

Inleiding

Probleemstelling

Uitgaan van ervaring bij materiaalkeuze is onverstandig

Keuze maken op basis van voldoende kennis en wat technisch en economisch verantwoord is

Rekening houdend met strenge eisen en voorschriften zoals milieuwetgeving en productaansprakelijkheid

Er zijn duizenden uitvoeringen van sommige materialen

Materiaalgroepen

Vaste stoffen: metalen, polymeren, keramieken(, composieten, biomaterialen)

Indeling gebaseerd op chemische samenstelling en atoomstructuur

Metalen: hoog aantal vrije elektronen, warmte- en elektrische geleiding, sterk en vervormbaar

Rubbers en kunststoffen: organische verbindingen samengesteld uit koolstof, waterstof en andere niet-metallische elementen, zeer lage moleculaire structuren, lage dichtheid, zeer vervormbaar

Keramieken: mengsels van metallische en niet-metallische elementen, zeer hard, zeer bros

Composieten: samenstelling van meerdere materialen, gewenste combinatie van eigenschappen mogelijk

Biomaterialen: gebruikt voor implantaten in het menselijk lichaam

Materiaalkeuze

Vooraf bepalen aan welke eisen het uiteindelijke product moet voldoen

Primaire eisen: sterkte- en vervormingseigenschappen

- Welke omgeving?
- Veiligheidsaspecten?
- Beste verbindingstechnieken? (Nabehandelingskosten, demontage)
- Oppervlaktebehandelingstechnieken?
- Vormingsproces? (Poedermetallurgie, gieten)

Secundaire eisen: onderhouds- en economische aspecten, verbindingsmogelijkheden...

Winst uit economisch materiaalgebruik

Arbeidskost, mechanisatie en automatisatie, grootte van de productserie

Gebruik van hoogwaardig materiaal kan kostenbesparend werken door betere mechanische eigenschappen

Ontwerpprocessen

Voorbeelden: milieuvriendelijk ontwerpen, design for assembly, design for disassembly, top down/bottom up, lean production, value management

1. Formuleren van het project
2. Plannen
3. Bewaken en optimaliseren van het proces
4. Vormgeving
5. Testen

Materiaalkeuze kwam vroeger als laatste aan bod, nu in het begin: ontwerp wordt opgehangen aan het te gebruiken materiaal

Methodisch ontwerpen: selectiecriteria en waarderingscijfers, materiaalkeuze vanaf het begin in rekening gebracht, mogelijkheid tot lichter, milieubewust te construeren, materiaalkeuze zal bepalend zijn voor het succes van de constructie en de constructiedelen

Programma van eisen: vervormbaarheid, taaiheid, lasbaarheid, verspaanbaarheid... ook economische factoren zijn hier belangrijk

Basisbegrippen

Spanning en vervorming

<https://www.tosec.nl/wiki/spanning-rekdiagram/>

Stijfheid: mate waarin een lichaam vervormt onder inwerking van krachten, hoe hoger de stijfheid, hoe groter de weerstand tegen vervorming

Elastisch gedrag: geen blijvende vervorming nadat krachtswerking wegvalt

Lineair elastisch gedrag: vervorming recht evenredig met opgelegde kracht

Plastische vervorming: permanente vervorming

Mechanisch gedrag van metalen is (bijna) tijdsafhankelijk

Visco-elastisch gedrag: polymeren vertonen tijdsafhankelijk elastisch gedrag: nadat de opgelegde kracht weggenomen is, duurt het enige tijd alvorens de vervormingen weggaan

Enkelvoudige trek en druk

Spanning: kracht per eenheid van oppervlakte

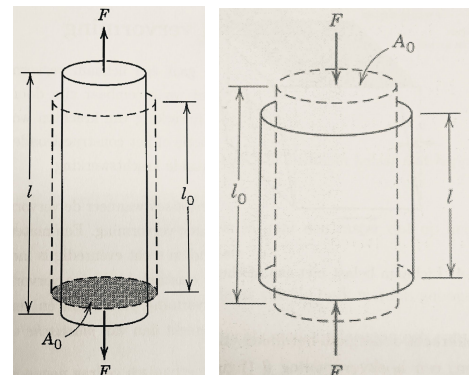
Oorspronkelijk oppervlak: ingenieurswaarde, normaalspanning

Werkelijk oppervlak: ware spanning

Rek: verlenging per lengte-eenheid, dimensieloos

Oorspronkelijke lengte: ingenieurswaarde

Wet van Hooke: $\sigma = E \epsilon$



Dwarscontractie: rek loodrecht op de as van het lichaam is een negatieve fractie van de rek in de asrichting, dus een verkorting, fractie aangeduid als coëfficiënt van Poisson

Drukkracht bij conventie negatief

Rek negatief = stuik

Enkelvoudige afschuiving

Schuifspanning: kracht in het vlak van het oppervlak resulteert in een hoekverdraaiing, lineair verband door glijdingsmodulus G

Enkelvoudige buiging

Koppel M , combinatie van trek en druk, veroorzaakt normaalspanning die niet constant is

Lineair elastisch materiaal: spanningen lineair over de doorsnede, rechtevenredig met de opgelegde belasting

Zuivere wringing/torsie

Wringend koppel T veroorzaakt schuifspanningen in een dwarsdoorsnede loodrecht op de as, rechtevenredig met T in lineair elastisch materiaal

Materiaaleigenschappen

Homogene/heterogene materialen

Homogeen: materiaaleigenschappen onafhankelijk van de plaats in het materiaal

Voorbeeld: beton op voldoende grote schaal

Isotrope/anisotrope materialen

Isotroop: materiaaleigenschappen in alle richtingen gelijk

Orthotroop: materiaaleigenschappen op drie onderling loodrechte symmetrievlakken

Voorbeeld: hout

Keramische materialen

Inleiding

Keramik: groep anorganische, niet-metallische materialen, die na vormgeving bij lage temperatuur hun eigenschappen verkrijgen door een behandeling bij hoge temperatuur

Voorbeeld: glas

Traditionele keramiek (baksteen, glas, cement...) en hoogwaardig technisch keramiek (siliciumnitride, siliciumcarbide)

Grootste afnemer: elektronica-industrie (technisch keramiek)

Kenmerken: hardheid, slijtvastheid, sterkte bij hoge temperatuur, corrosiebestendigheid

Hoog smeltpunt $\Rightarrow$ koud voorvormen, bindmiddelen toevoegen om *groene vorm* te bekomen, sinteren (= samengeperst poeder verhitten onder smelttemperatuur), eventueel nabewerken

Bros (geringe capaciteit voor plastische vervorming) $\Rightarrow$ mechanische energie wordt geheel gebruikt om scheuren te vergroten, geringe plastische vervorming

Gedrag afhankelijk van micro-structurele fouten: poriën, insluitels, krassen van nabewerkingen

Tijdens vormgeving rekening houden met spanningsconcentraties

Voornaamste problemen: brosse karakter, hoge productiekosten, slechte reproduceerbaarheid, beperkte verbindings- en bewerkingstechnieken.

Toepassingen

onderdelen van turbines en dieselmotoren: zuigers, klepkoppen, cilinderwanden, rotors voor turbo's

- + hogere bedrijfstemperatuur
- + geen koelsysteem
- + minder smering
- + minder brandstofverbruik
- + minder vervuilende uitlaatgassen

snijgereedschap: harder dan veel andere materialen

prothesen: corrosiebestendigheid tegen lichaamsvocht, mogelijkheid oppervlaktestructuur vergelijkbaar met menselijk bot

Materialen

Oxiden, carbiden, boriden, nitriden

Oxide keramiek

Aluminiumoxide: Belangrijkste technisch keramisch materiaal, breed toepasbaar, maar betere alternatieven op vlak van weerstand tegen thermische schokken en sterkte bij hoge temperaturen

Zirkoniumoxide: *transformatietaaiheid* = 3 verschillende vormen kristalstructuur afhankelijk van temperatuur, een paar volumeprocent met kleine korrelgrootte toevoegen aan aluminiumoxide is voldoende om eigenschap mee te geven

$\Rightarrow$ monoklien zirkoniumoxide is stabiel tot 1150°C

$\Rightarrow$ tetragonaal tussen 1150°C en 2370°C

$\Rightarrow$ kubisch boven 2370°C

Overgang tetragonaal - monoklien: volumetoename 4%

Bij afkoeling na sinteren op 1600°C willen zirkoniumdeeltjes veranderen van vorm maar worden tegengehouden door vaste matrixstructuur en blijven in metastabiele tetragonale vorm. Als er zich dan een scheur vormt worden de zirkoniumdeeltjes monoklien en wordt verdere groei van de scheur tegengehouden.

Deeltjes met grote korrelgrootte toevoegen resulteert in betere taaheid door microscheurtjes doordat deeltjes wel overgaan van tetragonaal naar monoklien.

Als matrixmateriaal: gedeeltelijk gestabiliseerd met MgO + warmtebehandeling levert verbetering in sterkte en taaheid door fase-overgang in de buurt van scheuren

Toepassing: motoren, trekstenen (door lage warmtegeleiding, grote impactweerstand, geringe wrijving), vezelversterkers als versterkt door toevoeging van synthetische vezels met verschillende mechanische eigenschappen, maar klein verschil in korrelgrootte en onderlinge afstand

Materiaalbeproeving

Doelstelling - begrenzingen

Beproevingen moeten ervoor zorgen dat onnodige kosten vermeden worden, zoals een kostbare bewerking op een kwalitatief minderwaardig product.

Laboratoria moeten de oorzaak van breuk, abnormale vervorming of vroegtijdige slijtage kunnen vaststellen.

Onderzoek op karakteristieke materiaaleigenschappen

Karakteristieke eigenschappen zijn belangrijk voor de dimensionering van constructies, controle van het ruwe materiaal en van de verwerkingsprocessen en ook voor het verkrijgen van gegevens die voor de bewerking nodig zijn.

Door proefstaven tot breuk te belasten of tot een vooraf bepaalde vervorming bereikt wordt en dan de nodige belasting te meten.

Statische beproeving: hardheidsmetingen, trekproef, belasting langzaam tot de hoogste waarde, duurproef, belasting snel tot een waarde die dzn constant gehouden wordt

Dynamische beproeving: belasting met één slag op het werkstuk, belasting periodiek tussen twee grenswaarden veranderend

Hardheidsmeting

Hardheid: weerstand van het materiaal tegen het indringen van een harder materiaal

Kan bij staal door koudverstevinging en warmtebehandeling ruim veranderen

Meting laat toe conclusies te trekken over structuur van materiaal

Hardheidsmeting volgens Brinell

Indringingslichaam: geslepen kogel van gehard staal, hardmetaal voor hardheden > 400HB, diameter afhankelijk van dikte proefstuk en hardheid materiaal

Meetvoorwaarden:

- Gestandaardiseerde kogeldiameter: 1, 2.5, 5 en 10mm
- Onderzijde proefstuk geen zichtbare vervorming na proef
- Indrukking 0.2 tot 0.7 keer de kogeldiameter

Weergave meetresultaat: 'waarde'HB voor gebruikelijke omstandigheden: kogeldiameter 10mm, beproevingsbelasting 29420N, belastingstijd 10-15s

Anders: 'waarde'HB '#mm/#N/#s' beproevingsbelasting in (1/0,102)N

Voorbeeld: 350 HB 5/250/30 $\Rightarrow$ 250/0,102 = 2450N

Toepassingsgebied:

- Materialen met matige hardheid tot 450HB, bij harder materiaal vervormt de kogel elastisch
- Materialen met structuurbestanddelen van verschillende hardheid.
- Controle op de treksterkte van werkstukken die een warmtebehandeling hebben ondergaan
- Niet voor zeer harde metalen en dunne oppervlaktelagen.

Hardheidsmeting volgens Vickers

nauwkeurigste hardheidsmeting, uitgebreid meetgebied

Indringingslichaam: stompe, vierzijdige diamanten piramide

Beproeingsbelasting: geometrisch gelijkvormige indukking, belastingsgebied tussen 98N-980N

Meetwaarde: $HV = 0.102F/A$

Weergave van de meetresultaten: voorbeeld: 640 HV 50 met 50/0.102=490N gedurende 10-15s, 180 HV 20/30 met 20/0.102=196N gedurende 30s

Toepassingsgebied:

- Allerlei materialen met zeer verschillende hardheden, zeer harde materialen
- Dunne harde oppervlaktelagen, proefbelasting klein en diagonaal indrukking kleiner dan $\frac{2}{3}$ van de laagdikte

Hardheidsmeting volgens Rockwell

Hardheid gemeten uit indringdiepte, korte beproevingstijd

Indringingslichaam: diamanten kegel met stompe hoek van 120°

Beproeingsbelasting: constant, in 2 trappen aangebracht: voorbelasting + hoofdbelasting

Stap 1: voorbelasting F_0 (98N) = referentie voor meting

Stap 2: belasting F_1 (1373N) $\Rightarrow$ (1471N) elastische en plastische vervorming tov referentie

Stap 3: belasting F_0 , uitlezen blijvende indrukking t_b (=plastische vervorming)

Meetwaarde: O.E. met indringdiepte, HRC = 100 - 500 t_b

Toepassingsgebied:

- Snelle hardheidsmeting, hardheidsgebied 20-70 HRC, indien zachter: HRB met stalen kogel ipv diamanten kogel
- Dikte proefstuk minstens 10 keer indringdiepte t_b

Dynamische hardheidsmeting volgens Shore

Hardheid meten adhv elastische botsing van een kogel in een buis loodrecht op het materiaal, ijking uitgaande van perlitisch glashard staal, terugkaatsing verdeeld in 100 gelijke delen

Meetapparaat: scleroscoop, sclerograaf = klein, licht, handig

Toepassing:

- Overal op proefstukken te plaatsen indien goed vastgeklemd of opgespannen
- Zware onderdelen: gietstukken, walsen
- Controle voor gelijkmatige hardheid op grote oppervlakken

Onderlinge vergelijking van de hardheidswaarden

Geen lineair verband tussen verschillende meetmethoden, geen omrekenformules, wel tabellen

Beproeving van de sterkte bij statische belasting

Karakteristieke sterkte-eigenschappen op basis van spanningen berekend uit de kracht en doorsnede van de proefstaaf vóór de proef begint (niet de ware spanning).

Algemene breukverschijnselen

Uitersten: brosse breuk (bros materiaal) = plotselinge breuk zonder aanwijsbare plastische vervorming, vervormingsbreuk (taai materiaal) = sterke plastische vervorming voor breuk, ertussenin noemt men gemengde breuk

Trekproef

Kracht (onrechtstreeks via spanning) en optredende verlenging (onrechtstreeks via rek) worden gemeten, uiteenzetting van spanning verticaal en rek horizontaal levert trekkromme
Indien de kracht niet centrisch aangrijpt is de kracht op de doorsnede niet overal gelijk

Continue trekproef

Continu proefstuk belasten tot breuk en ondertussen kracht en verlenging meten in een vervormingsgestuurde/stijve trekbank ⇒ kan ook snel afnemende krachten volgen

Treksterkte = maximum belasting/oppervlakte

Proportionaliteitsgrens = grens lineair gedrag

Breukrek = rek bij breuk

Intermitterende uitvoering van de trekproef

Staf met bepaalde kracht belasten, verlenging opmeten, kracht verwijderen, resterende verlenging opmeten, herhalen met steeds hogere belasting

Stelt ons in staat de elasticiteitsmodulus en elasticiteitsgrens te bepalen.

Totale rek = elastische + plastische rek

0.2-rekgrens in praktijk gebruikt als elasticiteitsgrens = spanning waarbij de plastische rek 0.2% bedraagt, metaal met hoge 0.2-rekgrens = stug metaal

Trapsgewijze trekproef

Trekkracht trapsgewijs laten toenemen, voor een nadere bestudering van het elastisch gebied

De verlenging gedraagt zich aanvankelijk recht evenredig maar buigt rechts af ter hoogte van de proportionaliteits- of evenredigheidsgrens.

Grootheden af te leiden uit een trekproef

Elasticiteitsmodulus E: helling van de rechte voor een spanning onder de proportionaliteitsgrens, grote E: stijf, kleine E: slap, bij metalen 210 000MPa

Tip: $E_{\text{koperlegeringen}} = \frac{1}{2} E_{\text{staal}}$, $E_{\text{aluminiumlegeringen}} = \frac{1}{3} E_{\text{staal}}$

E O.E. met temperatuur

Coëfficiënt van Poisson: $\frac{\Delta d/d_0}{\Delta L/L_0} = -\nu$ verhouding van dwarscontractie over verlenging =

dwarscontractiecoëfficiënt ν , negatief want insnoering gepaard met verlenging

Te bewijzen: ν kan hoogstens $\frac{1}{2}$ zijn

Gegeven: $L = L_0 + \Delta L = L_0(1 + \epsilon)$

$$a = d_0 + \Delta d = d_0(1 - \nu\epsilon)$$

Bewijs:

$$V = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = L_0(1 + \epsilon) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot (1 - \nu\epsilon)^2$$

$$\approx V_0 \cdot (1 - 2\epsilon\nu + \epsilon) = V_0[1 + (1 - 2\nu) \cdot \epsilon]$$

$$\Delta V = V_0(1 - 2\nu) \cdot \epsilon$$

$$\Delta V > 0 \Leftrightarrow 1 - 2\nu \Leftrightarrow \nu \leq \frac{1}{2}$$

□

Energie-opslag in het elastisch gebied

Arbeid = belasting maal verlenging, in spanning-rekdiagram stelt oppervlakte onder de curve de gemiddelde arbeid voor

Bij ontlasten kan deze energie teruggewonnen worden, van belang bij veren

Veren: hoge elasticiteitsgrens, lage elasticiteitsmodulus, directe mechanische koppeling, snelle toe- en afvoer van energie

Energieopslag bij verenstaal: 2.5J/cm³

Elektrische accu: x100

Thermische spanningen

$\sigma = -\alpha E \Delta T$, variatie αE groter dan α en E apart

Treedt op bij verhinderende van vervorming, ongelijkmatig opwarmen/afkoelen

Enkele honderden MPa bij $\Delta T = 100^\circ C$

Beproeving van de sterkte bij dynamische belasting

Algemeen gedrag

Vermoeingsbreuk: breuk na periodiek wisselende belasting, vaak bij een lagere spanning, begint aan de oppervlakken want

- kristallieten hebben grootste spanning
- makkelijker te vervormen
- chemische reactie met omgeving mogelijk

Oorzaken: vaak ongelijkmatige spanningsverdeling die (ver)buiging veroorzaakt

- kerfwerking: zones ontstaan met ware spanning een veelvoud van berekende spanning
- materiaalfout, oppervlaktebeschadiging, contact met andere onderdelen

Gelijkmatige belasting: op elke doorsnede staat eenzelfde belasting, elk materiaaldeel neemt een even groot deel van de belasting op

Spanningpieken

⇒ plaatselijke plastische vervormingen met koudversteving en brosheidverschijnselen

⇒ uit- of instulpen van glijlagen

⇒ oppervlakken ruwer, krefwerking en spanningen in de kerfbodem

⇒ ontstaan en uitbreiden van scheuren

Dynamische belasting

Meestal statische basisbelasting met een in de tijd dynamische belasting is gesuperponeerd.

Zwelbelasting: hoogste en laagste spanning hebben zelfde teken

Wisselbelasting: tegengestelde richting van hoogste en laagste spanning

Vermoeingssterken

Vermoeingssterkte: welke gemiddelde spanningen en spanningsamplituden een onderdeel blijvend, een oneindig aantal belastingscycli, zonder te breken kan verdragen

$$\sigma_s = \sigma_m \pm \sigma_A$$

$$\tau_s = \tau_m \pm \tau_A$$

Met i_m gekozen middelste spanningen, i_A hoogste spanningen

Speciale gevallen:

- Zwelsterkte met laagste spanning nul $\Rightarrow \sigma_z = 2 \cdot \sigma_A \mid \tau_z = 2 \cdot \tau_A$
- Wisselsterkte met gemiddelde spanning nul $\Rightarrow \sigma_w = \pm \sigma_A \mid \tau_w = \pm \tau_A$

Spanning kleine letter als index, sterkte (grensspanning) grote letter

Vermoeingsproeven

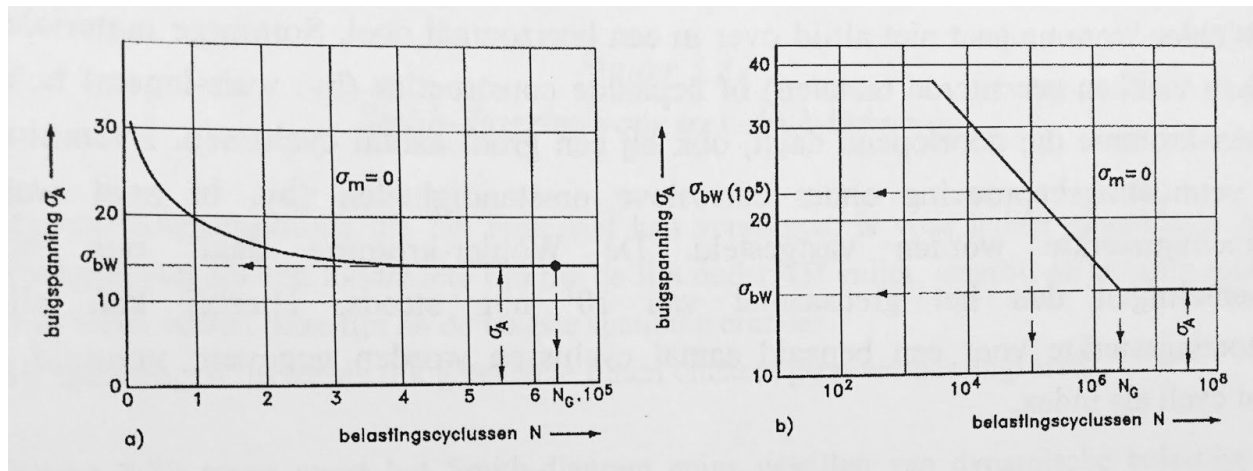
Oppervlaktegesteldheid: belangrijk voor de levensduur

- Gelijke wijze vervaardigd en afgewerkt
- Proeven onder gelijke omstandigheden uitgevoerd
- Rekening houden met vingercorrosie, luchtvochtigheid

Omwentelingsbuigproef: een aantal proefstukken uit het zelfde materiaal en op dezelfde manier voorbereid over de gehele beproevingslengte met een constant buigmoment belasten met steeds kleiner wordende belastingsamplituden tot breuk

Bij elke omwenteling wisselende buigspanningen om nul

Wöhlercurve: vanaf statische sterkte stijl omlaag converterend naar vermoeingsbuigwisselsterkte σ_A op grenswaarde N_G waarna verdere beproeving niet meer noodzakelijk is



Wordt niet horizontaal bij sommige materialen, constructies, corrosieve omstandigheden
Nauwkeurige proeven bij een aantal proefstaven geeft een strooibandbreedte waaruit met zekere waarschijnlijkheid het punt van breken of de vermoeingssterkte worden afgelezen

Factoren die invloed hebben op de vermoeingssterkte

- Oppervlaktegesteldheid
 - Afwijking gepolijste toestand $\Rightarrow$ daling vermoeingssterkte
 - Inwendige drukspanningen $\Rightarrow$ verhoging vermoeingssterkte
- Corrosie: grote invloed
- Temperatuur: structuurveranderingen
- Frequentie: opwarming
 - Metalen $< 10^4$ /minuut
 - Kunststoffen < 600 /minuut

Verhoging van de vermoeingssterkte

Koudvervorming, drukspanningen (shot-peening)

Beproeving van taaheid

Taa: sterk vervormbaar, $\Leftrightarrow$ **bros**

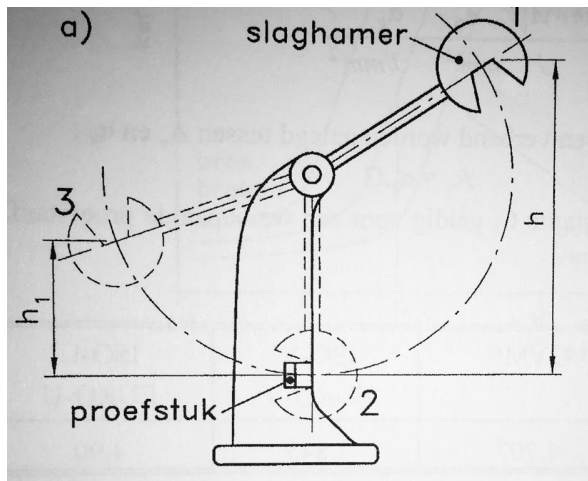
Taaheid is rechtevenredig met de arbeid nodig voor breken

Metalen: grote verschillen door

- Kristalroosters
- Structuur:
 - homogeen/heterogeen
 - grof-/fijnkorrelig
 - Koudvervormd
 - Niet-metallische insluitsels
- Spanningstoestand (afschuiving)

Taaheid niet enkel materiaaleigenschap, maar ook functie van vormgeving, belastingswijze en -snelheid, temperatuur...

Spanningstoestand: een-(trekproef), twee-(ballon, drukvat), drie-assig(machineonderdelen, kerven), belangrijk voor plastische vervorming daar dit enkel komt door afschuiving



Kerfslagproef

Proefstaaf tussen twee steunpunten met een slag op buiging belasten waardoor er een drie-assige spanningstoestand ontstaat

Proeven vergelijkbaar als

- Proefstaven zelfde vorm
- doorsnede (hoogte, breedte) van de hamer
- Snelheid waarmee hamer proefstuk treft

Potentiële energie W_p wordt vanaf valhoogte h omgezet in kinetische energie om proefstuk in (2) te breken

waarna de hamer (3) bereikt waar slaghamer restenergie W_t op lagere hoogte h_1 heeft

Slagarbeid: $A_v = W_p - W_t = F(h-h_1)$, met F de oplegkracht

Kerfslagwaarde-temperatuurkromme

Kubisch vlakken gecenterd (kvr): onafhankelijk temperatuur

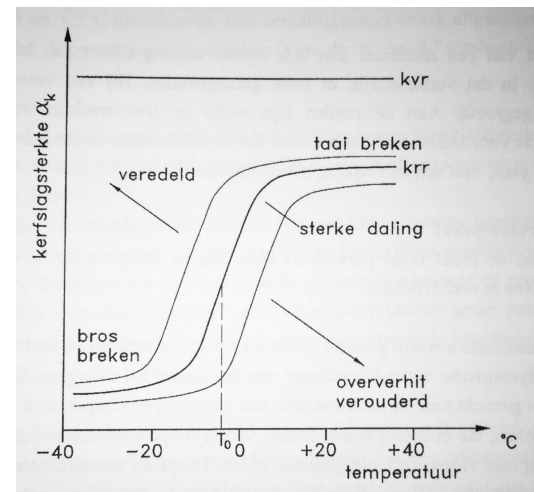
Kubisch ruimtelijk gecenterd (krr): afhankelijk temperatuur

Overgangstemperatuur $T_0 = f(\text{structuur, warmtebehandeling ...})$

Voorbeeld: fijnkorrelig, koud is taaier dan grofkorrelig $\Rightarrow T_0$ lager

Toepassingsgebied:

- Controle warmtebehandeling: lagere kerfslagwaarde bij oververhitting of ontlaatsbroosheid (hogere taaheid)



- Controle verouderingsgevoeligheid staal

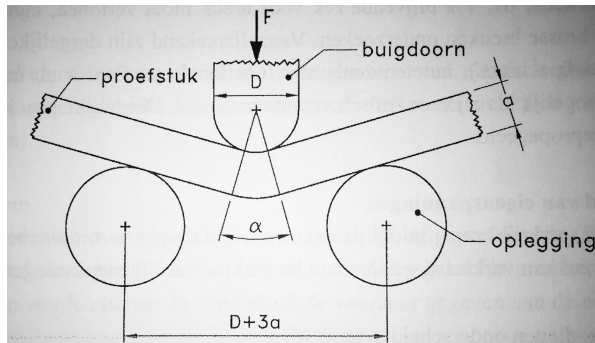
Taaiheid beoordelen zonder meting:

Taai: breukvlak gegroefd, randen stuik en trek

Bros: breukvlak vlak, randen glad

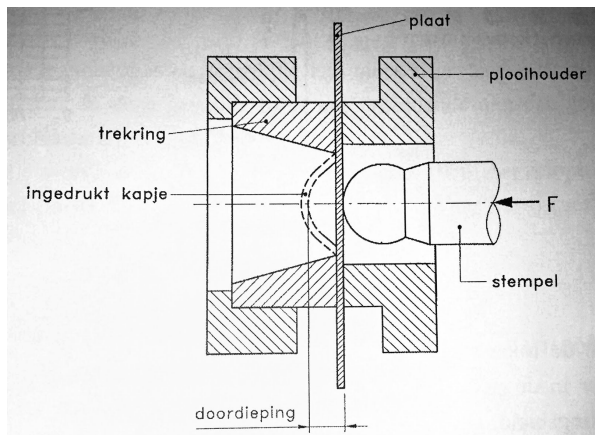
Beproeving op bewerkingseigenschappen

Bewerkingsmethoden nabootsen om na te gaan of materiaal bewerking zonder scheuren kan doorstaan



Vervormingsbuigproef

Nagaan of staal in koude toestand kan worden gebogen zonder scheurvorming. Hoe dunner de doorn, hoe eerder het materiaal zal scheuren



Doordiepingsproef volgens Ericksen

Dieptrekproces

Doordieping: de afgelegde weg van de kogel van raken tot scheur zichtbaar is in vervormde plaat

Korrelgrote zichtbaar aan buitenkant ingedrukte kapje: sinaasappelschil $\Rightarrow$ grofkorrelig

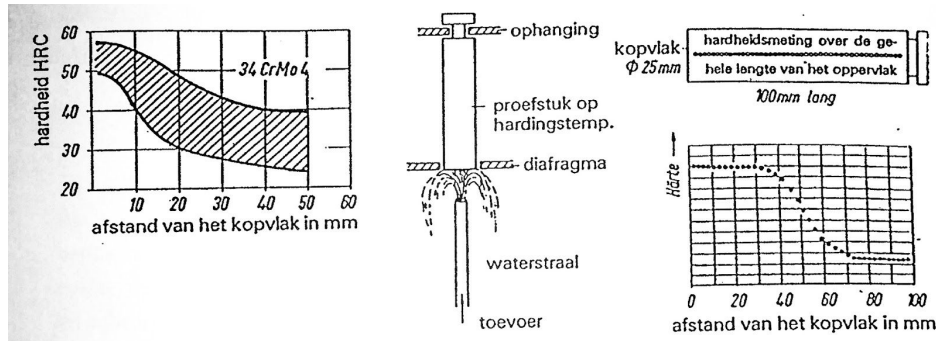
Glad $\Rightarrow$ fijnkorrelig

Proef ter bepaling van de indringdiepte

Hardingsdiepte staal bepalen

Op hardingstemperatuur verhit proefstuk afschrikken met zelfde waterdruk, doorsnede spuitkop, toepassing van diafragma voor afkoeling

⇒ **Jominy-kromme**: hardheid ifv diepte, doorhardingskromme



Structuuronderzoek

Metaalmicroscoop, 25-1000 keer vergroten om korrelgrootte en kristallietenvorm vaststellen
Bij geslepen oppervlakken alleen slijpkrassen en -groeven te zien, geen afzonderlijke kristallieten

Slief: microscooppreparaat, geslepen met fijn schuurpapier, gepolijst en al dan niet eerst in giethars ingebed, ontwikkeld door kort etsen, achteraf droog te bewaren

Reliëf: Door zuur-, zout-, of loogoplossing worden sommige kristalsoorten wél en andere niet zichtbaar

Macroscopisch: slakinsluitels, segregatiezones...

Voorbeeld: Baumannafdruk ter bepaling van sulfide-segregaties

Non-destructief materiaalonderzoek en kwaliteitscontrole

Algemeen

Steeds lichtere materialen, doorsneden worden kleiner ⇒ invloed inwendige fouten groter
Constructieonderdelen die bij breuk mensenlevens in gevaar brengen of grote materiële schade kunnen veroorzaken moeten stuk voor stuk, 100%, beproeving op inwendige gebreken ondergaan

Voorbeeld: lasnaden, apparatuur voor hoge drukken...

- Foutieve giet- of smeedproducten en halffabrikaten te verwijderen voor verdere bewerking
- Materiaalverwisseling, foutieve warmtebehandeling voorkomen

Penetratiemethode

Vloeistof op oppervlak aanbrengen, via capillaire werking in scheurtjes, na verwijdering enkel in scheurtjes

Tweede ontwikkelvloeistof of -poeder maakt scheurtjes zichtbaar door chemische reactie met eerste vloeistof

Toepassing: alle soorten materialen

Magnetischebeproeving

Toepassing: ferro-magnetische materialen

- Materiaal magnetiseren via gelijkstroom gevoede magneet voor dwarse scheurtjes, via wisselstroom gevoede magneet voor scheurtjes in de langsrichting
- Controleren of er strooivelden zichtbaar via de poedermethode of via inductie waarbij het strooiveld inductiestromen veroorzaakt die akoestisch of via een oscillograaf kunnen aangetoond worden

Beproeving met magnetische inductie (wervelstromen)

Metallisch proefstuk in spoel waardoor wisselstroom vloeit ondervindt elektrische stromen, wervelstromen, die magnetische velden veroorzaken in de spoel

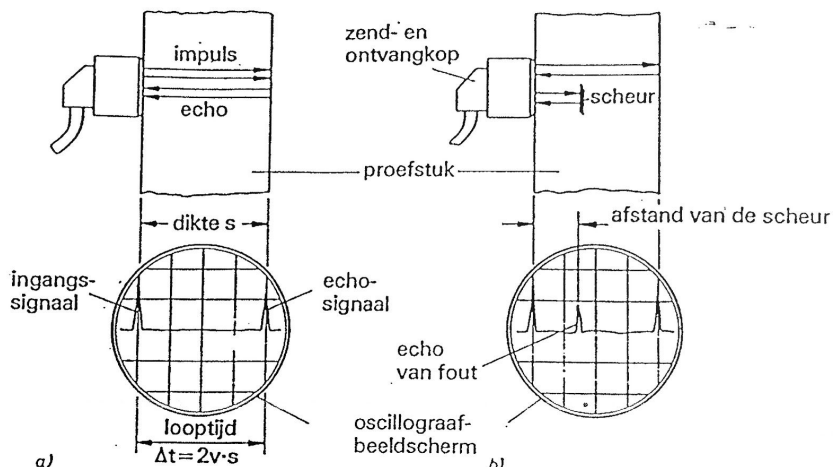
Zo kunnen volgende zaken aangetoond worden op een oscillograaf:

- Zuiverheidsgraad van zuivere elementen
- Gehalte aan legeringselementen
- Warmtebehandelingsstoestand (hardheid, sterkte, hardingsdiepte)
- Doorsnede-vermindering tgv inwendige fouten

Toepassing: foutendetectie, sorteren, diktemeting

Ultrasoon-onderzoek

Geluidsgolven (0,5-20MHz) in materialen rechtlijnig en met lage snelheid als mechanische trilling, reflectie op grensvlakken



Hoe kleiner de fout, hoe hoger de frequentie
Output van het door inwendige fouten beschadigde proefstuk vergelijken met een foutloos werkstuk

Opwekken ultrasoon geluid:

- Piëzoelektrisch effect: 200kHz-25MHz
- Magnetostrictie: 10-200kHz

Aantonen van fouten:

- Geluidsdoorstraling: gescheiden zend- en ontvangknoppen met ertussen het proefstuk, grotere verzwakking van het geluid bij aanwezigheid van inwendige fouten $\Rightarrow$ kleinere spanning in ontvangknop, meting met buisvoltmeter, diepte fout niet vast te stellen
- Impuls-echo methode: zender=ontvanger, korte geluidsimpulsen, zwakke reflecties aan grensvlak, inwendige fout resulteert in extra piek, meting met kathodestraal oscillograaf, ligging fout vast te stellen

Toepassing: metalen, rubber, polymeren

Voorbeeld: foutdetectie rails, lasnaden, smeed- en gietstukken

Beproeving met röntgen- en gammastralen

Hogere frequentie laat toe dieper in materiaal te dringen, golflengte kleiner dan afstand atomen in kristalrooster

Reactie met materiaal:

- absorptie/verzwakking: grofstructuur-röntgen, structuuronderzoek op fouten
- Buiging aan kristalroostervlakken: fijnstructuur-röntgen, kristalrooster- en foutenonderzoek
- Aanstoten van de atomen: spectraalanalyse, röntgen-fluorescentie, bepaling legeringsbestanddelen

Bij fouten minder verzwakking van de stralen

Opwekken stralen:

- Röntgenstralen: in röntgenbuis gloeiende kathode zendt elektronen uit die versneld via hoogspanning een wolfram-anode treffen waar hun hoge snelheid grotendeels wordt omgezet in warmte, de rest in remstraling, röntgenstraling
- Gammastraling: uiteengevallen atoomkernen van radioactieve elementen

Halveringstijd: duidt moment aan waarop de helft van de uitstralende atoomkern is uiteengevallen

1/10 doorlating: dikte loodplaat waarin de intensiteit van de straling tot op 1/10 wordt teruggebracht

Aantonen van fouten:

- Filmopnamen: geometrische vorm van fout vastleggen door stralen die door materiaal zijn gepasseerd op te vangen op vlakfilm versterkt door folies en erachter tegengehouden door loodfolie om strooistraling te onderdrukken, kwaliteitscontrole door stukjes draad mee te fotograferen
Toepassing: lasnaden, gietstukken, staaldiktes tot 100mm, aluminium tot 400mm
- Beeldscherm: zink- en cadmium sulfide kristallen lichten op door röntgenstralen, schaduw van werkstuk met heldere fouten
Toepassing: lichtmetalen, dunne stalen en niet-metallische werkstukken
Röntgenbeeld-versterkingsbuis: onderzoek van overlans en in spiraalvorm gelaste buizen
- Combinatie met ultrasoon onderzoek om diepte fout te bepalen en om fouten in straalrichting te detecteren

Kunststoffen

Chemie van kunststoffen en moleculaire structuur

Classificatie

Herkomst: natuurlijk vs. synthetisch

Natuurlijk: beenderen, huid, spieren, hout (cellulose, pectine, lignine)

Kunststoffen: koolwaterstoffen, biopolymeren uit planten

Synthese/polymerisatie/vormingsreactie

Condensatie-polymeren: vorming condensaat

Additie-polymeren: zelfde of ander molecule toevoegen aan dubbele binding van bestaande molecule

Moleculaire structuur

Intermezzo: soorten bindingen

Sterkte chemische primaire bindingen: (ionbindingen, metaalbindingen,) covalente bindingen

Zwakke fysische secundaire bindingen: VDWkrachten, waterstofbindingen, dipoolvorming, tijdelijke dipoolvorming

Thermoplasten: zwakke fysische bindingen tussen molecules, lineair of vertakt

Thermoharders: sterke chemische bindingen binnen molecules, ruimtelijke vernetting

Elastomeren: zwakke fysische bindingen tussen molecules, met enkele sterke chemische cross-links, beperkte vernetting

Mechanisch gedrag

Thermoplasten: niet bestand tegen hoge temperaturen, lasbaar

Voorbeeld: polyetheen, polypropyleen, polycarbonaat

Thermoharders: niet smeltbaar, onoplosbaar

Voorbeeld: epoxy, polyester, phenoformaldehyde

Elastomeren: niet smeltbaar, sterk vermogen tot herstel

Voorbeeld: rubber, polyurethaan

Koolwaterstoffen ⇒ kunststoffen

Isomeren: KWS met zelfde samenstelling, maar verschillende moleculaire structuur

Lange kwsketens ontginnen en thermisch kraken onder inerte atmosfeer om kortere, beter te verwerken ketens te bekomen

Ketenlengte en vertakking bepalen eigenschappen

Alkanen: C_nH_{2n+2} , ketenvormige molecules met enkelvoudige bindingen tussen de koolstofatomen, verzadigd

Alkenen: C_nH_{2n} , dubbele C-binding, onverzadigd

Alkinen: C_nH_n , drievoudige C-binding, onverzadigd

Meervoudige C-binding ⇒ atomen dichter bij elkaar ⇒ hoger energieniveau ⇒ reactiever

Ketenvormig (alifaten) vs. ringvormig (aromaten):

- Ketenvormig: kronkelende keten als energetisch meest stabiele vorm, indien uitgestrekt naast elkaar, voldoende secundaire bindingsenergie om vorm te behouden, maar als dan verwarmd wordt trillen ketens los naar kronkelende keten want vdwkrachten worden zwakker ⇒ krimpen op macroscopische schaal
Toepassing: krimpkous en krimpfolie
- Ringvormig: benzeen
toepassing : napalm, zonnecrème

Polymerisatie via additie (polyetheen PE): vertrekkende van etheen, een katalysator toevoegen die de dubbele binding opsplijst en met 1 elektron ervan bindt, het ander elektron is ter beschikking voor een binding met een ander etheenmolecule waar opnieuw de dubbele binding opsplijst tot er een keten gevormd is waarvan de lengte invloed heeft op de eigenschappen van het eindproduct

Kunststoffen vs. metalen

Kunststoffen

Moleculaire opbouw

Edelgasconfiguratie ⇒ goede chemische weerstand (verf = polymeerlaag)
⇒ metaal: bescherming tegen corrosie
⇒ hout: bescherming tegen vochtindringing

Relatief sterke covalente binding en zwakke intermoleculaire binding

Amorf, met kristallijne gebieden

Metalen

Atomaire opbouw

Onvolledig bezette elektronenschil ⇒ binding met zuurstof mogelijk ⇒ corrosiegevoelig

Sterke metaalbinding

Metaalrooster

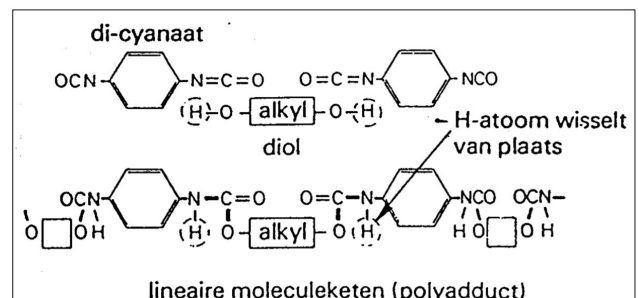
Meer kunststof eigenschappen tgv moleculaire ipv atomaire opbouw

- Lagere soortelijke massa ($900\text{--}2000\text{kg/m}^3$),
- lagere en temperatuursafhankelijke stijfheid,
- 5 tot 15 keer grotere thermische uitzetting,
- 1/300 slechte warmte- en elektrische geleidbaarheid,
- Chemisch zeer goed bestand tegen zuren, logen, zoutoplossingen, oplosbaar
- vaak ontvlambaar en brandbaar,
- goed in de massa in te kleuren,
- soms mogelijk water op te nemen met uitzetting tot gevolg en een wijziging van elektrische en mechanische eigenschappen,
- niet vormvast bij langdurige belasting, kruip&relaxatie,
- niet warmvast bij hoge temperaturen, vallen uiteen en verkleuringen blazen ontstaan

Synthese van kunststoffen

Polymerisatie via poly-additie (= zonder bijproduct) (polyurethaan PU): 2 verschillende monomeren dicyanaat en diol samenbrengen, energie toevoegen, $\text{N}=\text{C}$ klappt open, C neemt e^- van O van diol voor edelgasconfiguratie en stoot daarbij H af die zich bindt met N

Gevolgen: wijziging in verhouding tussen en van monomeren zelf



Synthese macro-moleculen: temperatuurbelasting, katalysatoren, reactieregeling gebruikt om molecule met bepaalde vorm te verkrijgen of vormen te vermijden

Co-polymeren: verschillende polymeren samenvoegen voor combinatie van voordelen

Voorbeeld:

- ETFE, ethyleen-tetrafluorethyleen, wordt gebruikt als vervanger van glas in grote gebouwen door transparante, zelfreinigende en impact resistente eigenschap
- Surlyn: zelfherstellend bij impact (door warmte), thermoplast
- [p(MMA/nBA)]: zelfherstellend zonder externe impuls, thermoplast

Synthese via poly-condensatie (fenolformaldehyde/fenolhars/bakeliet):

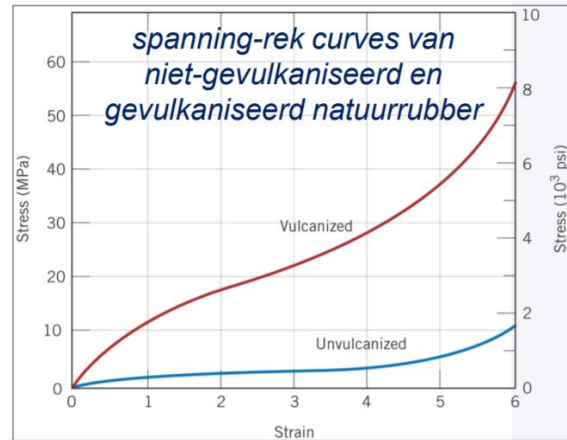
fenol + formaldehyde - H_2O → fenolformaldehyde

Bakeliet is een thermoharder: lage elektrische geleidbaarheid, hoge warmteweerstand, stijfheid en sterkte

Toepassing: luidsprekers, biljartballen, motoren, asbakken

Vulkanisatie: cross-linking van thermoplasten:

hoge T en druk, dubbele binding klappt open, zwavel reageert (additie polymerisatie) en vormt cross-links $\Rightarrow$ elastomeer met beter mechanische eigenschappen: zelfde rekbaarheid, hogere sterkte en stijfheid $\Rightarrow$ slijtvaster bij cyclische belasting



Kristalliniteit

(semi-)kristallijne polymeren: polymeer met kristallijne gebieden in een amorf geheel

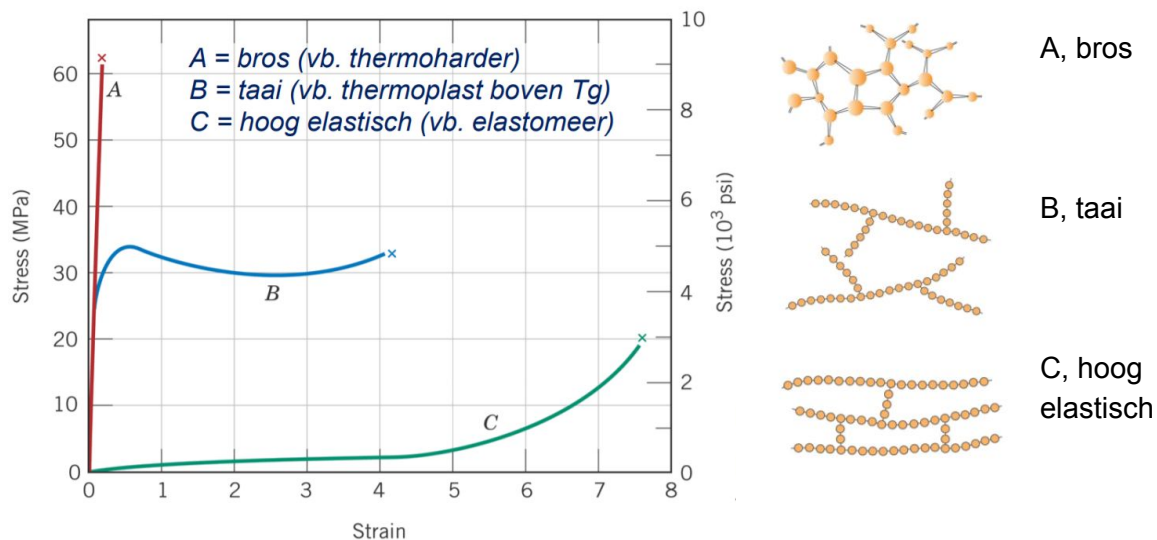
Kristallisatie: niet-vertakte en isotactische molecules passen in elkaar, zijgroepen komen in dalen van nevenliggende molecules te liggen, gestimuleerd bij korte lineaire ketens, afgewisseld met amorse gebieden, bevordert door langzame afkoeling vanuit smelt

Bij metalen makkelijk door atomaire structuur

Bij polymeren moeilijk door lange ketens

Eigenschappen, vormgeving en toepassingen van kunststoffen

spanning-rek diagram



Invloed van ketenlengte

Ketenlengte $\uparrow \Rightarrow$ raakvlakken $\uparrow \Rightarrow$ sterkte secundaire binding $\uparrow \Rightarrow$ viscositeit $\uparrow \Rightarrow$ verwerkbaarheid $\downarrow$

Invloed van temperatuur

Smelttemperatuur T_m : energie nodig om ketens los te trillen

$\sim$ ketenlengte: ketenlengte $\uparrow \Rightarrow T_m \uparrow$

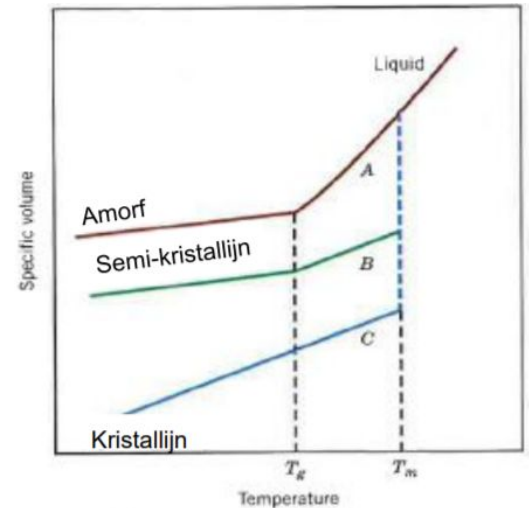
Dubbele bindingen, aromatische groepen en complexe vertakkingen $\Rightarrow T_m \uparrow$

Enkel van toepassing voor semi-kristallijn en kristallijn polymeer

Glastransitietemperatuur T_g : temperatuur amorf vaste stof bros wordt bij koeling, of zacht bij verwarming

Tussen $0.5T_m - 0.8T_m$

Enkel van toepassing voor amorf en semi-kristallijn polymeer



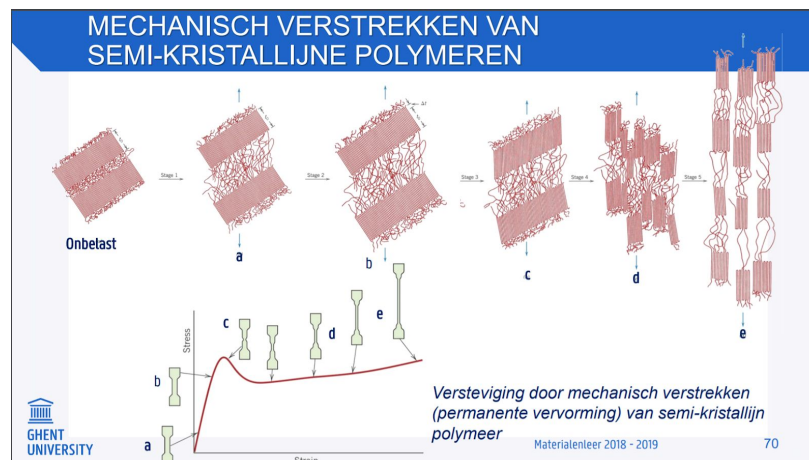
Invloed op mechanisch gedrag: hoe warmer, hoe minder stijf

Invloed van kristalliniteit

Anisotropie: vervorming afhankelijk van de belastingsrichting

Hoog % kristalliniteit: sterker, dener, stijver materiaal

Mechanisch versterken



a en b: elastisch gebied, minieme verlenging kristallijn gebied
c: heroriëntatie kristallijn gebied
d: kristallijne gebieden breken in blokken, nog steeds geconnecteerd
e: kristallijne gebieden georiënteerd volgens belastingsrichting, mechanische anisotropie

Toepassing: stijfheid verhogen, textielvezels isotroop maken

Visco-elastisch gedrag van polymeren

Elastisch gedrag: constante vervorming tijdens belasting

Visceus gedrag: toenemende vervorming gedurende belastingsperiode die bij ontlasten blijft

Visco-elastisch gedrag: bij belasten plotse toename in vervorming die degressief toeneemt en bij ontlasten deels plots afneemt en daarna gradueel daalt

Voorbeeld: silly-putty, elastisch bij hoge, visceus bij lage belastingssnelheid

Kruip: toenemende vervorming bij constante spanning, $E_c(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)}$

Relaxatie: vervorming blijft constant bij dalende spanning, $E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$

Invloed temperatuur op relaxatiemodulus: hoe hoger de temperatuur, hoe lager de relaxatie-modulus (logaritmisch), hoe lager de spanning moet zijn voor dezelfde vervorming

Vermoeiing van kunststoffen

PS, PMMA, PP, PE, PTFE vertonen vermoeiingsgrens bij 10^7 cycli, nylon en PET niet

Gas-/vloeistofdichtheid van enkele polymeren

PET flessen laten CO_2 deels door

Verwerking/vormgeving van kunststoffen

Thermoplasten

Spuitsieten: polymeer verwekt in verwarmde kamer, met druk in vorm spuiten, koelen onder glastemperatuur, nawarmen op lage temperatuur voor verlaging inwendige spanning, verhoging kristallisatiegraad, hoge precisie, duur, traag

Extrusie: continu proces, vorm bepaald door spuitkop (profielen, buizen, slangen, pijpen, platen...), lucht- en/of watergekoeld, snel, goedkoop

Filmblazen: extrusieproces gevolgd door ingeblazen buisvormige holte omhoog gericht, naar beneden afgevoerd en ondertussen afgekoeld en eventueel dichtgelast, opgerold

Vacuümvormen: vacuüm tussen weekgemaakte kunststof folie en vorm

Blazen van flessen: voorverwarmde buisvormige folie in 2-delige vorm opblazen, snel en goedkoop

Thermoharders

Warmpersen: kunststof polymeriseert in verwarmde matrijzen dmv perskracht, grote werkstukken mogelijk, goede vulling, korte cyclustijden, dure persen en matrijzen

Algemeen

3Dprinting: additieve productie, niet enkel voor kunststoffen, complexe vormgeving, materiaalefficiënt, verschillende printmechanismen, gezondheidsrisico's

Ecologische voetafdruk

Microplastics, 'plastic soep', CO₂-uitstoot

Recycling: sorteren en recyclen nog niet op punt

Biopolymeren: opgebouwd uit biologische monomeren, biologisch afbreekbaar

Circulair hergebruik van polymeren momenteel enkel op laboniveau: depolymerisatie in monomeren

Composieten

Composieten: (constructie-)materialen die bestaan uit twee of meer duidelijk te onderscheiden fasen → heterogene materialen

Toepassing: verbetering van eigenschappen: stijfheid, druksterkte, breuktaaiheid...

Natuurlijk vs. technische composieten

Natuurlijke: hout, bamboe, beenderen, tanden...

Technische: gelaagd hout, gewapend beton, vezelversterkte composieten, nanocomposieten

Vezelversterkte kunststoffen

Samenstellende componenten:

- Versterkingsvezels: bepalen stijfheid, beperken scheurgroei, belastingsdragende component
- Matrix: zorgt voor belastingoverdracht, houdt vezels op hun plaats en beschermt, vermindert vezelbreuk
- Grensooppervlak: nabehandeling van vezels, verzekert binding vezel-matrix (capillaire werking), bevordert bevochtiging van vezel door matrix

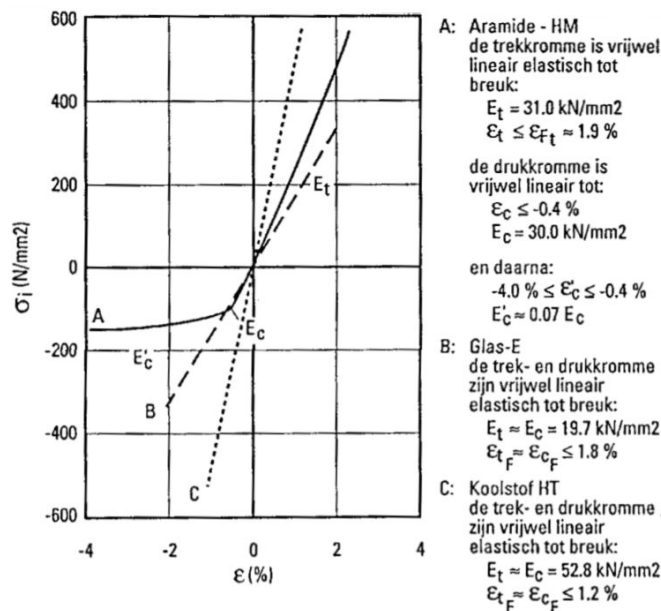
Toepassing: hoge mechanische eigenschappen (sterkte en stijfheid) tov soortelijke massa

Vezelmaterialen

- glasvezels(5-20µm): bekomen door trekken van dunne draad uit gesmolten draad, vaak voor korte vezels
→ makkelijke verwerking, minder goede mechanische eigenschappen

- koolstofvezels(3-7 μ m): bekomen door oxidatie (200-400°C)($\Rightarrow$ radiale krimp) , pyrolyse (300-600°C) van precursor, evt. gevolgd door graffitisering (2000-3000°C)
 $\rightarrow$ kleine tot licht negatieve thermische uitzettingscoëfficiënt, elektrisch geleidend
- aramidevezels(5-20 μ m): poly-aramide (Kevlar), high density poly-ethyleen (Dyneema), goede buigzaamheid en taaiheid
- [, metaalvezels, keramische vezels]

Trek-/drukkrommes van versterkingsvezels



Helling = E-modulus

A: asymptotisch gedrag naar links $\rightarrow$ slechte weerstand tegen drukkrachten, versplintert

C: stijfst, grootste E

Matrixmaterialen

Thermoplasten vs. thermoharders

Thermoplasten: amorf/semi-kristallijn/liquid crystal

- + “vloeibaar” te maken (beperkt omkeerbaar), beperkte krimp, lasbaar, grotere taaiheid
- duurder, blijft zeer viskeus, kruip, graad van kristalliniteit moeilijk te controleren

Thermoharders: bekomen door polycondensatie-reacties, vernetting door katalysatoren of acceleratoren, soms volstaan temperatuur en druk

- + betaalbaar, verwerking bij kamertemperatuur en met beperkte investering, lage viscositeit
- krimp, bellenvorming bij verwerking $\Rightarrow$ giftig/kankerverwekkend, niet recycleerbaar

Vezelpatronen

Korte vezels: random verdeeld, licht, goed vervormbaar (aerodynamisch)

Unidirectionele vezels: anisotroop $\Rightarrow$ dwarse lagen, handschoenen! $\Leftrightarrow$ zwakke plek door onzuiverheid hand

Diverse textiel-patronen: weefsels, breisels, vlechtsels

Wikkelpatronen

Natuurgeïnspireerd: spinnenweb

Hybride: laminaten met hogere stijfheid, weerstand tegen stootbelasting, demping, lagere prijs..., aangebracht op kern van hout, schuim, papier $\Rightarrow$ “sandwich” panelen met hogere verhouding van buigstijfheid tot gewicht

Farbicagetechnieken

Algemeen

Thermoplasten: vezels impregneren tot prepreg of granulaten, vervolgens verwarmen $> T_{\text{smelt}}$, vormgeven, afkoelen

Thermoharders: vezels met vloeibaar hars impregneren en polymeriseren, druk+temperatuur dienen als katalysator/accelerator, naharden, opletten voor bellenvorming en giftige dampen, “pot-life” = beschikbare tijd vóór verharding van hars optreedt

Fabricagetechniekkeuze $\sim$ vereiste mechanische eigenschappen, kwaliteit, geselecteerde vezels en matrix, complexiteit en grootte werkstuk, omvang serie, gezondheidsrisico's, milieu... Steeds gebruik van mal/matrijs: goedkoop, eenvoudig tot duur, lossingsmiddel of -film nodig

Handlamineren & opspuiten: droge vezel aanbrengen op mal, hars aanbrengen met borstel of handrol, uitharden aan lucht onder atmosferedruk

$\Rightarrow$ Arbeidsintensief, veranderlijke kwaliteit, kleine reeksen, grote plaat- en schaalconstructies

Vacuüm bag, pressure bag en autoklaaftechnieken: vezels met hars, of “prepregs” in mal, afgesloten van atmosfeer door kunststoffolie, onderdruk onder, overdruk op folie (geen gasbellen), temperatuur toepassen

$\Rightarrow$ Lage porositeit, hoge vezelpercentages

Fabricagetechnieken: harsinfusie en -injectietechnieken: droge vezelversterking in matrijs, sluiten, onder vacuüm, hars weinig viskeus laten infuseren en/of injecteren

$\Rightarrow$ traag, grote stukken

Warmpersen: gedrenkte vezelversterking tussen matrijzen, verwarmen en onder druk

$\Rightarrow$ goede vulling, grote aantallen, automatiseerbaar, beperkte grootte, zware, dure persen

Wikkelen: continue vezels door harsbad leiden, doorheen wikkeloog om roterende doorn wikkelen, uitharden

$\Rightarrow$ efficiënt, automatiseerbaar, ingewikkelde wikkelpatronen

Pultrusie: continue vezels gedrenkt in harsbad, trekken door “voorvorm”-matrijs voor verwijderen van overtollig hars, definitieve vormgeving en polymerisatie in verwarmde matrijs

$\Rightarrow$ continu proces, verschillende productiesnelheden, hoge vezelpercentages

Spuitsieten: thermoplastische granulaten met vezels verwarmen en onder druk injecteren in gekoelde matrijs

⇒ enkel korte vezels, slechtere eigenschappen, hoge viscositeit, hoge injectiedrukken, kleine stukken, mechanische eigenschappen moeilijk voorspelbaar door volgens stroming gerichte vezels

Thermovormen: thermoplastische vellen met versterkingsvezels voorverwarmen en door vacuüm

⇒ efficiënt, beperkte krommingen product

3Dprinten: gesmolten filament fabricage, ultrasoon gecontroleerd printen (vezels in lagedrukzones waarna met laser lokaal uitharden)

Mechanisch gedrag

Veralgemeende wet van Hooke voor orthotroop materiaal

Orthotroop: materiaaleigenschappen anders in 2 of 3 onderling loodrechte richtingen, vb. hout
Door anisotropie 9 onbekenden ipv 3: 3 Young's moduli, 3 glijdingsmoduli, 3 poisson coëff.

Trekken volgens vezelrichting levert eenvoudig gedrag ↔ willekeurige richting ⇒ complex met afschuivingen

Composieten: typisch in én uit het vlak scheef bij niet-symmetrische belasting

Thermische spanningen ⇒ inwendige spanningen

Bistabiele laminaten: met kleine kracht in andere stabiele toestand te krijgen

Belastingen

⇒ spanningstoestand in composiet

Statische belasting: langdurig constant, (residuele) sterkte/stijfheid/buigstijfheid, scheurinitiatie en -propagatie, kruip, ≠ orthotrope richtingen, uniaxiaal/multiaxiaal testen

Dynamische belasting: kort krachtig, impact, crushing, thermische schokbelasting, (niet-)kritisch

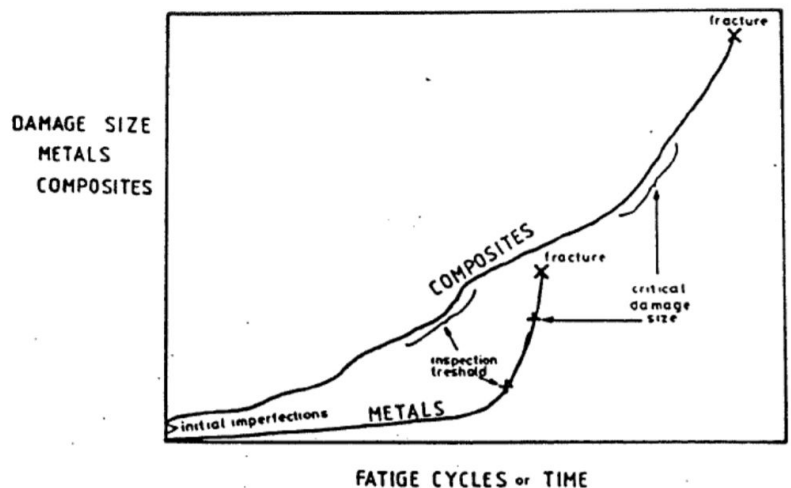
Hoe groter het gewicht, hoe kleiner de snelheid (en omgekeerd) om eenzelfde impact te hebben

Vermoeiingsbelasting: periodisch
variërende belasting ⇒ structuur faalt bij lagere spanningen/vervormingen dan bij statische belasting

Trekbank

Spanningsconcentraties tussen vezel en matrix ⇒ micro-scheurtjes, verlagen lokale spanningsconcentraties ⇒ schade in composieten groeit gradueel

Composieten: gradueel ↔ metalen: plots,
breekpunt dicht bij inspection threshold =
moment waarop schade zichtbaar is

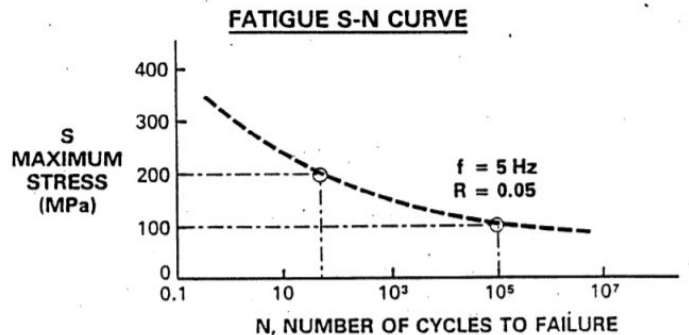


Blokbelasting: verschillende belastingen aanleggen in intervallen,

Miner's regel = tijdens constante amplitude vermoeiingsbelasting vermeerderd de schade lineair over de levensduur. Niet correct:

- Voorspelde levensduur is groter dan actuele,
 - schadegroei niet lineair bij composieten,
 - geen onderscheid in volgorde belastingsblokken,
 - geen interactie tussen schade die overeenstemt bij verschillende belastingsniveaus.
- Schadegroei in composieten wordt beïnvloed door reeds aanwezige schade

SN-curve = S: max. aangelegde spanning, N: #aantal cycli tot falen
geldig voor welbepaalde combinatie van proefstuk, belasting en omgevingsomstandigheden



Composieten hebben speciaal schademechanisme:

Vermoeiing $\Rightarrow$ vorming microscheurtjes $\Rightarrow$ mindere mechanische eigenschappen $\Rightarrow$ herverdeling spanningen $\Rightarrow$ beschadigd laminaat moet minder spanningen opnemen $\Rightarrow$ schade groeit eerst in omringende laminae, daling stijfheidsparementers, stijging permanente vervorming
 $\leftrightarrow$ metalen: zeer plots falen van component

Parameters belangrijk voor vermoeiing

Sample, belasting, omgeving

Materiaal: vezel-volumefractie

Hoge vermoeiingsweerstand $\Rightarrow$ hoge vervorming bij falen, minder scheurinitiatie

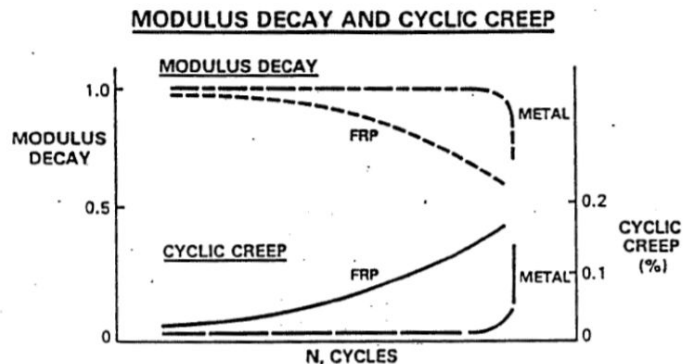
Geometrie: grotere dimensie $\Rightarrow$ grotere kans op initiële defecten $\Rightarrow$ levensduur daalt

Smalle breedte $\Rightarrow$ sneller scheurtjes van ene naar andere kant

Haltervormig $\Rightarrow$ slechts klein gebied maximaal belast $\Rightarrow$ onzuiverheden in staart niet erg

Temperatuur: microscheuren tijdens vermoeiingscyclus $\Rightarrow$ interne wrijving $\Rightarrow$ T stijgt lokaal $\Rightarrow$ minder bestand tegen vermoeiing

Vochtigheid: absorptie $\Rightarrow$ verzachting + opzwellung matrix $\Rightarrow$ degradatie interface $\Rightarrow$ vermoeiingsweerstand laag



Belastingsrichting: bepaalt of vermoeiingsgedrag

gedomineerd wordt door vezels of door matrix, kleine afwijking van vezelrichting $\Rightarrow$ significante reductie van eigenschappen

Belastingstype: trek- vs. drukbelasting

Vermoeiingsweerstand in trek < in druk

Trek $\Rightarrow$ scheurtjes $\Rightarrow$ verhoging vervorming, T en degradatie

Belastingsfrequentie: ideaal hoogst mogelijk $\Rightarrow$ testduur kortst

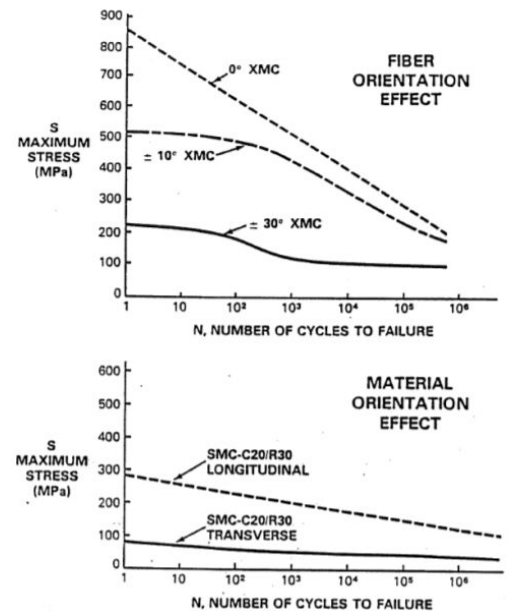
Maar matrix viscoelastisch $\Rightarrow$ grote frequentieafhankelijkheid

Hoge frequentie $\Rightarrow$ snelle opwarming

Lage frequentie $\Rightarrow$ scheurtjes kunnen groeien

Ultra high cycle fatigue = ultrasoon (20kHz), moeilijk toepasbaar op composieten

Thermal fatigue = temperatuur cyclisch variërend, tijdrovend, keramisch-, metaal- en polymermatrixcomposieten



Niet-destructief testen (NDT)

Schadefenomenen in composieten

Productie: (lijn) porositeiten, delaminatie/disbond, vreemd materiaal/insluitels, micro-scheurtjes, T joints, vezelplooien, matrix tekort (stijfheid $\downarrow$)...

(Abnormaal) gebruik: microscheuren tgv vermoeiing, vezelbreuk, verlies hechting matrix-vezel, delaminatie tgv impact event (luchtvaart), barely visible impact damage (BVID) = impactenergie kegelvormig door materiaal, al bij milde impact

Detectie

Destructief: tijdens inspectie schade aangebracht door hoge belasting of versnijden

Niet-destructief: geen schade zodat proefstuk hergebruikt kan worden

Visueel: zowel op macro- als microschaal kijken

Voordelen	Nadelen/limitaties
+ Alle materialen + Elke zichtbare geometrie + Volledig beeld. + Zeer snel + Contactloos + Geen expertise nodig + Kleine investering nodig – € + Vaak gebruik in industrie voor niet-primaire componenten	- Oppervlakte techniek - Geen toegang tot defecten onder de oppervlakte (tenzij het material optisch transparant is, bijv GFRP)

Vloeibare penetrant: oppervlak schoonmaken, penetrant aanbrengen, overtollige afvegen, ontwikkelaar aanbrengen

Voordelen	Nadelen/limitaties
+ Alle materialen + Elke zichtbare geometrie + Volledig beeld + Geen expertise nodig + Kleine investering – € + Vaak gebruikt in metaal sector om lasnaden te inspecteren	- Niet voor poreuze oppervlakten - Traag (45 min voor 1 test is standaard) - Oppervlakte techniek - Oppervlaktevoorbereiding nodig (verwijderen van vuil) - Contact - Smerige boel: veel opkuiswerk nadien - Enkel voor defecten die connecteren met de oppervlakte - Chemische toxiciteit van penetrant

Tap test: tikken op materiaal(coin tapping/geautomatiseerd), frequenties analyseren

Voordelen	Nadelen/limitaties
+ Alle materialen + Elke geometrie zolang ze bereikbaar zijn met impacthamer + Beperkte expertise nodig (zeker voor niet-geinstrumenteerde coin-tapping) + Kleine investering - \$(\\$) + Vaak gebruikt in industrie	- Puntmeting - Niet voor poreuze oppervlakten - Traag (afhankelijk van meetrooster) - Contact - Lage gevoeligheid aan kleine defecten - Lage gevoeligheid aan diepe defecten - Interpretatie is vaak zeer moeilijk - Geen karakterisering van defect type

X-stralen radiografie: elektromagnetische straling met korte golflengte, Röntgen/X-stralen,

- schadelijk voor de gezondheid,
- full-fieldmethode,
- meten van dikteverandering, materiaalfase, schade,
- 2D fouten in richting van bestraling niet detecteerbaar,
- penetrant gebruikt om absorptie te verhogen ⇒ contrast

X-stralen tomografie: CT-scanning, 2D radiograms vanuit ≠ instraalrichtingen ⇒ 3D beeld

Voordelen	Nadelen/limitaties
+ Bijna alle materialen + Elke geometrie zolang het in bestralingskamer past + Volledig beeld + Contactloos + Volume techniek + Volledig 3D rendering van volume + Gevoelig aan veel defecten: vezeldistortie, delaminatie, scheurtje, porositeiten, diktevariatie, ruwheid ...	- Sommige materialen hebben contrastproblemen, bijv. CFRP - Zeer traag omdat vele 2D radiograms moeten genomen worden - Zeer hoge investering – €€€€€ - Hoge expertise nodig - Ioniserende straling – zeer ongezond
Resolutie komt overeen met 1/1000ste van afmetingen proefstuk	
Momenteel enkel gebruikt voor inspectie van primaire onderdelen in luchtvaart	

Actieve thermografie: elektromagnetische straling, infrarood, lange golflengte, warmtebeeld
Lock-in thermografie = sinusoïdale warmtestimulatie, induceren van thermische golf met penetratiediepte $\delta \approx 1.8\sqrt{\alpha/\pi f}$ met thermische diffusiviteit α en frequentie f : $f \downarrow \Rightarrow \delta \uparrow$

Voordelen	Nadelen/limitaties
+ Alle thermisch geleidende materialen + Geometrie kan bepaalde kromming hebben + Volledig beeld + Snel + Contactloos + Volume techniek + Gevoelig aan veel defecten: vezeldistortie, delaminatie, scheurtje, porositeiten, diktevariatie ...	- Interne caviteiten en grote krommingen problematisch - Oppervlaktebehandeling soms nodig voor beter contrast, bijv GFRP - Lage gevoeligheid aan diepe defecten (> 5mm) - Anisotrope warmtediffusie is uitdaging - Medium investering - €€€ - Hoge expertise nodig
Resolutie komt overeen met 1/500ste van afmetingen proefstuk Krijgt recent veel aandacht voor mogelijk toekomstige implementatie in industrie Methode is een hot topic in huidig onderzoek	