

Tandheelkundige Materiaalkennis

door Ir. J. N. Tekenbroek.

(Vervolg)

HOOFDSTUK VI BLIJVENDE VORMVERANDERINGEN

§ I. *De Plastische eigenschappen van de materialen*

a) Verstevinging

In het vorige hoofdstuk werden voornamelijk **de zuiver elastische eigenschappen** van de materialen besproken.

Deze zijn van belang voor het beoordelen van de materialen in verband met de vereiste **sterkte** en **vormbestendigheid** van de apparaten, die er mede vervaardigd worden. **De plastische eigenschappen** die thans nader beschouwd zullen worden richten zich meer op **de verwerking** van de materialen.

Bij het nemen van afdrukken, het persen van prothesen en vele andere tandtechnische handelingen spelen vooral de plastische eigenschappen een rol.

Brosse materialen breken spoedig als zij belast worden boven hun elasticiteitsgrens, taaie materialen laten zich over een langer of korter traject plastisch vervormen. Uit het verloop van de trek-kromme na overschrijding van de elasticiteitsgrens blijkt, dat een steeds groter wordende kracht nodig is om een materiaal plastisch te vervormen.

Onderbreekt men een trekproef als een willekeurig punt M op de trek-kromme (zie fig. 32) is bereikt en ontlast men de proefstaaf, dan zal de lijn MM', die ongeveer evenwijdig is aan de oorspronkelijke moduluslijn OE, worden doorlopen. Volledig ontlast wordt

het punt M' op de horizontale trekas bereikt en de afstand OM' geeft de blijvende vervorming, de blijvende rek, van de gerekte proefstaaf aan. Indien men opnieuw gaat belasten, zal wederom de lijn MM' , maar thans in opgaande richting, worden gevolgd. Bij dit opnieuw belasten van een reeds voorgerekte proefstaaf is de rek aanvankelijk weer zuiver elastisch, de lijn MM' is de moduluslijn van de voorgerekte staaf, en het punt M is de elasticiteitsgrens van het reeds gerekte materiaal. Deze nieuwe elasticiteitsgrens M ligt hoger dan E de elasticiteitsgrens van het oorspronkelijk materiaal, hetgeen betekent, dat het gerekte materiaal steviger is dan het oorspronkelijke materiaal. Bij verdere toeneming van de belasting wordt vanaf het punt M de trekkromme van het

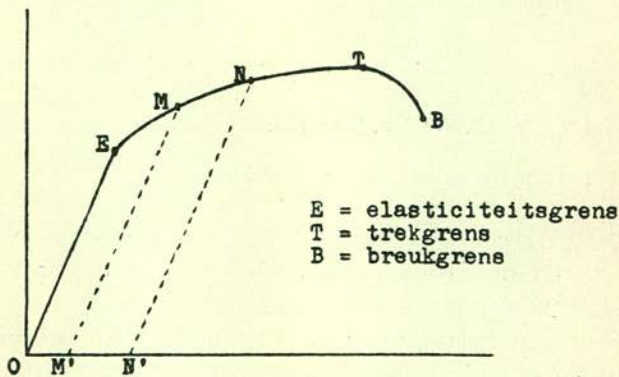


fig. 32

oorspronkelijke materiaal vervolgd. In het punt N de trekproef nogmaals onderbrekend, veert het materiaal bij totale ontlasting terug naar punt N' op de trekas.

Van het thans tweemaal gerekte materiaal is, wanneer de proefstaaf weer belast wordt, NN' de moduluslijn en N de elasticiteitsgrens geworden, welke weer hoger is dan het zojuist genoemde punt M . Het gerekte materiaal krijgt een steeds hogere elasticiteitsgrens, het materiaal wordt door het koude plastische vervormen stugger, steviger, veerkrachtiger; men noemt dit verschijnsel de **verstevinging**. Het heeft praktische betekenis, o.a. heeft getrokken draad (goud of roestvrij staal), dat voor orthodontische apparaten wordt gebruikt, er zijn veerkracht aan te danken.

Het is nuttig om op nog enige andere verschijnselen bij het plastisch vervormen van materialen vooraf te wijzen.

b) Elastische nawerking

Als men een proefstaaf van een kunststof uiterst langzaam uitrekt en daarbij niet de elasticiteitsgrens van het materiaal overschrijdt, blijkt, dat door het langzame uitvoeren van de proef het anders elastische materiaal toch niet direct tot zijn oorspronkelijke lengte terugveert. Wacht men evenwel enige tijd dan krijgt de proefstaaf tenslotte zijn oorspronkelijke lengte terug. Dit verschijnsel, dat men de **elastische nawerking** noemt, wordt bij sommige materialen ingewikkelder.

Niettegenstaande ook deze materialen bij een normale uitvoering der belastingsproeven goede zuiver elastische eigenschappen vertonen, treden er indien men ze uiterst langzaam belast vormveranderingen op, die zich noch direct, noch door een elastische nawerking geheel herstellen.

c) Thermisch terugveren

Verwarmt men het nog niet volledig in zijn oorspronkelijke vorm herstelde materiaal van hierboven een weinig, dan veert het verder terug. Men noemt dit verschijnsel het **thermisch terugveren**. Maar soms herstelt ook na deze verwarming de vormverandering zich niet geheel, zodat dan een blijvende vormverandering wordt waargenomen. Het materiaal is, niettegenstaande het beneden de elasticiteitsgrens belast werd, dan toch plastisch vervormd als gevolg van het uiterst langzame uitvoeren van de belastingproef.

In fig. 33 worden deze verschijnselen bij een langzaam uitgevoerde drukproef grafisch weergegeven, waarbij de vormverandering en de tijd tegenover elkaar zijn uitgezet.

De lijn a geeft het verloop van de vormverandering weer,

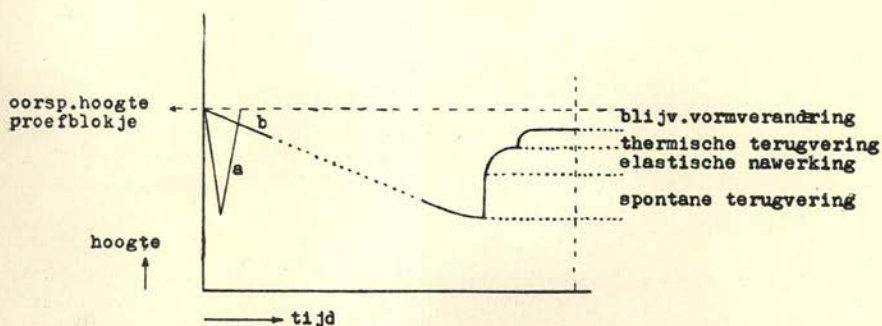


fig. 33

wanneer een proefblokje op normale wijze aan een drukproef wordt onderworpen; de lijn b geeft het verloop aan wanneer de drukproef uiterst langzaam wordt uitgevoerd. Bij het opheffen van de belasting treedt eerst een spontane terugvering op, daarna wordt het traject doorlopen van de elastische nawerking, vervolgens, na enige verwarming, demonstreert zich het thermisch terugveren. Het proefblokje keert niet tot zijn oorspronkelijke hoogte terug, zodat, zoals fig. 33 ook aangeeft, een blijvende plastische vervorming van het materiaal heeft plaats gehad.

Bij het nemen van afdrucken met plastische of elastische afdruckmassa's kan de elastische nawerking een bron van fouten opleveren. Ook het thermische terugveren kan bij het uitgieten der modellen daartoe aanleiding geven door de warmteontwikkeling bij het hardworden van de uitgietsgips.

d) Relaxatie

Tenslotte wordt nog het volgende verschijnsel, dat met het plastisch vervormen van materialen in verband staat, vooraf vermeld.

Als een proefstaaf van een of ander materiaal wordt uitgerekt beneden zijn elasticiteitsgrens en men verwarmt de proefstaaf, die in gespannen toestand wordt gehouden, dan blijkt, dat door die verwarming de spanning in het materiaal afneemt. Men duidt dit verschijnsel aan met de naam **relaxatie**. Bovendien komt dan bij een daarop volgende totale ontlasting van het materiaal naar voren dat, niettegenstaande de belasting de elasticiteitsgrens niet overschreden heeft, de proefstaaf toch niet meer tot zijn oorspronkelijke lengte terugveert, maar dat ook hier een blijvende vervorming heeft plaats gehad.

De versteviging, de elastische nawerking, het thermische terugveren, de relaxatie en nog meerdere later ter sprake komende verschijnselen, die in verband staan met het plastisch vervormen van materialen, rechtvaardigen vanwege hun practisch belang voor het op juiste wijze behandelen en beoordelen van de materialen een nadere beschouwing.

§ 2. *Potentiaalkuil en warmtewerking*

a) *Potentiaal kromme*

Het plastische gedrag van een vaste stof wordt bepaald door de vorm, de onderlinge oriëntering en de bindingskracht van de moleculen, atomen of ionen, waaruit de beschouwde stof is opgebouwd.

Van twee naast elkaar gelegen atomen 1 en 2 in een vaste stof kan opgemerkt worden, dat zij in hun evenwichtstoestand **een minimum aan potentiële energie** t.o.v. elkaar bezitten.

Bij het uitrekken van een materiaal wordt de onderlinge afstand der atomen vergroot en moet de bindingskracht tussen de atomen overwonnen worden. Het kost kracht en dus energie om atoom 2 verder van atoom 1 te verwijderen, welke energie men terugvindt in de vermeerdering van de potentiële energie van atoom 2 t.o.v. atoom 1, wanneer hun onderlinge afstand zich vergroot.

Indien men de beide atomen dichter bij elkaar wil brengen, vereist dit ook kracht, hetgeen men bij het samendrukken van een materiaal ondervindt.

De atomen gedragen zich als elastische bollen; bij het kleiner maken van hun onderlinge afstand zullen hun negatief geladen electronensferen elkaar moeten doordringen. Hierdoor worden sterke afstotende krachten in het leven geroepen, waartoe eveneens het feit bijdraagt dat de positief geladen kernen van de beide beschouwde atomen dichter bij elkaar gebracht worden en elkaar dan sterker zullen afstoten. Deze afstotende krachten nemen sterk met het kleiner worden van de afstand tussen de beide atomen toe.

Naar welke zijde atoom 2 zich beweegt vanuit zijn evenwichtstoestand, steeds moeten daarbij krachten overwonnen worden, zodat bij iedere verplaatsing van atoom 2 t.o.v. atoom 1 de potentiële energie van 2 t.o.v. 1 toeneemt.

Indien in een grafiek de potentiële energie van atoom 2 t.o.v. atoom 1 wordt uitgezet tegenover hun onderlinge afstand, krijgt men een **potentiaalkromme**, zoals aangegeven in fig. 34.

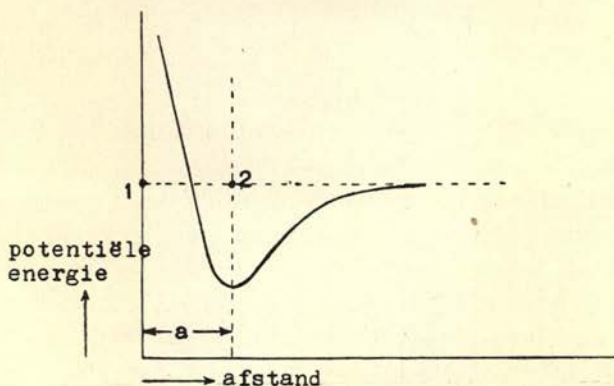


fig. 34

Op een afstand a van atoom 1 bevindt zich atoom 2 in zijn evenwichtstoestand. Bij samendrukking verkleint men de afstand en neemt de potentiële energie voortdurend en zeer snel toe, hetgeen zich in het steile verloop van de potentiaalkromme aan de linkerzijde demonstreert. Aan de rechterzijde gaat de potentiaalkromme tenslotte vlak verlopen, omdat bij het groter worden van de afstand tussen de beide atomen (bij het uitrekken van een materiaal) de aantrekkingskracht steeds afneemt.

In zijn evenwichtstoestand bevindt atoom 2 zich dus (grafisch gesproken) in een **potentiaalkuil**. De diepte van de potentiaalkuil hangt af van de grootte der bindingskracht; hoe sterker deze bindingskracht is, hoe meer energie het kost om het atoom uit zijn evenwichtstoestand te halen, dus hoe dieper de potentiaalkuil zal zijn.

b) Warmtewerking

Tengevolge van de warmtewerking bevindt een atoom van een vaste stof zich in zijn evenwichtstoestand niet in rust, maar vibreert om zijn evenwichtsstand.

De **kinetische theorie der warmte** geeft aan, dat bij een bepaalde temperatuur de moleculen van alle gassen dezelfde gemiddelde hoeveelheid kinetische energie hebben. Deze bedraagt voor één grammolecule $\frac{3}{2} RT$, waarin R de universele gasconstante en T de absolute temperatuur van het beschouwde gas is.

Voor één molecule is deze energie $\frac{3}{2} \frac{R}{N} T$, waarin N het Avogadro-

getal is (het aantal moleculen per grammolecule). $\frac{R}{N}$ is wederom een

universele constante, die de naam draagt van de constante van **Boltzmann**, welke aangegeven wordt door de letter k .

De gemiddelde kinetische energie van één molecule in een gas is dus $\frac{3}{2} kT$. De **verdelingswet van Maxwell** geeft aan dat er in een gas moleculen zijn met meer en met minder kinetische energie dan de gemiddelde. Hoe groter de snelheid is waarmede een molecule zich in het gas beweegt, hoe groter zijn kinetische energie zal zijn. Zet men tegenover elkaar uit de snelheid en het aantal moleculen dat een bepaalde snelheid heeft, dan krijgt men, zoals in fig. 35 de bekende **verdeelkromme** van **Maxwell**.

De getrokken lijn geeft de verdeling van het aantal moleculen naar de snelheid bij de temperatuur T_1 terwijl de gestippelde kromme deze verdeling bij een hogere temperatuur T_2 aangeeft.

Bij vaste stoffen, waarin de moleculen aan een vaste plaats gebonden zijn, kan de kinetische warmteënergie der moleculen zich niet, zoals bij gassen en vloeistoffen, in een snelheid uiten, waarmee zij zich vrij bewegen, maar trillen de moleculen door de warmtewerking om hun evenwichtsstand. De frequentie van deze trillingen wordt bepaald door de grootte der aanwezige bindingskracht, terwijl de amplitudo de maat aangeeft van de kinetische warmteënergie der moleculen. In afwijking van de gassen met één atomige moleculen krijgen de moleculen en atomen in een vaste stof door de warmtewerking naast hun kinetische energie nog een bedrag aan potentiële energie t.o.v. van elkaar.

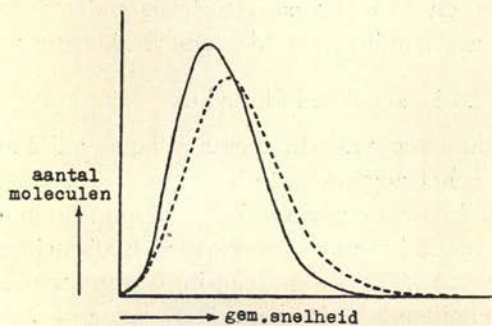


fig. 35

Men kan uitrekenen, dat deze potentiële energie gelijk is aan de kinetische energie (bij geoorloofde benadering aannemend dat het hier harmonische trillingen betreft), zodat in een vaste stof een molecule ten gevolge van de warmtewerking een totale hoeveelheid gemiddelde energie heeft gelijk aan $2 \times \frac{3}{2} kT = 3 kT$. Ook hier geldt de verdelingswet van Maxwell, zodat er moleculen zijn die een grotere hoeveelheid energie hebben dan de gemiddelde en dus met een grotere amplitudo om hun evenwichtstand vibreren, tegenover moleculen met een kleinere hoeveelheid energie.

Bij een temperatuur beneden het smeltpunt zitten de moleculen van een vaste stof gevangen in hun potentiaalkuil.

Bij het smeltpunt is de gemiddelde warmte-energie der moleculen zo groot, dat zij allen hun potentiaalkuil kunnen verlaten. De samenhang van de vaste stof gaat daarbij verloren, de stof smelt.

Beneden het smeltpunt is de gemiddelde warmte-energie der moleculen daarvoor te gering, maar er komen (verdelingswet van Maxwell) moleculen voor die aanzienlijk meer dan de gemiddelde warmte-energie bezitten en daaronder zullen een aantal zijn die voldoende energie bezitten om hun potentiaalkuil te kunnen verlaten. Hoe dichter de temperatuur bij het smeltpunt komt, hoe groter dit aantal zal zijn. Deze moleculen „ontsnappen” uit hun potentiaalkuil en vinden, onder afstand van hun teveel aan warmte-energie aan hun directe omgeving, een nieuwe evenwichtstoestand, waarbij zij weer een minimum aan potentiële energie t.o.v. hun omgeving hebben. Na verloop van enige tijd zijn zij volgens de regels der waarschijnlijkheid wederom aan de beurt om van hun omgeving zoveel warmte-energie toebedeeld te krijgen, dat zij wederom in staat zijn uit hun potentiaalkuil te ontsnappen. Zo kunnen moleculen in een vaste stof van plaats veranderen; de **diffusie** in vaste stoffen gaat hier zijn verklaring vinden.

c) Dislocaties en diffusie

Bij het behandelen van de metaalalliages zal later besproken moeten worden het zogenaamde homogeniseren van alliages door middel van een bepaalde warmte-behandeling. Bij het afkoelen van een gesmolten metaal kunnen de eerste zich afscheidende kristallen rijker of armer aan één van de legeringscomponenten zijn dan de zich later afscheidende kristallen. Het vast geworden metaal is dan niet homogeen samengesteld. Door verhoging van de temperatuur wordt een groter aantal moleculen in staat gesteld hun potentiaalkuil te verlaten en egaliseert zich door diffusie de concentratieverschillen in het beschouwde materiaal, waardoor het homogener wordt.

Maar het hier ontwikkelde beeld omtrent het door de warmte-werking kunnen verlaten van de potentiaalkuil is nog niet geheel toereikend om de diffusie in vaste stoffen te verklaren. Men kan zich immers afvragen, waar vindt een atoom of molecule, dat zijn potentiaalkuil verlaten heeft, in zijn naaste omgeving een plaats. Bij de behandeling van de kristallen immers is betoogd, dat alle beschikbare plaatsen in een kristalrooster bezet zijn.

Verschillende verschijnselen hebben echter genoodzaakt dat men van deze voorstelling is moeten terugkomen. Men is namelijk gedwongen in de submicroscopische bouw van de kristallen meerdere en zelfs een groot aantal **onregelmatigheden** te moeten aannemen,

welke afwijkingen van de ideale roosterstructuur de naam van **dislocaties** dragen. Deze dislocaties bestaan, eenvoudig voorgesteld, daaruit, dat bij de groei van de kristallen niet alle beschikbare plaatsen in het kristalrooster bezet worden. Er komen dus open plaatsen voor in het rooster, waarin de door de warmtewerking aan hun vaste plaats ontsnapte moleculen terecht kunnen; zo kan men zich de diffusie in vaste stoffen verklaren.

Als een materiaal uitgerekt wordt, zijn alle moleculen wat verder van elkaar gebracht, en bezitten daardoor iets meer potentiële energie t.o.v. elkaar of, om het beeld van de potentiaalkuil te gebruiken, zij zijn alle een weinig uit hun potentiaalkuil gelicht.

Omdat er dan voor alle moleculen een geringere diepte van de potentiaalkuil resteert om overwonnen te moeten worden teneinde aan hun vaste plaats te kunnen ontkomen, zal er bij een bepaalde temperatuur in een onder spanning staand materiaal een groter aantal moleculen zijn, die door de warmte-energie daartoe in staat zijn, dan bij het onbelaste materiaal. Verhoogt men bovendien de temperatuur, dan zullen meerdere moleculen uit hun potentiaalkuil kunnen ontsnappen en een nieuwe plaats gaan innemen, bij welke heroriëntering zij weer een minimum aan potentiële energie t.o.v. hun omgeving krijgen. Zij verliezen daarbij de spanning waaronder zij door de uitwendige mechanische belasting van het materiaal stonden. De spanning in het belaste materiaal neemt daardoor af, hetgeen het hierboven besproken verschijnsel der relaxatie verklaart. De snelheid waarmee dit gebeurt, de relaxatietijd, hangt af van de diepte der potentiaalkuilen, (dus van de aard van het materiaal), de grootte der spanning en van de temperatuur.

d) Verschil tussen kristallijne en amorfe stoffen

Het principiële verschil dat tussen de kristallijne en de amorfe vaste stoffen bestaat, kan aan de hand van het bovenstaande als volgt worden aangegeven. Bij de kristallijne stoffen hebben de moleculen, atomen of ionen een regelmatige uniforme rangschikking t.o.v. elkaar, terwijl bij de laatste van een willekeurige en ongelijke oriëntering der bouwstenen sprake is. De in een kristalvlak gelegen roosterpunten liggen op onderling gelijke afstand en de diepte der potentiaalkuilen is voor alle aanwezige moleculen (atomen of ionen) daarbij gelijk. Neemt men een doorsnede door een **amorfe stof**, dan liggen daarin de moleculen op **onregelmatige**

afstand van elkaar en hun potentiaalkuilen zijn **niet gelijk diep**.

Schematisch wordt dit in figuur 36 weergegeven.

Dit principiële verschil in opbouw tussen kristallijne en amorfe stoffen veroorzaakt een uiteenlopend gedrag bij het plastisch vervormen tussen beide groepen van stoffen, waardoor een afzonderlijke behandeling ervan nodig is.

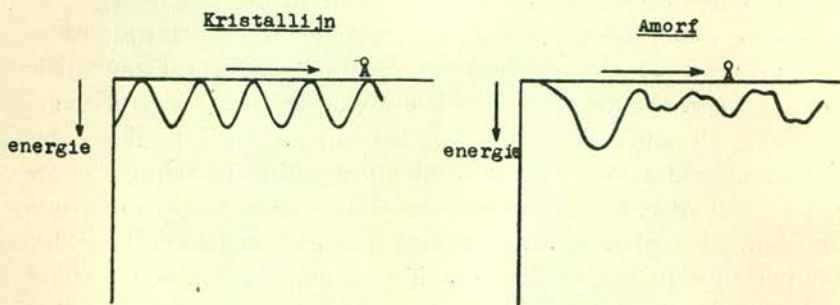


fig. 36

§ 3. *Het plastisch vervormen van kristallijne stoffen*

a) *G l i j v l a k k e n*

Voor de tandheelkundige materiaalkennis is het plastische gedrag van de metalen, die alle tot de kristallijne stoffen behoren, van belang. In hun gebruikelijke vorm zijn de kristallijne materialen **microkristallijn** van structuur. Zij zijn opgebouwd uit microscopisch kleine kristallen, de **kristallieten**, die kristallografisch willekeurig georiënteerd en door grillige grensvlakken gescheiden de vaste stof opbouwen.

Voor een goed begrip van het plastisch gedrag der microkristallijne stoffen is noodzakelijk eerst dit gedrag van de „**enkel**” **kristallen** nader te beschouwen.

Er is reeds vroeger op gewezen, dat de metalen een eenvoudig regulair kristalrooster hebben, waarbij een veel voorkomend kristalpatroon, de kubische dichte bolpakking of vlak gecenterde kubus is.

Door een kristal, waarvan dan hier als voorbeeld genomen wordt een kristal dat een kubische dichte bolpakking als de elementaircel heeft, kan men zich meerdere vlakken aangebracht denken. De in verschillende richting door het kristal gedachte vlakken zullen op verschillende wijze en met verschillende dichtheid door atomen bezet zijn. In fig. 37 is getracht dit op schematische wijze aan te geven.

Van de het dichtst met atomen bezette vlakken is er één in het vlak van tekening afgebeeld. De atomen bevinden zich daarin op een bepaalde afstand, in de figuur aangegeven als a , van elkaar verwijderd. Loodrecht op het vlak van tekening zowel verticaal (schematisch aangegeven in de linker benedenhoek van fig. 37) als horizontaal (niet aangegeven in de tekening) bevinden zich soortgelijke vlakken bij deze kristalvorm. Deze vlakken hebben een zelfde wijze van atoombezetting als het vlak van tekening en al deze vlakken zijn op een afstand a van elkaar verwijderd, gelijk aan de afstand waarop de atomen van elkaar verwijderd zijn in die vlakken.

Beschouwt men vervolgens andere vlakken in dit kristal b.v. die welke een hoek van 45° maken met de zojuist besproken vlakken; in fig. 37 zijn zij in de linkerbovenhoek aangegeven. In deze vlakken

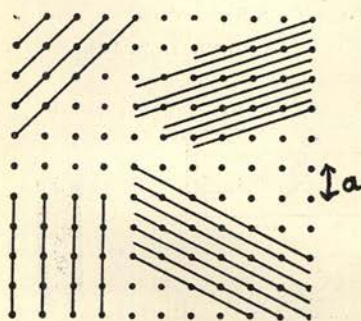


fig. 37

liggen de atomen niet op een afstand a van elkaar, maar zoals eenvoudig te berekenen is, op een afstand $a\sqrt{2}$ (de hypotenusa van een gelijkbenige rechthoek met de zijden a). De atomen liggen in die vlakken verder van elkaar; de afstand tussen die vlakken zelf is echter niet meer a zoals zojuist, maar kleiner en wel $\frac{1}{2}a\sqrt{2}$, zoals zich eveneens eenvoudig laat berekenen.

In de linkerbenedenhoek van de tekening (fig. 37) zijn weer andere vlakken in het kristal schematisch aangeduid. De atoombezetting in die vlakken is weer geringer, de afstand tussen de atomen is daar groter ($a\sqrt{5}$), maar de afstand tussen de vlakken zelf is weer geringer dan in het vorige geval $\left(\frac{2a}{\sqrt{5}}\right)$.

Hoe dichter vlakken in een kristal bij elkaar gelegen zijn, hoe sterker zal de bindingskracht tussen die vlakken zijn. De het dichtst

met atomen bezette vlakken, die men in een kristalvorm kan aangeven, zijn, zoals uit het voorafgaande bleek, het verst van elkaar verwijderd en zullen met de minste bindingskracht onderling verbonden zijn.

Als een uitwendige kracht op een kristal uitgeoefend wordt zullen de zwakkere bindingskrachten tussen deze vlakken zich het eerst begeven. Hieruit volgt dat de **glijvlakken** in een kristal de het **dichtst met atomen** bezette vlakken zijn.

Hoe meer vlakken er in een kristalvorm voorkomen waartussen geringe bindingskrachten heersen, dus vlakken met een zo dicht mogelijke atoombezetting, des te gemakkelijker laat zo'n kristal zich plastisch vervormen of om tot de metalen terug te keren des te smeedbaarder zal het metaal zijn. Het verschil in smeedbaarheid tussen de metalen onderling is te verklaren uit het verschil tussen hun kristalrooster. De kristalroosters die de kubische dichte bolpakking als patroon hebben, bezitten, zoals vroeger, besproken

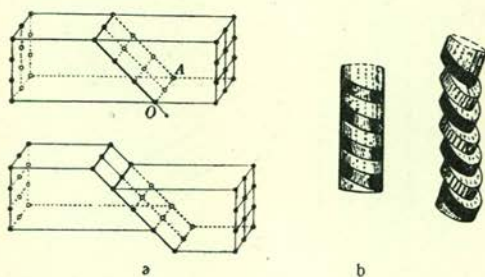


fig. 38

is, drie, loodrecht op elkaar staande, reeksen van evenwijdige vlakken met een zo dicht mogelijke atoombezetting. In metaalroosters, die de gecenterde kubus als elementaircel hebben, treft men slechts één reeks van evenwijdige vlakken met de dichtste atoombezetting. Deze kristallen zullen dus minder gemakkelijk te deformereren zijn en deze metalen zullen minder smeedbaar zijn dan de eerst besprokene.

Een klassieke proef waarmee het afschuiven van een metaalkristal langs de glijvlakken gedemonstreerd wordt, is het uitrekken van een tindraad, die uit een enkel kristal vervaardigd is. De aanvankelijk zuiver ronde gladde draad plat zich af en wordt band-

vormig met een gestreept oppervlak. Fig. 38 geeft schematisch aan hoe dit te verklaren is.

b) Anisotropie van enkelkristallen

Het metaal koper heeft de kubische dichte bolpakking als elementaircel van zijn kristallen. Een enkel-kristal van koper, zodanig kubusvormig geslepen, dat de zijvlakken van de kubus evenwijdig zijn aan de het dichtst met atomen bezette vlakken van het kristalrooster, vertoont als het belast wordt in een richting evenwijdig aan die zijvlakken een elasticiteitsmodulus van 6800 kg/mm^2 en een treksterkte van 15 kg/mm^2 . De belasting in het kristal is dan evenwijdig aan de vlakken die het minst sterk onderling zijn verbonden, zodat een afschuiving gemakkelijk plaats heeft. Belast men deze kubus echter in de richting evenwijdig aan zijn lichaamsdiagonaal, in welke richting de daarmede evenwijdige kristalvlakken sterker onderling verbonden zijn, dan zal het meer kracht kosten om de afschuiving, dus het plastisch vervormen, langs de glijvlakken te doen plaats hebben. In overeenstemming daarmede vindt men dan een hogere elasticiteitsmodulus en een hogere treksterkte en wel resp. 19.400 kg/mm^2 en 35 kg/mm^2 .

De mechanische eigenschappen van een enkelkristal zijn dus niet gelijk voor de verschillende richtingen in het kristal; ook in mechanisch opzicht gedraagt een kristal zich **anisotroop**.

c) G l i j z o n e s

Bij het belasten van een kristal boven zijn elasticiteitsgrens vervormt het kristal zich plastisch door afschuiving langs de glijvlakken. De atomen in die glijvlakken verschuiven daarbij van de ene evenwichtstoestand t.o.v. elkaar naar een volgende. Uit de grootte der bindingskracht kan men theoretisch de kracht uitrekenen die nodig is om twee vlakken in het kristal langs elkaar te schuiven. Dit berekende bedrag bleek echter enige honderden malen groter te zijn dan de kracht die men experimenteel vindt. De verklaring van verschil vindt men in de storingen in het kristalrooster, de **dislocaties**, waarop reeds eerder gewezen is.

Men stelt zich deze plaatselijke storingen in het kristalrooster het eenvoudigste voor door aan te nemen dat meerdere plaatsen in het rooster niet bezet zijn. Bij een mechanische belasting van een kristal zullen de atomen in de omgeving van een dislocatie de spanningsbijdrage moeten overnemen van de ontbrekende atomen, waar-

door de aanwezige atomen onder een hogere spanning komen te staan. Bij het toenemen van de mechanische belasting zullen deze plaatsen het eerste toegeven en daar ter plaatse begint de plastische vervorming. Het glijvlak met de meeste dislocaties, zijnde dit de zwakste plaats in een kristal, zal het eerst afgeschoven worden en verder gaande zoekt de afschuiving zijn weg door het kristal gaande van de ene onregelmatigheid naar de andere.

Als de plastische vervorming langs het eerste glijvlak over een bepaalde afstand heeft plaats gehad, zullen de dislocaties in dat glijvlak wat „opgevuld” worden, en zal een grotere kracht nodig zijn voor de verdere afschuiving langs hetzelfde vlak. Bij het toenemen van de belasting zal het verder plastisch vervormen dan geschieden door afschuiving langs een ander glijvlak. Dit zal langs een vlak zijn gelegen op enige afstand van het eerste vlak. In de directe nabijheid van een vlak waarlangs reeds deformatie heeft plaats gehad is het kristalrooster mede wat vervormd en zal het afglijden van het kristal daar ter plaatse meer kracht vereisen dan langs een vlak gelegen in een nog ongerept gedeelte van het kristal. Zo ontstaan in een kristal dat plastisch vervormd wordt op bepaalde afstanden van elkaar **glijzônes**, die zich aan het oppervlak van het kristal macroscopisch demonstreren als **glijlijnen**. Bij het toenemen van de plastische vervorming komen achtereenvolgens de glijvlakken met grotere weerstand in aanmerking om in de plastische deformatie betrokken te worden. Hoe meer een kristal reeds plastisch vervormd is, hoe meer kracht er nodig is om het nog verder te vervormen tot het moment bereikt wordt dat de daarvoor benodigde kracht zo groot is dat het materiaal breekt.

d) Plastisch vervormen van polykristallijne stoffen

Zoals dat reeds vroeger besproken is en zoëven nog vermeld, zijn de gekristalliseerde stoffen in hun gebruikelijke vorm polykristallijn. Fig. 39 geeft aan hoe in een metaal de kristallieten willekeurig kristallografisch georiënteerd en met grillige vlakken begrensd door elkaar liggen. Het is een afbeelding van een geëtst slijppreparaat ener Au-Pt legering.

Wordt een stof met polykristallijne structuur beneden zijn elasticiteitsgrens belast, dan zal de in het materiaal opgewekte spanning niet gelijkmatig over de kristallieten van een doorsnede verdeeld zijn. De kristallieten gelegen in een te beschouwen doorsnede zijn

niet op dezelfde wijze kristallografisch georiënteerd. Door de uitwendige belasting zal het beschouwde materiaal wat uitgerekt worden, waarbij alle in de doorsnede gelegen atomen over dezelfde afstand verder van elkaar zijn gebracht. Dit veroorzaakt in de

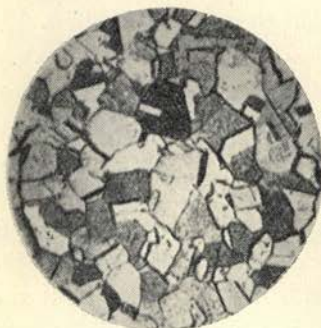


fig. 39

verschillende kristallieten van de doorsnede niet dezelfde spanning. In een kristalliet b.v. dat kristallografisch zodanig in de beschouwde doorsnede is georiënteerd, dat de belasting werkt in een richting waarin het enkel-kristal de geringste elasticiteitsmodulus heeft,

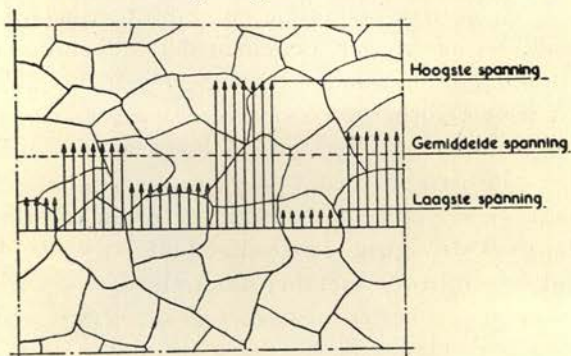


fig. 40

zal door de rek slechts een geringe spanning opgewekt worden. De spanning in de verschillende kristallieten gelegen in de doorsnede zal daarom uiteenlopen, zoals fig. 40 aangeeft.

Deze ongelijke spanningen sommeren zich tot een gemiddelde spanning over de doorsnede, die de uitwendige belasting in evenwicht houdt. Doordat in alle doorsnedes een zeer groot aantal

kristallieten aanwezig zijn, zal de gemiddelde spanning (en daarmee de gemiddelde elasticiteitsmodulus) in alle doorsneden van het materiaal hetzelfde zijn.

Moest over een enkel-kristal opgemerkt worden dat dit anisotroop was, in hun gebruikelijke polykristallijne structuur gedragen de kristallijne stoffen zich als isotrope stoffen. Er bestaat echter een verschil tussen deze isotropie en die van b.v. een vloeistof of een amorfe stof. Men duidt dit verschil aan door de polykristallijne stoffen **pseudo-isotroop** te noemen.

Wordt een polykristallijne stof boven zijn elasticiteitspunt belast dan gebeurt het volgende.

Een kristalliet, dat dusdanig kristallografisch georiënteerd in de beschouwde doorsnede gelegen is, dat zijn gunstigste glijvlakken evenwijdig aan de belastingsrichting lopen, zal onder invloed van de spanning het eerst plastisch gaan deformeren. Aan deze deformatie wordt spoedig een grens gesteld omdat het beschouwde kristalliet tussen zijn naburen, die nog niet plastisch gedeformeerd worden bij de heersende spanning, ingeklemd zit. Aan de randen van het gedeformeerde kristalliet zal het kristalrooster vertrokken worden, waardoor daar ter plaatse de atomen t.o.v. elkaar verplaatst worden, waarbij inwendige spanningen ontstaan. De atomen krijgen een grotere potentiële energie t.o.v. elkaar dan in de rusttoestand. Bij het verder toenemen der uitwendige belasting zullen de kristallieten met minder gunstig gelegen glijvlakken aan de beurt komen voor deformatie en dat vereist meer kracht. Dit verklaart waarom een steeds grotere uitwendige kracht nodig is om een reeds ten dele plastisch vervormd polykristallijn materiaal verder te vervormen, een verschijnsel, dat aan het begin van dit hoofdstuk met de naam **verstevinging** werd aangeduid. Als in een legering kristallen van verschillende metalen naast elkaar voorkomen, dan zullen de kristallen van het zachtste metaal het eerste gedeformeerd worden bij een mechanische belasting van het materiaal. Vertoont de microstructuur van zo'n legering grote kristallen, is deze structuur dus **grof kristallijn**, dan zullen kristallen van het zachte metaal over een langer traject plastisch vervormd worden alvorens de andere aanwezige hardere kristalsoorten daaraan een grens stellen. Bij een **fijnere kristallijne** structuur van de zelfde legering zal aan deze plastische vervorming eerder een grens gesteld worden. De legering is dan harder, stugger, vaster dan bij een grof kristallijne structuur.

e) Spanningsvrij gloeien

In een plastisch gedeformeerd metaal komen door de vervorming van de roosters der kristallieten inwendige spanningen voor, vooral langs de grenzen der kristallieten. Bij verhoging der temperatuur zullen in dergelijke gebieden de atomen, die door de inwendige spanning reeds ten dele uit hun potentiaalkuilen zijn gelicht, onder invloed der warmtewerking hun potentiaalkuil verlaten en een nieuwe plaats in het rooster van het kristalliet gaan innemen, waarbij zij weer een **minimum aan energie** t.o.v. hun omgeving bezitten. Als gevolg van de temperatuurverhoging verdwijnen daardoor de inwendige spanningen in het metaal; men noemt een dergelijke warmtebehandeling van koud gedeformeerde metalen het **spanningsvrij gloeien**. De temperatuur, waarbij dit op de gunstigste wijze geschiedt, hangt af van het metaal en van de grootte der deformatie. Bij sommige metalen ligt die temperatuur tussen 250° en 300°, waarbij de verhittingsduur ongeveer een half uur is.

f) Rekristallisatie-temperatuur

Wordt de temperatuur van een metaal dat koud gedeformeerd is hoger opgevoerd, dan treedt een rekristallisatie in het materiaal op. Bij die hogere temperatuur, de **rekristallisatie-temperatuur**, krijgen meerdere atomen tegelijk een dusdanige grote beweeglijkheid, dat zij niet meer een vrije plaats in het kristalrooster van het oorspronkelijke kristalliet zoeken, maar gezamenlijk een nieuw kristalrooster gaan opbouwen. De kiemen voor deze nieuwe kristallen treft men op die plaatsen in het materiaal, die het sterkst gedeformeerd zijn. Uit deze kiemen vormen zich kristalkernen van waaruit de nieuwe kristallieten groeien. Is het metaal sterk gedeformeerd, dan heeft men veel plaatsen met hoge inwendige spanning, dus veel kristallisatie-kiemen; er zullen dan veel kristalkernen en daarmee veel nieuwe kristallieten ontstaan, met als gevolg dat na de rekristallisatie het materiaal een **fijn korrelige** structuur vertoont.

Bij hun vorming groeien de nieuwe kristallieten regelmatig naar alle kanten uit waardoor zij met rechte grensvlakken tegen elkaar aan komen te liggen. Treft men in een slijp-preparaat van een metaal dergelijke meer regelmatige grensvlakken aan, dan heeft men meestal met gerekristalliseerd materiaal te maken.

Is het materiaal maar weinig plastisch gedeformeerd, zodat maar weinig kiemen aanwezig zijn, dan zullen bij verhitting van het

metaal boven de rekristallisatie-temperatuur maar weinig kristalkernen ontstaan met als gevolg dat zich grotere kristallieten vormen. Men krijgt dan een **grof kristallijn** materiaal. Hetzelfde gebeurt als men een sterk gedeformeerd materiaal vooraf ten dele spanningsvrij gloeit en vervolgens boven de rekristallisatie-temperatuur verhit.

g) Secundaire rekristallisatie

Een toename van de kristalliet-grootte in een metaal kan nog op een geheel andere wijze plaats hebben, welke niet in verband staat met het koud deformereren. Dit verschijnsel, dat de naam draagt van **secundaire rekristallisatie** berust op het bekende feit, dat grote kristallen door hun geringere oppervlakte energie aangroeien ten koste van kleine kristallen, die door de kleinere kromtestralen van hun oppervlakken een grotere oppervlaktetenspanning hebben. Door temperatuurverhoging kan deze secundaire rekristallisatie, die veel langzamer verloopt, dan de hierboven besproken rekristallisatie versneld worden.

In het algemeen gesproken hebben grofkorrelige materialen minder goede mechanische eigenschappen, zodat men bij koud vervormde metalen er voor moet oppassen, dat de juiste grootte van de kristallieten in het oorspronkelijke materiaal niet verloren gaat door een verkeerde warmtebehandeling.

De verschillende metalen en hun alliages vereisen uiteenlopende temperaturen en verhittingstijden om op de juiste wijze thermisch behandeld te worden. Bij speciale alliages geven de fabrikanten nauwkeurige voorschriften betreffende eventuele warmtebehandelingen.

In gegoten metaal vindt men geen plastisch gedeformeerde platen, zodat gegoten metalen bij verhitting geen rekristallisatie vertonen (afgezien dan van een mogelijke secundaire rekristallisatie).

h) Warmdeformereren van metalen

Na hetgeen besproken is, zal het zonder meer duidelijk zijn dat er een verschil is tussen het koud en het warm deformereren van een metaal. Men moet het ijzer smeden als het heet is, zegt het spreekwoord. Bij het plastisch vervormen in de warmte kost het minder kracht om de kristallieten te deformereren met als gevolg dat er minder inwendige spanningen in het materiaal zullen optreden. In de warmte laat een metaal zich over een groter traject plastisch vervormen, zonder dat het materiaal daarbij scheurt. Indien een metaal om zijn goede mechanische eigenschappen en juiste struc-

tuur te bewaren koud gedeformeerd moet worden terwijl men voor zijn doel een aanzienlijke deformatie nodig heeft, verdient het aanbeveling om gedurende de koude bewerking het metaal af en toe spanningsvrij te gloeien om de versteviging op te heffen. Een handelwijze, die in de tandtechniek o.a. bij het vormen van een kroonband toegepast wordt. Door het af en toe gloeien tussen de bewerkingen wordt het goudbandje weer soepeler, waardoor de kans, dat bij de verdere koude vervorming het materiaal zou scheuren voorkomen wordt.

i) Het plastisch vervormen van amorfe stoffen

Bij het bespreken van het plastisch vervormen van de kristallijne stoffen kon dankbaar gebruik worden gemaakt van hetgeen in vorige hoofdstukken omtrent de kristallijne toestand der materie reeds behandeld was. Over de amorfe toestand is in het voorafgaande niet veel meer opgemerkt dan dat de moleculen daarbij niet regelmatig t.o.v. elkaar georiënteerd zijn. Om met vrucht de verschijnselen te kunnen bespreken die bij het plastisch vervormen van de amorfe stoffen van belang zijn, moet deze te geringe kennis omtrent de amorfe toestand aangevuld worden.

De snel tot ontwikkeling gekomen chemie der kunststoffen heeft in de laatste jaren veel bijgedragen tot de nadere kennis omtrent de amorfe toestand.

Het is nog slechts een goede tien jaar geleden dat de kunststof, aanvankelijk schoorvoetend en met veel teleurstellingen, zijn intrede in de tandheelkunde deed. Op het ogenblik neemt deze groep van stoffen reeds een belangrijke plaats onder de tandheelkundige materialen in. De kunststoffen staan nog aan het begin van hun ontwikkeling en het is waarschijnlijk dat in de loop der komende jaren andere vertegenwoordigers van deze groep van stoffen op tandheelkundig gebied toepassing zullen vinden naast de thans voornamelijk toegepaste zogenaamde acrylaten. Voor de kennis der tandheelkundige materialen is een nadere oriëntering in de chemie der kunststoffen noodzakelijk en deze oriëntering voert tevens tot de gewenste meerdere kennis van de amorfe toestand. Alvorens het plastisch vervormen der amorfe stoffen te bespreken, zal in het volgende hoofdstuk eerst het een en ander omtrent de chemie van de kunststoffen besproken worden.

(Wordt vervolgd)