

WAT IS STERKTE?

In de framebouw praat men veel over sterkte en daarom lijkt het alsof iedereen weet waarover gepraat wordt. Bij sterkte denkt men vooral aan treksterkte, d.w.z. het aantal Newton ($1\text{N} = \pm 0,1\text{ kg}$) per vierkante millimeter dat een trekstaaf van een bepaald materiaal kan verdragen tot het breekpunt. Maar druksterkte is voor veel constructies even belangrijk en treksterkte is geen echte constante. In FIG.1 zien wij een grafiek van de treksterkte van glas in verhouding tot de diameter. Zeer dunne vezels benaderen een sterkte van 14000 N/mm^2 ; dit is 10x de sterkte van de beste framebuizen. Vanaf $0,01\text{mm}$ is de treksterkte constant: slechts 170N/mm^2 !

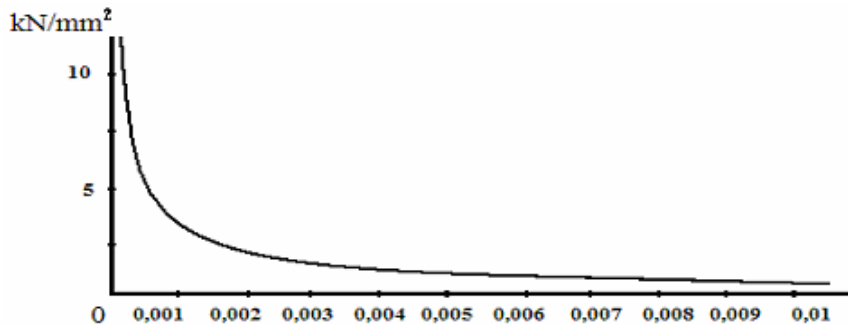


FIG.1

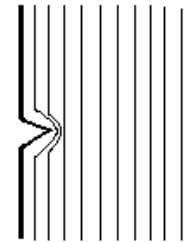


FIG.2

Uit onderzoek blijkt dat niet alleen glas, maar ook andere stoffen deze eigenschap bezitten. Metalen vezels scoren matig bij deze tests. Dit is verklaarbaar, omdat ionbinding en covalente binding sterker zijn dan de metallische binding. Het blijkt dat microstructuren zo sterk zijn, omdat er nauwelijks fouten ("dislocaties") in zitten. Op macroniveau zijn er zaken die veel meer invloed hebben op de uiteindelijke treksterkte als de sterkte van een "perfecte" microvezel. De voornaamste is "breuk-energie". Dit is de hoeveelheid energie, die opgenomen wordt door een proefstaaf tijdens het breken; de meeste vaste stoffen hebben een lage breukenergie. Het sterke punt van metalen is niet hun absolute sterkte, maar de weerstand tegen breuk. Metalen zijn niet sterk maar taai. Koolstofvezels zijn veel sterker dan metalen, maar hebben een lagere breukenergie. Krassen op het oppervlak kunnen aanleiding zijn voor een plotselinge breuk. Dit is te verklaren uit FIG.2; de lijnen op de figuur zijn krachtlijnen. De belasting per vierkante mm is overal gelijk, behalve aan de punt van de barst: daar lopen 3 krachtlijnen vlak langs elkaar en is de belasting driemaal zo hoog. Als de totale belasting groter is dan een derde is van de treksterkte van de staaf, zal de tip van de barst de maximale treksterkte overschrijden en groter worden. Nu zullen er nog meer krachtlijnen doorsneden worden en de stress voor de punt van de barst wordt nog groter: de barst breekt razendsnel door het materiaal!

Er zijn verschillende types microstructuren in vaste stoffen. Glas is amorf d.w.z. de moleculen bezitten geen regelmatige posities t.o.v. elkaar. De meeste stoffen, ook metalen, zijn kristallijn d.w.z. de atomen zijn volgens vaste patronen gerangschikt. Dit kan volgens drie structuren: 1. Kvg (kubisch vlakken gecentreerd o.a. koper, α -ijzer); 2. Krg (kubisch ruimtelijk gecentreerd o.a. γ -ijzer, molybdeen); 3. Hds (hexagonale dichtste stapeling o.a. beryllium, magnesium).

De kvg en hds structuur zijn maximaal dichte stapelingen: de vulgraad is 74%; bij de krg structuur is de vulgraad 68%. Er zijn dus altijd gaten in elke moleculenstructuur de z.g.n. intersitiële ruimtes; deze kunnen andere atomen bevatten. Bij de krg structuur zijn deze ruimtes groter dan bij de kvg structuur, maar de vorm is ongunstiger. Een koolstofatoom past slecht in het γ -ijzerkristal, maar goed in het α -ijzerkristal. In een stapeling van atomen kan een lege plaats voorkomen (een vacature) of een vreemd atoom (een substitutie). Als de temperatuur hoger wordt, nemen door bewegingen van atomen de vacatures in aantal toe. Substitutionele en intersitiële atomen kunnen zich via vacatures verplaatsen (diffusie). In metalen ontstaan onder belasting zichzelf verplaatsende dislocaties; deze vervormen het rooster zo sterk, dat ze hun eigen beweging hinderen. Er moet voor verdere vervorming steeds meer energie worden toegevoerd; daarom is de breukenergie van metalen zo hoog. De vervorming van het rooster verklaart de versteviging die optreedt: hardheid en treksterkte nemen toe, de rek af. Alle vreemde atomen hebben invloed op de dislocatiebewegingen. Door legeren neemt de rekgrens en treksterkte toe, zeker als die atomen in groepjes voorkomen. Dit bereikt men o.a. door warmtebehandeling (de diffusie verloopt dan sneller)!

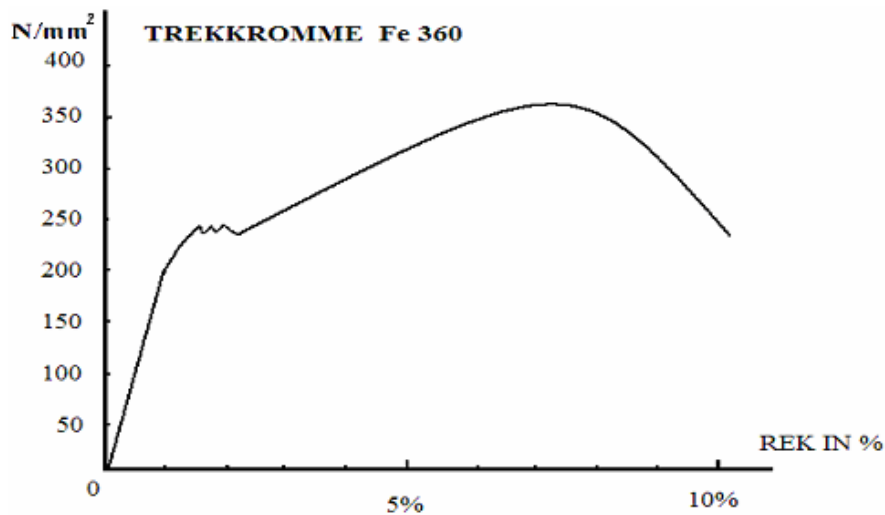


FIG.3

We spannen een staaf constructiestaal met een lengte van 100 mm en 10mm² doorsnede in een trekbank. We verhogen de trekkracht steeds met 50 N/mm². Na iedere verhoging meten we hem. De resultaten zetten we uit in een grafiek (zie FIG.3). De eerste drie maal zal de staaf wel rekken in de trekbank, maar als we hem eruit halen, blijkt hij niet langer te zijn. We noemen dit elastische rek. Pas bij 200 kg blijkt de staaf 0,2mm langer te zijn geworden (dit is 0,2%). Dit noemen we permanente rek; we spreken van de rekgrens of R_{0,2}. Bij 250 kg doet zich een ander verschijnsel voor. De staaf rekt terwijl de kracht erop niet toeneemt; dit noemen we de vloeigrens. In feite worden de koolstofatomen, die zich in de dislocaties verzameld hadden, eruit gedrukt. Bij 300 kg is de staaf 105mm lang; als we nu verder trekken, zal de staaf bij 370 kg beginnen in te snoeren en breken. Geven we deze staaf aan een collega, als nieuw meetexemplaar, dan zal hij constateren dat de rekgrens van deze staalsoort hoger is dan die van constructiestaal; verder heeft het staal geen vloeigrens, de rek voor breuk is gering, en de treksterkte is hoger. Dit noemt men koudverstevingen; het wordt bereikt door de buis over doorsnede te trekken en op te rekken. Als we een metalen buis buigen, zal in de "buitenbocht" rek optreden, en in de "binnenbocht" druk. Door de rek zal er koudversteving plaatsvinden; de kristalstructuur van de buitenbocht wordt daardoor harder en brosser. Dit is de verklaring van het breken van metaaldraad door heen en weer buigen. Als we koudverstevigd metaal verhitten, zullen de interstitiële moleculen door diffusie weer naar de dislocaties gaan. Als er genoeg tijd is, gebeurt dit ook bij kamertemperatuur ("ouderen").

Het fietsframe moet zo sterk zijn, dat het onder maximale belasting niet permanent vervormt. Dit wordt bepaald door de rekgrens. In veel advertenties schermen de fabrikanten met de maximale treksterkte van hun metaalsoorten. Gewoonlijk een onbelangrijke waarde: zodra we over de rekgrens gaan, is het frame al onbruikbaar! Ideaal is een hoge rekgrens en een hoge rek voor breuk. Helaas is dit een combinatie van tegenstrijdige eigenschappen. Sommige metaallegeringen (o.a. Reynolds 753) en sommige kunststoffen (o.a. carbonfiber) hebben geen rekgrens. Zodra we de maximale belasting overschrijden, breekt het frame.

WAT IS STIJFHEID?

Volgens de wet van Hooke vervormen ook starre materialen bij een belasting op trek of druk. Als we tweemaal zo hard trekken zal de lengtetoeename verdubbelen (voor elke materiaalsoort!).

$$\text{rek} = \frac{\text{lengtetoeename}}{\text{originele lengte}} \quad (\text{dimensieloos getal, gewoonlijk in \%})$$

Young formuleerde de wet van Hooke anders. Hierbij wordt een materiaalconstante geïntroduceerd, die Young- of E-modulus genoemd wordt: "soortelijke stijfheid". Symbool: E of E-modulus, uitgedrukt in Mega-pascal (Mpa=N/mm²) of in G(iga)pa.

$$\text{rek} = \frac{\text{belasting}}{\text{stijfheid}} \quad \text{Ofwel:} \quad \text{stijfheid} = \frac{\text{belasting}}{\text{rek}}$$

Materiaal is stijf als het een hoge weerstand tegen vervorming heeft. Wanneer gewicht geen rol speelt, kun je elke constructie stijf maken door veel materiaal te gebruiken. Een fiets moet licht zijn; daarom kijken we ook naar de relatieve stijfheid (E-modulus gedeeld door soortelijke massa). Materialen met een lage E-modulus hebben soms toch een hoge treksterkte; een bekend voorbeeld is nylon.

<u>MATERIAAL</u>	<u>Soort.Massa</u>	<u>E-modulus</u>	<u>E/s.m.</u>	<u>TABEL I</u>
Carbon U.D.+epoxy	1,6 kg/dm³	210 Gpa	130	
E-Glas+epoxy	2,1	55	26	
Staal	7,8	210	27	
Titanium	4,5	120	27	
Aluminium	2,7	72	26	
Magnesium	1,7	42	25	
MetalMatrix M2	2,9	88	30	

Vele metalen en kunststoffen zijn stijf genoeg om er frames mee te bouwen. Een deel valt af door slechte weerstand tegen wisselende belasting; ze zijn niet sterk genoeg, te zwaar, of te duur. Heeft de constructeur een materiaalkeuze gemaakt, dan zijn er twee methodes om de stijfheid te vergroten: een grotere wanddikte of een grotere diameter. Dit resulteert in een hoger gewicht, maar omdat de stijfheid toeneemt met de derde macht van de diameter, kiest de constructeur voor een kleinere wanddikte en een grotere diameter. Zo wordt een frame lichter en stijver. Gelegerde superstalen zijn even stijf als piskakkenijzer. De dunne buis gaat dus ten koste van de stijfheid. Als we naar tabel I kijken, blijkt dat alleen met carbonfiber echte stijfheidsverbetering mogelijk is. Sterktetechnisch kunnen we een titanium frame bouwen dat de helft weegt van een stalen exemplaar, maar zo'n frame is te flexibel. Ook hier kiest de constructeur gewoonlijk voor grotere buisdiameters als oplossing, wat het gewichtsvoordeel weer vermindert. Alleen met aluminium is er op stijfheidsgebied vooruitgang geboekt. Er zijn aluminium-lithium-legeringen ontdekt die 10% stijver zijn (80 i.p.v.72 Gpa). Verder kan aluminium als matrix gebruikt worden in composieten. Gary Klein versterkte zijn aluminium frames als eerste. Hij gebruikte hiervoor boronvezels; dit is puur borium rond een wolfram kern. Tegenwoordig gebruikt men als wapening deeltjes van SiC of Al₂O₃. Specialized bouwt met deze "MetalMatrix" M2 buizen van de fabrikant Duralcan lichte frames. Zo'n buis wordt gemaakt door een poedermix onder hoge druk te verhitten tot het smeltpunt van de laagst smeltende component in een buisvormige mal. De relatieve stijfheid is ± 15% beter (zie tabel I).

Composieten van vezels en kunststoffen wijken in stijfheid sterk af van metalen: in de lengterichting van de vezel is het weefsel het stijfst, dwars daarop veel minder. Bij een "vierkant" weefsel zijn evenveel draden in de lengte als de breedte gebruikt en is de stijfheid gelijkmatig. Wil men sterkte of stijfheid in een bepaalde richting optimaliseren, kan men Uni-Directoraal (**U.D.**)weefsel kiezen met vrijwel alle draden in de lengte, of carbon als ketting en aramide als inslag. Maar metaal is homogener van samenstelling en de productietechnieken zijn betrouwbaarder, waardoor de veiligheidsfactor van het frame lager gekozen kan worden. Bij composieten dient men een ruime marge aan te houden.