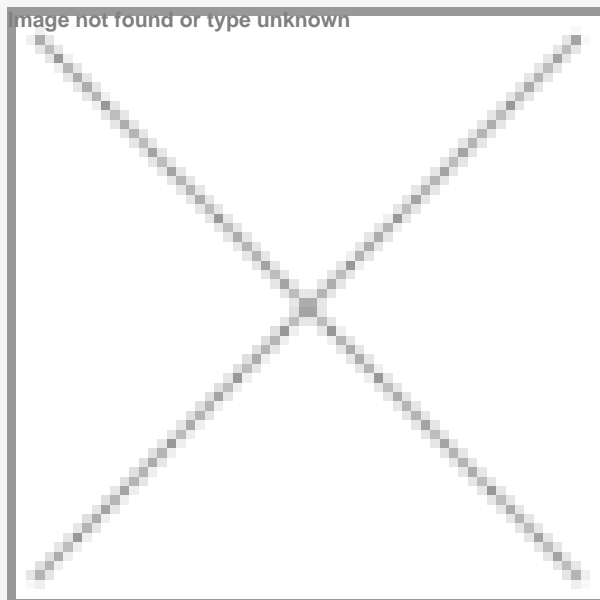


Plast Teknologi

Udvalgt sektion



Generelle egenskaber ved plast

Termiske egenskaber

Polymere materialers egenskaber påvirkes i væsentligt højere grad af temperaturen end de fleste metaller og keramiske materialer. Det kommer til udtryk ikke blot som forholdsvis store egenskabsændringer, når temperaturen ændres, men også ved at de kritiske temperaturer – først og fremmest glasovergang og smeltning – er meget lave. Derudover kan der forekomme mindre markante, termiske omdannelser. I rendyrket form forekommer glasovergang kun hos amorfe materialer. Hos de delkrystallinske plast har glasovergang kun forholdsvis lille betydning. Smeltning forekommer alene i den krystallinske fase hos delkrystallinske materialer.

Foruden de rent fysiske parametre, som er betydende for materialernes termiske egenskaber, har tiden væsentlig indflydelse, når det gælder polymerer. Forhøjet temperatur fører nemlig ofte til effekter, som kan betragtes som forandringer i polymerernes kemiske struktur. Jo længere tid materialet udsættes for varme, desto mere udpræget bliver disse forandringer normalt. Der er tale om ældningseffekter. Et almindeligt eksempel herpå er forsprødnings. En parameter som maksimal anvendelsestemperatur vil således i høj grad være bestemt af den tid, i hvilken komponenten tænkes anvendt.

Hos plastene – først og fremmest de amorfe – gælder det, at deres endelige egenskaber påvirkes af afkølingshastigheden under forarbejdningen. Denne effekt betegnes fysisk ældning og behandles senere – men først skal fænomenet glasovergang gennemgås.

Tilstandsformer – glasovergang

Tilstandsformer hos lavmolekylære stoffer

Lavmolekylære stoffer forekommer normalt i tre forskellige tilstandsformer: Fast, flydende og luftformig. Hvilken af tilstandsformerne, der er til stede i et aktuelt tilfælde, afhænger hovedsageligt af temperaturen. Stoffernes egenskaber er afgørende forskellige i de forskellige tilstandsformer.

Fast tilstandsform er karakteriseret ved forekomsten af et bestemt volumen og en bestemt form. Er molekylerne eller atomerne regelmæssigt ordnet, er stoffet krystallinsk; er molekylerne uordnede, er stoffet amorft.

Flydende tilstandsform, væske, er karakteriseret ved et bestemt volumen, men en ubestemt form. Luftformig tilstandsform, gas, karakteriseres ved ubestemt volumen – en luftart udfylder hele det rum,

den befinder sig i – og ubestemt form.

Overgangen fra en tilstandsform til en anden sker ved ganske veldefinerede temperaturer for hvert enkelt stof.

Når et stof omdannes fra fast til flydende tilstand, siger man, at det smelter. Når det modsatte sker, siger man, at det størkner eller fryser. Den temperatur, hvorved omdannelsen sker, kaldes stoffets smeltepunkt (smelte-temperatur), frysepunkt eller størkningspunkt (frysetemperatur).

Overgår et stof fra flydende til luftformig tilstand, fordampes eller koger det, mens det fortættes eller kondenseres, når det om-dannes fra luftformig til flydende tilstand. Omdannelsestemperaturen kaldes tilsvarende for kogepunkt (evt. fordampningstemperatur) eller fortætningspunkt (fortætningstemperatur).

Tilstandsformerne repræsenterer forskellige energiindhold. Ved højere temperatur tilføres et stof så megen energi, at de bevægelser og svingninger, der altid foregår i atomer og molekyler, øges. Ved fortsat energitilførsel vil først de sekundære bindingskræfter, der holder fx ionerne i et salt på plads i et krystalgitter – og dermed gør stof-fet fast – overskrides med det resultat, at stoffet smelter. Senere vil de bindingskræfter, der stadig holder stoffet sammen til en væske, også overskrides: stoffet fordampes. I damp-fasen virker ingen intermolekylære kræfter, men kun de primære bindingskræfter, som stadig holder atomerne sammen til molekyler.

Omdannelserne mellem de tre tilstandsformer, fast, flydende og luftformig, kaldes 1. ordens omdannelser.

Et stofs specifikke volumen (m^3/kg) ændres markant, når smeltepunktet passerer.

Specifikt volumen i forhold til temperatur

Image not found or type unknown

Specifikt volumen i forhold til temperatur

Ændring af specifikt volumen ved smeltning af et lavmolekylært, krystallinsk stof

Desuden er typisk også egenskaberne temperaturafhængighed forskellige i forskellige tilstandsformer. På figuren, der viser ændringer af specifikt volumen med temperaturen, angiver kurvens forskellige hældninger, at den termiske udvidelseskoefficient er forskellig i fast og i flydende tilstand.

Glasovergang – glastilstand

Polymerer opfører sig anderledes end det, der lige er beskrevet, og som gælder for krystallinske, lavmolekylære stoffer. Alle plasttyper er polymerer, men ikke alle polymerer er plast!

Ved tilstrækkeligt lav temperatur vil enhver polymer komme i en tilstand, hvor den optræder glasagtigt med hensyn til mekaniske egenskaber, idet den bliver hård, sprød og næsten ideelt elastisk. (Et ideelt elastisk materiale er karakteriseret ved, at det ved deformation og efterfølgende aflastning går helt tilbage til dets oprindelige form). Den indbyrdes bevægelighed af kædemolekylerne er forhindret; strukturen er fastfrosset. Hverken formændring eller indbyrdes glidning mellem molekylerne er mulig.

Denne tilstand kaldes glastilstanden.

Lange sidekæder og forgreninger samt tilsætning af blødgøringsmidler øger molekylernes indbyrdes afstand, hvorved deres gensidige tiltrækning nedsættes, og molekylernes bevægelighed lettes. I så tilfælde må stoffet køles længere ned, før glastilstanden kan opnås.

Når temperaturen forøges, vil de atomare svingninger i stoffet blive stadig større. Ved en vis temperatur – glasovergangstemperaturen – vil den energibarriere overskrides, som hindrer rotation af segmenter af kæde-molekylerne. Stoffet bliver blødt og gummi- eller læderagtigt, og det bliver muligt at ændre polymer-kædens form.

Specifikt volumen af poly--vinyl-acetat som funktion af - temperaturen

Image not found or type unknown

Specifikt volumen af poly--vinyl-acetat som funktion af - temperaturen

En sådan omdannelse kaldes en 2. ordens omdannelse. Der sker typisk en ændring af stoffets egenskaber.

Man ser en ændring af den termiske udvidelseskoefficient, men ændringen sker ikke springvis som i de lavmolekylære stoffer, men som en blød overgang.

Glasovergangs-tempera-tu-ren, T_g , er imidlertid ikke en materiale- eller stofkonstant. Stoffets termiske forhistorie, fx afkø-lingshastig-heden fra bearbejdningstemperatur og lagringstid ved stuetemperatur, på-virker T_g . Se figuren nedenfor.

Ændring i det specifikke volumen over tid

Image not found or type unknown

Bestemmelse af glasovergangstemperatur

Det specifikke volumens ændring med temperaturen henholdsvis 1 minut (≈ 0,02 timer) og 100 timer efter chokkøling fra en temperatur over T_g

Alle amorfe og delkrystallinske polymerer udviser glasovergang, men da fænomenet er knyttet til den amorfe struktur, vil det være mindre og mindre tydeligt, jo højere krystalliniteten er. T_g 's beliggenhed illustreres bedst ved bestemmelse af volumenudvidelsen ved opvarmning af en amorf polymer som fx i øverste figur over polyvinylacetats specifikke volumen.

I praksis ændres kurvens hældning ikke ved et skarpt knæk, men ved en jævn overgang. Man finder T_g som skæringspunktet mellem de to rette kurvestykkers forlængelse.

En polymers egenskaber ved stuetemperatur vil være væsentligt forskellige, afhængigt af om polymeren ved denne temperatur befinder sig i glastilstanden eller i den læderagtige tilstand.

Plastpolymerer* ordnet efter deres glasovergangstemperatur, T_g, i °C

Ved stuetemperatur vil stofferne i venstre søjle være i læderagtig tilstand og stofferne i højre søjle i glas-agtig tilstand.

T_g < stuetemperatur		T_g > stuetemperatur	
Polyethylen	-120	Polyamid 610	40
Polyoxymethylen	-80	Polybutylenterephthalat	40
Polyurethan, lineær	-30	Polyamid 11	45
Polyvinylidenchlorid	-17	Polychlortrifluorethylen	45
Polypropylen	-10	Polyamid 6	50
		Polyamid 66	50
		Cellulosenitrat	66
		Celluloseacetat	70
		Polyethylenterephthalat	70
		PVC	80
		Polyphenylensulfid	90
		Polystyren	100
		Acrylplast	104
		Polytetrafluorethylen	126
		Polycarbonat	150

Smelteinterval

Som tidligere beskrevet, smelter lavmolekylære stoffer ved en veldefineret temperatur, og den ved smeltetemperaturen tilførte energi medgår netop til at omdanne hele stofmassen fra fast til flydende tilstand.

Polymerer opfører sig anderledes!

Polymerer smelter over et temperaturinterval. Hvis man kan tale om en smeltetemperatur, må det være den temperatur, hvorved den sidste kry-stallit smelter. Smeltetemperaturen beror i øvrigt, ligesom T_g , på stoffets termiske forhistorie.

Efter passage af smelteintervallet antager polymererne en tilstand som en højviskos væske med viskoelastiske egenskaber. Under smelteprocessen brydes efterhånden de svageste af de sekundære bindinger.

Smelteintervallet er for amorfe stoffer som regel ret bredt (10-20 °C), mens det for delkrystallinske stoffer ofte er ganske smalt. Dette tilskrives de sekundære bindinger inde i krystallitterne, som er mere veldefinerede end bindingerne i den amorfe struktur.

Sammenhængen mellem specifikt volumen og temperatur

Image not found or type unknown

Sammenhængen mellem specifikt volumen og temperatur

Luftformig tilstand forekommer ikke hos de højpolymerer stoffer. De sekundære bindingskræfter, der summeres op over de lange kæde-molekyler, vil være så store, at molekylerne ved fortsat opvarmning vil blive termisk nedbrudt, før de intermolekylære kræfter overskrides, og stoffet fordampes.

De forskellige tilstandsformer for polymerer og overgangene imellem dem illustreres fint ved elasticitetsmodulens variation med temperaturen. Se figuren nedenfor.

Image not found or type unknown



Elasticitetsmodulens variation

Elasticitetsmodulen som funktion af temperaturen hos amorf polystyren

I hærdeplast danner molekylerne tredimensionale netværk, hvorfor molekylsegmenternes bevægelighed er stærkt begrænset. Glasovergangstemperaturen hos hærdeplast vil imidlertid variere med plastens udhærdningsgrad, idet stigende udhærdningsgrad afspejles i et tættere molekylært netværk og dermed i reduceret bevægelighed af molekylsegmenter.

Glasovergangen er væsentligt mere markant ved de amorfe stoffer end ved de delkrystallinske. Et karakteristisk eksempel er vist nedenfor, hvor elasticitetsmodulens temperaturvariation er angivet for en amorf og en delkrystallinsk polystyren.

For amorfe stoffer vil T_g normalt angive den øvre temperaturgrænse for deres anvendelse som konstruktionsmateriale, mens det ikke gælder for delkrystallinske stoffer, som normalt kan belastes til en temperatur i nærheden af det krystallinske smeltepunkt.

Image not found or type unknown



Elasticitetsmodulen i afhængighed af temperaturen hos en amorf og en delkrystallinsk polystyren

Øvrige termiske egenskaber

Fysisk ældning

Det er karakteristisk for de højpolymere stoffer, at deres egenskaber ikke kun afhænger af temperaturen, men også af den tid, stofferne er udsat for belastning. Når man fx vil bestemme en maksimal anvendelsestemperatur, må man tage hensyn til den tid, i hvilken konstruktionen påregnes anvendt. Fænomenet kaldes fysisk ældning. Det omfatter også det tidligere nævnte, at en højpolymers slutegenskaber påvirkes af afkølingshastigheden fra forarbejdningstemperaturen. Det er særligt udtalt ved de amorfe polymerer.

Termisk udvidelse

Den termiske udvidelseskoefficient af polymerer er omkring ti gange så høj som hos de gængse

metaller. Udvidelseskoefficienten stiger med faldende elasticitetsmodul. Tilsætning af fyldstoffer og forstærkningsmaterialer, fx glasfibre, medfører en reduktion af udvidelseskoefficienten. Erfaringen viser en sammenhæng mellem udvidelseskoefficient og elasticitetsmodul som vist i formlen nedenfor.

Sammenhængen mellem udvidelseskoefficient og elasticitetsmodul

Image not found or type unknown

Sammenhængen mellem udvidelseskoefficient og elasticitetsmodul

α er udvidelseskoefficienten, k er en konstant, og E elasticitetsmodulen. For de almindeligste termo-plast er $\alpha \approx 50-250 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Specifik varme

Et stofs specifikke varme eller varmeyfælde er den varmemængde, som skal til for at hæve temperaturen af 1 kg af stoffet 1°C . Polymerers specifikke varme stiger med temperaturen. For de almindeligste plastpolymerer er den specifikke varme ved stuetemperatur 1,05 til $2,3 \text{ kJ/kg} \times ^{\circ}\text{C}$

Varmeledning

Varmeledningsevnen angiver den varmemængde, som ved en bestemt temperatur pr. tidsenhed kan ledes igennem et bestemt tværsnit af et materiale. Plastpolymerers varmeledningsevne er generelt meget lav; normalt klassificeres de som varmeisolatorer. Varmeledningsevnen kan øges gennem tilsætning af varmeledende tilsætningsstoffer, fx carbonfibre og metalliske fyldstoffer.

Værdierne for de almindelige plastpolymerer varierer fra $0,1 \text{ J/m} \times \text{s} \times ^{\circ}\text{C}$ for polystyren til $0,5 \text{ J/m} \times \text{s} \times ^{\circ}\text{C}$ for polyethylen med høj massefylde.

Kuldeskørhed

Undertiden er man interesseret i et stofs kuldeskørhed eller sprødhedstemperatur, dvs. den temperatur, ved hvilken stoffet ved afkøling bliver skørt eller sprødt. Generelt bevarer plastmaterialerne deres mekaniske egenskaber ned til ret lave temperaturer. Polymethylpenten bliver dog skørt allerede omkring frysepunktet, og PVC mister slagsejhed ved ganske få minusgrader. Ellers ses i tabelværker ofte skørhedstemperaturer ned til -50 til -70°C for de almindelige plast. Der findes dog særligt kuldebestandige specialplast. For polyethersulfon oplyses -175°C og for polyimid -200°C .

Temperaturindeks

For anvendelse ved forhøjet temperatur angiver temperaturindekset den højeste temperatur, ved hvilken et materiale kan fungere kontinuerligt, uden at nogen egenskab forringes mere end 50 %. Det bestemmes, ved at man ved forskellige temperaturer registrerer udvalgte egenskabers tidsafhængighed, indtil værdierne er ændret til 50 % af udgangsværdierne.

Typisk vil man få kurver af typen som i figuren øverst på næste side. I praksis vælges normalt 20.000 timers eksponeringstid, hvilket er ca. 2,3 år.

Den egenskab, der hurtigst ændres med 50 % (her er det slagsejhed) bliver dimensionsgivende.

Det fremgår, at man kan have temperaturindeks for enkelte egenskaber eller for en samling af egenskaber. Ofte betegnes temperaturindeks som TUL, idet metoden er udviklet af Underwriters Laboratories i USA. I tabeller vil ofte angives TUL, hvor alle egenskaber er taget i betragtning, og TUL for slagsejhed.

Værdierne varierer fra 50 °C for de almindelige termo-plast til over 200 °C for nogle specialplast. I mange situationer ønsker man at kende et materiales maksimale anvendelsestemperatur. Det er dog ganske svært at angive en sådan, eftersom den påvirkes af såvel mekanisk belastning som af det omgivende miljø og af tiden. Desuden kan en temperaturgrænse ændres ved tilsætning af fyldstoffer, stabilisatorer og andre hjælpestoffer.

Image not found or type unknown



Udvalgte egenskabers tidsafhængighed ved forskellige temperaturer $T_3 > T_2 > T_1$

Temperaturindekset kan i visse tilfælde anses for den højeste anvendelsestemperatur, men den kan både være højere og lavere i andre tilfælde.

En række plastmaterialer er følsomme over for fugt, enten ved at de absorberer fugt, eller at de angribes kemisk og dermed undergår hydrolytisk nedbrydning. Polycarbonat kan i tørt miljø normalt anvendes vedvarende ved temperaturer op til omkring 135 °C, mens temperaturgrænsen i vand er 50 °C ved langtidsbelastning. Den maksimale anvendelsestemperatur i luft og i vand kan således være ens eller forskellig, afhængigt af materialets opbygning og sammensætning.

Mekaniske egenskaber

Polymerers reaktioner på mekanisk påvirkning afhænger af den kemiske sammensætning af stoffets molekyler samt af en række andre faktorer.

Middelmolekylmassen skal være over et vist minimum, før tiltrækningskraften mellem molekylerne

bliver tilstrækkelig stor til, at stoffet får nogen væsentlig styrke. Når denne kritiske værdi er nået, vil fortsat forøgelse af molekylmassen medføre en tilsvarende stigning i mekanisk styrke. Styrken stiger derefter stadig langsommere med stigende molekylmasse, indtil en grænse nås.

Principielt forløb af sammenhæng mellem en polymers trækstyrke og middelmolekylmasse

Image not found or type unknown

Trækstyrke i forhold til middelmolekylmasse

Principielt forløb af sammenhæng mellem en polymers trækstyrke og middelmolekylmasse

Ikke alene middelmolekylmassen, men også molekylmassens fordeling spiller en rolle. Det er fx vigtigt, at der ikke forekommer fraktioner med molekylmasse under en vis grænse. Med blot 10-15 % indhold af lavmolekylære fraktioner forringes alle mekaniske egenskaber væsentligt.

Krystallisation vil i kraft af den kraftigere tiltrækning mellem molekyl-erne og den større massetæthed ligeledes medføre, at polymerers mekaniske styrke forøges.

Ved orientering af kædemolekylerne vil styrken stige i orienteringsretningen, men falde i tværretningen. Man har så en anisotrop egenskabsfordeling.

Ydre blødgøring af et plastmateriale, dvs. mekanisk iblanding af hjælpe---stoffer, vil normalt altid medføre forringelse af materialets elasticitetsmodul (E-modul). Ganske små mængder af et blødgøringsmiddel kan derimod bevirke en stigning af trækstyrken, idet blødgøringsmidlet som en slags indre smøremiddel kan bevirke, at molekylernes mulighed for at orienteres lettes, hvorved materialet får styrke i orienteringsretningen.

Fugtoptagelse, som forekommer fx i polyamiderne, kan have en ret markant blødgørende virkning på mange plastmaterialer.

Etablering af tværbindinger, hvilket under visse betingelser kan forekomme i termoplast, vil medføre en forøgelse af elasticitetsmodulen. Træk-styrken kan derimod blive reduceret, hvis der opstår et stort antal tvær-bin-dinger, idet de kan forhindre, at belastningen fordeles jævnt på hovedmolekylkæderne.

Image not found or type unknown



Arbejdslinjens forløb ved forskellige temperaturer for celluloseacetat

Som det senere vil blive diskuteret nærmere, vil temperaturen have væ-sentlig indflydelse på polymerers

opførsel ved mekanisk belastning. Ved stigende temperatur aftager elasticitets-modul, flydespænding og træk-styrke. Imidlertid findes der tilfælde, hvor trækstyrken først tiltager lidt med stigende temperatur for derefter at aftage på normal vis. Det tilskrives, ligesom med indflydelsen af blødgøringsmidler, kædemolekylernes stigende bevægelighed og dermed deres større evne til at orienteres. På figuren til venstre vises temperaturens indvirkning på deformationsforløbet af en termoplast.

Krybning

Når polymerer udsættes for mekanisk belastning, vil de deformeres ligesom alle andre materialer. Ved konstant belastning vil metaller i det væsentlige deformeres konstant. For polymerer gælder det derimod, at deformationen med tiden vil øges ved konstant belastning. Materialerne giver så at sige langsomt efter. Fænomenet kaldes krybning, og det er en væsentlig dimensioneringsfaktor for plastmaterialer.

Man taler om tre typer af deformation:

1. Elastisk deformation
2. Viskoelastisk deformation
3. Plastisk (eller viskos) deformation

Elastisk deformation optræder momentant, når et materiale påtrykkes en mekanisk spænding. Den er uafhængig af tiden og vil i reglen være proportional med spændingen (Hookes lov). Metalkonstruktioner dimensioneres almindeligvis på basis af elastisk deformation.

For de fleste plastmaterialer er viskoelastisk og plastisk deformation imidlertid meget udpræget. Læren om og studiet af materialers flydeforhold kaldes reologi. De reologiske forhold for polymerer er yderst vanskelige at afklare. For nemheds skyld benytter man sig ofte af simple modeller for at beskrive det, man kan observere.

Elastisk deformation kan således forklares som en vis udretning af valensvinkler i de enkelte atomer – en reversibel deformation.

Der sker imidlertid også en vis udretning af de ellers til en vis grad sammenkrøllede kædemolekyler, men den proces tager tid – den elastiske reaktion forsinkes. Denne viskoelastiske deformation er ligeledes reversibel.

Den plastiske deformation kan forklares ved, at kædemolekylerne glider i forhold til hinanden – en ændring, som er irreversibel og følgelig an-svar-lig for den blivende deformation, som man altid kan observere i et plast-materiale, der har været udsat for mekanisk belastning i nogen tid.

Simpel deformationsmodel for et polymert materiale

Image not found or type unknown

Simpel deformationsmodel for et polymert materiale

Modellen er opbygget af fjedre og dæmpere

Figuren ovenfor er en mekanisk model til forklaring af de specielle deformationsforhold for plast. Den er sammensat af to gange to elementer, en fjeder og et væskestempel (en oliedæmper). Elementerne er to og to koblet henholdsvis parallelt (Kelvin-element) og i serie (Maxwell-element).

Det tilhørende deformationsbillede er vist på figuren nedenfor, hvor deformationen er afbildet som funktion af tiden efter påtrykning af en konstant mekanisk last og efterfølgende aflastning til nul.

Principielt forløb af krybekurve med belastning ved t_1 og aflastning ved t_2

Image not found or type unknown

Principielt forløb af krybekurve med belastning ved t_1 og aflastning ved t_2

De enkelte faser i krybeforsøget illustreres ved den mekaniske model nedenunder.

Mekanisk model af faserne i et krybeforsøg

Image not found or type unknown

Mekanisk model af faserne i et krybeforsøg

Bogstaverne refererer til punkterne på krybekurven ovenover.

Til tiden t_1 påtrykkes en last svarende til, at der ophænges et lod i kroge under stemplet fornedent.

Herved deformeres materialet øjeblikkeligt svarende til punkt A på krybekurven. På modellen illustreres det ved udretning af den øverste fjeder.

Efter nogen tid ved den konstante last vil deformationen øges svarende til punkt B på krybekurven. Denne reaktion er sammensat af en visko-elastisk og en plastisk (viskos) flydning; stemplerne i modellen har haft tid til at vandre fra nederste til øverste stilling.

Til tiden t_2 , der svarer til punkt B, aflastes materialet til nul (loddet under fjederen fjernes). Øjeblikkeligt trækker materialet sig sammen, idet den rent elastiske del af deformationen straks op-hæves. På den mekaniske model illustreres dette ved sammentrækning af den øverste fjeder svarende til situation C.

Efterhånden som tiden går, vil den viskoelastiske del af deformationen ophæves; punkt D nås. På modellen sørger den anden fjeder for sammentrækning af det øverste stempel svarende til situation D. Det ses, at deformationen aldrig bliver nul, men nærmer sig mere og mere til en bestemt værdi: Den plastiske deformation ophæves ikke, men manifesterer sig som en blivende deformation.

Denne fremstilling må dog betragtes som overordentligt forenklet, idet de faktiske forhold er mere komplicerede. Modellen illustrerer blot hoved-træk-kene i polymerernes reologiske forhold. En svaghed er det blandt andet, at temperaturen er forudsat konstant.

Spændings-tøjningsforløb

Ligesom ved metallerne har man ved de polymere materialer fornøjelse af at optegne spændings-tøjningsdiagrammer, som også kaldes arbejdslinjer.

Først optegnes kurver over sammenhængen mellem deformationen (fx forlængelsen) af en materialeprøve og den til deformationen nødvendige kraft. Da kraften naturligvis vil være dobbelt så stor, hvis prøve-legemets tværsnitsareal fordobles, omregnes kraften altid til en spænding, dvs. kraften pr. tværsnitsarealenhed. På samme måde omregnes deformationen til den relative deformation, hvilket vil sige den aktuelle deformation i forhold til den aktuelle måleafstand.

Principielt spændings-tøjningsdiagram

Image not found or type unknown

Principielt spændings-tøjningsdiagram

Det viser sammenhængen mellem spænding (σ) og tøjning (ϵ) ved trækbelastning af et tænkt materiale.

Relativ deformation kaldes tøjning. Derved kan man med ret stor tilnærmelse tillade sig at sammenligne arbejdslinjer, der er baseret på forskellige størrelser af prøvelegemer. Normalt tænker man for det meste på træk-prøvning, når man taler om spændings-tøjningsdiagrammer, men der fås tilsvarende arbejdslinjer ved alle andre deformationstilfælde, det være sig tryk-, bøjnings-, forskydnings- eller vridningsbelastning.

Kurvens første stykke er retlinjet, dvs. der er proportionalitet mellem den påtrykte spænding og den deraf følgende relative forlængelse, hvis Hookes lov gælder for det pågældende materiale. Materialets

elasticitetsmodul, E , kan da beregnes som forholdet mellem spændingen og tøjningen ved at benytte Hookes lov:

Hookes lov

Image not found or type unknown

Hookes lov

E er elasticitetsmodulen, σ er spændingen, og ϵ er tøjningen.

Man kan også sige, at elasticitetsmodulen, E -modulen, er den spænding, som vil medføre 100 %'s tøjning, hvis ellers materialet ikke brydes forinden og det var lineært elastisk helt til brud.

Ved spændinger ud over det hookeske område afviger kurven fra den rette linje, dvs. elasticitetsgrænsen overskrides. Arealet under arbejdslinjen (A på figuren nederst på forrige side) er et udtryk for det til deformationen udførte arbejde. Hos termo-plast med delkrystallinsk struktur og hos hærdeplast gælder Hookes lov i det elastiske område, mens det ikke er tilfældet hos amorfe termoplast.

Principielt forskellige forløb af spændings-tøjningskurver

Image not found or type unknown

Principielt forskellige forløb af spændings-tøjningskurver

Kurvernes endepunkter repræsenterer brud. A repræsenterer et sprødt materiale, B et sejt materiale, og C et materiale med en flydegrænse, kendetegnet ved σ_s , og påfølgende plastisk deformation.

Som det fremgår af det foregående om krybning, har tiden afgørende indflydelse på de polymeres flydeforhold. Derfor vil arbejdslinjer, der optegnes ved forskellige deformationshastigheder, være forskellige. For at få et fuldstændigt billede af en polymers flydeforhold må man derfor foretage trækforsøg ved forskellige deformationshastigheder og om nødvendigt også ved forskellige temperaturer.

Arbejdslinjens variationer med deformationshastigheden, $\dot{\epsilon}$, og temperaturen, T

Image not found or type unknown

Arbejdslinjens variationer med deformationshastigheden, $\dot{\epsilon}$, og temperaturen, T

Typiske arbejdslinjer for en polyamid med forskelligt fugtindhold

Image not found or type unknown

Typiske arbejdslinjer for en polyamid med forskelligt fugtindhold

Den øverste kurve repræsenterer næsten tørt materiale. Polyamiden er delkrystallinsk, og vi har et tilnærmelsesvis lineært begyndelsesstykke, hvis hældning angiver elasticitetsmodulen. Det elastiske område følges af en krumning af kurven svarende til viskoelastisk deformation. Det sidste – i visse tilfælde næsten retlinjede – forløb repræsenterer det plastiske område. Det ses også, hvorledes arbejdslinjen ændrer sig, når materialet absorberer fugt; der sker en vis blødgøring.

På tilsvarende måde som ved trækprøvning kan man ved trykprøvning og ved bøjeprovning opnå lignende arbejdslinjer og værdier af brudspænding, elasticitetsmodul og tøjning. Bøjeprovning kan udføres ved trepunktsbøjning og ved firepunktsbøjning, der giver lidt afvigende resultater. Det menes, at firepunktsbøjning giver mest realistiske resultater. Ved bøjningsbelastning vil reaktionen i materialet være en kombination af træk- og trykspændinger med en principiel fordeling som vist på figurerne nedenfor.

A.Princippet i trepunktsbøjeprovning B.Princippet i firepunktsbøjeprovning Spændingsfordeling i en bjælke mellem de indre anlægs punkter ved firepunktsbøjning

Image not found or type unknown

A.Princippet i trepunktsbøjeprovning

Image not found or type unknown

B.Princippet i firepunktsbøjeprovning

Image not found or type unknown

Spændingsfordeling i en bjælke mellem de indre anlægs punkter ved firepunktsbøjning

Da polymerer, som tidligere omtalt, udviser udpræget krybning ved længere tids belastning, må man benytte sig af krybedata ved dimensionering af plastemner. Belastes et plast-materiale med konstant last ved konstant temperatur, vil deformationen øges med tiden og give en principiel krybekurve som vist på figuren til nedenfor.

Principiel krybekurve ved konstant last og konstant temperatur

Image not found or type unknown

Principiel krybekurve ved konstant last og konstant temperatur

Vi kan genkende de tidligere omtalte tre komponenter, som den totale deformation er sammensat af. Den elastiske deformation medfører en øjeblikkelig initial-tøjning. Den visko-elastiske deformation ses som primær krybning, og den plastiske deformation som det stort set lineære forløb, der benævnes sekundær krybning.

For at få brugbare krybedata må man udføre krybeforsøg ved forskellige laster og forskellige temperaturer. Ved at afbilde kurveskarer i samme diagram kan der uddrages en række ingeniørmæssigt interessante data, fx krybemodul, krybebruddata og isokrone spændings-tøjningsforløb.

Skare af krybekurver ved forskellige spændinger

Image not found or type unknown

Skare af krybekurver ved forskellige spændinger

Så-dan et diagram er imidlertid ikke altid operationelt. Derfor konstruerer man ud fra diagrammets oplysninger en række andre diagrammer, som hver for sig har deres fordele, afhængigt af hvilken opgave der skal løses.

Et eksempel er et såkaldt isokront spændings-tøjningsdiagram (iso = samme, kronos = tid), hvor kurverne gælder for forskellige, konstante tider.

Isokront spændings-tøjningsdiagram for polystyren optegnet ved to forskellige temperaturer

Image not found or type unknown

Isokront spændings-tøjningsdiagram for polystyren optegnet ved to forskellige temperaturer

Et andet eksempel er det isometriske spændings-tidsdiagram, hvor det er hensigtsmæssigt at bruge logaritmisk tidsakse. Her er det tøjningen, der holdes konstant på en række forskellige værdier.

Isometrisk spændings-tidsdiagram; $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

Image not found or type unknown

Isometrisk spændings-tidsdiagram; ?1

Endelig kan man med fordel afbilde krybemodulets tidsafhængighed ved fastholdt spænding eller deformation. Også her anvendes en logaritmisk tidsakse.

Krybemodulkurver; $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

Image not found or type unknown

Krybemodulkurver; ?1

Som tidligere nævnt, vil krybeforholdene påvirkes af eventuel fugtoptagelse, idet der vil indtræde en blødgørende effekt. Desuden kan der ved efterkrystallisation og dannelse af tværbindinger forekomme sammentrækning, som kan tilsløre forholdene vedrørende krybning. Endelig vil ældning som følge af påvirkning af ultraviolet lys, oxygen og ozon påvirke materialernes krybeegenskaber.

Spændingsrelaksation

Hvis man holder et polymert materiale i konstant deformation, vil materialet ligeledes udvise koldflydning, hvorved spændingen vil aftage med tiden. Fænomenet, som kan siges at være et spejlbillede af krybning, kaldes spændingsrelaksation.

Forskellige relaksationsforløb ved konstant tøjning og temperatur

Image not found or type unknown

Forskellige relaksationsforløb ved konstant tøjning og temperatur

Spændingen er jævnt faldende; processen kan ikke inddeles i forskellige faser som ved krybning. Hvis spændingen falder til nul, taler man om fuldstændig relaksation. Det forekommer i bløde, amorf og ikke tværbundne polymerer efter et døgn tid ved stuetemperatur. Materialeleverandørerne præsenterer sjældent relaksationsdata; man må ved dimensionering klare sig med krybe-data

Hårdhed

Et materiales hårdhed er dets evne til at modstå indtrængning af et fast legeme. Hårdheden bestemmes på grundlag af sammenhørende værdier af indtrængningsdybden af fx en kugle eller en keglespids og den dertil nødvendige kraft. Hårdheden af de enkelte polymerer afhænger af polymerens art, af temperaturen og af eventuelle tilsætningsstoffer. Desuden er hårdheden i nogen grad afhængig af prøvelegemets dimensioner, som ikke må være for små i forhold til indtrængningslegemets. Normalt vil hårdhed og elasticitetsmodul følges ad, således at hårdere materialer også har højere elasticitetsmodul.

