

## MODELLEREN VAN KRUIPGEDRAG KRUIPGEDRAG: KRUIPPROEVEN EN TRAGE TREKPROEVEN

Ir. T.E. Glazemakers, Philips CFT, afdeling Parts Processing, groep Materials,  
ir. W.M.M. Huijbregts, KEMA Nederland BV, KEMA Power Generation, Inspection & Materials,  
prof. dr. ir. Y. Houbaert, Universiteit Gent, Algemene Metallurgie, Siderurgie en Fysische Metaalkunde

Materialen maart/april 1998

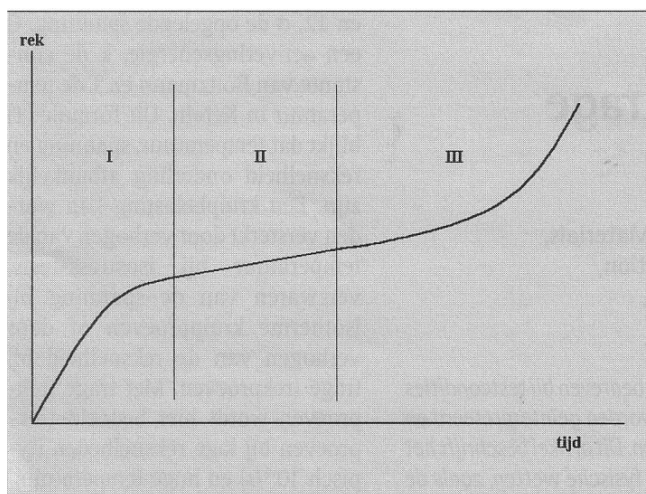
*Om de testduur te verkorten worden kruiptests meestal bedreven bij testcondities zwaarder dan de bedrijfscondities. De testresultaten worden geïnterpreteerd en geëxtrapoleerd via empirische relaties of fysische wetten. Dit artikel beschrijft het fysisch modelleren van kruip. Hierbij worden bekende fysische wetten, zoals de Norton-wet voor secundaire kruip, gecombineerd met factoren die primaire en tertiaire kruip beschrijven. Dit "uitgebreide Norton model" is hiermee in staat om het gehele kruipgedrag van een metaal te voorspellen. Het model wordt toegepast om kruiptests te interpreteren en te extrapoleren. Ook wordt aangetoond dat ook trage trekproeven bij hoge temperatuur en in principe elk plastisch gedrag bij hoge temperatuur op deze manier gemodelleerd kunnen worden. Mogelijke toepassingen zoals voorspelling van kruiplevensduur en interpretatie van trage trekproeven voor kruip worden toegelicht.*

Kruip is veelal een langetermijnfenomeen met soms catastrofale gevolgen. Er zijn al honderden manjaren besteed aan het ontwikkelen van methoden om kruipgedrag en levensduur van een materiaal in service omstandigheden te voorspellen. Structuurreplica's en rekmetingen worden gebruikt om de kruipbeschadiging van een component in service te monitoren en de restlevensduur af te schatten. Andere methoden steunen op laboratorium-simulaties met verhoogde kruipbelasting om de proefduur te verkorten. Inherent hieraan is het risico verbonden dat extrapolatie van testresultaten tot fouten kan leiden wanneer kruipmechanismen veranderen bij verhogen van temperatuur en spanning. Sommige extrapolaties zijn gebaseerd op puur empirische relaties, andere op fysische wetten. Deze tekst beschrijft het opstellen van een fysisch model om kruiptests te interpreteren.

### KRUIPTESTS

Kruip is de plastische vervorming van een materiaal bij een belasting onder de vloeigrens. Figuur 1 toont een typische kruipcurve bij een constante belasting. Men onderscheidt drie stadia:

- een primair stadium met afnemende reksnelheid (versteving)
- een secundair stadium met semiconstante reksnelheid
- een tertiair stadium met toenemende reksnelheid (verzwakking).



Figuur 1. Algemene kruipcurve met drie stadia.

Voor het secundaire stadium zijn al lang relaties gelegd tussen kruipsnelheid, spanning en temperatuur. De Norton-wet (ook wel power-law) is gebaseerd op het kruipen van dislocaties:

$$(d\varepsilon/dt)_R = A \sigma^n e^{-Q/kT} \quad (1)$$

Hierbij is  $d\varepsilon/dt$  de secundaire kruipsnelheid,  $A$  een constante,  $n$  de Norton exponent typisch tussen 3 en 12,  $\sigma$  de opgelegde spanning,  $Q$  een activeringsenergie,  $k$  de constante van Boltzmann en  $T$  de temperatuur in Kelvin. Uit formule (1) blijkt dat temperatuur, spanning en reksnelheid onderling afhankelijk zijn. Een kruipbelasting kan worden versterkt door verhogen van de temperatuur bij isostress-tests, verzwaken van de spanning bij isotherme kruipproeven of door verhogen van de reksnelheid bij trage trekproeven. Met trage trekproeven wordt hier bedoeld trekproeven bij lage reksnelheden (typisch  $10^{-6}/s$ ) en hoge temperatuur.

Tabel 1. Opgestelde model.

Een model voor kruip	
Uitgebreide Norton-wet	$(d\varepsilon/dt)_{kruip} = d\varepsilon/dt(1-H)^n \cdot (1+S)$
Secundair stadium	$(d\varepsilon/dt)_R = A \sigma^n e^{-Q/kT}$
Primair stadium	$H = (h \cdot (d\varepsilon/dt)_{kruip} / \sigma) \cdot (1 - ((1/H^* - 1^m) / (1/H - 1)))$
Tertiair stadium	$dS/dt = C \cdot (d\varepsilon/dt)_{kruip}$

Met  $T$ ,  $\sigma$  en  $d\varepsilon/dt$  testparameters,  $A$ ,  $h$ ,  $H^*$  en  $C$  materiaalparameters bepaald door fitting en  $H$  en  $S$  toestandsparameters.

Bij kruipproeven worden de resultaten geëxtrapoleerd naar de bedrijfscondities. Dit kan via empirische relaties zoals bijvoorbeeld de Monkman-Grant relatie die een verband legt tussen de secundaire kruipsnelheid en de tijd tot breuk. Door het fitten van modellen naar testresultaten zijn elegantere interpretaties van testresultaten mogelijk. Sinds de jaren tachtig worden aan het National Physics Laboratory (NPL) in Cambridge rekenmodellen ontwikkeld die gebaseerd zijn op de achtergronden van kruip [1, 2]. Bij de KEMA is deze modellering in 1995 ingevoerd tijdens een onderzoek naar de interpretatie van trage trekproeven [3]. Hieronder worden deze modelleringstechniek en enkele toepassingen toegelicht.

#### FYSISCH MODELLEREN VAN KRUIP

Zoals vermeld bestaat een typische kruipcurve uit drie stadia. De Norton-wet (1) beschrijft het secundaire stadium in het geval van dislocatiekruip; we beperken ons hier tot dit type kruip. De andere twee stadia hebben ook een fysische achtergrond. De versterking in het eerste stadium kan worden vergeleken met de werkversterking in een trekproef. De verzwakking in het tertiaire stadium wordt veroorzaakt door kruipbeschadiging; twee bekende types van kruipbeschadiging zijn precipitatie-vergroving en void vorming op de korrelgrenzen.

Net zoals de Norton-wet voor dislocatiekruip zijn voor deze verschijnselen wetten opgesteld. Het zou te ver gaan om deze hier te bespreken. Belangrijk is dat de beschrijving voor het secundaire stadium in de Norton-wet (1) uitgebreid kan worden met factoren die het primaire en het tertiaire stadium beschrijven:

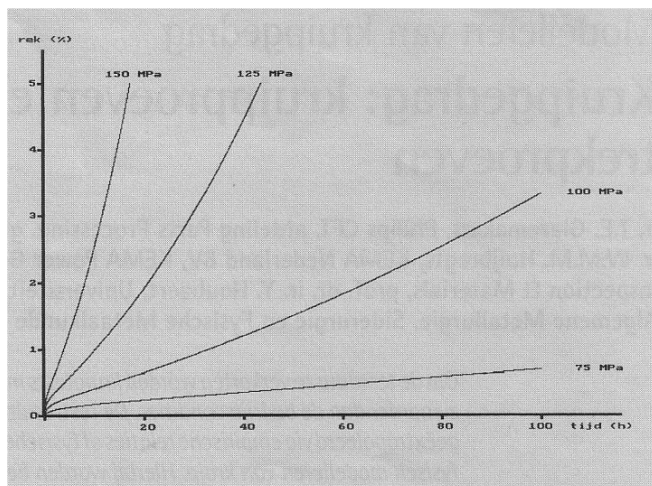
$$(d\varepsilon/dt)_{kruip} = (d\varepsilon/dt)_S \cdot \text{factor}_{\text{primaire}} \cdot \text{factor}_{\text{secundair}} \quad (2)$$

Deze uitbreiding gebeurt onder aanname dat versterking en kruipbeschadiging tegelijk optreden, maar in verschillende stadia domineren. De  $\text{factor}_{\text{primaire}}$  evolueert als functie van de tijd van een initiële waarde tot de limietwaarde 1; de  $\text{factor}_{\text{secundair}}$  heeft als startwaarde 1 en stijgt tijdens levensduur. Hierdoor zijn beide factoren ongeveer 1 tijdens het secundaire stadium. De factoren zijn gebaseerd op fysische modellen voor verschijnselen zoals precipitatie-vergroving. Ze zijn functies van

testparameters (temperatuur, spanning), materiaalparameters en toestandsparameters. Deze laatste parameters geven de toestand van het metaal weer na primaire versterking of tertiaire kruipbeschadiging. Het kan bijvoorbeeld een maat zijn voor de precipitatievergroving. De tijdsevolutie van de toestandsparameters wordt in differentiaalvergelijkingen beschreven. Deze vergelijkingen tezamen met formule (2) en formule (1) beschrijven het hogetemperatuur mechanische gedrag van een metaal. Na invoeren van randvoorwaarden zoals temperatuur, spanning en reksnelheid wordt het stelsel differentiaalvergelijkingen met numerieke analyse opgelost.

### TOEPASSING: KRUIPTESTS

Als voorbeeld maken we gebruik van een model voor een hittebestendig chroomstaal, dit omwille van de eenvoud van dit specifieke model. In het opgestelde model (zie Tabel 1) zijn de 'uitgebreide Nortonwet', de Norton-wet en de evolutie van toestandsparameters voor het primaire en tertiaire stadium te herkennen. Het zou ons te ver leiden om de oorsprong van de vergelijkingen in dit model te bespreken. Figuur 2 toont de voorspelde kruipcurves bij verschillende spanningen bij 650 °C. De drie kruipstadia zijn te herkennen in deze curves. De secundaire kruipsnelheid neemt toe bij toenemende spanning. Wanneer een kruipproef bij hoge spanning (dus korte proefduur) uitgevoerd is, kunnen aan de hand van de proefresultaten en het model extrapolaties naar lagere spanningen worden uitgevoerd. Let wel, het model kampt met dezelfde problemen als andere extrapolatiemethodes.



Figuur 2. Modelvoorspellingen kruipcurves, verschillende spanningen, 650 °C

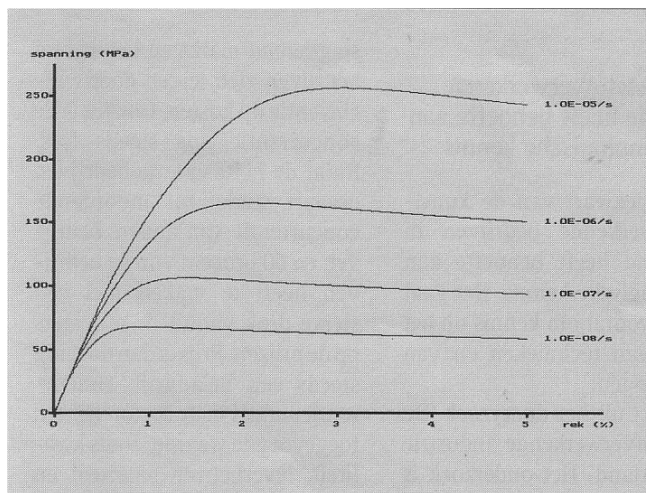
Als kruip en kruipbeschadiging bij de hoge testcondities en bij de lage bedrijfscondities verschillen, ontstaan extrapolatiefouten. Een voordeel bij het fysisch modelleren is dat men zich ervan bewust is welke restricties verbonden zijn aan het extrapoleren. Een tweede voordeel is dat meer informatie wordt verkregen: het volledige vervormingsgedrag wordt voorspeld. Hierbij geldt een beperking: het tijdstip van breuk is niet opgenomen in de modellen omdat hiervan geen modelmatige beschrijving bestaat. De levensduur van een component wordt bij de modellen bepaald als de tijd tot een bepaalde ontwerprek, bijvoorbeeld twee procent rek. Een nadeel van de modellering kan de mogelijke arbeidsintensiviteit zijn: voor een nieuw type legering moet worden nagegaan welk kruipmechanisme en welke kruipbeschadiging optreden.

### TOEPASSING: TRAGE TREKPROEVEN

Hierboven werd gesteld dat het volledige mechanische gedrag van een metaal kan worden beschreven. Bij een trekproef is de reksnelheid constant en niet de spanning. Bij hoge temperatuur en lage reksnelheden is de opgelegde rek deels elastisch en deels kruip.

$$(\sigma/\dot{\sigma}) = E( K-(d\varepsilon/dt)_{\text{kruip}} ) \quad (3)$$

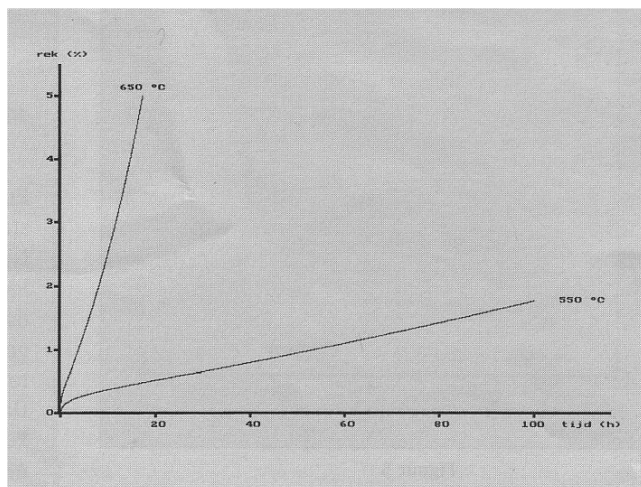
Formule (3) (met E elasticiteitsmodulus en K de opgelegde reksnelheid) tezamen met het stelsel differentiaalvergelijkingen beschrijven trage trekproeven. Figuur 3 toont een aantal algemene trage trekproefvoorspellingen met het model. Bij hogere reksnelheden resulteren hogere spanningen. De sterkte van een metaal bij hogere temperaturen is immers sterk reksnelheidsafhankelijk. Duidelijk is dat trage trekproeven en kruipproeven niet los van elkaar staan. Meer nog, de resultaten van de ene testmethode kunnen worden gebruikt om de andere te voorspellen. Bij de KEMA gebeurde het modelleren van trage trekproeven met het oog op het interpreteren van CERT proeven voor kruip. Constant Extension Rate Tests (CERT) zijn trage trekproeven bij hoge temperatuur in een corrosieve omgeving en geven inzicht in de interactie tussen mechanische vervorming en hogetemperatuurcorrosie. De corrosie moet dan wel in de modellering worden meegenomen. Ook trage trekproeven aan lassen en warmtebehandelde materialen kunnen via de modellen worden verwerkt en gegevens leveren over het kruipgedrag.



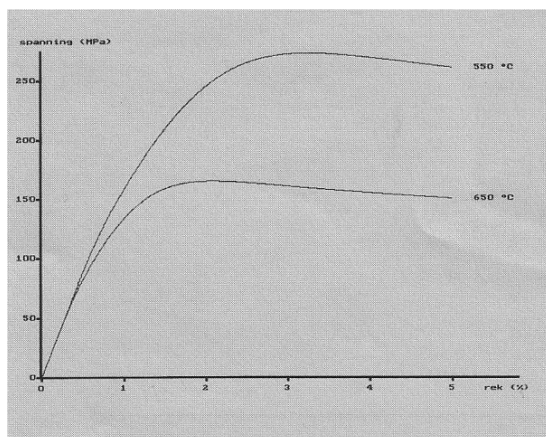
*Figuur 3*  
*Modelvoorspellingen bij trage trekproeven, verschillende reksnelheden, 650 °C*

#### TOEPASSING: EXTRAPOLATIES NAAR ANDERE TEMPERATUREN

Een laatste voorbeeld is het extrapoleren tussen verschillende temperaturen. Formule (1) bevat een temperatuursafhankelijkheid in de vorm van een activeringsenergie. Hierdoor is het aannemelijk de temperatuursafhankelijkheid in de andere vergelijkingen in eerste instantie te verwaarlozen, voorbeelden zie figuren 4 en 5.



Figuur 4  
Modelextrapolatie kruipcurve bij 150 MPa van 650 °C naar 550 °C



Figuur 5  
Modelextrapolatie lage trekproef bij  $1.0E^6/s$  van 650 °C naar 550 °C

## PROGRAMMATUUR

Het beschreven model werd in 1995 ontwikkeld bij de KEMA, specifiek om trage trekproeven te modelleren [3]. Een model wordt opgesteld rekeninghoudende met het belastingsregime (kruip of trage trekproef) en het materiaaltype (type kruip, type kruipbeschadiging). Zoals beschreven bestaat dit model uit een stelsel differentiaalvergelijkingen. Een modelcurve wordt berekend door het numeriek oplossen van dit stelsel met een 'RungeKutta' algoritme van de vierde orde. De modelcurve wordt gefit naar de proefresultaten. Door de fitting worden een aantal modelparameters bepaald. Hierna kan naar andere reksnelheden, temperaturen of belastingsregimes geëxtrapoleerd worden. Het model is gevalideerd aan de hand van trage trekproeven met verschillende reksnelheden en temperaturen. De algemene modelvoorspellingen (zoals figuren 2 en 3) stemmen overeen met de resultaten behaald door de NPL modellering [1,2]. Momenteel zijn alleen de belastingsregimes kruip en trage trekproef modelmatig gerealiseerd. In principe kan elke variatie van spanning en reksnelheid (bijvoorbeeld cyclische belasting) als randvoorwaarde opgelegd worden. Als huidige ontwikkeling wordt het model aangepast door medewerkers van de KEMA voor een algemener gebruik en Windows95. In enkele eindigeelementenpakketten, zoals MARC, zijn standaard fysische modelwetten voor kruip opgenomen. Hierdoor bestaat de mogelijkheid de modelparameters verkregen door fitting rechtstreeks in de eindigeelementen modellering van complexe componenten in te voeren.

## CONCLUSIES

Het is mogelijk kruip te beschrijven door middel van een uitgebreide Norton-vergelijking op basis van de fysische mechanismen die kruip veroorzaken. Deze modellering is in staat het hogetemperatuur plastisch gedrag te voorspellen, specifiek kruip en trage trekproeven. Het fysisch modelleren van kruipgedrag biedt een aantal uiteenlopende mogelijkheden zoals het voorspellen van het volledige kruipgedrag, het voorspellen van het vervormingsgedrag afhankelijk van de randvoorwaarden, het voorspellen van levensduur op basis van ontwerpreeks, het bewust omgaan met extrapolaties, het interpreteren van trage trekproeven voor kruip en het mogelijk gebruiken van trage trekproeven in combinatie met corrosieve gascondities (CERT). Het model wordt momenteel verder ontwikkeld door medewerkers van de KEMA.

## Dankwoord

Het onderzoek bij de KEMA is mogelijk gemaakt door financiële ondersteuning van de Nederlandse elektriciteitsproductiebedrijven.  
Het model is ontwikkeld als afstudeerwerk bij de KEMA voor de universiteiten van Gent (UG, België) en Manchester (UMIST, UK); waarvoor dank aan deze instellingen.

## REFERENTIES

1. M.F. Ashby en B.F. Dyson, NPL report DMA (A) 77, 1984
2. S. Osgerby en B.F. Dyson, Proceedings 5<sup>th</sup> int. conference on creep and fracture, p. 53-61, 1993
3. T.E. Glazemakers, thesis materiaalkundig ingenieur, Universiteit Gent, 1995