *krackelering* (spröda polymerer - crazing) eller *skjuvningsband* (sega polymerer - ductile). Dessa är inte reversibla om inte polymerer blir värm på en högre temperatur än dess T_g.

Krackelering

Krackelering förekommer ofta i regioner med hög hydrostatisk spänningar vilket leder till bildandet av genomträngande mikrotomrum och små fibriller. Om en tillämpad dragkraft är tillräcklig kommer dessa broar sträckas ut och brytas vilket gör att detta tomrum växer och växer samman till sprickor. Sprickorna uppkommer vinkelrätt mot den den huvudsakliga deformationsriktningen. Dessa sprickor finns endast inom polymerer och skiljer sig från vanliga sprickor eftersom polymerers kan bli riktigt tunna och har dessa fibriller utrstäckta i deformationsriktningen. Sprickorna kan ge upphov till ljusspridning. Sprickbildningens initieringstid beror på hur stor dragkraften är, temperaturen och om det finns lågmolekylära vätskor som kan främja bildningen. En teori är att sprickorna uppkommer där det finns defekter i polymeren.

Skjuvningsband

Alla polymerer deformeras inte likadant under samma stressförhållanden, det beror på deras polymeregenskaper. Dessa polymerer kommer istället bilda regioner av lokaliserade skjuvningsband och utvecklas i 45˚ i förhållande till sträckningsdeformationen. Detta är det dominerande fenomenet när man drar i sega polymerer.

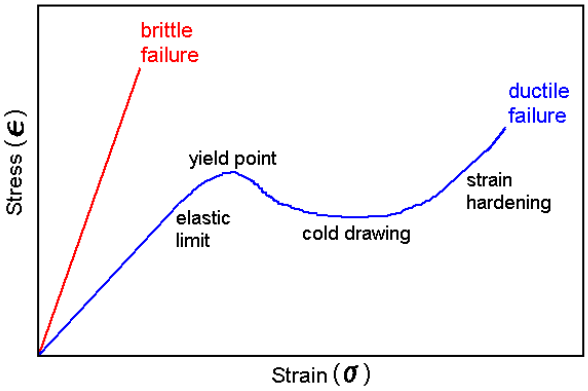
Testmetoder

Det finns en stor variation i metoder för att testa en polymers mekaniska egenskaper, t ex statiska (draghållfasthet och skjuvning), transienta (krypning och stress-avslappning), effekt och cyliska (utmattningsprov). Transienta tester innebär att tiden det tar för polymeren att svara på en kraft när den blir snabbt utsträckt till en given längd, eller tiden då polymeren svarar då en last snabbt läggs på (krypning). Inverkanstest testar hur mycket energi som krävs för att materialet ska faila under olika laster, och utmattningsprov bestämmer antalet cykler som man kan applicera stress innan polymeren fallerar.

Statiskt test

De statiska används för att testa kraftsvaret när provet är ansträngt, pressat eller skjuvat i ett konstant läge. Deformationsgraden är konstant, och *tensile testing* är den vanligaste metoden. Polymerer har många olika mekaniska egenskaper beroende på temperatur och deformationshastighet. Spröda polymerer vid rumstemperatur ökar snabbt i spänning när töjningen ökar tills den går sönder. Denna punkt är inte en materialegenskap utan beror mycket på antalet defekter i materialet och bearbetningshistoria. Därför måste testen göras om många gånger för att få pålitliga värden. Sega polymerer, som många termoplaster och

polyamider. Spänningen i diagrammet når sitt högsta värde som kallas *yield stress* (sträckgräns), varefter materialet börjar deformeras, dvs permament förändras. Då töjningen fortsätter sjunker först spänningen innan den ökar igen. Detta minimum som uppkommer brukar kallas *draw stress*. Om materialet inte går sönder här fortsätter kurvan uppåt igen. Vad som händer är att polymerkedjornasträcks lokalt i dragriktningen vilket gör mostånd mot ytterliggare deformation vilket gör att spänningen ökar. I tensile deformation *neckas* materialet, dvs en bit av den ser ut att smalna av som ett hundbens mitt vilket stabiliserar. Ingen ytterliggare minskning sker sen i tvärsnittet utan nacken blir längre tills provet går sönder. Som tidigare kommenterat kan alla amorfa material uppvisa alla dessa egenskaper beroende på temperaturen.



1. Dragdeformation

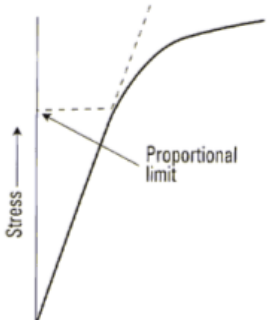
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

σ är ”engineering stress”, *F* är kraften som läggs på materialet och A_0 är den ursprungliga arean på materialet innan kraften påverkar den. ε är”engineering strain”, ΔL är förändringen i gage length och L_0 är ursprungslängden. *Poissons ratio*:

$$v = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1}{V}\left(\frac{\delta V}{\delta \varepsilon}\right)\right]$$

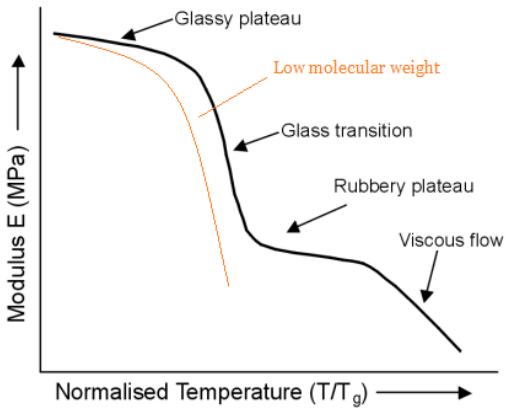
V är definerad som kvoten av den sanna töjningen i tvärriktningen (ε_T) och den sannan töjningen i långsgående riktningen (ε_L). Den anger hur ett material reagerar på tryck- och dragkrafter. När ett material töjs ut i en riktning dras det ihop i andra riktningar.För de allra flesta glasartade polymererna är *v* = ca 0.4. Vi får en relation mellan spänning och töjning för ideala elastiska solider genom *Hookes lag*:

$$\sigma = E\varepsilon$$



E är proportionalitetsfaktorn kallad Youngs modul. Plottar man den representativa spänning-töjningskurvan för en typisk spröd polymer kan man se att den från en början följer Hookes lag, innan spänningen avviker vid en punkt kallad *proportionella gränsen*. Slutet av kurvan där den avbryts är var materialet fallerar.

Under T_g har alla glasartade polymerer precis som alla lågmolekylära substanser ungefär samma elasticitetsmodul. Först sjunker denna sakta med ökande temperatur, sen hastigt kring T_g. För lågmolekylära material fortsätter modulen att falla med ökande temperatur. För högmolekylära amorfa material faller modulen till en platåfas kallas *Rubbery plateau* för att sedan falla igen för högre temperatur. Polymerer smältbearbetas ofta i detta område kallat *Voscous flow* där viskositeten är låg. Platåfasen beror på de hoptrasslade polymerkedjorna som stoppar glidning precis ovanför T_g innan de lätt skiljs åt tack vare den höga kinetiska energin och modulen faller. Semikristallina polymerers kurva ser ungefär likadan ut som den för högmolekylära amorfa polymerer, men dess platånivå ligger ofta högre.



2. Komprimering och skjuvning

Provet förbereds ofta som en skiva i komprimering. Skjuvspänningen τ och Hookes lag för skjuvning defineras på nästa sida:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \qquad \tau = G\gamma$$

A_0 är den yta som skjuvkraften verkar på. *G* är skjuvningsmodulen och γ skjuvdeformationen som ges av vinkeln efter deformation. De tre deformationerna kan vara relaterade till varandra genom Poisson’s ratio.

Transitorisk test (eng. Transient test)
Två typer är som tidigare nämnt krypning och spänningsrelaxation. Krypningstest mäter töjningen hos ett prov som utsätts för en snabb tillsättning av en konstant last vid konstant temperatur, vilket kan vara både skjuv-, draghållfasthet och komprimering osv. Spänningsrelaxationstest registrerar tvärtom spänningen som krävs för att hålla provet töjt en viss grad under konstant temperatur.

1. Krypning
Dessa test är extra viktiga för material som skall hålla för konstanta laster under lång tid. Här tittar man noga på förhållandet mellan spänning och töjning då spänningen ligger konstant och töjningen beror på tiden.

2. Spänningsrelaxation
Dessa kan göras med samma instrument som för tensile test. Deformationen måste vara så nära ögonblickligt som möjligt och kräver helst en huydraliskt driven maskin. En komplett mätning skulle kunna ta år, men genom att registrera data för provet vid olika temperaturer skapas en genväg till att skapa en kurva där spänningen beror av tiden.

Slagprov
Denna mäter energin som krävs för att göra sönder ett prov under snabb lastning. Ett sätt att göra detta är med en slags hammare som slår provet och energin mäts som minskning i hammarens kinetiska energi, men det finns många fler test. Den kan också beräknas som arean under spännings-töjnings-kurvan i en tensile test. Det är viktigt att testa materialet i en ungefärlig temperatur och inverkan som den sedan skall användas i, även defekter påverkar. Spröda polymerers slagstyrka är mycket låg.

Generellt är amorfa polymerer med stora skrymmande subtistuenter och ickelinjära huvudkedjor spröda, och även oorienterade kristallina strukturer medverkar då temperaturen är över T_g. De kan göras mindre spröda genom att placera små gummiaktiga partiklar i polymermatrixen, där god vidhäftning är viktigt.

Utmattningstest
Används för att avgöra hur många cykler ett prov håller vid en viss spänning. Uthållighetsgränsen är den maximala spänningen som kan läggas över provet för att den inte skall fallera oavsett antal cykler. Oftast ligger spänningen som leder till fallering kring 20-40 % av den statiska dragstyrkan. Antal cykler förkortas med sjunkade temperatur.

Kap 5 – Viskoelasticitet och gummielasticitet

Gummielasticitet
Temperaturen i ett gummiband ökar om den sträcks ut snabbt. Om det istället hänger en vikt i gummiband som sträcker ut den och vi värmer, så kommer gummibandet att tvärtom minska i längd till skillnad från metaller och gaser. Denna effekt kallas *Gough-Joule-effekten*.

Termodynamik
Genom beräkningar med ursprung ur termodynamikens första och andra lag ser man vad effekten ovan beror på. Elastomerer är nästan helt okomprimerbara, och den inre energiförändringen under deformation är också liten. Det innebär att de entalpiska bidragen i gummielasticitet generellt är obetydliga och att effekten endast beror på entropiska skäl. När en polymer är odeformerad kan vi se deras kedjor som gynnsamt oordnade, vilka blir ordnade under deformation. Det innebär att en kraft kommer uppstå som vill motarbeta deformationen och återställa den oordnade gynnsamma konformationen.

Kap 7 – Tillsatser, blandningar och kompositer

Polymerblandningar och interpenetrerande nätverk

Att blanda minst två material har blivit viktigt för kommersiella plasters kostnad. Om en särskild polymer antingen ska bli homogent blandad eller fasseparerad beror på många faktorer, t ex processkinetiken, processtemperaturen och lösningsmedel och andra eventuella tillsatser. Det viktigaste att ta i beakt är termodynamiken – när man blandar två polymerer sker en förändring i *Gibbs fria energi*.

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m$$

Om ΔG_mär positiv över hela kompositionen vid en given temperatur kommer de två polymererna separeras vid jämvikt i två rena faser. För att de ska blandas helt homogent måste både ΔG_m vara negativt och dess andraderivata större än noll över hela kompositionen. Om ΔG_m är negativ, men andraderivatan inte är större än noll kommer blandningen separeras vid jämvikt i två faser med blandad sammansättning som innehåller båda polymererna.

Polymerblandningar kan uppvisa många olika egenskaper som den lägre och högre kristiska lösningstemperaturen (LCST/UCST). Solida polymerblandningar har ofta LCST som måste beaktas under smältprocesser då temperaturen kan orsaka fasseparation och ge helt andra egenskaper. Om blandningen smälts ovanför den här temperaturgränsen LCST kommer fasseparation ske. USCT är svårarare att se eftersom den ofta ligger under T_g under vilken *long-range*-rörelser upphör.

För att blandningen skall vara homogen måste först ΔG_m vara negativ, vilket innebär att ΔH_m måste vara negativ eller liten. För att detta skall ske måste det finnas gynsamma förhållanden mellan de bägge polymererna såsom t ex dipol-dipol-bindningar eller vätebindningar. Ofta kan egenskaperna bli additiva med avseende på de bägge inviduella polymererna.

Förstärkta plaster och fasseparerade blandningar

Komprimeringsstyrkan hos spröda plaster kan förstärkas kraftigt av att tillsätta en gummiartad fas i form av små partiklar. Om vidhäftningen är god kan partiklarna bidra med en energiabsorberande kapacitet genom att förändra den mekaniska deformationsprocessen. Bra exempel finns nedan. Båda blandas med andra polymerer för att öka deras slagtålighet. I de mest extrema fall av makrofasseparerade blandningar kan man behöva ta till förenande ämnen såsom segment-copolymerer som innehåller en eller två av blandpolymererna.

HIPS (high-impact polystyrene)
Hos denna främjas gränsyteadhesion av *graftpolymerisation* av butadien i polystyrenens matrix vilket gör att två material som normalt inte kan blandas binder kemiskt. Detta gör att annars väldigt spröda polymerer kan blandas med mer gummiaktiga vilket ger segare egenskaper, i detta fall ger det den slagtåliga polymerern HIPS som används i leksaker och produkthöljen. (Graftpolymer = en speciell typ av förgrenade sampolymeren i vilka sidokedjorna är strukturellt skild från huvudkedjan.)

ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)
En värmeförvrängd version av HIPS, termoplast, som är en slagmodifierad copolymer skapad från akrynolitrin och styren med graftpolymeren polybutadien. ABS används i rörsystem, hjälmar mm.

Interpenetrerande nätverk - IPN

Dessa är kombinationer av två eller fler polymerer i nätverksform. Minst en av dem är syntetiserad och/eller tvärbunden i närvaro av den andra. IPN har alltså några av fördelarna från både polymererblandningar och nätverkspolymerer. Om båda är termodynamiskt blandbara kommer fasseparation ske, fasen kommer dock vara mindre än för en fysisk blandning för segment-copolymerer eller graft av de båda. Många morfologier är tänkbara beroende på komponentvolym, fasviskositet och den relativa hastigheten för tvärbindning och fasseparation. Ett sätt att skapa IPN är att först tvärbinda en polymer som sen svullnar upp vid tillsats av andra ämnen. Den värms för att initiera polymerisation och för att tvärbinda till det andra nätverket. Om man inte använder en tvärbindningsagent till den andra polymeren är slutresultatet ett enda nätverk, och kallas då halv-IPN. Man använder IPN i förstärkta plaster, jonbytarmassor, tryckkänsliga lim, kontaktlinser och styrd medicinfrisättning.

Introduktion till polymerkompositer

Kompositer är mycket viktiga i många olika applikationer, och gemensamt för dem alla är en hög hållfasthet. I majoriteten av alla fall är den diskontinuerliga fasen i fiberform, och även värmehärdade – men på senare tid har intresse väckts hos kompositer gjorda av kol, keramik eller metall för material som skall klara hög värme. Den viktigaste klassen av värmehärdade kompositer (kallas *thermosets*) är *epoxi.* De är billiga och enkla att skapa, men tyvärr också sköra och en relativt hög vätskeabsorption vilket kan påverka styrkan i matrixens vidhäftning. Termoplaster har ofta en högre slagseghet (*impact strength*) än de värmehärdade men är mottagliga för angrepp från LM för krypning vilket gör att de är mindre stabila under lastning. Kompositer kan skapas genom många olika processer, inkluderat komprimering och *hartssprutpressning*. Andra mer speciella

metoder för processerande av kompositer är trådlindning och *pultrusion*, de används för att förbereda kontinuerliga fiberstärkta kompositer med en kontrollerad fiberorientering.

Kompositers mekaniska egenskaper är starkt påverkade av dess storlek, typ, koncentration, spridning av fyllmedel och ytvidhäftningen mellan matrixen och fyllmedlet samt matrixens egenskaper.

Mekaniska egenskaper

Modul

Den huvudsakliga funktionen med att förstärka fyllmedlet är för att öka kompositens modul, och brukar följas av en ökning i värmebeständighetstemperatur. Modulen hos en glasaktig komposit med partikelformigt fyllmedel kan uppskattas med *Haplin-Tsai ekvationen*:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + AB\phi_f}{1 - B\psi\phi_f}$$

M är kompositens modul (drag-, skjuvnings- eller bulk), M_m är den oförstärkta korresponderande matrixpolymerens modul, *A* är en konstant beroende på fyllmedlets geometri, ϕ_f är fyllmedlets volymandel, ψ beror på fyllmedlets maximala packningsvolym och *B* beror på *A* och fyllmedlets relativa modul M_f, se nedan:

$$B = \frac{\left(\frac{M_f}{M_m}\right) - 1}{\left(\frac{M_f}{M_m}\right) + A}$$

Styrka

Denna egenskap beror på väldigt många faktorer inkluderande vidhäftningsförmågan och är därför inte lika enkel att beskriva som modulen. Den interfaciala styrkan kan sjunka i kontakt med vatten som absorberas av fyllmedlets yta, eller på grund av den termiska stress som uppstår vid en missmatchning mellan höga expansionskoefficienter och relativt stela fyllmedel som t ex kisel eller grafit. Ett förslag på hur man bäst kan beskriva en partikulärfylld komposits styrka (σ_u) relativt dess ofyllda matrix (σ_m) är Schragers ekvation:

$$\sigma_u = \sigma_m \cdot e^{-r\phi_f}$$

R är en interfacial faktor (typiskt 2,66 för många kompositer). Detta ger ett maxiamlt värde på styrkan (då fyllmedlet är högst 35-40 %) och förutsätter bra vidhäftning. Gällande fiberförstärkta kompositer beror styrkan precis som modulen på fiberorienteringen med avseende på stressriktning. Den maximala styrkan fås när fibrerna är orienterade i dragriktningen. Kol-fiberkompositers modul är högre än glasfiberkompositer eftersom kolfibermodulen på samma sätt är högre än glasfibermodulen.

Interfacial vidhäftning och kopplingsmedel

Den interfaciala styrkan förbättras genom användning av lågmolekylärvikt-organofunktionella silaner, som fungerar som *kopplingsagent* som överbryggar matrix-fyllmedelsgränsen. Dessa tillsatser har oftast en eller fler hydrolyserbara grupper som är kapabla att binda till mineralytor, och en matrixspecifik organofunktioell grupp som t ex en epoxyfunktionalitet som kan reagera med, eller främja vidhäftning till matrixens s.k hartset (slags kådalik polymermassa.

Nanokompositer

Dessa kompositer har höga oorganisk förstärkningar. Några av de attraktiva egenskaperna hos nanokompositer är förbättrade elektriska och mekaniska egenskaper, minskad gas- och vattenpermeabilitet, ökad termisk stabilitet, tålighet, högre värmebeständighet, återvinningmöjlighet, potenial för yt-och interfacial modifiering, bättre jonkonduktivitet med flera. Ännu bättre är att nanokompositer bygger på naturliga, billiga som t ex lera. Kompositerna skapas från mycket anisotropiska plattformade nanofyllmedel som är spritt i en polymermatrix. Dessa plattor är mycket smala och placerade i staplar som kan separeras eller exfolierade under kompositfabrikation. Dessa kompositers moduler är ca 100 gr högre än en typisk termoplast eller en värmehärdad. Den vanligast använda nanofillern är *montmorillonit* (mmt) som har samma kemiska struktur som talk och glimmer men en anna skiktladdning. Mmt består av ett oktahedralt aluminiumskikt mellan två tetraediska kiselskikt. I allmänhet haren del magnesiumjoner ersatt aliminiumjoner i aluminiumskiktet, vilket ger en negativ laddning i lagren. Denna neutraliseras genom att placera anjoner mellan aluminiumlagren.

Kompositfabrikation

Kompositer som skalla användas i icke-uppbärande applikationer där inga laster läggs på dem skapas genom *arkformning* (SMC), bulkpressmassa (BMC), gjutning, injektion och spray-up. För att skapa kompositer som skall bära laster används främst trådlindning och pultrusion.

BMC (bulk-molding compound) - Består i allmänhet av styrenbehandlad omättad polyester-harts (omättad eftersom den då består utav styrenmonomerer som polymeriseras i slutet av processen). Den består också utav en termoplast, ett inert fyllmedel (reag ej kemiskt med omgivning) som t ex kalciumkarbonat, glasfiber, en polymerisationsinitiator och andra tillsatser som ett smörjmedel och ett mognadsmedel (ex MgO). Konsistensen liknar spackel.
SMC (sheet-molding compound) – Skapas genom att kombinera styrenbehandlad polyesterharts tjocknad med kalcium- eller magnesiumoxid med fyllmedel, oxider, peroxider och små glasfiber. Den hålls sedan mellan lager av polyetyeln-film som tas bort vid gjutning.

Trådlindning
Fibrer dras ifrån spolar genom ett kompositharts bad, och de impregnerade trådarna lindas sedan på en form i ett bestämt mönster. De härdas sedan på en bestämd temperatur och formen tas bort.

Pultrusion
Är kontinuerlig till skillnad från trådlindning då härdningen sker under processen vilket gör att pultrusion passar bättre för kommersiellt bruk. Fiberbuntar och en slags matta av glas/polyester kombineras och matas in i ett hartsbad innan den passerar en form och en ugn. Majoriteten av behandlade kompositer är fiberglas med olika framställningsmetoder.

Kap 11 – Polymerprocesser och reologi

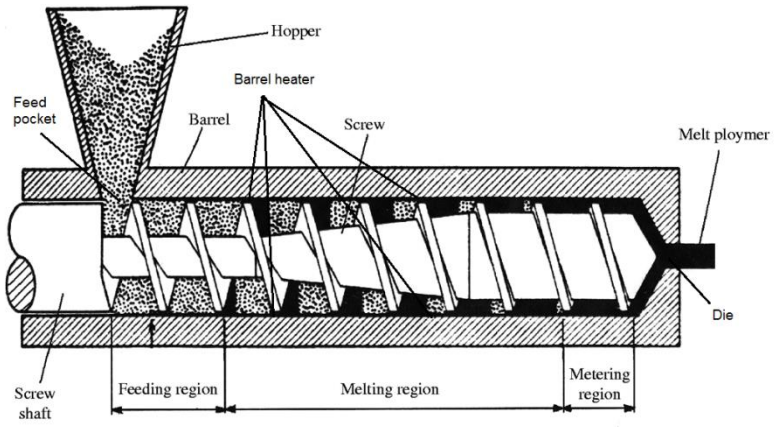
I detta kapitel beskrivs de viskoelastiska egenskaperna hos polymersmältor och koncentrerade lösningar, särskilt i relation till polymerprocessoperationer.

Grundläggande processoperationer

Dessa operationer kan delas in i fem breda kategorier – extrusion, gjutning, spinning, kalandrering och beläggning.

Extrudering/strängsprutning

Applikationer: Kontinuerlig produktion av plaströr, -ark och –stavar.



De två huvudkomponenterna i extrusion är extrudern/strängsprutsmaskinen och munstycket. Extrudern består av en matartratt och en cylinder som kan delas in i tre delar som kallas matnings-, komprimerings- och mätningssektionen. I matningssektionen som ligger först efter tratten transporteras den solida massan (i form utav pulver eller pellets oftast) med hjälp av en roterande skruv vidare till komprimeringssektionen. Här börjar massan att smälta av värmen från elektriska värmare i cylinderväggen. När massan nått mätningssektionen är allt smält och med hjälp av skruven pressas massan ut genom munstycket. Genom att välja munstycke kan man

till en del styra massans färdiga utseende. Värt att notera är också att utrymmet blir större och större och massan pressas samman mer i början än i slutet.

Gjutning

Applikationer: en satsprocess i form utav formsprutning och formpressning som används för att göra plastbitar.

Formpressning
Är på många sätt den billigaste och enklaste polymerprocessoperationen och den huvudsakliga processen för att gjuta värmehärdade polymerer (formsprutning föredras för termoplaster). Massan placeras i botten på en öppen gjutform och press läggs på tills massan fyllt ut hela gjuthåligheten och resten pressats utanför kanterna, denna del kallas *flash*.

Sprutpressning
Här är gjutformen stängd innan massan når in och en kolv används för att pressa en specifik mängd smält hartset från en öppen överföringskruka genom en liten öppning i gjutformen. När formen sen öppnas används utstötarstift för att pressa ut den smälta biten ur gjurformen. Det som blir kvar kallas *cull*. Denna metod går snabbare än formpressning eftersom temperaturen kan vara högre och massan då flyter snabbare och under lägre tryck. Denna metod används för att forma delar som är mer intrikata eller spröda

Formsprutning
Materialet, som kan vara antingen termoplastisk eller värmehärdad, matas in i en uppvärmd trumma, blandas, och tvingas in i en formhålighet via sk. löpare som fördelar masan jämnt och kyls och stelnar till efter formen av håligheten. Denna metod används för att skapa en enda del som t ex ett tangentbord eller flera små bitar samtidigt (och kallas då multi-impression molds). Temperaturen i denna gjutning är mycket hög och ställer stora krav på utformandet av komponenterna.

Termoformning
Här värms ett plastark upp tills det mjuknar och sedan formas den efter gjutningsformen med hjälp av lufttryck eller vakum mellan arket och formen. Applikationer är allt ifrån plastdrickkoppar till beläggning av bilflak.

Formblåsning
Dessa operationer använder en gas för att expandera förformen (massan) mot en gjutformshålighet för att skapa ett ihåligt objekt. Formblåsning används för att skapa plastflaskor, bensintankar, barntrehjulingar mm.

Rotationsgjutning
Använder centrifugalkraften för att tvinga en massa att täcka insidan av en gjutningsformen med smält hartset. Sedan tas formen av och polymeren kyls ner. Mycket lite eller inga biprodukter skapas, och lagret med polymer blir mycket jämnt. Denna metod kan användas för mycket stora objekt.

Kalandrering

Applikationer: kalandering av plastark.

Denna metod kan precis som extrusion skapa plastark. Smält polymermassa pressas i den lilla håligheten mellan två upphettade roterande cylindrar som snurrar i motsatta riktningar. Riktigt tunna ark kan skapas med kalandrering, och kan också användas för att ge ett redan skapad ark en särskild finish eller laminera två ark.

Beläggning

Applikationer: deposition av organiska beläggning på plastark.

Generellt sett beläggs en rörlig yta med ett tunt lager av vätska (t ex polymersmälta eller lösning). I *valsbeläggning* (roll coating) tar den undre rullen upp vätska från ett bad och levererar den till nästa rulle eller direkt till ett rörligt ark. Tjockheten beror på vätskans egenskaper och avståndet mellan rullarna genom vilken arket åker. En annan viktig metod är *bladbestrykning* (blade coating) där ett flexibelt blad för vätskan till ett ark, eller så kan den kombineras med valsbeläggning. Tjockheten beror här på trycket på det flexibla bladet. Den mest direkta metoden är dock *ridåbeläggning* (curtain coating) där man strängsprutar vätskan direkt på den rörliga arket, och tjockheten beror på arkets hastighet och volymen från munstycket.

Introduktion till polymerreologi

Reologi = läran om materiens deformations- och flytegenskaper.

Det viskösa flödet hos en Newtonsk vätska beskrivs av *Newtons lag om viskositet*:

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

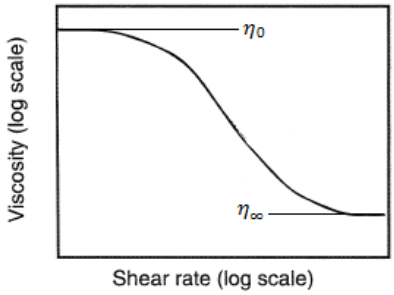
τ är skjuvspänningen, μ viskositetskoefficienten och γ skjuvdeformationen. När det gäller Newtonska vätskor som t ex vatten och mineralolja beror μ på temperatur och tryck men inte på γ, till skillnad från icke-Newtonska vätskor som t ex koncentrerade polymerlösningar och polymersmältor. Dessa har också ett stort beroende av molekylvikten.

Icke-Newtonska vätskor

Dessa fluider har en viskositet som är beroende av skjuvhastigheten, men det finns vissa som uppvisar spänninsrelaterade förändringar, som t ex ketchup, tandkräm, blod mm. I en Newtonsk vätska är förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet linjärt och dess proportionalitetskonstant är till μ - medan icke-newtonska fluiders förhållande som kan se olika ut med tiden, och en konstant viskositetskoefficient kan inte bestämmas. Fluidernas skenbara viskositet η defineras av *Newtons lag om viskositet* som:

$$\tau = \eta(\gamma)\gamma$$

Denna kallas för den *generaliserade Newtonska vätskemodellen*. Det riktiga förhållandet ges av själva materialets konstitutiva ekvation. Vid låga skjuvhastigheter är viskositeten nästan oberoende av skjuvdeformationen vilket liknar Newtonianskt uppförande, och närmar sig ett gränsvärde η_0 då γ = 0.



Vid låga skjuvhastigheter hindrar polymerers intrassling ett skjuvflöde och därför är viskositeten hög. Vid högre hastigheter börjar kedjorna orientera sig i flödesriktningen och redas ut, och viskositeten sjunker. När hastigheten är mycket hög finns inga stabila förvecklingar och viskositeten når en låg och rak nivå där den åter igen är oberoende av skjuvdeformationsgraden. Denna kallas för den andra Newtonska platåregionen och kan observeras i polymerlösningar men inte i smältor eftersom graden som krävs är så hög att att kedjorna kan gå sönder. I ovanliga fall kan viskositeten öka med ökande skjuvgrad. Dessa kallas *shear thickening* istället för *shear thinning*.

Reometri

Reologi = avser generiskt de experimentella tekniker som används för att bestämma de reologiska egenskaper hos material, det vill säga kvantitativa och kvalitativa relationer mellan deformationer och spänningar och deras derivat.

Förhållandet mellan spännings- och skjuvgrad och genom detta den skenbara viskositetens beroende av skjuvgraden kan bestämmas över många temperaturer genom dessa tekniker som använder enkla metoder. Dessa är kapillär- och Couettereometri som bygger på tryckflöde genom ett kapillär och skjuvflöde genom två roterande, koncentriska cylindrar. Det finns även andra metoder varav någon kommer att nämnas nedan.

Couettereometern, kon- och plattreometern samt andra metoder kan mäta skenbar viskositet över låga till måttliga skjuvhastigheter. Kapillärreometern mfl arbetar vid höga skjuvhastigheter som är typiskt för många processoperationer som *extrudering* (se tidigare samma kapitel).

Kapillärreometer

Denna metod ger oss en modell för en icke-newtoniansk fluids flöde genom ett kapillärmunstycke. Vi använder också vår förståelse för tryckflödet genom en tub för att bestämma den skenbara viskositeten hos en polymersmälta som funktion av skjuvgraden.

Vätskan tvingas genom ett rör med konstant tvärsnitt och exakt kända dimensioner under laminärt flöde. Antingen flödet eller tryckfallet är fixerad och den andra uppmätt. Flödesgraden kan omvandlas till ett värde för skjuvhastigheten och tryckfallet till ett värde för skjuvspänning då vi vet dimensionerna. Genom att variera trycket eller flödet kan en flödeskurva bestämmas. När en relativt liten mängd vätska är tillgänglig för

reometrisk karakterisering kan en mikrofluidisk reometer med inbäddade trycksensorer kan användas för att mäta tryckfallet för en kontrollerad flödeshastighet.

Couettereometer

Här drivs en roterande cylinder med bestämd radie med en konstant vinkelhastighet inuti en yttre koncentrisk cylinder med give radie. Här betraktar vi det laminära flödet mellan de bägge plattorna.

Kon- och plattreometer

Vätskan är placerad på en horisontell platta med en mycket grund kon placerad i den med en vinkel i storleksgraden 1 grad. Plattan roteras och kraften på konen mäts upp. Kon- och plattreometrar kan även drivas i ett oscillerande läge för att mäta elastiska egenskaper, eller i kombinerade rotations-och oscillerande läge.

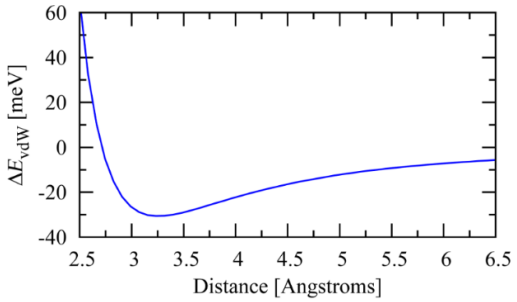
ASKELAND & FULAY

Kap 2 - Atomstruktur

Kemiska bindningar

Interatomära utrymmet

Är i en solid metall ungefär lika lång som den atomiska diametern. Det fungerar dock inte för jonbundna material eftersom utrymmet där är en summa av två olika långa jonradier.



Den minsta energinivån är bindningsenergin, den energi som krävs för att skapa eller bryta bindningen. Hög bindningsenergi betyder hög töjning och hög smältpunkt. Joniska material har en hög bindningsenergi pga den stora elektronegativitetsskillnaden. En mindre lutning är en svag bindning, och den har också en mindre ”dipp”.

Young's modulus – är ett mått på styvheten hos ett elastiskt material och är en kvantitet som används för att karakterisera material. Denna är relaterad till lutningen på kraft-avstånds-kurvor. En brant lutning innebär hög modul och mycket kraft för att töja bindningen.
Sträckgräns (eng: *yield strength*) - den spänning vid vilken ett material börjar att deformera plastiskt. Före sträckgräns kommer materialet att deformeras elastiskt och kommer att återgå till sin ursprungliga form när den pålagda spänningen avlägsnas. När sträckgräns passeras, kommer en del del av deformationen vara bestående och icke-reversibel.
CTE (coefficient of thermal expansion) – beskriver hur mycket ett material expanderar/kontraherar med temperature

$$\alpha = \left(\frac{1}{L}\right)\left(\frac{dL}{dT}\right)$$

Kap 3 - Atomisk och joniska ordningar – kristallstruktur

Short-range vs long-range order

Ingen ordning

Gäller i monoatomiska gaser, t ex Ar, och i plasma skapat i ett fluroescerande lysrör.

Short-range order - SRO

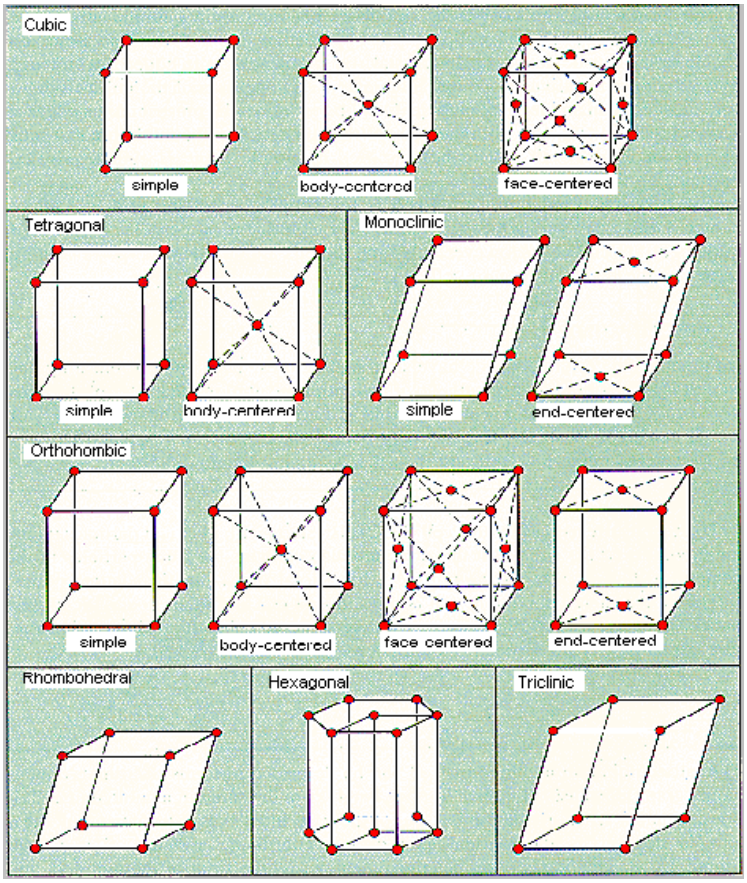
Gäller då atomerna uppvisar arrangemang endast fram till sin närmaste granne, t ex vattenmolekyler, som i sig är ordnade men uppför sig slumpartat kring andra vattenmolekyler. Finns också något liknande i oorganiska glaser, de är tetraedrar som i sig är ordnade men som binds slumpartat till varandra. Många polymerer har också ordningar som liknar glasens struktur.

Long-range order - LRO

Gäller det flesta metaller och legeringar, halvledare, keramer och vissa polymerer. De har alla en kristallin struktur där atomarrangemang sträcker sig långt och uppvisar ett periodiskt 3D-mönster, dessa kallas kristallina material. Ett *polykristallint material* består av flera kristaller med olika orienteringar i rymden, dessa kallas *korn*. Gränserna mellan dessa korn kallas *korngränser*. Man kan finna LRO genom att använda tekniker som röntgendiffraktion eller elektrondiffraktion.

Flytande kristall (LC) – polymeriska material med en särskilt ordning. De uppför sig som amorfa material i ett läge. Med en extern stimulering, t ex temp.förändring eller elektriskt fält, justeras molekylerna och bildar små regioner som är kristallina.

Amorfa material



Alla material som uppvisar SRO är amorfa, alltså icke-kristallina. En periodisk ordning maximerar den termodynamiska stabiliteten i materialet. Bra exempel är glaser. Många plaster är också amorfa. De innehåller små kristallina delar, men när de bearbetas trasslas de långa kedjorna ihop och kan inte placera sig i någon ordning. Kristallina material har både SRO och LRO.

Gitter, enhetsceller och kristallstruktur

En *enhetscell* är delsektion av ett gitter som fortfarande bibehåller gittrets hela karaktärsdrag. Genom att stapla enhetsceller kan man bygga upp hela gittret. Det finns sju unika arrangemang:

Alla dessa kallas Bravais-gitter. Det är bara efter att vi identifierat ett materials Bravais-gitter som vi kan börja formulera en grund och beskriva en kristallstruktur. Eftersom vi får en kristallstruktur genom att lägga ihop Bravais-gitter och grunder (gupper av flera atomer i en särskild ordning) finns det hundratals olika. De tätpackade enhetscellerna på bilden är endast FCC och HCP.

Atomantal per enhetscell

En särskilt antal gitterpunkter definerar varje enhetscell. När vi räknar antal atomer som hör till varje cell måste vi tänka på att en punkt kan höra till mer än en cell, t ex ligger bara en åttondedel av en hörnpunkt i den aktuella cellen. 8 hörnatomer ger därför bara en hel gitterpunkt/cell.

Koordinationstal

Är antalet atomer som rör en särskild atom, eller antalet närmaste grannar – och indikerar hur tätt packat atomerna ligger. Om vi tittar först på *simple cubic* (SC) ser vi att ett hörn har sex närmaste grannar i respektiver

relaterat hörn. I *body-centered cubic* (BCC) har mittenatomen åtta närmaste grannar när man summerar varje hörn i cellen. FCC har på samma sätt koordinationstal 12.

Packningsgrad– den fraktion av rymden som är ockuperad av atomerna, med assumptionen att alla atomer rör vid varandra och är sfäriska.

$$Packningsgrad = \frac{(antal\ atomer/cell)(atomvolym)}{enhetscellens\ volym}$$

$$Densitet = \frac{(antal\ atomer/cell)(atommassa)}{(enhetscellens\ volym)(Avogadros\ konstant)}$$

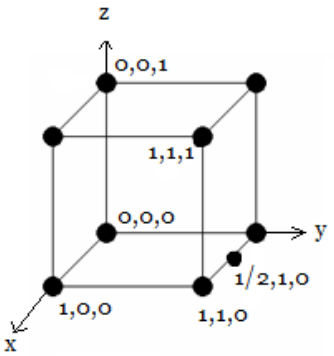
Allotropiska eller polymorfiska material

Material med mer än en möjlig kristallstruktur är antingen allotropiska eller polymorfiska. Allotropiska används för rena element och polymorfiska för föreningar. Egenskaperna hos några material beror väldigt mycket på hur strukturen är polymorf, t ex de dielektriska hos vissa.

Enhetscellens riktningar, punkter och plan

Avstånd mäts i antalet gitterparameter vi måste flytta i en riktning för att gå från origo till den aktuella punkten och anges med punktkoordinater, se bilden.

Vissa riktningar i enhetscellen är särskilt viktiga. *Miller-index* är sättet som används för att beskriva dessa riktningar. Metod för att **finna riktningarna**:



1. Använd ett positivt orienterat koordinatsystem, bestäm koordinaterna för två punkter i samma riktning.
2. Subtrahera punkten längst fram med punkten längre bak (som i vektorer) för att få antalet gitterparameter mellan dem i rätt riktning.
3. Förkorta/förläng resultatet till minsta heltal.
4. Omge dem med [ ]. Om du får ett negativt tecken, placera det ovanför siffran.

Kommentar: [-100] och [100] ligger på samma linje men har olika riktningar. En riktning och dess multipel är identiska, glöm inte att fragmentera ner. Vissa riktningar kan vara lika och tillhöra en grupp beroende på var vi sätter origo.

Metaller deformerar enklast längst de plan i enhetscellen som den är mest tätpackad kring. Ytenergin beror mycket på de kristallografiska planen, och har stor roll i kristalltillväxt. Metod för att **identifiera planen**:

1. Identifiera de punkter i vilka planet korsar x-,y- och z-axlarna. Om den går genom origo, flytta origo!
2. Ta den inverterade värdet av dessa skärningspunkter.
3. Ordna fraktionerna men minska *inte* ner till minsta heltal.
4. Placera resultatet inom ( ), negativa tecken över siffrorna.

Kommentar: Plan och dess negativa motsvarningar är identiska (till skillnad från punkter), (020) = (0-20). Plan och deras mutiplar är inte identiska (igen till skillnad från punkter). I varje enhetscell representerar plan av en viss form en grupp av ekvivalenta plan som har sina särskilda index pga dess koordinatriktningar. Dessa liknande plan representeras med { }. I kubiska system har en riktning samma index som ett plan som en vinkelrätt mot detta plan.

Mellanrumsläge

Dessa atomer har ett koordinationstal lika stort som antalet atomer den rör vid, och spelar en viktig roll för molekylens styrka och fysikaliska egenskaper. Atomer i kubiska hålrum har ett koordinationstal på åtta i en SC-struktur medan atomer i oktaedriska hålrum har ett koordinationstal på sex (t ex i BCC och FCC). De tetraediska hålrummens atomer har koordinationstalet fyra (också BCC och FCC). Mellanliggande atomer eller joner vars radie är lite större än hålrummet radie kan tränga sig in och putta bort de omkringliggande atomerna en aning. Atomer med mindre radie än hålet får inte sitta i mellanrummet eftersom den skulle ”glida omkring”.

Joniska kristallstrukturer

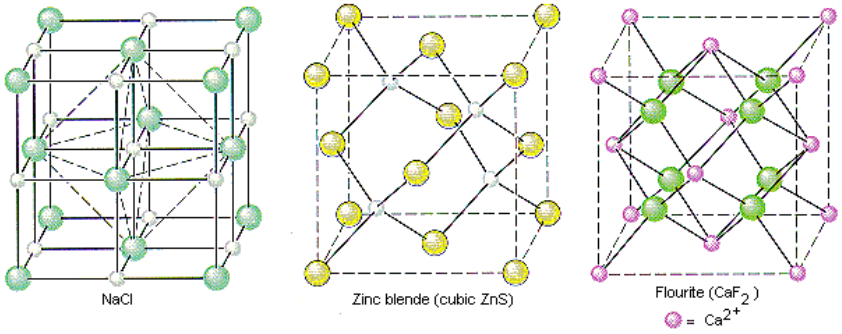
Joniska material måste ha en kristallstruktur som försäkrar elektrisk neutralitet och stökiometri, men också låter joner av olika storlekar packas effektivt. Joniska kristallstrukturer kan ses som tätpackning av anjoner med katjoner i många av polyedrar som skapas av hålrummen. CsCl kan ses som en SC av Cs+ med en Cl- i dess kubiska hålrum. Kristaller av NaCl har Cl- i FCC och Cl- i dess okatedriska hålrum.

Zinkblände

Radien på atomerna gör att S^{2+} ligger i de tetraediska hålrummen i en enhetscell, dvs ett FCC med Zn^{2+} på de vanliga gitterplatsernaoch S^{2+} i hälften av de tetraediska hålrummen. Ett annat exempel med den strukturen är GaAs.

Fluorit

Strukturen är FCC med anjoner i alla åtta tetraediska hålrum.

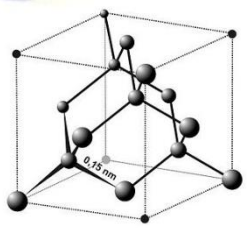


Kovalenta strukturer

Kovalent bundna material har komplexa strukturer för att uppfylla de begränsningar som bindningen ger. De är också rätt öppna strukturer.

Diamantstruktur

På samma sätt som kisel och germanium är diamant bundet av fyra kovalenta bidningar och skapar en tetraeder vilket ger koordinationstalet fyra. Enhetscellen kallas *DC*, diamond cubic, och atomerna bildar ett stelt gitter som gör det väldigt starkt.



Diffraktionstekniker för kristallstrukturanalys

Röntgenspridning

Röntgenspridningstekniker är en familj av icke-destruktiva analytiska tekniker som ger upplysning om kristallstrukturen, kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper hos material och tunna filmer. Dessa tekniker är baserade på att observera den spridda intensiteten hos en röntgenstråle som belyser ett prov som en funktion av infallande och spridningsvinkel, polarisation, och våglängd. Röntgenkristallografi är en metod för bestämning av arrangemanget av atomerna i en kristall, i vilken en röntgenstråle träffar en kristall och får ljusstrålen att spridas i många specifika riktningar. Från dessa vinklar kan en crystallographer producera en tredimoensionell bild med atomernas genomsnittliga positioneri kristallen, deras kemiska bindningar samt eventuella fel.

Elektronspridning och mikroskopi

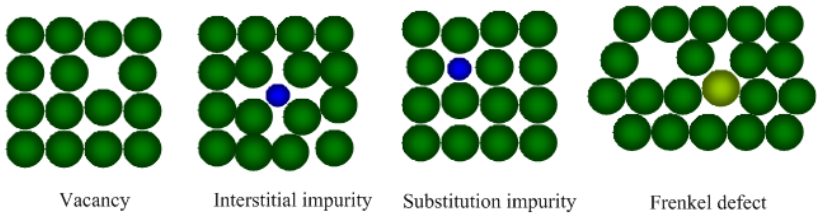
Detta är en teknik som används för att studera material genom att skjuta elektroner i ett prov och observera det resulterande interferensmönstret. Elektronstrålen som lämnar provet används för att forma en bild av kristallen, vilket görs både via TEM och elektronspridning.

Kap 4 - Defekter i atomiska och joniska ordningar

Punktdefekter

Punktdefekter är lokala störningar i en annars perfekt ordning i en kristallstruktur. De påverkar en region omkring sig själva och kan uppkomma när atomer/joner rör sig pga temperatur, processing eller genom

introduktion till andra atomer. En punktdefekt involverar vanligtvis en atom/jon eller ett par och skiljer sig därför från förlängda defekter som t ex dislokationer och korngränser. Det finns olika sorters punktdefekter.



Vakanser

Vakanser ökar den termodynamiska stabilitetet i ett kristallint material, och finns i alla material. De uppkommer i metaller genom stelning, vid höga temperaturer eööer som en konsekvens av strålning. De spelar också en stor roll i bestämning av hur mycket atomer/joner kan röra sig i materialet eller diffundera – särskilt i rena metaller. Koncentrationen ökar med temperaturen

Mellanrumsdefekter

Uppkommer när en extra atom/jon placeras i materialet på en vanligtvis obemannad plats. De är mindre, men fortfarande större än utrymmet vilket innebär att omkringliggande region blir komprimerad och förvrängd. Ett exempel på när vi vill ha detta är när vi introducerar väteatomer till järn för att producera stål. Om det finns dislokationer i kristallen som försöker röra sig kring dessa defekter tar det emot, och det blir svårt att skapa permanenta deformationer i metaller och legeringar. Detta är ett sätt att öka en metalls styrka. Antalet defekter hålls i princip konstant oavsett temperatur när de väl introducerats.

Substituitionella defekter

En atom/jon är utbytt mot en annan och ockuperar en vanlig gitterställe. De kan vara större eller mindre, och påverkar omgivningen därefter – de förändrar med andra ord de interatomiska avstånden i omgivande kristallen. Den kan vara antingen introducerad som en legeringstillsats eller som en oavsiktlig orenhet. Om atomer/joner blir substitutionella eller mellanliggande beror på dess storlek och valenselektroner. Två versioner av denna defekt är Frenkel och Schottky.

Frenkeldefekt – Vakans-interstitiellt par formas när en jon hoppar från ett gitterställe till en interstitiell plats och lämnar en vakans efter sig. Detta kan hända också i metaller och kovalent bundna material.
Schottkydefekt – Unik för joniska material och är vanliga i många keramiska material. I denna edefekt uppstår vakanser som måste balanseras av andra laddningar för att upprätthålla den elektriska neutraliteten. Det är också viktigt att bibehålla en massbalans

Linjedefekter - Dislokationer

Introduceras under stelning av materialet eller när det permanent deformeras. De finn i alla material, men är särskilt användbara i studiet av förstärkning och deformation av metaller. Detta är eftersom de ger en mekanism för plastisk feromationen, dvs irreversibel deformation.

Skruvdislokationer

Kan liknas vid att skära genom ett material och sedan skruva det en atom. *Burgersvektorn* är en vektor som representerar storleken och riktningen på den gitterförvrängningsdislokationen som finns i ett kristallgitter. Vektorn är parallell med skruvriktningen.

Kantdislokationer

Kan illustreras genom att skära ner en bit i ett kristallgitter och infoga ett extra plan som delvis fyller snittet. En cirkulär loop som beskriver dislokationen är nu längre än förut iom det extra planet. Denna extra bit är Burgersvektorn. Här är dock vektorn vinkelrät mot dislokationen. Omgivningen störs av dislokationen.

Blandade dislokationer

Har bägge dislokationer, Burgersvektorn är dock densamma för alla partier av de blandade dislokationerna. När en skjuvkraft arbetar i vektorns riktning kan dislokationen röra sig genom att bryta bindningarna med atomer i ett plan. Den kan sedan binda med nästa atom i samma plan ett steg bort, vilket innebär att hela dislokationen förflyttat sig en atom i sidled. Dislokationen fortsätter röra sig genom hela materialet tills den kommer utanför kristallen och skapar något som liknar ett trappsteg.

Peirels-Nabbaro-spänningen - den spänningen som behövs för att flytta dislokationen från en jämviktspunkt till en annan. $\tau = ce^{-\frac{kd}{b}}$, där τ är skjuvspänningen som krävs, *c* och *k* är materialkonstanter, b är burgersvektorn och d är avståndet mellan två glidplan. Ett lågt τ får man antingen om *d* är stort eller om *b* är litet.

Glidning (*slip*) – Mobilitetsprocessen för dislokationer. Planet den glider längs heter glidplanet, i Burgersvektorns riktning som vanligtvis är längs ett tätpackat plan. En skruvdislokation ger samma resultat som en kantdislokation, förutom av dislokationen istället ligger vinkelrätt mot Burgersvektorn (dock sker deformationen i vektorns rikning!). Dislokationer rör sig inte lätt i t ex kisel eller polymerer som har kovalenta band eftersom deras styrka och riktning gör att de går sönder innan dislokationerna får tillräckligt mycket kraft för att glida. Den enda stora deformationen i polymerer är när deras långa kedjor trasslas ut och sträcks. Material med jonbidningar glider inte heller eftersom den skulle orsaka laddningsobalans och skulle gå sönder istället. Glidning förklarar varför metallers styrka sänks avsevärt än beräknat från deras bindningar. Om glidning uppstår krävs bara att en mycket liten del av bindningarna längs innerplanet bryts vid en tidpunkt för att kraften för att kunna deforma metallen ska bli liten men tillräcklig. Glidning ger också seghet i metaller, vilket innebär att dislokationer gör att metaller inte är jättespröda. Manipulerar vi dislokationer kan vi förändra en metalls egenskaper. Kraften som krävs för att initiera glidning kan beräknas med *Schmids lag.* Eftersom olika kristaller/korn är orienterade olika kan vi dock inte använda den för att förutse polykristallina materials mekaniska uppförande.

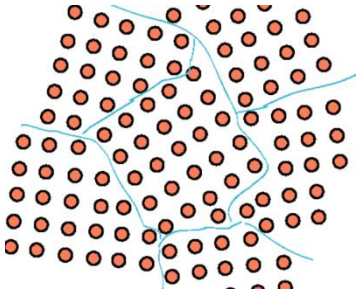
Kristallstrukturen har stor inverkan på hur mycket en skjuvkraft påverkar materialet. Beroende på kristallernas enhetsceller finns det olika antal glidningssystem, mao riktningar för glidning. T ex har FCC 12 och BCC 48.

Ytdefekter

De gränser eller plan som separerar materialet i regioner, alla med samma kristallstruktur men olika orienteringar. Atombindningarna på materialytan är störda eftersom ordningen plötsligt tar slut vid ytan, vilket utnyttjas hos bl a kiselbaserad mikroelektronikprodukter. Den kan också vara grov och mer reaktiv.

Korngränser

Många metalliska och keramiska material består på mikroskalan av små kristalliska portioner, *korn*. Deras arrangemang är i det närmaste identiska med varandra, men skiljer sig i orientering för varje grannkorn. I korngränserna ligger de så nära att de orsakar en regionskomprimering och på andra ställen tvärtom spänning. Ett sätt att kontrollera en materials egenskaper är genom att kontrollera kornstorleken. En dislokation kan inte färdas långt i ett material med mycket korngränser innan den fastnar, och förstärker därmed materialet. För att se ytan använder man sig av metallografi.



Metallografi – Ytan av en metallografisk prov föreberds genom olika metoder som slipning, polering och etsning. Efter detta analyseras det ofta genom optisk eller elektronmikroskopi. Ytan utsätts för sk *etching*, kemisk attack. Med enbart metallografiska teknik kan en skicklig tekniker identifiera legeringar och förutsäga materialegenskaper. Ett sätt att avgöra kornstorleken är genom *ATSM*, dvs genom att titta på antal per ytenhet. Ett stort ATSM-värde innebär mao många korn, och mindre storlek.

Småvinkelgränser

Är en rad av dislokationer som skapar en liten felorientering mellan angränsande kristaller. Eftersom dess energi är lägre än flr en vanlig korngräns är de inte lika effektiva i att motstå glidning.

Staplingsfel

Uppstår i FCC-metaller och är ett fel i staplingssekvensen (AB/ ABC osv) i tätpackade plan. Sådana staplingsfel påverkar glidningsprocessen.

Tvillingplan

Det är ett plan med kristallstruktur vars spegelbild som ligger tvärs över har en felorientering. Tvillingar kan skapas när en skjuvkraft arbetar längs tvillinggränsen, vilket tvingar atomerna att flytta ur sin position. Detta sker under deformation eller värmebehandling av särskilda metaller och legeringar. Tvillingplan påverkar också glidningsprocessen och stärker metaller. Rörelse i tvillinggränsen kan också deformera materialet.

Korngränser med sin höga energi är mycket mer effektiv när det gäller att blockera dislokationer än både staplingsfel och tvillingplan. Defekter spelar en stor roll i påverkandet av mekaniska, elektriska och magnetiska egenskaper hos material. Varje imperfektion i kristallen ökar dess inre energi vid den aktuella platsen. En dislokation i en annars perfekt kristall kan enkelt röra sig genom kristallen. Att öka dislokationsdensiteten stärker materialet. Den kommer öka markant om vi töjer eller deformerar materialet, detta kallas *deformationshärdning* (strain hardening) och kommer kommenteras med i kapitlet om frakturer längre fram.

Kap 5 - Atom- och jonrörelser

Atomers och joners stabilitet samt diffusionsmekanismer

Atomer/joner på deras normala positioner i kristallstrukturer är inte stabila eller i vila. De har termisk energi och kommer att röra sig, en atom kan t ex flytta sig för att ockupera en närbelägen vakans vilket kallas *själv-diffusion*. En atom kan också flytta sig från en interstitiell plats till en annan. Effekten på materialet är dock inte så stor även om detta pågår kontinuerligt. Atomer och joner kan också hoppa över korngränser, vilket gör att gränsen flyttas. Det blir fler hopp per sekund om temperaturen ökar.

Oordningen som skapas av vakanser hjälper till att minimalisera den fria energin och därför öka den termodynamiska stabiliteten. När diffusionen fortsätter har vi ett nettoflöde av atomer som lämnar sitt gitterställe för att fylla närbelägna vakanser och därmed skapar nya vakanser. När atomer/joner rör sig mellan interstitiella platser behövs dock inga vakanser, och mekanismen inträffar oftare än vakansdiffusion. Små interstitiala atomer kan också diffundera snabbare pga sin storlek.

Aktiveringsenergi, diffusionshastighet och permeabilitet

Atomer måste pressa sig förbi omgivande atomer under diffusion vilket kräver energi som måste tillföras, ofta från värme. Denna energibarriär kallas *aktiveringsenergin*. Denna energi är lägre för interstitiell diffusion än för vakansdiffusion, vilket innebär att låg energi ger enklare diffusion. Kovalent bundna material som kisel och kol har ovanligt hög aktiveringsenergi pga deras höga bindningsstyrka. I joniska material kan en jon bara placeras på en plats med samma laddning. Därför är aktiveringsenergin hög och hastigheten långsam för joniska material jämfört med metalliska. Då energin beror på styrkan i atombindningarna är den högre i material med hög smältpunkt. Man kan mäta diffusionshastigheten genom att mäta flödet i materialet. Detta samband beskrivs av *Fick's första lag*:

$$J = -D\frac{dc}{dx}$$

där *J* är flödet, D är diffusionskoefficienten och *dc/dx* är koncentrationsgradienten. Det negativa tecknet säger oss att flödet går från högre till lägre koncentration, vilket ger en negativ kvot – och *J* blir positiv. Denna första lag definerar relationen mellan den kemiska gradienten och flödet, medan *Fick's andra lag* beskriver variationen i koncentrationsgradient under instabila diffusionsförhållanden.

Diffusion är starkt beroende av temperatur. När temperaturen ökar gör även diffusionskoefficienten det och därför även flödet. *D* beror också på koncentrationen av ämnen och på materialets komposition. Den första kan i många fall bortses från om koncentrationerna är små.

Volymdiffusion – Atomer rör sig genom kristallen Pga omkringliggande atomer är aktiveringsenergin stor och hasigheten relativt liten.
Korngränsdiffusion – Atomer är dåligt packade i dessa gränser och atomer diffunderar lätt, och aktiveringsenergin är låg.
Ytdiffusion – Ännu enklare eftersom begränsningarna är färre på atomerna som diffunderar.

Hos polymerer är den viktigaste diffusionen den mellan långa polymerkedjor. Här tittar vi på permeabilitet istället för på diffusion. Polymerer med en polär grupp har högre permeabilitet för vattenånga än för syre. Ju mer kompakt en polymer är, desto lägre permeabilitet säger man generellt.

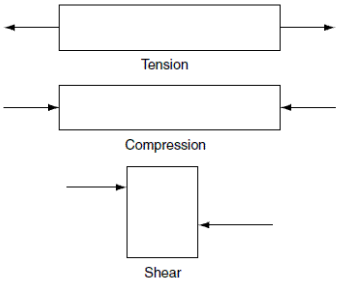
Diffusionsprocesser blir mycket viktiga i ingenjörsvetenskapen när material används eller behandlas vid förhöjd temperatur. Vid *smältning och gjutning* för att forma material i en viss form. Många material har dock för hög smätpunkt för att behandla med dessa metoder och då används istället *sintring.*

Kap 6 - Mekaniska egenskaper

För att bestämma rätt material till den önskade komponenten bör man betrakta dess mekaniska egenskaper. Ska den vara stark, styv eller seg? Kommer den användas i höga temperaturer eller under hög belastning? Det är viktigt att vara noga i sitt val - material med samma nominella kemiska struktur kan ha stora skillnader i egenskaper som bestäms av dess mikrostruktur.

Terminologi

Spänning och töjning



Spänning (eng*: stress*) är definerat som kraft per enhetsarea och uttryckt i Pa.
Dragkraftsspänning (eng: tensile stress) σ involveras ofta i lastbärande applikationer.
Skjuvspänning (eng: shear stress) τ involveras ofta i materialprocesser som t ex *extrudering* (se Freid kap 11) och i strukturella applikationer.

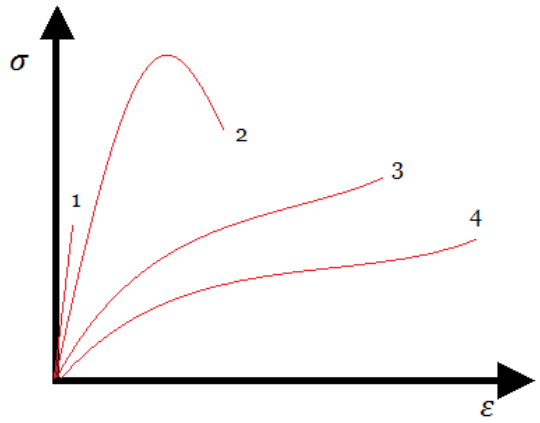
Töjning *(*eng: *strain*) är definerat som förändring i längd per enhetslängd och enhetslöst (m/m). *Dragspänning* (eng: tensile strain) betecknas ε, *skjuvdeformation* (eng: shear strain) betecknas γ. *Elastisk töjning* är en fullt återhämtningsbar töjning efter en pålagd spänning och försvinner direkt efter att spänningen tagits bort (se kapitel 2). Den kommer inte visa någon permanent deformation. I många material är elastisk spänning och töjning linjärt relaterade. Stora elastiska deformationer kan ses i *elastomerer* (som t ex naturliga gummin, silikoner) när förhållandet är icke-linjärt. När deformationen inte går tillbaka helt efter att spänningen tagits bort kallas det plastisk töjning. Hastigheten med vilken en töjning utvecklas i ett material kallas *töjningsgrad* med enhet s^{-1}.

I ett *visköst* material utvecklas töjningen under en tidsperiod och materialet återhämtar sig inte. Detta går inte i fas med den pålagda spänningen. Ett *viskoelastiskt* material är någonting mellan ett elastiskt och ett visköst (ex *Silly Putty*), och här ligger många polymermaterial. En del av töjningen kommer gå tillbaka till sitt ursprungliga utseende till skillnad från det viskösa efter någon tidsperiod. I ett viskoelastiskt material som hålls under konstant töjning under en längre tid kommer spänningen gradvis att minska, vilket kallas *spänningsrelaxation* (jmfr med gitarrsträngar). Blanda inte ihop det med töjningsrelaxation. *Viskositet* η (som vi går närmre in på i Fried kap 11) är definerat som lutningen av skjuvspänningen τ och skjuvdeformationsgraden $\dot{\gamma}$ och definerat som nedan. Se bild på nästa sida!

$$\tau = \eta\dot{\gamma}$$

Dragprov

Detta test är populärt eftersom egenskaperna som erhålls kan tillämpas för att konstruera olika komponenter. Ett dragprov mäter ett materials motstånd mot ett långsamt pålagd kraft, och graderna är mycket små i testen. Provet placeras i en maskin som långsamt drar de båda ändarna utåt, och testet för typiskt på metaller, legeringar och plaster. Det kan göras på keramer men de går ofta sönder eftersom de är så spröda. Därför gäller följande text främst dessa material.



1. Keramer, glas, asfalt, polymerer under T_g.
2. Metaller vid rumstemperatur
3. Elastomerer
4. Termoplastiska material över T_g.

Skalorna stämmer inte för de olika kurvorna, men det ger en överblick för hur de ser ut. Metaller och termoplastiska material har en initial elastisk region följd av en ickelinjär plastisk. Elastomerer uppför sig lite annorlunda än andra polymera material. Keramer mfl har endast en elastisk och ingen plastisk deformation vid rumstemperatur.

Engineering stress = $\sigma = \frac{F}{A_0}$ Engineering strain = $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

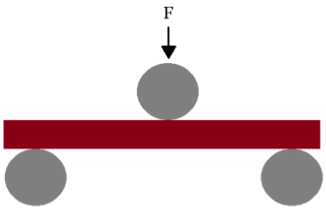
A_0 är en ursprungliga tvärsnittsytan på provet, l_0 dess ursprungliga längd och Δl skillnad i längd när en kraft F läggs på.

Den översta punkten i kurva 2 i bilden nedan kallas *brottgräns* och den spänning där plastiska regionen börjar kallas *sträckgränsen*, materialet har nått sin elastiska gräns. I metalliska material brukar denna spänning krävas för att dislokationer eller glidning skall initieras, och motsvaras av utredning av intrasslade kedjor i polymerer. Den *proportionella gränsen* defineras som den nivå där spänning och töjning inte längre förhåller sig linjärt till varandra. I många material är inte en deformation enhetlig utan uppträder olika mycket lokalt i provet, här en minskning av tvärsnittsarean på ett ställe i provet vilket kallas midjebildning/avsnörning (eng: *necking*). Spänningen sjunker i kurva 2 igen efter sin högsta punkt eftersom necking uppstår och mindre kraft krävs för att deformera en mindre tvärsnittsyta. Lutningen i den elastiska regionen är den elastiska modulen och kallas *Youngs modul* (se kap 2). Arean under kurvan kallas *tensile toughness* och är energin absorberad av ett material innan sprickbildning. Seghet är mängden deformation ett material kan klara utan att brytas.

Mekaniska egenskaper beror på temperaturen. sträckgräns, brottgräns och elasticitetsmodulen minskar vid högre temperaturer medan segheten ökar.

Böjprov/bockningsprov

I många spröda material kan man inte enkelt göra det vanliga dragprovet pga brister i materialet yta som gör att det enkelt bildas sprickor, för dessa används istället med t ex böjprovet. Resultatet från detta test liknar spänning-töjnings-kurvan men här plottas snarare spänningen mot provets böjning (i l.e). Spröda material används ofta så att endast komprimerande krafter skall arbeta på dem eftersom dessa inte initierar sprickbildning i materialets ytbrister. De har liten mekanisk hårdhet.



Materials hårdhet

Hårhetstestet mäter ett materials ytmotstånd mot att penetreras av ett hårt objekt.

Brinell

I detta test är inträngaren en hård stålsfär på ca 1 cm i diameter som tvingas in i ett materials yta. Intryckets diameter mäts och Brinells hårdhetsnummer beräknas sedan från en definerad ekvation.

Rockwell

Här används istället en hård liten stålsfär för mjuka material och en diamantkon, ”Brale”, för hårdare. Djupet på intrycket i materialet mäts och omvandlat till Rockwells hårdhetsnummer. Eftersom detta test inte kräver någon optiskt mätning är denna mer populär är Brinell.

Dessa båda hårdhetsnummer används som kvalitativ bas för jämförelse mellan material. Ett Brinellhårdhetsnummer kan erhållas efter bara några minuter utan i princip någon förberedelse av provet och utan att göra sönder det, och ger fortfarande ett bra värde av den tensila styrkan.

Slagprov

När ett material utsätts för ett hastigt, kraftigt slag och töjningsgraden är extremt stor kan den bete sig mycket mer sprött än vad som är observerat i ett dragprov. För att testa prov under dessa villkor används ett *slagprov*.

Bland dessa finns *Charpy*- och *Izod*-test som båda på olika sätt går ut på att tillföra en kraft under mycket liten tid vilket ger en stor töjningshastighet. Izod används ofta för polymerer, antingen skårade eller ej. Här svingar en tung pendel från ett högt läge och bryter provet. Skillnaden i energi är slagenergin man vill åt. Förmågan att stå emot ett stötslag refereras till som materialets slagseghet. Skåror, som kan vara orsakade av t ex dålig bearbetning, koncentrerar spänningar och minskar ett materials hårdhet. Värt att notera är att energin som krävs för att bryta ett material inte alltid är relaterad till den tensila hårdheten (arean under kurvan) under hög töjningshastighet då t ex metaller kan uppsträda som spröda men annars vara både starka och sega.

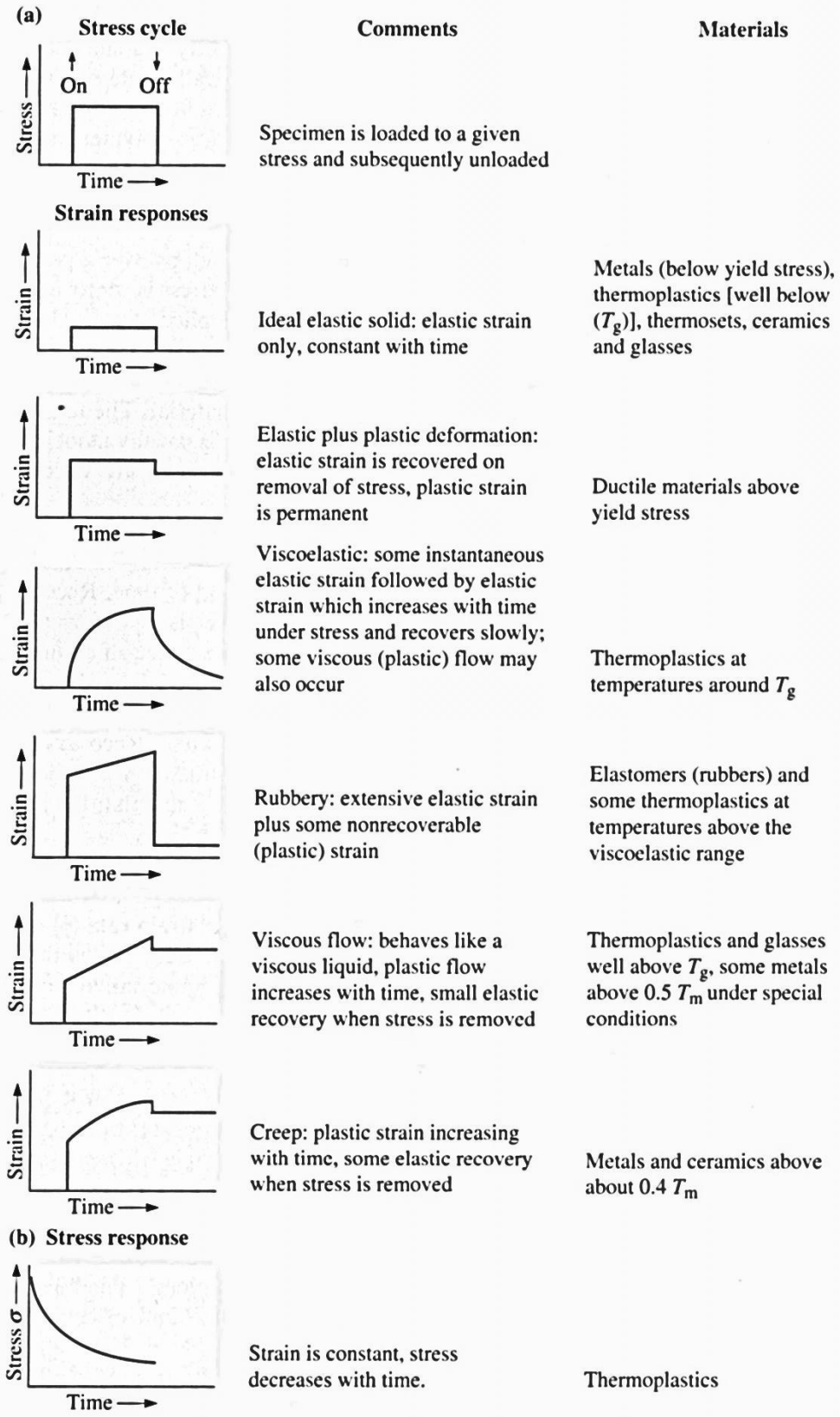


Figure 6-2 (a) Various types of strain response to an imposed stress. (*This article was published in* Materials: Principles and Practice, *C. Newey and G. Weaver (Eds.), Figure 6-9, p. 300. Copyright © Butterworth-Heinemann (1991).*) (b) Stress relaxation in a viscoelastic material. *Note the y-axis is stress.* Strain is constant.

Kap 7 – Brottmekanik, utmattning och krypning

Mikrostrukturella frakturer i metaller

Seghetsbrott

I metaller med bra seghet och hårdhet uppstår seghetsbrott transgranulärt (genom kornen), och ofta syns en stor deformation i komponenten som uppstår före det slutgiltliga brottet. Seghetsbrott brukar orsakas av enkel överlastning eller genom att applicera för stor spänning till materialet. I ett dragprov börjar seghetsbrott med kärnbildning, tillväxt och sammansmältning av mikrohålrum i mitten av teststången. Hålrum bildas när en hög spänning tvingar metallen till separation vid korngränserna eller i gränssnitten mellan metallen och små orenheter. När den lokala spänningen ökar växer hålrummen till stora hål tills det blir för liten kontaktyta och stödja lasten och fraktur inträffar. Även glidning bidrar till seghetsbrott. Dessa kan identifieras genom att frakturytan är platt där hålrummen först uppstått och en liten skjuvläpp där frakturytan är i 45 grader till spänningen.

Sprödbrott

I metaller och legeringar med hög styrka eller dålig seghet och hårdhet. Även metaller som i vanliga fall är sega kan misslyckas på ett sprött sätt i låg temperatur, hög töjningsgrad eller annat. Sprödbrott är ofta en effekt av ett *slag* snarare än överlastning, och liten eller ingen plastisk deformation behövs. Sprickor börjar ofta i småfel som koncentrerar spänningen och rör sig enklast via specifika kristallografiska plan (ofta {100}-planen). Ibland tar den dock vägen mellan korngränserna. Ofta är frakturytan slät och vinkelrät mot spänningen i ett dragprov. Om frakturen uppstår genom klyvning är varje korn slät och olika orienterad vilket ger ytan ett kristallint utseende.

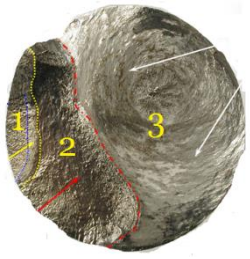
Mikrostrukturella frakturer i keramer, glaser och kompositer

I keramiska material tillåter jon- och kovalenta bindningar få eller inga glidningar och därför går de sönder genom sprödbrott. Klyvningen sker via de tätpackade planen och därför är det svårt att avgöra var den började då ytan är mycket slät. Glas har också sprödbrott och ofta görs det *conchoidalt* (se bild åt höger), vilket innebär att de inte följer något särskilt plan eftersom glas är amorfa. Denna yta har en mycket len spegelzon nära ursprungssprickan med rivlinjer.

Gällande polymerer kan termoplaster kan gå sönder antingen genom spröd- eller seghetsbrott beroende på om temperaturen är över eller under glasövergångstemperaturen T_g. Härdplaster fallerar genom sprödbrott eftersom dess kedjor är ihopbundna. I fiberförstärkta kompositer är frakturerna mer komplexa. Dessa består av starka, spröda fiber som är omslutna av en mjuk seg matrix. När en dragspänning appliceras längs fibrerna deformeras matrixen segt och fibrerna bryts av den ojämna lasten sprött. Frakturering sker oftare om bindingen mellan fibrerna och matrixen är dålig och hålrum kan bildas, och skapar *delaminering*, dvs att de olika lagrerna i en komposit börjar dela sig (tänk glimmer).

Utmattning

Utmattning (eng: *fatigue*) är en minskning i styrka eller ett materials misslyckande beroende på repetitiv spänning som kan vara ovanför eller under sträckgränsen och är vanlig bland applikationer som arbetar under last under lång tid, som t ex turbinblad, implantat, skor osv. Trots att dessa spänningar ligger under sträckgränsen uppstår spänningarna så många gånger att materialet tillslut fallerar pga utmattning! Utmattning sker ofta i tre steg:



1. En liten spricka initieras eller kärnbildar, oftast vid ytan där spänningen är som störst, och inkluderar ytdefekter.
2. Sprickan växer gradvis medan lasten går sin cykel.
3. En plötslig fraktur uppstår när det kvarvarande tvärsnittet är för litet för att bära upp lasten.

För att utmattning skall uppstå måste åtminstone en del av spänningen vara dragspänning. I keramer tittar vi inte på utmattning eftersom de fallerar pga sin låga hårdhet och designas för statiska laster. Polymerer uppvisar utmattning, men den fungerar annorlunda än hos metaller. Här utsätts materialet för repetitiv spänning som gör att en avsevärd mängd värme kan uppstå nära sprickan och interaktionen mellan utmattning och mekanismen *krypning* (se nästa avsnitt) påverkar det övergripande beteendet. Kompositers elasticitetsmodul minskar med utmattning.

En utmattningsfraktur kan identifieras med några lätta kontroller. Frakturytan är särskilt nära ursprungssprickan slät och utåt blir den grövre, vid brytningen kan den vara fibrös. Ofta bär de märken som liknar musslors geometri.

Ett sätt att testa ett materials motstånd mot utmattning är att göra ett roterande kantileverstråletest som går ut på att man placerar ett prov horisontellt med dena änden fäst och en kraft i andra änden. Provet roterar sedan först 90 grader så att den area som hade spänningar över sig nu är i vila, sedan vidare 90 grader till så att den som först spändes sedan komprimerades av den pålagda kraften. På så sätt genomförs en sinusoidal cykel fårn maximal dragspänning till maximal komprimeringsspänning. Man räknar motståndskraften i antal genomgångna cykler.

Utmattningsgränsen är den spänningen som gör att det maximalt är 50 % risk för utmattningsbrott. Nu för tiden tror man inte att det finns någon exakt utmattninsgräns. Man kan på olika sätt försöka påverka materialet för att förminska risken att utmattningsbrott uppstår. Man kan till exempel använda olika ytbehandlingar där ett exempel är *shoot peening* (blästring). Keramer uppvisar oftast inga utmattningsbrott eftersom dessa ofta är tillverkade för att motstå konstant spänning.

Krypning

Om vi applicerar en spänning på ett material vid en förhöjd temperatur kommer material stretchas ut och så småningom fallera, även om spänningen är under sträckgränsen vid den specfika temperaturen. En tidsberoende permanent deformation under konstant last/spänning vid hög temperatur kallas *krypning.* Under denna deformation börjar materialet flyta långsamt vilket kan bidras till från diffusion, dislokationsglidning och korngränsglidning. Detta syns också i polymeriska material, och kan komma i kombination med midjebildning ochhålrumskärnbildning i sega metaller och legeringar. Ett material som fallerat av krypning har inte frakturerats, utan den punkten kallas *spänningsbrott* (eng: *stress rupture*). Kornen nära frakturytan tenderar att vara avlånga.

Spänningskorrosion

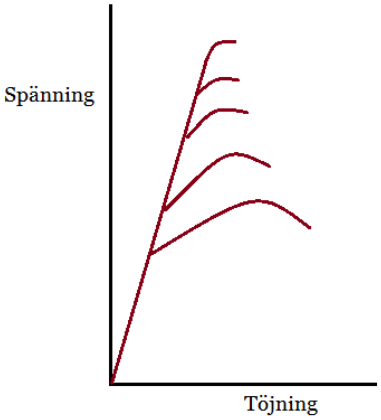
Detta är ett fenomen i vilket material reagerar med korrosiva (frätande) kemikalier i omgivningen vilket leder till sprickor och lägre styrka. Spänningskorrosion kan identifieras genom att betrakta ytan på mikroskalan – ofta syns en omfattande förgrening av sprickan längs korngränserna. Ett exempel är inorganiska silikatglaser i kontakt med vattenånga. Optiska fibrer skyddas av en polymerisk hinna för att förhindra korrosion. För att bestämma krypningsegenskaper kan ett krypningstest göras då en konstant spänning appliceras till ett uppvärmt prov som direkt stretchas elastiskt. Töjningen mäts med tiden och plottas i en krypningskurva. I första fasen rör sig många dislokationer och deformationen ökar, men efter ett tag fastnar många vid andra brister och kurvan flackar av. Till sist börjar midjeavsmalning och spänningen ökar vilket gör att deformationen accelererar tills provet går av.

Dislokationsstigning – Högre temperaturer tillåter dislokationer att stiga i ett metalliskt material genom att atomer antingen rör sig från eller mot dislokationen genom diffusion. Detta gör att dislokationen flyttar sig därefter, vinkelrätt och inte parallellt gentemot glidplanet. Den rör sig urpsrungligen från gitterdefekter och skapar deformation även vid låga spänningar. I krypning i polykristallina keramer är andra faktorer som t ex korngränsglidning och kornbildning särskilt viktiga.

Kap 8 – Härdning och glödning

Härdning kräver att metallen/legeringen är segt, och används för att stärka det. Hos polymerer fungerar metoden helt annorlunda, och fungerar inte alls bra hos keramer och inorganiska glaser.

Kallbearbetning vs spännings-töjnings-kurvan



Om vi gör ett dragprovstest på ett metalliskt material som tidigare utsatts för en spänning högre än sträckgränsen kommer den nu inte att plastiskt deformeras förrän efter denna nya spänningsgräns, *flödesspänningen*. Om vi gör detta om och om igen mer allt högre spänning ökar vi flödesspänningen och dragstyrkan samt minskar materialets seghet. Tillslut kommer flödesspänningen, dragstyrkan och brytstyrkan vara lika stor och ingen seghet finns kvar, materialet kan inte deformeras mer. Detta kallas att vi *töjningshärdat* eller *kallbearbetat* materialet medan vi samtidigt deformerat det. Det finns många metoder att göra detta på, exempelvis *valsning* (skapar plattor genom att rulla det genom två cylindrar och samtidigt pressa samman dem), *smidning* (deformerar metallen till en formhålighet), *dragning* (stav pressas genom munstycke och skapar t ex vajrar) samt *extrudering/strängsprutning* (se Fried kap 11).

Kallbearbetning är ett effektivt sätt att forma metalliska material samtidigt som man ökar deras styrka. Olika material svarar olika effektivt på kallbearbetning.

Mekanismer och egenskaper

Styrkan ökar genom att vi ökar antalet dislokationer i materialet. Efter att en dislokation fastnat och vi fortsätter öka spänningen försöker den röra sig genom att böja sig, den kan röra sig så långt att en loop skapas. När den tillslut når sig själv skapas en ny dislokation – detta kallas *Frank-Read-source*. När det finns för många dislokationer interfererar dem med sina egna rörelser vilket ökar styrkan men minskar segheten. Glaser innehåller inte dislokationer och kan därför inte härdas. Termoplaster som deformeras stärks, men inte genom dislokationer utan genom kedjelinjering och ev. lokal kristallisation.

Vi kontrollerar töjningshärdningen genom att kontrollera mängden plastisk deformation. Den är ändlig just eftersom ett material som förlorat sin seghet blir sprött och bryts. Vi kan också förutse ett materials egenskaper utefter hur mycket bearbetning som gjorts.

Mikrostruktur och restspänningar

Under plastisk deformation genom kall- eller varmbearbetning produceras ofta en mikrostruktur med avlånga korn i spänningsriktningen.

Anisotropiskt beteende

Kornen roterar samtidigt som de sträcks ut vilket gör att vissa kristallografiska riktningar och plan blir linjerade med spänningsriktningen vilket gör att vissa orienteringar utvecklar ett *anisotropiskt beteende*. I processer som tråddragning och extrudering skapas en *fibertextur* vilket ger högst styrka längs trådens axel vilket är vad vi vill ha! Lägg märke till att det liknar härdning hos termoplaster. I processer som valsning orienterar sig korn i de riktningar som materialet kristallografiskt föredrar vilket ger en *bladtextur*. Egenskaperna beror här på i vilken rikting man mäter.

En del av den påladga spänningen, ca 10 %, är lagrat som restspänningar i den intrasslade dislokationsstrukturen vilket ökar materialets totala inre energi. Ju högre kallbearbetning, desto högre inre energi. De är inte alltid önskvärda och kan tas bort genom en värmebehandling som vi kommer till senare i kapitlet. Restspänningarna är inte enhetliga genom materialet och påverkar materialet förmåga att bära laster.

Kallbearbetningsegenskaper

Det finns en del för- och nackdelar med att kallbearbeta ett material:

- vi kan stärka ett metallisk material samtidigt som vi formar det
- vi kan erhålla perfekta dimensioner och ytor
- billig metod för att skapa stora mängder av små delar, inga legeringar krävs heller
- vissa metaller, t ex HCP-Mg, har en begränsat antal glidplan och är spröda vid rumstemperatur och kan inte bearbetas så mycket
- seghet, konduktivitet och korrosionsmotstånd försämras av kallbearbetning. Å andra sidan är försämringen av konduktivitet mindre än för andra processer och funkar för att stärka t ex kopparledningar

- kontrollerade restspänningar och anisotropiskt beteende kan vara en fördel, men är de inte kontrollerade försämras materialegenskaperna kraftigt
- kallbearbetningens effekt försämras vid högre temperaturer och kan alltså inte användas för komponenter som skall fungera under höga temperaturer då rekristallisation (se nedan) skulle orsaka en katastrofal sänkning i styrka
- vissa deformationsprocesser kan endast fungera under kallbearbetning

Glödning (eng: Annealing)

Vissa egenskaper hos kallbearbetning gör att man i vissa fall letar efter andra alternativ. Glödning är en värmebehandling som eliminerar vissa eller alla effekter från kallbearbetning. Vid låga temperaturer kan det användas utan att påverka materialets mekaniska egenskaper. Om alla effekter elimineras är materialet åter igen mjukt och segt men har fortfarande en fin yta och fina dimensioner. Genom att kombinera kallbearbetning och glödning i cykler kan man därför genomföra stora deformationer. Glödning används också som ord för att t ex eliminera restspänningar i glas och för att nå maximal seghet i gjutjärn även utan föregående kallbearbetning. Glödning genomförs i tre steg:

1. **Återhämtning**.
   Det kallbearbetade materialet består av deformerade korn innehållande stora intrasslade deformationer. När den först värms tillåts dislokationerna att röra sig och forma en särskild struktur, dock är dislokationsdensiteten oförändrad vilket innebär att även de mekaniska egenskaperna är det. Detta tar bort restspänningarna och återställer konduktiviteten samt ökar ofta korrosionsmoståndet.
2. **Rekristallisation**
   Efter en viss temperatur börjar små nya korn kärnbildas vid cellgränserna av strukturen vilket reducerar antalet dislokationer helt vilket gör att materialet har låg styrka men hög seghet. Denna temperatur kallas *rekristallisationstemperaturen* och är inte fix utan liknar smältpunkten.
3. **Korntillväxt**
   Vid ännu högre temperatur sker både återhämtning och rekristallisation snabbt och skapar en fin kornstruktur. Är temperaturen hög nog börjar kornen växa och sluka de mindre kornen, vilket dirvs utav minskningen i korngränsyta. Denna effekt är nästan alltid oönskad.
   Keramiska material som inte uppvisar någon töjningshärdning uppvisar mycket korntillväxt. Ett ställe där korntillväxt är önskat är i vissa optiska komponenter eftersom större korn ger mindre ljusspridning.

För att få en god kombination av styrka och seghet behöver vi forma materialet via kallbearbetning och sedan kontrollera glödgningen för att få önskansvärd seghet. Och för att göra detta behöver vi veta materialet rekristallisationstemperatur och storleken på rekristallisationskornen. Vid den här temperaturen kommer korn att omformas till nya, likformiga dislokationsfria korn.

Temperaturen minskar med ökad andel kallbearbetning, under 30-40 % kallbearbetning kommer inte heller rekristallisation uppstå. Temperaturen minskar också med mindre originalkornstorlek, och rena metaller har lägre än legeringar. Högre smältpunkt innebär högre rekristallisationstemperatur. Framförallt definerar denna temperatur skillnaden mellan kall- och varmbearbetning!

Varmbearbetning

Bearbetning ovanför rekristallisationstemperaturen, här är metallen kontinuerligt rekristalliserad. Under processen sker ingen förstärkning, dock är mängde plastisk deformation nästan oändlig. Varmbearbetning passar bra för att forma stora delar eftersom metallen har låg sträckgräns och hög seghet. Vissa strukturer har också flera aktiva glidplan vilket tillåter mer deformation än vid kallbearbetning. Egenskaperna är inte heller isotropiska eftersom ytan svalnar snabbare än de centrala delarna vilket innebär att dessa korn blir mindre. Ytan är dock inte lika fin som vis kallbearbetning eftersom det bildas oxider under formningen. Det är också svårare att vara precis i dimensioneringen. Elastiska modulus är lägre vid högre temperaturer, och metallen komprimeras efter svalning vilket innebär att bitarna måste göras större än avsett för att kunna krympa till rätt storlek.

Kap 9 – Stelning

Industrin använder stelning som sitt primära processteg för att producera metalliska skivor och tackor, som sedan i det sekundära steget kall- och varmarbetas till sin slutgiltiga form. Vi använder det också för att behandla inorganiska glaser.

Nukleation

Nukleation – kallas även groddbildning och refererar till formationen av den första nanostora kristalliten från smält material. Bredare sagt, till det initiala steget för att formera en fas till en annan.

När en fluid övergår i en solid skapas en grönsyta mellan de bägge faserna, ju större solid desto större ökning i ytenergi. Ett *embryo* är en liten solid partikel som skapas från fluiden när atomerna klungas. Den är instabil och kan antingen växa och bli en stabil kärna eller återlösas tillbaka till fluiden. Om denna råkar ha en radie större än den kritiska radien så kommer den totala fria energin att sjunka när den växer, vilket innebär att den inte återsmälter utan blir en stabil kärna och fortsätter att växa. Att skapa så stora partiklar är mycket osannolikt vid den termodynamiska fryspunkten, vi måste underkyla den. En *homogen nukleation* uppstår när temperaturen är låg nog för vätskan att stelna. Värt att nämna är att en sådan nukleation endast uppträder under kontrollerade laborationer, istället utgör orenheter i vätskan en yta som det solida kan formeras på och skapar enkelt en radie större än den kritiska. Det innebär att vätskan behöver långt mindre underkylning för att solidifieras. Detta kallas för en *heterogen nukleation.*

Nukleationshastigheten ökar när vi först sänker temperaturen eftersom den är 0 för fryspunkten. Sen kommer den dock att sjunka igen då atomrörelser avstannar, och det finns därför en temperatur med ett maximalt värde för hastigheten någonstans däremellan. I en heterogen nukleation är den också beroende på koncentrationen av orenheter i vätskan.

Tillväxtmekanismer

Efter att en solid fas formas påbörjas tillväxten när fler atomer fastnar på den solida. Tillväxten beror på hur värmen transporteras bort från det smälta materialet. I solidifieringsprocessen gäller det två sorters värme; den *specifika* värmen och den *latenta* värmen. Den specifika värmen är värmen som krävs för att förändra temperaturen av en massa 1 grad. Denna måste först transporteras bort - antingen genom värmestrålning ut i atmosfären omkring eller genom ledning ut till den omgivande smältan - tills vätskan kyls ner till dess fryspunkt där nukleationen börjar.

För att smälta en solid krävs energi, därför kommer lika mycket energi avges när vi solidifierar samma massa, den latenta värmen. Denna måste bort innan solidifieringen kan avslutas, och hur detta görs avgör materialets tillväxtmekanism och den slutgiltiga strukturen.

Plan tillväxt

En inokulerad vätska (med nukleationsagenter) som kyls under jämvikt behövs ingen underkylning då heterogen nukleation enkelt förekommer. Den latenta värmen leds bort via det solida materialet från gränsytan mellan det solida och den fluida. Små utbuktningar osm börjar växa på gränsytan omges av fluid med högre temperatur vilket gör att tillväxten avstannar tills omgivande material hinner ifatt vilket ger en plan tillväxt.

Dendritisk tillväxt

När vätskan inte är inokulerad och nukleationen är dålig måste fluiden bli underkyld innan solider formas. Här kan utbuktningar snabbt formas och växa till sig i sk *dendtriter* som formas i gränsytan eftersom vätskan framför den är underkyld. Den latenta värmen leds in i den underkylda vätskan och ökar dess temperatur. Denna dendritiska tillväxt pågår tills den underkylda vätskan når över fryspunkten, och kvarvarande vätska solidifieras enligt plan tillväxt. Fortfarande måste den omgivande smältan ta upp den latenta värmen fårn plan tillväxt, medan dendritisk tillväxt avger den till den underkylda vätskan.

Solidifieringstiden påverkar dendriternas storlek, som mäts genom att mäta avtåndet mellan de sekundära dendritarmar. Små armar brukar betyda högre styrka och bättre seghet. För att få sådana kan man t ex producera mycket små fina vätskedroppar som fryser till, vilket kallas *spray-finfördelning*. Dessa fryser snabbt och skapar en fin dendritisk struktur. Genom att modifiera dropparna kan vi bättra på ett materials egenskaper, många komplexa legeringskompositer i form utav homogent puder kan också skapas.

Sammanfogning av metaller

Hårdlödning (eng: *brazing*) – En legering som kallas fyllmedel används för att foga samman en metall till sig själv eller till en annan metall, och har en smältpunkt ovanför 450 grader.
Lödning (eng: *soldering*) – en hårdlödningsprocess med fyllmedel som har smältpunkt under 450 grader. Det vanligaste använda materialet till detta är bly-tenn- och antimon-tenn-legeringar, men nya forskas fram eftersom bly är giftigt. I dessa båda processer smälter man inte samman metallerna utan endast fyllmedlet.
Smältsvetsning (eng: *fusion welding*) – En del av metallerna som skall sättas samman smälts och i många fall tillsätts ett fyllmedel – den smälta regionen kallas för fusionszonen. När denna stelnar sitter metallerna ihop, och ingen nukleation krävs då metallen istället påbörjar tillväxt ifrån de existerande kornen.

BMG – bulkmetalliska glaser

I komplexa legeringar är det möjligt att styra solidifieringsprocessen så att BMG skapas. I keramiska system är det ganska enkelt att skapa amorfa glas eftersom kristallisationskinetiken är relativt låg. I metaller behöver dock särskilda kompositioner utvecklas för att forma BMG. Det som är nytt med dessa material är att ganska stora bitar material kan skapas genom att använda traditionella metoder med låga kylningshastigheter.

Metalliska glaser har andra egenskaper än polykristallina metaller och legeringar. Det finns inga dislokationer eller glidsystem är glidning inte möjligt. I dragprov är de inte så sega, men fortfarande bättre än många keramer. Denna kombination av egenskaper gör att de har bra återfjädring vilket gör att de t ex är bra i golfklubbor.

Kap 10 – Fasta lösningar och fasjämvikt

Genom att introducera orenheter under processering av ett material förändrar dess komposition och influerar dess stelningsbteende. Dessa effekter kan vi undersöka med en jämviktsfasdiagram. Denna skildrar olika fasers stabilitet, och vi kan förutse hur ett material solidifieras under jämvikt samt vilka som kommer bara termodynamiskt stabila och vid vilka koncentrationer faserna borde finnas.

Fas – en unik form som ett material kan existera i
Fast lösning – solitt material i vilket atomer/joner sprids jämnt

Det finns två sorters legeringar: *enfaslegeringar* och *flerfaslegeringar*. I detta kapitel skall vi studera enfaslegeringar.

Fas

Kan defineras som en del eller eller hela systemet som är fysiskt homogent med sig själv och bundet av en yta så att den är mekanisk separerad från andra delar (vatten har t ex tre faser). Karakteristik:

- Genomgående samma struktur eller atomiska arrangemang
- Genomgående grovt sett samma komposition och egenskaper
- En definitiv gränsyta mellan fasen och omgivande faser

Fasregeln nedan beskriver relationen mellan ett antal komponenter och faser och de betingelser som kan förändras:

$$2 + C = F + P$$

C är antalet kemiskt oberoende komponenter i systemet (vatten är alltså en, inte två eftersom de inte kan varieras oberoende av varandra), *F* är antalet frihetsgrader (alt. antalet variabler) och *P* är antalet närvarande faser. Tvåan innebär att både temperatur och tryck får varieras. Detta gäller dock bara vid termodynamisk jämvikt vilket ofta inte gäller. En fas behöver inte vara fast/vätska/gas, det kan t ex vara två olika enhetscellsstrukturer för samma metall.

Löslighet och fasta lösningar

Det kan vara bra att veta hur mycket av ett ämne vi kan tillföra utan att skapa ytterliggare en fas, t ex en sockerlösing då vi placerar socker i vatten. Vi är med andra ord intresserad av ett materials löslighet i ett annat.

Obegränsad löslighet

T ex alkohol i vatten, eller flytande koppar i flytande nickel. Endast en fas skapas av de två, oavsett hur stor mängd alkohol vi har i. En fast lösning är inte en blandning, utan är utav en fas med nya egenskaper. På

liknande sätt kan vi skapa polymeriska material för att öka deras användbarhet genom att forma sk. co-polymerer som består av olika monomerer.

Begränsad löslighet

T ex salt/socker i vatten eller flytande zink i flytande koppar. Ett tag bildas bara en fas, men med för stor procenthalt av en särskild fas skapas istället två faser. Lösligheten ökar med ökad temperatur.

Ingen löslighet

T ex olja i vatten. De kan dock spridas i varandra (tänk såpa).

Krav för obegränsad fast löslighet

För legeringar, kraven måste mötas men räcker inte nödvändigtvis. De kallas *Hume-Rothery-reglerna*:

- **Storleksfaktor**. Atomerna/jonerna måste vara av liknande storlek för att minimera gitterspänningar.
- **Kristallfaktor**. Materialen måste ha samma kristallstruktur, annars finns någon punkt med övergång mellan två faser som inte är enhetliga.
- **Valenser**. Jonerna måste ha samma valens , annars främjas bildningen av föreningar istället för lösningar.
- **Elektronegativitet**. Atomerna måste ha ungefär samma elektronegativitet för att inte föreningar skall bildas.

Lösningshärdning

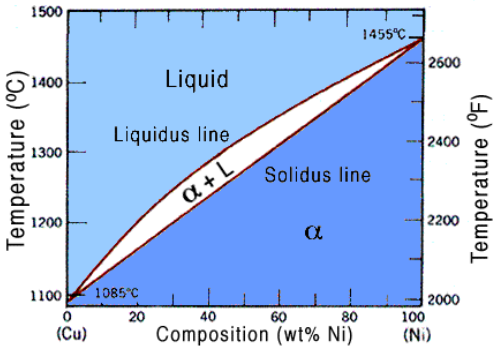
En av de viktigaste effekterna av fasta lösningar är den resulterande förstärkningen som orsakas av ökad resistant mot dislokationer. Hos keramer kan vi minnas från kap 7 att dess styrka i huvudsak bestäms av dess defekter, och fastlösningsformation har ingen stor effekt på dem på samma sätt som töjningshärdning inte hade det. Fastlösningsformation hos halvledarmaterial som kisel har stort inflytande över deras magnetiska, optiska och dielektriska egenskaper.

Graden av lösningshärdning beror på två faktorer. Först ger en stor skillnad i atomstorlek mellan originalatomen och den tillsatta atomen en ökad styrka eftersom den motverkar glidning. För det andra ger ju mer mängd legerande ämne ju större styrka – men används alltför mycket kan lösningsgränsen uppnås och en annan förstärkning kallad dispersionsförstärkning uppstå. Hos denna bidrar ytgränsen mellan de två faserna till dislokationsrörelsemotstånd. Detta står det mer om i kapitel 11. Effekterna hos lösningshärdning på material innefattar:

- Sträckgränsen, draghållfasthetsstyrkan samt hårdheten hos legeringar blir större än hos rena metaller.
- Segheten är nästan alltid lägre hos legeringar än hos rena metaller. Undantag är t ex Cu-Zi.
- Den elektriska konduktiviteten hos legeringar är lägre än hos rena metaller eftersom elektronerna sprids mer från atomen i de legerande elementen. Den är dock också mer stabil som funktion av temperaturen.
- Motståndet mot krypning och styrkeförsämring vid förhöjd temperatur höjs.

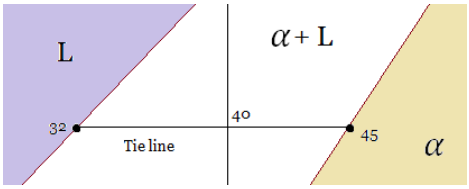
Isomorfa fasdiagram

Med endast två element eller föreningar i ett material kan ett binärt fasdiagram skapas. Isomorfa binära fasdiagram kan hittas bland många metalliska och keramiska system. I ett isomorft diagram skapas endast en fas, de två komponenterna har full fast löslighet. *Vätsketemperaturen* är den temperaturgräns över vilken ett material är helt i vätskefas. *Stelningstemperaturen* är motsvarande temperatur under vilken ett material är helt fast. Differensen mellan dessa två linjer som kan ses som det vita områdets höjd för olika procenthalter kallas *frysintervallet,* och inom detta existerar bägge faser samtidigt. α är alltså en solid fas med två komponenter.



Vi vill ofta veta hur många faser som är närvarande i en legering vid en viss temperatur, vilket kan göras med hjälp utav fasdiagrammet så länge termodynamisk jämvikt är uppfyllt. När två faser existerar samtidigt skiljer sig deras kompositioner från varandra och också från den ursprungliga kompositionen. Det finns endast en frihetsgrad inom detta område, kompositionerna är alltid bestämda när vi specifierar temperaturen. Därför kan

vi dra en korisontell linje längs en viss temperatur i området som binder ihop den solida och fluida punkterna för temperaturen. Ändarna representerar kompositionerna av de två faserna vid jämvikt. För att beräkna mängden av varje fas drar man en longitunell linje vid 40 om det t ex är 40 % Ni i legeringen. Viktprocenten av en viss fas beräknas som differensen mellan relevant punkt och 40 delat med hela längden. Denna kallas *hävstångssregeln*:



$$x = \frac{40 - 32}{45 - 32} = 0.62$$

Stelning av en lösningshärdad legering

När en sådan legering smälts och kyls kräver stelning både nukleation och tillväxt, och den påbörjas när vätskan når vätsketemperaturen (se kap 9). Tillväxt kräver i sin tur att den latenta värmen förs bort, samt att diffusion måste uppstå så att kompositionerna följer de solida och fluida kurvorna under nedkylning. Den latenta värmen tas bort över ett intervall av temperaturer vilket ger en kurva snarare än en platt linje i ett temperatur-linje-diagram vilket innebär att soldifikationen är annorlunda i legeringar jämfört med rena metaller.
I många verkliga gjutningar går kylningen för snabbt för att tillåta jämvikt vilket innebär att vi har defekten kemisk *segregation* i många gjutstycken gjorda av legeringar. För att undvika segregering kan man använda metoder som sprejfinfördelning.

Mikrosegregation – sker över små intervall och kan orsaka något som kallas *rödskörhet* vilket innebär att något smälter vid temperaturer under jämviktssolidus.
Makrosegregation. Uppstår över större avstånd (mellan ytan och centrum) och kan inte elimineras genom *homogenisering* (som med mikrosegr.) utan kan tas bort med varmbearbetning då strukturen i princip bryts ner.

Kap 11 – Urskiljningshärdning och eutektiska fasdiagram

Urskiljningshärdning

Genom att skapa ett material med två eller fler faser skapas denna förstärkning. Gränsen mellan två faser är en yta med imperfekt atomarrangemang, och i metalliska material interfererar den med dislokationsrörelser vilket förstärker materialen – *urskilningshärdning*.

I enkla urskiljningshärdade legeringar skapas små partiklar av en fas som ofta är mycket starka och hårda inuti en andra fas som är svagare och mer seg. Den senare fasen kallas *matrix*. Den härdade fasen kan kallas *utfällning* eller *dispergerad fas* beroende hur legeringen är formad. Om en fas eller en blandning har en mycket karakteristiskt utseende kan den kallas för en *mikrostrukturell komponent*. För att en urskiljningshärdning skall uppstå måste den dispergerade fasen/utfällningen vara liten nog för att vara effektiva hinder för dislokationer. I de flesta fall uppstår urskiljningshärdning genom fasövergångar – i detta kapitel koncentrerar vi oss på en stelningsövergång då en vätska stelnar och samtidigt bildar två solida faser vilket kallas en *eutektisk reaktion*. Denna är extra viktig i gjutjärn och många aluminiumlegeringar.

Det finns ett par allmänna faktorer att ta hänsyn till när man bestämmer hur matrixen och den dispergerade fasen påverkar en legerings generella egenskaper:

1. Matrixen ska vara mjuk och seg. Den dispergerade fasen hård och stark.
2. Den dispergerade fasen ska vara okontinuerlig och matrixen kontinuerlig eftersom sprickor i den första kan forplanta sig i hela materialet.
3. Den dispergerade fasens partiklar skall vara små och många, vilket ökar chansen att de kommer att störa dislokationsrörelser då ytarean ökar markant.
4. Den dispergerade fasen skall vara rund hellre än nålformad eller vass eftersom chansen är mindre att de kommer att initiera sprickor.
5. Högre koncentration av den dispergerade fasen ökar legeringens styrka.

Intermetalliska föreningar

En sådan förening är uppbyggd av två eller flera metalliska ämnen som skapar en ny fas med sin egen komposition, kristallstruktur och egenskaper – de är nästan alltid hårda och sköra och mycket lika keramer

mekaniskt sett. Ofta innehåller urskiljningshärdade legeringar en intermetallisk förening som sin dispergerade fas – men föreningarna används för applikationer även på egen hand.

Stökiometriska intermetalliska föreningar har en fix sammansättning och används t ex för att stärka stål som Fe_3C. Dessa föreningar representeras i ett fasdiagram av en vertikal linje
Ickestökiometriska intermetalliska föreningar har en bredd av sammansättningar och kallas ibland för mellanliggande fasta lösningar.

Fasdiagram med tre-fas-reaktioner

Många binära fasdiagram är mer avancerade än det isomorfa från kap 10, följande innehåller tre separata faser. Varje reaktion kan identifieras av följande:

1. Finn en horisontell linje i fasdiagrammet, denna indikerar tre-fas-reaktionen och representerar temperaturen där reaktionen äger rum under jämvikt.
2. Finn tre tydliga punkter på linjen, två ändpunketr samt en tredje mellan de bägge som inte behöver ligga mitt emellan dem. Denna tredje punkt representerar sammansättningen då reaktionen uppstår.
3. Titta ovan den tredje punkten och identifiera den fas eller de faser som är närvarande och gör samma sak nedanför punkten. Skriv sedan i reaktionsform faserna ovan som övergår i faserna under, och jämför med reaktionerna i bilden på nästa sida.

De *eutektiska*, *periktetiska* och *monotektiska* reaktionerna är en del av stelningsprocessen. Legeringar som används för gjutning och lödning utnyttjar den låga smältpunkten och att det inte finns något frysintervall i den eutektiska reaktionen. I det monotektiska diagrammet finns en slags ”kupol”, något som kallas blandbarhetslyfta (eng: *miscibility gap*) där två vätskefaser existerar samtidigt. I många system finns ett metastabilt sådant där området sträcker ut sig nedanför vätskeregionen. Både den eutektoida och den perektoida reaktionen är helt fast lösnings-reaktioner. Den eutektoida reaktionen bildar en grund för värmebehandling av flera legeringssystem, bland dem stål. Den perektoida reaktionen är extremt långsam och skapar ofta oönskade ej jämviktsstrukturer i legeringar. Alla fem reaktioner uppstår vid en fix temperatur och sammansättning.

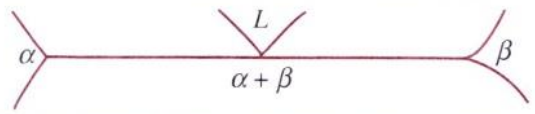
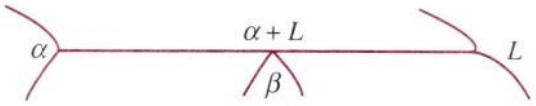
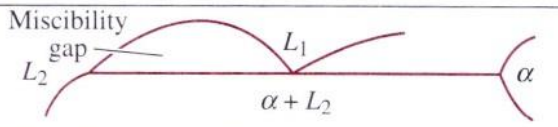
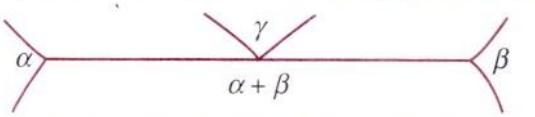
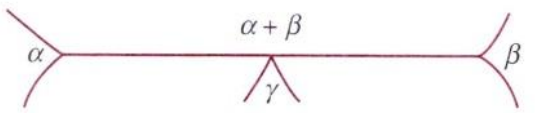
Eutectic	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectic	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotectic	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoid	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoid	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

Figure 11-4 The five most important three-phase reactions in binary phase diagrams.

Gibbs regel för tre faser vid konstant tryck lyder:

$$1 + C = F + P$$

Här har vi två komponenter *C* och tre faser *P* vilket ger oss frihetsgraden *F* = 0. Det innebär att när allatre är i jämvikt under reaktioner finns inga frihetsgrader. Av dessa fem faser kan endast den eutektiska och den eutektoida leda till urskiljningshärdning.

Eutektiskt fasdiagram och eutektiska legeringar

Vi tittar nu på en Pb-Sn-system eftersom det är ett bra sätt att betrakta den eutektiska reaktionen. Det finns fyra sorters legeringar i detta system:

Fastlösningsegeringar – 0-2 % Sn
En enfasig fast lösning av α formas under stelning. Dessa stärks utav lösningshärdning och genom att kontrollera stelningsprocessen för att göra kornen finare.

Legeringar över löslighetsgränsen – 2-19 % Sn
Stelnar också och skapar en fast lösning av α i en enhetlig fas. Medan legeringen fortsätter att stelna uppstår dock en fast-lösningsreaktionen vilket låter en andra fast fas β att fällas ut från den ursprungliga α-fasen. Det innebär att så fort en smälta med 2-19 % tenn kyls ner förbi löslighetskurvan är löslighetsgränsen överskriden och en liten mängd β bildas. Vi kan kontrollera egenskaperna hos denna legering genom att lösningshärda α, kontrollera mikrostrukturen genom processen samt kontrollera egenskaperna hos och mängden β som bildas. Dessa sammansättningar som bildar en fas vid hög temperatur och två vid en lägre passar för åldrings- eller utfällningshärdning.

Eutektiska legeringar – 61.9 % Sn
Eutektiskt betyder enkelt sammansmält. En legering med eutektisk sammansättning har den lägsta smältpunkten. Här finns inget frysintervall, dvs stelning uppträder bara vid en enda temperatur – här 183 grader. Ovanför den är hela legeringen flytande och måste därför innehålla 61.9 % Sn. När atomerna omfördelas under den eutektiska stelningen skapas en karakteristisk mikrostruktur som i detta system bildar en lamellär plattliknande struktur.

Hypo- och hypereutektiska legeringar 19 – 61.9 % Sn / 61.9 – 97.5 % Sn
En *hypoeutektisk legering* har en sammansättning som ligger mellan den vänstra sidan i fasdiagrammet av hjälplinjen och den eutektiska sammansättningen. När legeringen svalnar börjar vätskan stelna vid vätsketemperaturen och skapa solitt α, men är inte klar förrän den genomgått en eutektisk reaktion vilket innebär att en lamellär struktur bildas runt kornen av α . Detta gäller bara när den vertikala linjen för sammansättningen går igenom både vätskekurvan och den eutektiska linjen. Den motsvarande för högersidan i fasdiagramemt kallas för en *hypereutektisk legering*, vilket här innebär 61.9 – 97.5 % Sn.

Egenskaper

Varje fas i en eutektisk legering är mer eller mindre lösningshärdad. Vi kan influera dess egenskaper genom att kontrollera mängden och mikrostrukturen hos legeringen. Eutektiska korn groddbildas och växer individuellt, och i dessa är den lamellära orienteringen densamma. Om vi gör kornen finare ökar vi styrkan hos legeringen. Avståndet mellan två lameller av samma sort kan också avgöra vissa egenskaper. Ett mindre avstånd ökar också styrkan och bestäms av tillväxthastigheten.

Vi kan också kontrollera egenskaperna genom den relativa mängden av den primära mikrokonstituenten och den eutektiska. Med ökande mängd av den starkare mikrokonstituenten ökar också legeringerns styrka. När be bägge faserna har ungefär samma styrka förväntas den eutektiska legeringen vara som starkast tack vare effektiv urskiljningsförstärkning.

Alla eutektiska legeringar har inte en lamellär struktur, utan mikrostrukturen beror av kylningshastigheten, närvarande orenheter och legeringens natur. I Al-Si-legeringar förändras strukturen av sk *modifikation* som gör att kiselfasen växer som tunna stavar mellan aluminiumdendriter. Detta förstärker legeringens dragstyrka och % förlängning.

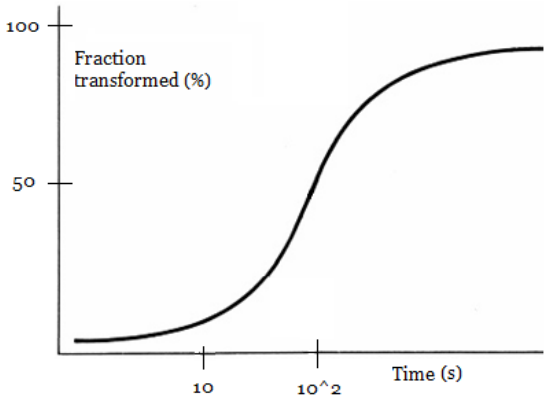
Materialbearbetning

Många bearbetningar utnyttjar det faktum att eutektiska reaktioner associeras med en låg smälttemperatur. Pb-Sn-legeringar används i legeringar till fyllmaterial för lödning (kap 9). Många gjutningslegeringar baseras också på eutektiska. Viktigt att nämna är också att dessa reaktioner är viktiga bland många keramsystem (kap 15).

Kap 12 – Fastransformation och värmebehandling

Nukleation i fasta tillstånds reaktioner

Ibland vill man kanske nukleera en fast fas i en annan fast fas, exempelvis eutektoida reaktioner. Precis som i stelning sker groddbildning enklast vid ytor i materialet för att minska ytenergin. En skillnad här är att vi kommer att få töjningsenergi på det omgivande fasta materialet.



För att en utfällningβ skall formas från den solida matrixen α måste både groddbildning och tillväxt uppstå. En lite oväntad komponent som transformationen beror på är deformationsenergin som krävs för att tillåta en utfällning att få plats i den omgivande matrixen under groddbildningen och tillväxten av utfällningen. Ibland leder detta till att fällningen får en särskild relation till matrixstrukturen som minimerar deformationsspänningen vid gränsytan mellan faserna. Dock är den största kontrollfaktorn för fastfastransformationen diffusionssteget. Transformationen går snabbare med högre temperatur eller fler nukleationsplatser. Transformationshastigheten kan ses som en S-kurva (*sigmoidal*) vilken kan beskriva de flesta fastfastransformationer. Den första flacka inkubationstiden sker är den tid som krävs för nukleation att uppstå. Den följs utav en snabb transformation då atomerna diffunderar till den växande utfällningen. Nära slutet sjunker hastigheten igen då källan av atomer börjar sina. Hos koppar ökar rekristallisationen med temperaturen eftersom tillväxt är en viktig faktor för elementet.

Total omkristalliseringshastighet är produkten av groddbildningshast. och tillväxthastighet. Omkristalliseringstiden är omvänt proportionell detta samband och ger en c-kurva kallad TTT-diagram (temp, tid, transformation).

Legeringshärdning genom att överskrida löslighetsgränsen

Fungerar på liknande sätt som för Pb-Sn (2-19 %) i kap 11. För t ex Al-4% Cu bildas vid kylning under dess vätsketemperatur en andra fas θ som ger urskiljningshärdning. Fasen existerar i en mycket liten mängd enligt hävarmsregeln för lägre temperaturer. Den kan växa i en särskilt stuktur som kallas *Widmanstättenmönster*, se bild, som minimerar spänningar och ytenergier och tillåter snabbare tillväxt men samtidigt sänker segheten och ökar brottsegheten.

Åldringhärdning

Produceras av en serie fastransformationer som leder till en enhetlig finfördelning av sammanhängande nanostora utfällningar i en mjukare segare matrix, ett vanligt exempel är Al-4% Cu. En stor fördel med åldringshärdning är att det kan användas för att öka sträckgränsen hos många metalliska material via relativt enkla värmebehandlingar och utan att förändra densitetet radikalt. Många stål åldringshärdas för att användas i många applikationer, och även nickelbaserade legeringar.

En begränsning är att härdningen kan användas över ett begränsat temperaturintervall, vid högre temperaturer börjar utfällningen växa och sedan lösas upp. Här är urskiljningshärdning som är olöslig mer effektiv än åldringshärdning. Åldringhärdningens värmebehandling består av tre steg:

1. **Lösningsbehandling**. Legeringen värms upp över vätsketemperaturen och hålls där tills en homogen solid α skapas. Detta steg löser upp den andra fasen θ och reducerar mikrosegmentering från den ursprungliga legeringen.
2. **Släckning**. Legeringen kyls snabbt (*släcks*) vilket gör att atomerna inte får tid att diffundera till potentiella groddbildningsplatser och θ skapas inte. Efteråt är strukturen övermättad och metastabil.

3. **Åldring.** Slutligen värms den fasta lösningen till en temperatur under vätskegränsen vid vilke atomer endast kan diffundera korta avstånd diffunderar till nukleationsplatser, en fällning växer till. Hålls legeringen här ett tag uppstår en jämviktsstruktur $\alpha + \theta$. Den är dock annrolunda från resultatet av en långsam kylning - θ skapas som ett ultrafint pulver

Under åldring skapas vanligtvis en kontinuerlig serie av andra fällningsfaser innan jämviktfällningen θ skapas ur dessa. Under tiden dessa utvecklas härdas legeringen, och de är också anledningen till att ge det tid är så viktigt! När den stabila ej sammanhängande θ bildas försvagas legeringen – nu är legeringen i det överåldrade tillståndet. Det finns fördelar med att använda en lägre temperatur trots att det tar längre tid - den maxiamala styrkan ökar och hålls under en längre tid, och egenskaperna är mer enhetliga. Går man såg lågt som till rumstemperatur kan härdningen ta flera dagar men ingen överåldring sker och toppstyrkan är som högst – *naturlig åldringshärdning*. I några aluminiumlegeringar vill man undvika detta och förvarar dem i kylrum. För att de inte ska bli oanvändbara.

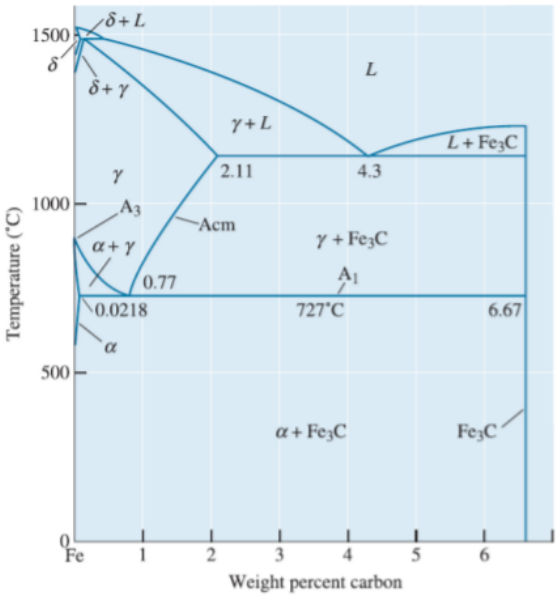
Alla legeringar är inte åldringhärdningsbara:

1. Legeringen måste uppvisa minskande fastlöslighet med minskande temperatur, alltså skapa en fas ovanför vätsketemperaturen och övergå i två faser under kylning.
2. Matrixen skall vara mjuk och seg och fällningen hård och spröd.
3. Legeringen måste vara utsläckningsbar – vissa kan inte kylas snabbt nog.
4. En sammanhängande fällning måste formas.

Eutektoida reaktionen

En fastlösningsreaktion där en solid fas övergår till två andra solida faser. Denna formation ger oss möjlighet att erhålla urskiljningshärdning. Förmågan att kontrollera uppkomsten av den eutektoida reaktionen (själva uppkomsten, sänka dess fart eller undvika den helt) är ett nyckelsteg i den termomekaniska bearbetningen av stål.

Viktigt fasdiagram för Fe-Fe_3C på nästa sida. I den kan man se att legeringen genomgår två allotropiska transformationer (övergång från fast till fast) vid värmning eller kylning. Först bildas δ-*ferrit* med BCC-struktur (inte så vanlig). Efter det går järnet över till FCC-strukturen γ eller *austenit* för att sedan återgå till BCC och α-*ferrit*. Eftersom α-ferrit och austenit har olika strukturer har de också olika löslighet eftersom hålrummen är olika stora. I FCC-strukturen är hålen större och lösligheten för C i austenit är alltså högre. *Cementit* (Fe3C) bildas när lösligheten för C i järn överskrids > 6.67 % och är extremt sprött och hårt. *Bainit* är nålformade kristaller bestående av cementit i α-ferrit.



Perlit – Den lamellära strukturen som uppstår av α (ferrit) och Fe_3C i järn-kol-systemet och är en mikrokonstituent i stål. Lamellerna är mycket finare än i bly-tenn-eutektisk eftersom järn- och kolatomer måste diffundera genom solid austenit istället för genom vätska. Perliten ger urskiljningsstyrka eftersom ferriten är relativt mjuk och seg och cementiten är hård, spröd och finfördelad.

Hypo- vs hyper-

Hypoetektoida stål innehåller mindre än 0.77 % kol och hypereutektoida mer. Ferrit är den primära mikrokonstituenten i hypoeutektoida och cementit i den hypereutektoida. Om den hypoeutektoida värms till 750 grader återstår endast austenit i mikrostrukturen, under den groddbildas ferrit i utkanterna av austeniten. Under 727 grader transfomeras resterande austenit till perlit av den eutektoida reaktionen. Strukturen innehåller då två faser – ferrit och cementit arrangerat som primär ferrit och cementit. I hypoeutektoida är den primära fasen istället Fe_3C som formar i utkanterna av austeniten. Efter kylning omger det hårda cementit öar av perlit – även stålet blir sprött.

Vi kan kontrollera reaktionen genom att ändra i legeringens sammansättning och därmed ändra mängden av den hårda sekundära fasen. Den stärkande effekten minskar dock när mängden kol blir för hög. Vi kan öka mängden perlit-korn genom att minska de austenits kornstorlek, ofta genom att producera dem vid lägre temperatur. Genom att öka kylningshastigheten reduceras diffusionsavtåndet vilket för att lamellerna skapas

tätare och därmed ökar legeringens styrka. Vi kan slutligen sänka övergångstemperaturen vilket ger en finare, starkare struktur och till och med förändra anordningen av de två faserna.

Bainit och perlit

Två sorters mikrokonstituenter skapas av övergången, perlit ovanför 550 grader, annars bainit som nämndes längre upp.

Nukleation och tillväxt i perlit

Om vi kyler fort till precis under en eutektoida temperaturen är austenit bara lite underkyld. Efter att faserna som senare skapar perlit nuklierar diffunderar atomer snabbt och grov perlit skapas. Om diffunderingen går långsammare, dvs underkylningen är större, så skapas finare perlit.

Nukleation och tillväxt i bainit

Vid en temperatur ”precis under näsan” på det c-formade TTT-diagrammet är diffusionen riktigt långsam och den totala övergången tar längre tid. Det ger också en annan mikrosturktur eftersom lamellerna i perlit skulle varit extremt tunna och gränsytan jättestor! Det hade gett en väldigt hög inre energi till stålet, som sänker den genom att låta cementiten fällas ut som runda partiklar i ferritmatrixen, denna struktur kallas bainit. Om temperaturen sänks blir bainiten ännu finare och generellt ökar styrkan och segheten minskar.

Martensinska reaktionen och seghärdning

Martensit en är fas som bildas ur en fastfastransformation utan diffundering. Tillväxthastigheten är här så hög att nukleation blir den kontrollerande faktorn. Reaktionen beror inte på tid utan bara på temperatur och går ofta snabbt. Övergången kan också drivas av mekaniska spänningar. Det mest kända exemplet är Ni-Ti-legeringar, och de har formminne.

Martensit i stål

Med mindre än 0.2 % C övergår FCC-austenit i övermättas BCC-martensit, med högre koncentrationer övergår den till BCT-martensit. Stålet måstesläckas från den stabila austenitregionen för att undvika formationen av perlit, bainit eller primära mikrokonstituenter, reaktionen påbörjas vid 220 grader. Mängden martensit ökar med lägre temperatur, och under den specifika martensittemperaturen är stålet 100 % martensit. Dess struktur är densamma som austenit. Martensit är mycket hårt och sprött med mycket fina korn, och BCT-martensit har inga glidplan. Martensitens egenskaper beror på mängden kol – lågt värde ger en ”spjälform” som inte är särskilt hårt medan ett högre ger smala plattor i olika orienteringar.

Seghärdning

Martensit är inte en jämviktsfas. När stålet värms under den eutektoida temperaturen fälls ferrit och Fe_3C ut, vilket kallas seghärdning. Denna dekomposition minskar stålets styrka samtidigt som segheten och slagståligheten ökar. Vid låga temperaturer kan seghärdning göra stålet starkare då martensiten kan skapa två övergångsfaser. Det innebär att man kan kontrollera egenskaperna genom att kontollera temperaturen.

Kap 13 - Järnlegeringar

Rostfria stål

Dessa har en utmärkt förmåga att motstå korrosion och har alla minst ca 11 % Cr vilket ger en tunn, skyddande kromoxidyta i kontakt med syre. Krom är också ett ferritstabiliserande ämne, vilket innebär att den påverkar austenite så den regionen minskar i ett fasdiagram samtidigt som ferriten ökar. För högkrom-lågkol-sammansättningar finns enfasig ferrit upp till fastfastemperaturen. Stål kan återvinnas och separeras.

Ferritiska rostfria stål

Innehåller högst 30 % Cr och 0.12 % C. Eftersom den har BCC-struktur har den god styrka och måttlig seghet hämtad från lösningshärdning och deformationshärdning/töjningshärdning. Dessa stål är magnetiska, kan ej värmebehandlas, är ganska enkla att forma och rel. billiga.

Martensitiska rostfria stål

För ett järn-kol-fasdiagram med 17 % Cr. Mängden krom är vanligen mindre eftersom den austenitiska regionen annars blir så liten att en väldigt sträng kontroll av austenitiseringstemperatur och kolinnehållet krävs. Lägre krommängd låter också kolinnehållet variera mellan 0.1 – 1 % vilket ger martensiten olika hårdhet. Materialets kombination av styrka, hårdhet och korrosionsmotstånd gör legeringen atttraktiv till applikationer som knivar och valv.

Austenitiska rostfria stål

Ett exempel är nickel, och dessa ökar den austenitiska regionen och eliminierar nästan helt ferriten från järn-krom-kol-legeringar. Om kolmängden är mycket liten skapas inte karbider och stålet är nästan helt austenitiskt. Dessa stål i FCC-form har utmärkt seghet, formbarhet och motstånd mot korrosion. Styrka fås genom omfattande lösningshärdning, kan kallbearbetas till högre styrka än ferritiskt! Ej magnetiska. Stålet har inte heller någon övergångstemperatur, vilket innebär att de har bra egenskaper och slagtålighet även vid låga temperaturer. Ett problem är att stålet vid hög temperatur karbidiseras längs korngränserna och krom utarmas i kornen – stålet korroderar lätt.

Åldringhärdade rostfria stål

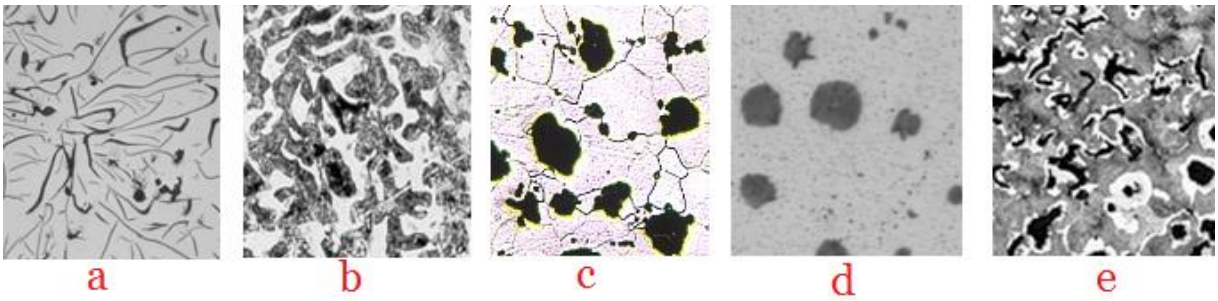
Dessa innehåller antingen Al, Nb eller Ta och hämtar sina egenskaper från lösningshärdning, deformationshärdning, åldringshärdning och den martensitiska reaktionen. Stålet hettas först upp och släcks för att austeniten skall omvandlas till martensit – högmekaniska egenskaper fås även vid lågt kolinnehåll.

Dubbelsidigt rostfritt stål

Ibland blandar man avsiktligt in olika faser i stålstrukturen – genom att kontrollera sammansättningen och värmebehandlingen kan vi skapa ett dubbelsidigt stål med ca 50 % ferrit och 50 % austenit. Detta ger oss en serie geneskaper som korrosionsmotstånd, formbarhet och svetsbarhet som inte kan fås i vanligt stål.

Gjutjärn

Dessa är järn-kol-kisel-legeringar med typiskt 2-4 % C och 0.5-3 % Si och går genom den eutektiska reaktionen vid stelning. Fem viktiga mikrostrukturen syns i bilden nedan. Alla dessa har olika egenskaper.



A – *Gråjärn* med strukturer som kallas grafitflarn
B – *Vitjärn* som består utan Fe_3C och perlit
C – *Smidbart järn* med grafitknölar
D – S*egjärn* med grafitsfärer
E – *Kompaktgrafitjärn* med kompakt grafit

Segjärn är lagom starkt där man inte behöver stål men något starkare än aluminium, som i avloppsledningar.

Eutektoidiska reaktionen i gjutjärn

Matrixen och egenskaperna hos de olika gjutjärnen bestäms utav hur austeniten transformeras under den eutektoida reaktionen (minns till ferrit och cementit i Fe-Fe_3C). Med kisel främjas en stabil reaktion där grafit bildas. Glödning ger här gjutjärnet en mjuk ferritisk matrix och inte grova perliter som i stål. Luftkylning ger en perlitisk matrix.

Gråjärn

Gråjärn är det vanligaste gjutjärnet. Den innehåller små sammankopplade grafitflarn som ger låg styrka och seghet. Punkten där flarnen når varandra är ursprungsgrafitkärnorna. *Ympning* bidrar till mindre eutektiska celler (kluster av flarn) som ökar styrkan. Högre styrka uppnås genom att minska kolekvivalenten, eller genom värmebehandling. Den har hög komprimeringsstyrka, nöntningsresistans, termisk konduktivitet och vibrationsdämpning.

Vitjärn

Vitjärn är starkt och sprött, skapas genom en eutektiskt reaktion vid 1140 grader för Fe-C och är metastabil. Den stabiliseras mha kisel som ökar temperaturen vilket efter underkylning ger grafit mer tid att växa till sig.

Smidbart järn/aducerjärn

Skapas genom värmebehandling av vitjärn vilket skapar klumpar av grafit. Den har bättre seghet vilket gör att det används i t ex verktyg och maskindelar. Under värmebehandlingen sönderdelas cementiten och grafitklumparna bildas, vars runda form ger en god kombination av styrka och seghet.

1. Under *FSG* (first stage graphitization) sönderdelas cementiten och graftifasen som kolet i Fe_3C diffunderar till grafitgroddar. Austeniten transformeras sen under kylningen vilket ger perlitisk smidbart järn.
2. För att få ferritiskt smidbart järn undergår gjutjärnet sedan *SSG* där kylningen sker mycket långsammare. Detta järn är hårdare och matrixen hård och spröd. Järnet drages sedan under den eutektoidiska temperaturen vilket seghärdar martensiten eller gör perliten sfärformad.

Segjärn

Detta gjutjärn innehåller sfäriska grafitpartiklar och skapas genom att flytande järn behandlas med en kolekvivalent med magnesium. Denna process kräver också flera steg.

1. Under en avsvavlning tas svael och syre bort ur den flytande metallen geom att tillsätta avsvavlingsagenter.
2. I *nodulizing* tillsätts Mg (ej rent, reaktionen skulle bli våldsam). Försvinner Mg bilads efter tredje steget istället kompaktgrafitjärn.
3. Under ympningen (eng: *inoculation*) orsakar FeSi-föreningar att grafiten groddbildas heterogent. Är den inte effektiv skapas istället vitjärn.

Jämfört med gråjärn är segjärn starkt och segt, men inte lika seg som smidbara järn.

Kompaktgrafitjärn

Grafitformen i detta gjutjärn är ett mellanting mellan flarn och sfärer som kallas maskformig grafit. Precis som sagt ovan skapas kompaktgrafitjärn som segjärn fast med en mindre mängd Mg. För att vara säker på att rätt grafitstruktur formas kan man tillsätta lite Ti.

Kap 14 – Icke-järnhaltiga legeringar

Inkluderar bland annat legeringar grundade på aluminium, koppar, nickel, cobolt, ädelmetaller och wolfram. När man konstruerar med dessa legeringar bör man överväga vissa egenskaper hos materialen. Bland dessa finns den *specifika styrkan*, generellt definerad som styrka/densitet. Även kostnaden är viktig och varierar stort mellan legeringarna, där fabrikation och slutfinish står för en stor del. Kompositer kan ha stora fördelar, men kan vara anisotropiska och ha begränsat temperaturintervall där de fungerar.

Aluminiumlegeringar

Aluminium är lättformat, har en hög termisk och elektrisk konduktivitet och har ingen stor seg-till-spröd-övergång för låga temperaturer. Fördelaktiga egenskaper är ickemagnetiskt beteende och moståndskraft mot korrosion och oxidation (tunn film av oxidation som skyddar mot korrosion). Den är dock ganska lättutsatt för utmattning även vid låg spänning. Aluminium är inte heller bra vid förhöjda temperaturer eftersom den har en låg smältpunkt, och har låg hårdhet vilket leder till dålig nötningsbeständighet. Aluminiumlegeringar kan delas in i två grupper: smideslegeringar och gjutlegeringar, och de i sin tur kan delas in i värme- och ickevärmebehandlingsbara.

FCC
densitet 2,7 g/cm3 (mycket låg)
smältpunkt 670° (låg)

Smideslegeringar

Skapas från plastisk deformation och har kompositioner som skiljer sig grovt från gjutlegeringar. Vissa av dem är inte åldringshärbara. Aluminiumlegeringars egenskaper är kontrollerade av kallbearbetning, fast-lösningsförstärkning och kornstorleksstyrning.

Gjutlegeringar

Många av de vanliga legeringarna innehåller tillräckligt mycket kisel för att orsaka en eutektisk reaktion vilket ger legeringarna låga smältpunkter, god *fluiditet* (förmågan hos en smält metall att flyta genom en smälta utan att solidifieras för tidigt) och god *gjurbarhet*. Gjutlegeringarnas egenskaper kontrolleras av fast-lösningsförstärkning av α-matrixen, spridningsstyrkan hos β-fasen samt solidifikation.

Kopparlegeringar

Kopparbaserade legeringar har högre densitet än stålbaserade. Även om dess sträckgräns hos en del legeringar är hög är deras specifika styrka typiskt lägre än aluminiums. De har bättre moståndskraft mot utmattning,

krypning och nötning än aluminium. Många av dem har mycket bra seghet, korrosionsmotståndskraft, elektrisk och termisk konduktivitet och kan enkelt sammanfogas eller bearbetas. Applikationer för kopparlegeringar är t ex elektriska komponenter (<0.1 % orenheter), pumpar och ventiler.

FCC
densitet 8,9 g/cm3 (hög)
smältpunkt 1085° (hyfsat låg)

Legeringarna har också dekorativa, olika färger beroende på legering. Ren koppar är röd, zinktillsatser ger en gul färg och nickel silver. Koppar korroderar lätt (rostar) och ger en grön yta som består av slags kopparsulfat vilken är olöslig i vatten men i syror.

Titanlegeringar

Titan producerar traditionellt från TiO_2. Titan har mycket gott korrosionsmotstånd, hög specifik styrka samt goda egenskaper även vid höga temperaturer. Under 535 grader har titan en skyddande tunn film, över temperaturen bryts filmen ner och den blir sprödare. Dess goda korrosionsmotstånd gör att titan appliceras som implantat, militärkomponenter, kemisk utrustning och jetmotorkomponenter.

α-fas HCP <882°< β-fas BCC
densitet 4,5 g/cm3 (låg)
smältpunkt 1668 (hög)

När titan kombineras med niob formas en superkonduktiv intermetallisk förening. När det kombineras med nickel får legeringen formminne, och med aluminium skapas en ny sorts intermetallisk legering. Titanlegeringar används i sportutrustning som t ex i golfklubbshuvuden.

Titan är allotropiskt, med HCP-struktur (α) vid låga temperaturer och övergång till BCC (β) vid 882 grader. Legerande element fast-lösningsförstärker och förändrar denna temperatur. Elementen kan delas in i fyra grupper. Tillsatser som tenn och zirkonium förändrar inte temperaturen trots att de stärker. Aluminium, syre, väte mfl (*alfa-stabilisatorer*) ökar den allotropiska transformationstemperaturen medan ett par andra ämnen (*beta-stabilisatorer*) sänker den. Den sista gruppen består av t ex mangan, krom och järn vilka producerar en eutektisk reaktion som sänker temperaturen och skapar en två-fas vid rumstemperatur!

Alfatitanlegering
Alfalegeringar härdas vid höga temperaturer i beta-regionen. Snabb kylning ger en nålformad α-struktur som har god motsåndskraft mot utmattning. Ugnskylning ger en plattare struktur som skyddar mer mot krypning.

Alfa-beta-titanlegering
Med en balans av α − och β-stabilisatorer får man en mix av de bägge faserna vid rumstemperatur, med en mikrostruktur som kan kontrolleras med värmebehandling. Den absolut vanligaste legeringen är 6 % Ti och 4 % Al. Glödgning ger en kombination av hög seghet, enhetliga egenskaper och god styrka och med en temperatur ovanför β-övergången tillåtes en liten mängd α-mängd vara kvar och förhindra kornbildning. Långsam kylning gör att likformiga α-korn skapas vilket ger god seghet och formbarhet och försvårar för utmattningssprickor. Snabb kylning skapar en nålformig α-fas. Även om sprickor lättare kan uppstå i denna strukturmåste de följa en väg längs $\alpha\beta$-gränsen.

Kap 15 – Keramer

Applikationer och egenskaper

Ett sätt att klassificera keramer är baserat på deras kemiska föreningar. De används i ett stort antal sidor av teknologin – t ex i eldfasta material, sensorer, magnetisk inspelningar, beläggningar och i slipmedel. Keramer finns också i naturen som oxider och i naturliga material som ben och tänder. De mest använda keramiska materialen är aluminiumoxid och kiseldioxid.

- *Aluminiumoxid* (Al_2O_3) används för att innehålla smält metall eller där ett material måste klara höga temperaturer. Det används också som ett dielektriskt substrat, t ex som isolatorer i tändstift.
- *Diamant* (C) är världens hårdaste naturliga material. I fabriker används industriella diamanter till slipning och polering. Det används också i smycken.

- *Kiseldioxid* (SiO_2) är förmodligen det mest använda keramiska materialet, och är en viktigt komponent i glas och många glaskeramer. Det används i värmeisolering, fiberförstärkta kompositer, eldfasta material, slipmedel, laboratoriska glas mm. Som långa fiber används kiseldioxid till optiska fibrer, och som pulver i t ex färg och bildäck.
- *Kiselkarbid* (SiC) ger ett otroligt oxidationsmotstånd även vid temperaturer nog att smälta stål och används som beläggning för metaller och annat vid extrema temperaturer. Det är också bra för att skapa värmelement till ugnar samt en halvledare.
- *Kiselnitrid* (Si_3N_4) liknar SiC men är lite svagare och kan användas till fordonsindustrins motorer och gasturbiner.
- *Titandioxid* (TiO_2) används till elektroniska keramer, och som vitt pigment i färg. Små partiklar används i solskyddsprodukter.
- *Zirkoniumdioxid* (ZrO_2) används för att skapa många andra keramer som tex zirkon, och för att göra syrgassensorer till fordon och mäta mängden upplöst syre i smält stål. Kristallen används i smycken.

Keramer har hög smältpunkt och komprimeringsstyrka, och en stor variation i drag- och flexibilitetsstyrka då de beror på defekter hos keramen och inte beror på dislokationer. Keramer är dock inte alltid spröda!

Syntes och bearbetning

Vi akn inte använda vanliga gjutnings- och termomekaniska processer för keramer eftersom de oftast(!) är spröda Detta gör att man istället utgår från ett fint pulver som skapas i önskvärda former, kallat syntes.

Framställning av pulver → homogen pulverblandning → Forma pulvret till en grönkropp → bränn materialet sintring/glasbildning → efterbehandling (polering) → färdig produkt.
Sintring – man pressar ihop keramikornen i höga temperaturer (dock under smälttemp) så att det bildas kragar där de sitter ihop. De smälter ihop pga minskning av specifik yta och korngränsdiffusion. Materialet strävar efter att få låg ytenergi.
Glasbildning - består av att man smälter ihop keramikornen pga en temp över smälttemperaturen.

Små delar kan gå på en minut, men de större produceras ofta genom processen *CIP* (cold isotactic pressing) där man lägger på tryck genom att använda olja. Dessa bitar sintras sen med eller utan tryck och används för att få högre förtätning eller mer komplexa former. Ibland använder sintringen sig också av tryck, det kallas *varmpressning* och används för keramer som inte uppträder bra utan tryck. På samma sätt kan stora bitar kompakteras under *HIP* (hot isotactic pressing) där trycket ökar densiteten utan att orsaka korntillväxt. Vissa keramer skapas via *reaktionsbindning*. Det kan göras vid lägre temperatur och ger bättre dimensionskontroll än varmpressning men ger lägre densitet och sämre mekaniska egenskaper.

Bandgjutning används för att producera tunna keramiska band och används till viktiga elektroniska förpackningar som baseras på aluminiumoxidsubstrat.
Slamgjutning använder en vattenhaltig uppslamning av pulvret. Slammet hälls i en plastgjutform, och när vattnet rinner av byggs en tjock massa upp längs formväggen. När den är tillräckligt tjock hälls resten av slammet ut, det går dock också att forsätta tills en solid massa bildats. Den torkas sedan vid hög temperatur – detta används bl a för konstkeramik.
Extrudering och formsprutning (se även Fried kap 11) är populära tekniker för att skapa tackor, tuber och isolatorer.

Egenskaper hos sintrade keramer

Här är snittkornstorleken, kornfördelningen och halten porösitet viktigt, precis som den sekundära fasen som kan finnas upplöst vid korngränserna. Keramer med små korn är starkare än grovkorniga, det minskar spänningar vid korngränserna. De magnetiska, dielektriska och optiska egenskaperna beror också på kornstorleken. I vissa applikationer måste man använda sig av enkelkristalliga material för att undvika skadliga korngränser som alltid finns i polykristallina keramer. I dessa keramer är porösitet en viktig defekt och anledningen till deras spröda struktur.

Oorganiska glaser

Ett glas är ett metastabilt material som har härdats och blivit stel utan kristallisation. Under glasövergångstemperaturen T_g är den fast.
Silikatglas är de mest använda, *kvartsglas* har en hög smältpunkt och dimoensionsförändringarna är små under temperaturväxlingar. Glasen

innehåller dock ofta oxider. Hos modifierade silikatglas bryter modifierare upp silikatnätverket om syre-silikat-förhållandet ökar väldigt mycket vilket innebär att syreatomerna inkorporeras i nätverket men resten ligger ”löst” i glaset. Modifieringen sänker också smälttemperaturen och viskositeten.

Platta glas skapas när glaset är smält och innefattar valsning genom vattenkylda cylindrar eller att låta smältglaset flyta över ett kar med flytande tenn vilket skapar en mycket fin ytstruktur. Stora speglar skapas genom att gjuta smältglas i en form och kyla så långsamt som möjligt för att undvika sprickor som en följd av restspänningar i glaset. Glödlampor och liknande skapas genom att pressa, dra eller blåsa in glas i gjutformar. Vissa glas kan glödgas för att minska restspänningarna. *Härdat glas* skapas genom att släcka ett platt glas yta med luftkylning så den kontraherar. Den klarar mycket högre dragstyrka och slag vilket används i hus, bilar, hyllor mm. *Laminerat glas* består av två glödgade glasbitar med en polymer emellan vilken gör den splitterfri vilket används i vindrutan på bilar.

Bra exempel är *borsilikatglas* som har god kemisk och dimensionell stabilitet och används i laboratorieglas. *Aluminiumsilikatglas* och *högsilikatglas* klarar sig bra vid höga temperaturer och skyddar emot hetta. Man kan också ta fram särskilda glas som t ex är ljuskänsliga.

Glaskeramiker

Dessa är kristallina material som skapas från amorfa glas i vilka vi kan utnyttja glas formbarhet. Glas har tyvärr en låg resistant mot krypning. Första steget för att skapa glaskeramiker är att vara noga med att kristallisation inte förekommer under nedkylningen. Går nedkylningen för långsamt börjar en okontrollerad groddbildning och tillväxt vilket kan förhindras genom att tillsätta modifierande oxider. Nukleationen kontrolleras på två sätt. Glaset innehåller agenter som reagerar med andra oxider och skapar faser med groddplatser. En värmebehandling genomförs som ger ett passande antal groddar under relativt låg temperatur för att maximera groddbildningen. En hög temperatur å andra sidan ökar kristallisationshastigheten vilket gör att en stor del av materialet kan bli kristallint. Denna särskilda glaskeram kan ge god mekanisk styrka och hårdhet. De viktigaste glaskeramerna används till matlagninsutrustning.

Lerprodukter

Lerprodukter är en grupp traditionella keramer som bl a används i tegel. Denna lera, *kaolinit*, tillsammans med vatten utgör ett bindmedel för det keramiska pulvret. Pudret, lera och vatten blandas och pressas sedan in i obakade formar. Högre fuktighet gör pudret mer plastiskt, och processer kallade *hydroplastisk formning* (extrudering, jiggering och handbearbeting) kan tillämpas. Ännu högre fuktighet ger slam som kan hällas i en form som förut. Efter att massan formats är den fortfarande svaga och behöver torkas och härdas. Den den torkar krymper storleken.

Eldfasta material

Dessa är viktiga komponenter i högtemperatur-bearbetningsutrustning. De måste klara sig vid höga temperaturer utan att korrodera elelr försvagas av omgivningen. De är typiskt sammansatta av grova oxiderade partiklar bundna av ett finare eldfast mateiral vilket smälter under eldning.

Sura eldfasta material inkluderar kiseldioxid, aluminiumdioxid och eldfast lera.
Basiska eldfasta material är t ex MgO, som rent har en hög smältpunkt och bra motstånd mot basattacker som ofta förekommer under ståltillverkning.
Neutrala inkluderar kromit och kan användas för att separera sura och basiska eldfasta material.
Särskilda som innefattar grafit används i många eldasta tillämingarnär syre inte är närvarande.

Andra keramiska material

Cement – keramiskt råmaterial som förenas med ett bindemedel som inte krver sintring eller eldning undergår cementering. En kemisk reaktion omvandlar en flytande massa (harts) till en solid som ansluter sig till partiklarna. Den viktigaste cementreaktionen producerar asfalt.
Beläggningar – De vanligaste är glasyrer och emaljer. Glasyrer används på ytan på keramiska material för att täta en permeabel lerkropp och för att skydda dekorationer. Emaljer används på metallytor. Båda förglasas lätt under eldning. Man kan skapa dem med färger genom att sätta till särskilda mineraler. Ett problem med dem båda är dock ytkrackelering som sker när de har en annan termisk expandering än materialet undertill.
Tunna filmer och enkla kristaller – Filmerna skapas genom olika tekniker som *förstoftning* (sputtring), *sol-gel,* och *kemisk förångningsdeposition*. Många av dessa tunna filmer prepareras och läggs på kiselskivor, glas och

andra substrat. Filmer kan t ex läggas på touch-screenskärmar och på glass för att göra det energieffektivt. Filmerna utvecklar ofta en textur eller orientering som kan vara fördelaktigt för applikationen. Enkla keramikkristaller används i många elektriska komponenter, och växer från smältor med tekniker liknande dem i kap 9.
Fiber – Skapas från keramiska material och används som förstärkning i komposita material, att väva i i textiler eller i fiberoptiska system. Den vanligaste, borsilikatglasfiber, ger styrka och stelhet till fiberglas.

Kap 18 – Magnetiska och elektriska material

Magnetiska material

En spole i vakuum ger upphov till ett magnetiskt fält *H* och en induktans *B*. Genom att sätta in en järnkärna i spolen förstärks effekten avsevärt eftersom vi får $B = \mu_r H$, där μ_r är *permeabiliteten* för järnet. Magnetism kan också karakteriseras genom *susceptibiliteten* $\chi = M/H$, där *M* är magnetiseringen eller den förstärkning som måste finnas för att få samma effekt utan som med järnkärna.

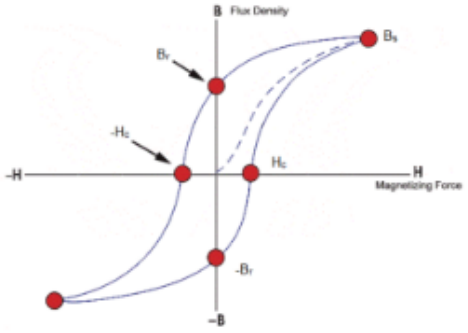
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{(H+M)}{H} = 1 + \left(\frac{M}{H}\right) = 1 + \chi$$

Material som förstärker spolens magnetfält - $\mu_r > 1, \chi > 0$
Material som försvagar spolens magnetfält – $\mu_r < 1, \chi < 0$

Bohrmagnet - det magnetiska moment som elektroner uppvisar på grund av spinn och att den orbiterar runt atomkärnan. Huruvida atomen är magnetisk eller inte beror på om elektronerna är oparade eller inte. Oparade atomer i de yttre skalen ger upphov till ett magnetiskt moment. Detta är vanligt hos övergångsmetallerna.
Diamagneter ($\mu_r \approx 0.99995, \chi \approx -0.00005$) försvagar *B* i en spole och kommer att tryckas ut från ett starkt magnetfält. (jmf. svävande groda).
Paramagneter ($\mu_r \approx 1.01, \chi \approx 0.01$) förstärker *B* i en spole och kommer att dras in. Är proportionellt mot antalet oparade elektroner. Hittas i f- och d-blocksämnen, kan även finnas i vätskor t.ex. flytande O2.
Ferromagneter (μ_r och χ höga) förstärker *B*-fältet kraftigt. Atomära magneter riktas åt samma håll i domäner som håller sig orienterade efter att *B*-fältet slagits av. Materialet måste vara fast.T ex Fe, Ni, Co, Gd, Tb.
Ferrimagneter ((μ_r och χ lite lägre) inte riktigt alla atomära magneterna riktar sig rätt. Nettoresultatet ger dock ett fält. T ex Fe3O4.
Antiferromagneter (som för paramagneter) Närbelägna atomära magneter tar ut varandra. Skiljer sig från paramagneter genom att *B* är temperaturberoende.

Hysteres i ferromagneter

För att skapa domäner i ferromagnetiska material krävs energi
→*hysteresslinga*.
B_s är den *mättade* magnetismen där alla domäner är riktade åt samma håll. Den magnetism som kvarstår när man tagit bort magnetfältet kallas för den *reminenta* magnetismen B_r. Vill man sedan avmagnetisera måste man tillföra den *magnetiserande kraften* H_c. Loopen är temperaturberoende , och över *curietemperaturen* försvinner reminensen helt och hållet.



Tekniska magneter

Mjuka/hårda magneter beror inte på mekaniska egenskaper utan har med deras ommagnetiseringsegenskaper att göra. Mjuka magneter är lätta att ommagnetisera det vill säga att hysteresslingan är smal men hög. Hårda magneter är svåra att ommagnetisera och därför är hysteresslingan både bred och hög.

Stenmagneter

Parallellt med den mittatlantiska ryggen ligger områden av stelnad lava som är magnetiserade åt olika håll. Detta uppstår eftersom jordens magnetiska poler byter håll så där vart miljonte år.

Elektriska material

Viktiga formler:

Ohms lag: $V = I \cdot R$

ρ - restivitet $R = \rho(I/A)$

σ - konduktivitet $\sigma = 1/\rho$

μ – mobilitet, q – laddning, n – laddn.bärarkonc. $\sigma = n \cdot q \cdot \mu$

Elektronledare	Konduktivitet	Bindning
Isolator	10^{-17} - 10^{-10}	Jonisk/kovalent
Halvledare	10^{-3} - 1	Polär kovalent
Metall	10^{7}- 10^{8}	Metallisk

En metalls totala resistivitet kan beskrivas som den temperaturberoende resistiviteten plus den defektberoende resistiviteten. Den defektberoende är inte temperaturberoende.

Supraledare har ingen konduktivitet under en viss kritisk temperatur T_c. Supraledare har också ett kritiskt magnetfält H_c och en kritisk strömtäthet J_c. För att få en så bra supraledare som möjligt skall dessa tre vara så höga som möjligt. För att kyla används olika köldmedier:

He(l) = 4 K
H_2 (l) = 20 K
N_2 (l) = 77 k

Typ I supraledare T_c < 4K
Typ II supraledare T_c < 18 K

På 80-talet kom de keramiska kopparoxiderna:

$(La,Sr)_2CuO_{4+x}$ → T_c = 40K
$YBa_2Cu_3O_7$ → T_c = 93K
$YBa_2Cu_3O_6$ → halvledare (felaktigt värmebehandlad)
$TiBa_2Ca_3Cu_3O_{11}$ → T_c = 122K

Fasta elektrolyter även kallade *jonledare* (ofta katjoner, ibland oxidjoner), $\sigma = nZ_q\mu$
Z är antalet laddningar, $\mu = (Z_q D)/kT$ där D är diffusiviteten = $D_0 e^{-Q/RT}$ och $k = R/N_a$.

Halvledare

Egenledande halvledare är vanliga halvledare exemplvis Si och Ge från grupp 14 i PS vilket ger 4 st valenselektroner. Bandgap ligger vanligtvis mellan 0,5- 2,5 eV. Den elektriska ledningsförmågan ökar med temperaturen (jmf. metall där konduktiviteten minskar med temp). Energin måste vara minst bandgapet för att halvledaren skall leda. Man kan dopa halvledare och få sk. *extrinsiska* halvledare, med dopnivåer E_d om man n-dopar eller E_a om man p-dopar. Det totala antalet laddningsbärare är för låg temperatur endast de extrinsiska, och för högre temperatur de extrinsiska och de intrinsiska. Vanliga halvledarföreningar:

IV: SiSi, GeGe.
III-V: GaAs, GaP, GaSb, AlP.
II-VI: CdS, CdSe, ZnSe, ZnTe, SiC.

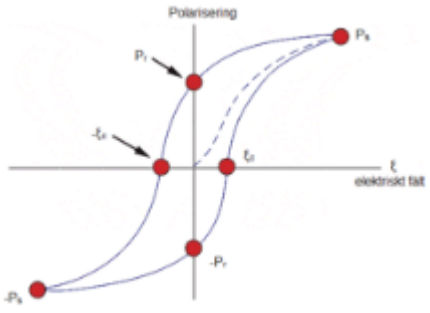
Dielektriska egenskaper för isolatorer, de är polariserbara:

1) elektronisk polarisation (förskjutning i elektronnmolnet)
2) jonisk polarisation (joner flyttar sig i förhållande)
3) molekylär polarisation (stänga in dipolen vatten)
4) korngränspolarisation (laddningsansamling)

Kondensatorn Q=CU, kapacitansen C=εA/d, ε är permittiviteten. Högt Q → högt C → hög relativ premittivitet.

Formförändringar kan ske antingen genom *elektrostriktion* eller *piezoelektricitet*. Elektrostriktionen ger små förändringar medan piezo ger större och främträder endast vid icke-centrosymmetriska kristaller. En mekanisk spänning ger upphov till ett elektriskt fält ξ och ett elektriskt fält ξ ger upphov till en mekanisk töjning. Exempel på material är SiO2, BaTiO3, PZT Pb(Zn,Ti)O3.

Piezokristaller används mycket inom nanotekniken för att förflytta något mycket små sträckor med hög noggrannhet. Man kan också använda det för att omvandla ljudvågor till elektriska impulser och vice versa.

Pyroelektricitet är när en temperaturförändring genererar en polarisering och ett elektriskt fält. Exempel är röd eller grön tourmaline.

Ferroelektricitet gäller material som är både piezo- och pyroelektriska. Har en permanent polarisation. Elektriska fält kan byta polarisationsriktning, exempel är BaTiO3. Ferroelektricitet i ett material kan beskrivas med hjälp av en hysteresslinga som visar hur polariseringen ändras beroende på pålagt elektriskt fält. P_r är den reminenta polarisationen som är kvar när det elektriska fältet tagits bort. ξ_c *coersivitetsfältet* är det elektriska fältet som behövs för att avpolarisera. Slingan uppstår för att det krävs energi för att vända på domänerna. Över en kritisk temperatur är effekten borta.