

Simulasie van spanningsvermindering en kruiprespons by P92-stoompype onder verskillende ladingstoestande

S Salifu,¹ D Desai,¹ S Kok,² O Ogunbiyi,¹ A Oketola,¹ I Cipriano³

¹ Departement Meganiese en Megatroniese Ingenieurswese, Tshwane-Universiteit van Tegnologie, Suid-Afrika

² Departement Meganiese en Lugvaartkunde-ingenieurswese, Universiteit van Pretoria, Suid-Afrika

³ Departement Bedryfsingenieurswese, Tshwane-Universiteit van Tegnologie, Suid-Afrika

Korresponderende outeur: S Salifu **E-pos:** smithsalifu@gmail.com

In 'n strewe om die koste van die produksie van elektriese energie drasties te verminder en die dringende behoefte om in die toenemende vraag na elektrisiteit te voorsien, word kragopwekkingstoompype aan verskillende stoomladingstoestande blootgestel. Dit is bekend dat die verskillende daaglikse ladingstoestande/-siklusse 'n beduidende impak op die kruipgedrag en die patroon van spanningsvermindering in die stoompype het. Gevolglik is die kruiprespons en spanningsvermindering van P92-stoompype wat aan verskillende ladingstoestande onderwerp is, gesimuleer deur in hierdie studie van 'n eindige-elementtegniek (EE-tegniek) gebruik te maak. Abaqus CAE/2020 is gebruik om die kruipgedrag en spanningsvermindering van die pype te raam, terwyl fe-safe/Turbolife in die berekening van die kruipskade en nutsduur van die pype gebruik is. Deur die verskillende bedryfstoeestande te vergelyk, is vinniger spanningsvermindering en hoër kruipvervorming waargeneem in die pype wat aan 'n bestendige toestand onderwerp is in verhouding tot die ontledings wat sikliese ladings omvat het. Die pype se kruipnutsduur wanneer dit aan sikliese lading onderwerp word, is korter as wat verkry word uit analyses wanneer dit aan 'n bestendige toestand onderwerp word. Dus verminder enige vorm van sikliese lading van stoompype kruipnutsduur aansienlik.

Sleutelwoorde: stoompype, kruipvervorming, spanningsvermindering, kruipskade, kruipvervorming, nutsduur

Stress relaxation and creep response simulation of P92 steam piping under different loading conditions: In a quest to drastically reduce the cost of production of electrical energy and the dire need to meet the increasing demand for electricity, power generation steam pipings are exposed to different steam loading conditions. The different daily loading conditions/cycles are known to impact the creep behaviour and the pattern of stress relaxation in the steam piping. , the creep response and stress relaxation of P92 steam piping subjected to different loading conditions were simulated using a finite element (FE) technique Abaqus CAE/2020 was used to estimate the creep behaviour and stress relaxation of the piping while fe-safe/Turbolife was used in the computation of the creep damage and useful life of the pipe. Comparing the different conditions of operation, faster or swifter stress relaxation and higher creep strain were observed in the piping subjected to steady-state in relation to the analyses encompassing cyclic loadings. The piping's useful creep life when subjected to cyclic loading is lower than that obtained when subjected to steady-state analysis. Thus, any form of cyclic loading of steam piping greatly reduces its useful creep life.

Keywords: piping, creep stress, stress relaxation, creep damage, creep strain, useful life

Inleiding

As 'n noodsaaklike komponent van kragopwekkingsaanlegte dien stoompype as 'n middel om stoom vanaf die stoomketelkompartement na die turbines te vervoer. As gevolg hiervan werk stoompype onder strawwe toestande wat gekenmerk word deur hoë werkstemperatuur en -druk. Gevolglik moet stoompype vervaardig word van materiale wat hierdie strawwe dienstoestande kan weerstaan (Salifu, et al., 2021a).

Daar is waargeneem dat die oorblywende nutsduur van kragopwekkingsaanlegte aansienlik verminder word wanneer hulle aan gereelde aanskakel- en afskakelsiklusse by hoë temperatuur onderwerp word, aangesien verskillende beskadigingsprosesse soos versagting wat die gevolg van is sikliese lading, kruipskadeakkumulering wat voortspruit uit die houtydperk en moontlike interaksies tussen twee falingsmodusse, kruip en vermoeidheid (Wang, et al., 2018; Wang, et al., 2019; Song, et al., 2021), die oorblywende nutsduur van stoompype beïnvloed. Goeie kennis van die kruipgedrag van komponente wanneer dit aan verskillende ladingstoestande onderwerp word, is noodsaaklik, aangesien dit help met die evaluering van die nuttige oorblywende nutsduur van kragentralekomponente soos stoompype (Hyde, et al., 2010; Laha, et al., 2001; Tu, 2022).

Die kruipvervorming en -gedrag van martensitiese P91-vlekvrystaal by verskillende temperature het die afgelope tyd baie aandag in die navorsingswêreld geniet (Eggeler, et al., 1994; Hyde, et al., 2006; Hyde, et al., 2010; Saber, et al., 2011), maar min navorsingsaandag is

geskenk aan die nuwe generasie kruipsterkteverbeterde ferritiese vlekvrystaal, P92, veral wanneer dit as stoompype gebruik word en aan verskillende bedryfsiklusse onderwerp word (Sugiura, et al., 2010; Vaillant, et al., 2008). P92 met 9-12% chroom is een van die nuwe generasies van hoë kruipsterkteverbeterde ferritiese vlekvrystaal wat toepassing in die kragopwekkingsaanlegte gevind het (beide in kern- en fossielbrandstofaanlegte) as superkopkomponente, stoompype en ander komponente wat in hoëtemperatuurtoepassings gebruik word (Susmel & Taylor, 2003). Aangesien dit 'n materiaal met 'n verbeterde kruipsterkte by hoë temperature is, maak P92 die bedryf van kritieke en superkritieke kragentrales moontlik waar die werkstemperatuur en -druk baie hoër is as wat in 'n konvensionele kragentrale verkry word (Saber, et al., 2011). As gevolg van die hoër werkstemperatuur en druk wat P92-stoompype kan weerstaan, is dit uiters belangrik om 'n goeie kennis te hê van die kruipgedrag van die pype wanneer dit aan verskillende daaglikse bedryfsiklusse tydens diens onderwerp word.

Studies wat uitgevoer is op stoompype wat gekenmerk word deur 'n kombinasie van reguit dele en elmboë, en wat aan hoëtemperatuurwerking blootgestel word, het getoon dat die optimum spanning en vervorming wat ontwikkel word as gevolg van kruiping gewoonlik by die elmboë of buigstukke geleë is (Salifu, et al., 2020a; Salifu, et al., 2020b). Dit maak dus hierdie areas meer geneig tot falings, aangesien dié areas 'n beperkende kruipnutsduur vergeleke met die ander areas toon (Salifu, et al., 2021a). Die vinnige akkumulering van kruipvervorming in hierdie area van die pype is die hoofmeganisme vir die falings wat in stoompype ervaar word (Lan, et al., 2018).

Met verloop van tyd is verskillende ramingstegnieke aangewend om die kruipgedrag van komponente met verskillende vorms en groottes te voorspel. Sommige van die metodes wat gereeld gebruik word, is eksperimentele, teoretiese en FE-tegnieke. Eksperimentele/teoretiese tegnieke is suksesvol deur verskillende navorsers aangewend in die raming van die kruipgedrag van komponente met eenvoudige geometrie en grenstoestande (Lan, et al., 2018). Andersyds word eindige-elementtegnieke vir komponente met komplekse vorms en grenstoestande gebruik (Hyde, et al., 2002a; Hyde, et al., 2002b).

Aangesien dit 'n algemeen gebruikte tegniek vir die bepaling van kruipgedrag van komponente met komplekse vorms en grenstoestande is, het T.H. Hyde, et al., (2002a; 2002b) die kruipgedrag van 'n 90-grade-elmboogpyp met ovaalheid en sonder ovaalheid onder interne druk gesimuleer. Daar is waargeneem dat die kruipnutsduur van die elmboogpyp afneem na gelang die posisie van die skade in die elmboog se dwarsdeursnee as gevolg van ovaalheid verander. In 'n ander studie het J.P. Rouse, et al., (2013) die kruipgedrag/-respons van 'n 90-grade-elmboogpyp numeries gesimuleer deur die wanddikte daarvan geleidelik te verander. Volgens die studie is daar waargeneem dat die spanningsherverspreiding in die elmboogpyp grootliks beïnvloed word deur die verskil in die pyp se dwarsdeursneeaafmeting, en dit het 'n groot invloed op die kruipnutsduur van die pyp, veral by die elmboog.

Om die kruipgedrag te bereken van hoëkruipsterkteverbeterde ferritiese vlekvrystaal-P92-stoompype, wat in hierdie

studie aan verskillende bedryfsiklusse onderwerp is, is die eindigelementtegniek (EE-tegniek) gebruik. Die kruipgedrag van die pyp as gevolg van die verskillende bedryfstoeestande is met behulp van FEA-sagteware, Abaqus CAE/2020, bereken, terwyl die raming/voorspelling van die skade as gevolg van kruiping en nutsduur van die pyp gedoen is met behulp van fe-safe/Turbolife, wat naverwerkingsagteware is.

Ontwikkelde spanning in dikwandige pype

Reguit pype waarvan die verhouding van binnedeursnee, D , tot die dikte, t , minder as 20 is, word as dikwandige pype of silindries gekategoriseer, en hulle word dikwels in kragopwekking gebruik om stoom van die stoomketelkompartemente na die turbine te vervoer. Wanneer stoom deur hierdie pype vloei, word termomeganiese spanning ontwikkel. Tydens werking kan die meganiese spanning wat in die reguit pyp ontwikkel word, met behulp van Lamé se teorie beraam word, terwyl die termiesespanningsvergelykings vir 'n dikwandige silinder gebruik word om die ontwikkelde termiese spanning in die reguit pype te bereken. Deur hierdie twee uitdrukkings te gebruik, kan die ontwikkelde termomeganiese spanning in 'n dikwandige reguit silinder of pyp bereken word (Kandil, et al., 1995; Pesonen, 2014).

Op grond van Lamé se teorie (Kanlikama, et al., 2013), word die vergelyking vir die hoepel-, longitudinale en radiale meganiese spanning wat ontwikkel word wanneer interne stoomdruk P op 'n dik pyp of silinder inwerk, weergegee word as:

$$\sigma_r = P \frac{r_i^2(r^2 - r_o^2)}{r^2(r_o^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_t = P \frac{r_i^2(r^2 + r_o^2)}{r^2(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{Pr_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (3)$$

Deur die von-Mises-teorie (Vergelyking (4)) te gebruik, kan die pyp se totale/effektiewe meganiese spanning bereken word.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_t\sigma_r + \sigma_t\sigma_z + \sigma_r\sigma_z)} \quad (4)$$

waar P die toegepaste stoomdruk verteenwoordig, σ_r die geïnduseerde radiale meganiese spanning, σ_t die ontwikkelde meganiese omtrekspanning, σ_z die geïnduseerde aksiale meganiese spanning en σ_{vm} die effektiewe meganiese von-Mises-spanning.

Vir 'n reguit en dik pyp by verhoogde temperature word die ontwikkelde termiese spanning bereken deur die volgende uitdrukkings te gebruik (Kandil, et al., 1995; Pesonen, 2014):

$$\sigma_{tT} = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[\frac{r^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr - \int_{r_i}^r T r dr - T r^2 \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{rT} = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[\frac{r^2 - r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr - \int_{r_i}^r T r dr \right] \quad (6)$$

$$\sigma_{zT} = \frac{\alpha E}{(1-\nu)} \left[\frac{2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr - T \right] \quad (7)$$

Daarna word die von-Mises-uitdrukking in Vergelyking (8) gebruik om die ontwikkelde effektiewe termiese spanning te bereken.

$$\sigma_{vmT} = \sqrt{[\sigma_{tT}^2 + \sigma_{rT}^2 + \sigma_{zT}^2 - (\sigma_{tT}\sigma_{rT} + \sigma_{tT}\sigma_{zT} + \sigma_{rT}\sigma_{zT})]} \quad (8)$$

waar die σ_{rT} ontwikkelde termiese radiale spanning verteenwoordig, σ_{tT} die ontwikkelde termiese omtrekspanning, σ_{zT} die ontwikkelde termiese aksiale spanning en σ_{vmT} die effektiewe/ totale termiese Von-Mises-spanning wat ontwikkel is.

Daarna word die individuele meganiese en termiese effektiewe von-Mises-spannings opgesom om die effektiewe termomeganiese spanning in die dik reguit pyp tydens werking te bepaal. Die uitdrukking vir die ontwikkelde effektiewe termomeganiese spanning wat in 'n dik reguit pyp ontwikkel word, word in Vergelyking (9) aangetoon.

$$\sigma_{TM} = \sigma_{vm} + \sigma_{vmT} \quad (9)$$

Konvensionele Hiperboliese Sinuskruipmodel

Vir komponente wat aan sikliese belading in 'n hoëtemperatuurkruiparea of omgewing onderworpe is, is dit uiters belangrik dat die kruipmodel wat gebruik word nie net die bestendigetoestand-kruipproses in berekening moet bring nie, maar ook in staat moet wees om met die kruipgedrag by die verskillende spanningsbestekke as gevolg van die sikliese belading voldoende in berekening moet hou. Aangesien die stoompepe in hierdie studie aan sikliese belading in 'n kruipregime onderworpe is, is 'n konvensionele hiperboliese sinus-kruipmodel gebruik wat bekend is vir die uitsonderlike vermoë daarvan om hoë- en laespanningsbestekke doeltreffend vas te lê, en die kruipgedrag onder sikliese lading voldoende in berekening te bring, soortgelyk aan dié wat in kragopwekkingskomponente ontwikkel is (Montes, et al., 2012), en die model se wiskundige uitdrukking word gegee as (Salifu, et al. 2020b; Strang & Greenwood, 1998):

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A \times \sinh(\beta\sigma) \quad (10)$$

waar β die materiaalkonstante voorstel en A die Arrhenius-funksies van die temperatuur (T) in Kelvin is, en dit word weergegee as

$$A = Ke^{-C/T} \quad (11)$$

waar K en C kruipmateriaalkonstantes vir die model verteenwoordig.

Kruipskade

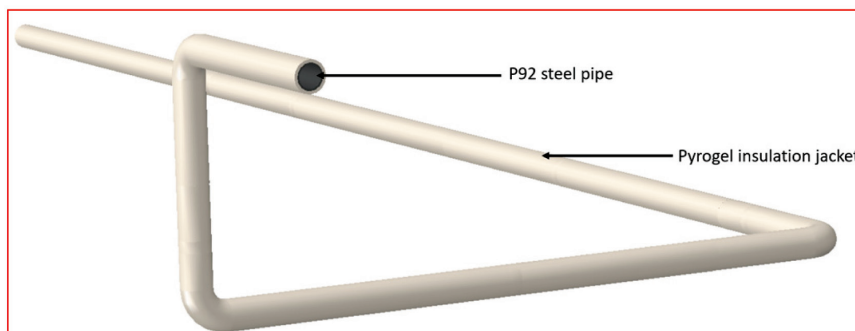
Indien 'n komponent wat aan hoëtemperatuurwerking onderworpe is beperkende kruipnutsduur voor faling in die teenwoordigheid van sikliese belading toon, is dit belangrik om te bepaal hoe lank die verskillende beladings toegepas word, en die beste benadering om dit te doen is deur Robinson se lineêrekruipskade- of tydbreukreël (Robinson, 1952; Liu, et al., 2017; Seruga, et al., 2011). Volgens die reël is die akkumulatie van skade in 'n enkele tydstep onafhanklik van die voorheen geakkumuleerde skade, en faling sal plaasvind wanneer die som van die individuele skade as gevolg van kruip gelyk is aan 1. Aangesien die stoompepe in hierdie studie aan daaglikse sikliese lading onderworpe is, word die tydbreukreël, ook bekend as Robinson se lineêrekruipskadereël, geskik geag om die kruipskadeakkumulatie te bereken, aangesien die uitdrukking die verskillende aansakel- en afsakelsiklusse in berekening bring, wat sodanig is dat faling in die pyp sal voorkom indien die som van die individuele kruipskade gelyk is aan een. Die uitdrukking vir die som van die lineêre kruipskade word weergegee as:

$$D_c = \sum \frac{t_i(\sigma)}{T_r(\sigma)} \quad (12)$$

waar D_c kruipskade verteenwoordig, T_r die kruipnutsduur voor faling of bars van die pyp is, en t_i die tydperk van die kruiping vir 'n gegewe spanningswaarde en temperatuurinkrement i is.

FE-model

Die kruiprespons van vervaardigde P92-stoompepe, wanneer dit aan verskillende bedryfstoeestande onderwerp is, is met Abaqus CAE/2020 en fe-safe/Turbolife (naverwerkingsagteware) gesimuleer. Verskeie stappe was by die analyses betrokke, en dit is sekvensieel waargeneem. Aanvanklik is hitteoordraganalise op die pyp uitgevoer vir die verskillende bedryfstoeestande, en daarna is die kruipanalise gedryf deur die nodale temperatuur wat in die pyp ontwikkel is in die voorafbepaalde veld toe te pas. Daarna is die uitvoerdatabasisresultate (odb-resultate) wat uit die kruipanalises verkry is, uitgevoer en in fe-safe/Turbolife (Fameso, et al., 2021) gebruik om die skade te bereken wat die pype as gevolg van kruiping ervaar, en die ooreenstemmende nutsduur van die pype vir die verskillende bedrywighede wat in aanmerking geneem word.



Figuur 1: Samestellingsmodel van pypisolasiemantel

Modelontwikkeling

’n Model van die pypisolasiemantel is in Abaqus geskep om te repliseer wat in ’n tipiese kragopwekkingsaanleg aangetref sal word. Die samestellingsmodel van die pype word in Figuur 1 uitgebeeld, terwyl die afmetings wat vir die pype en isolasiemantel gebruik is, in Tabel I weergegee word.

Die meganiese en termiese eienskappe van P92-staal en die isolasiemantel (pyrogel) wat in hierdie studie gebruik word, word onderskeidelik in Figuur 2 en Tabel II uitgebeeld, terwyl die konstante vir die kruipmodel wat gebruik is (konvensionele hiperboliese sinuskruipmodel) vir die P92-staal wat in hierdie studie gebruik is (uitgebeeld in Tabel III), is ná krommepassing

Tabel I: P92-stooppype (Rasiawan, 2017; Salifu, et al., 2020a; Salifu, et al, 2020c), en pyrogel-isolasiemantel (Salifu, et al., 2020b; Salifu, et al., 2021c; Salifu, et al., 2021d) afmetings

Mates	Afmeting van P92-stooppype (m)	Afmeting van pyrogel-isolasiemantel (m)
Totale lengte	52,10	52,10
Buitediameter	0,44	0,54
Binnediameter	0,38	0,44
Dikte	0,03	0,05
Radius van elmboog	0,50	0,50

van bestaande eksperimentele P92-staalkruipdata verkry (Kral, et al., 2018).

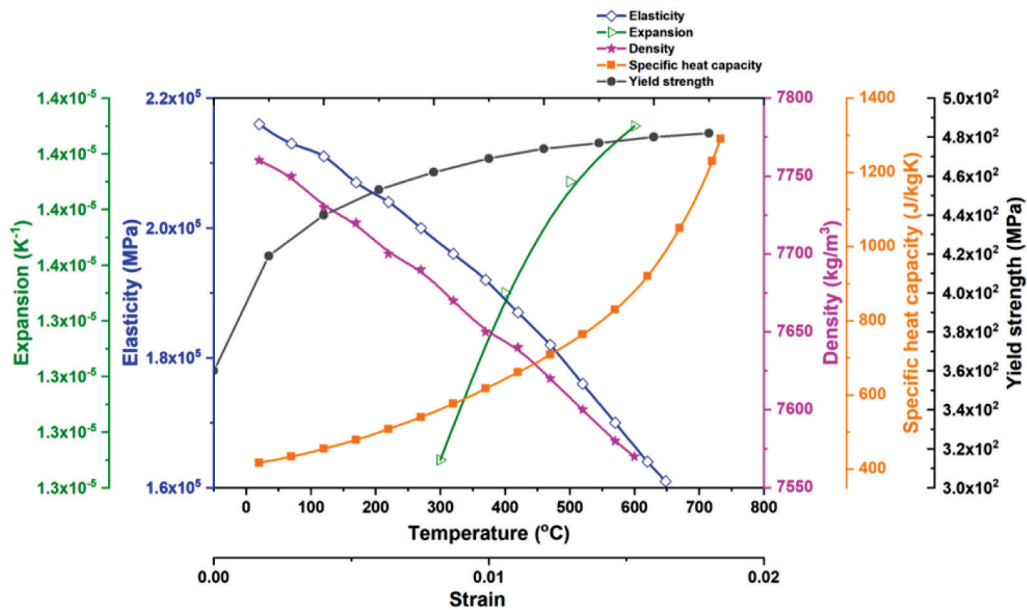
Tydens die bestendigetoestandanalise (hitteoordrag) is ’n werkstemperatuur van 550 met ’n konvektiewe hitteoordragkoeffisiënt van 10 000 W/m²K op die binnevlak van die pypsamstel toegepas, terwyl 25 met 18 W/m²K, wat kamer-temperatuur verteenwoordig, op die buiteoppervlak van die samstel toegepas is (buiteoppervlak van die isolasiemantel) (Salifu, et al., 2019; Salifu, et al., 2021b; Salifu, et al., 2021e; Ogunbiyi, et al., 2019). Ook is ’n druklading van 18 MPa, wat die werksdruk van stoom verteenwoordig, op die binnevlak van die samstel toegepas. Vir die ontledings wat uit verskillende daaglikse aan- en afskakelsiklusse bestaan, word die werks-temperatuur en druk wat op die binnevlak van die samstel gebruik word in Figuur 3(a) en (b) aangetoon, terwyl die beskrywing van die siklusse in Tabel IV aangetoon word. Die buitetemperatuur van die samstel is dieselfde as dié van die bestendigetoestandanalise, ongeag die werksiklus wat oorweeg word.

Tabel III: Konvensionele hiperboliese kruipmodelmateriaalkonstantes vir P92-staal

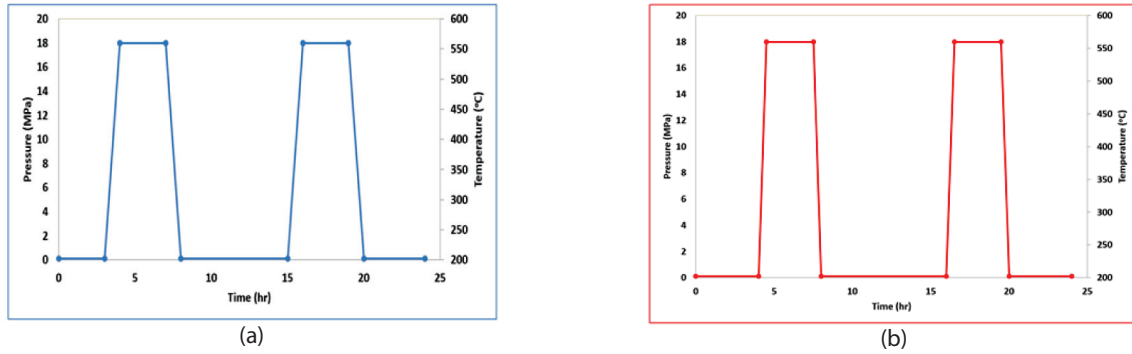
β ($\times 10^{-8}$ Pa)	C ($\times 10^4$ J)	K ($\times 10^{28}$)
6,3	7,2	2,0

Tabel II: Termiese/meganiese eienskappe van isolasiemantel (pyrogel) wat gebruik word [31, 34, 35]

Elastisiteit [GPa]	Poisson-verhouding	Uitsetting [$\times 10^{-6}$ K ⁻¹]	Digtheid [kg/m ³]	Spesifieke warmtekapasiteit [J/kgK]	Geleivermoë [$\times 10^{-3}$ W/mK]
10,0	0,20	4,0	170,0	2 300,0	64,0



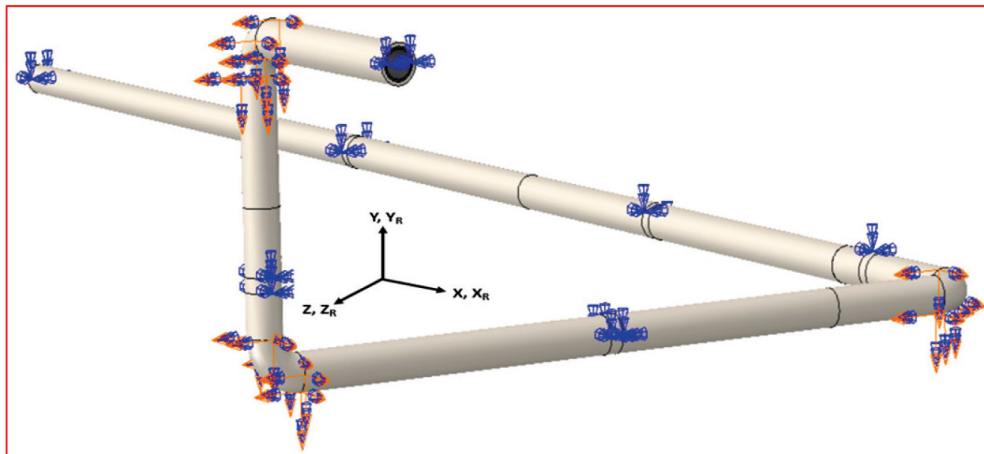
Figuur 2: Termiese/meganiese eienskappe van P92-staal [1]



Figuur 3: (a) 24-uur-bedryfsiklus A1, en (b) 24-uur-bedryfsiklus A2

Tabel IV: Beskrywing van daaglikse bedryfsiklusse

Daaglikse siklusse		
Bestendige toestand	Siklus A1	Siklus A2
Volledige bestendige toestand vir 24 uur	'n Daaglikse 24-uur-siklus, bestaande uit twee 3 uur spitse, vier 1-uur-oorgangstye en buitespitstye van 14 uur.	'n Daaglikse 24-uur-siklus, bestaande uit twee 3 uur-spitse, vier 30-minuut-oorgangstye en buitespitstye van 16 uur.



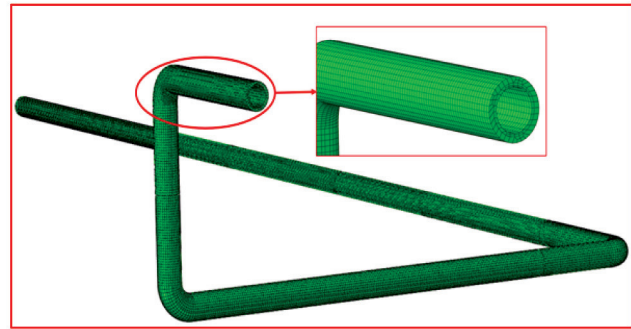
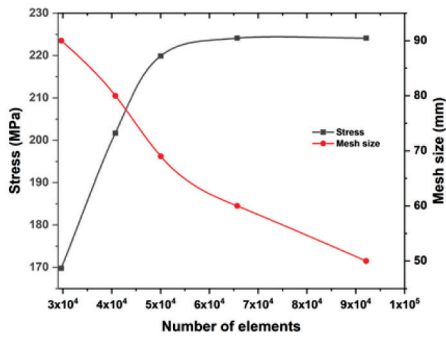
Figuur 4: Grenstoestande op die samestel toegepas

Tabel V: Toegepaste grenstoestande

Ligging in die pypnetwerk	Grenstoestande
Verste eindpunte	Verplasing/rotasie X: Nie vas nie Y: Nie vas nie Z: Nie vas nie X_{R1} : Vas Y_{R2} : Vas Z_{R3} : Vas
Elmboë	Verplasing/rotasie X: Nie vas nie Y: Nie vas nie Z: Nie vas nie X_{R1} : Nie vas nie Y_{R2} : Nie vas nie Z_{R3} : Nie vas nie
Steunstukke	Verplasing/rotasie X: Nie vas nie Y: Nie vas nie Z: Nie vas nie X_{R1} : Vas Y_{R2} : Vas Z_{R3} : Vas

Die meganiese grenstoestande wat aan die pypisolasiemasstel toegeken is, boots die werklike grenstoestand na wat in kragopwekkingsaanlegte op stoompepe toegepas word. Rotasie-/verplasinggrenstoestande is toegepas wat verplasing van die samestel in X, Y en Z toelaat, en elmboogrotasie in die rigting X_{R1} , Y_{R2} en Z_{R3} , soos in Figuur 4 geïllustreer.

Ná die toepassing van die toepaslike meganiese grenstoestande en lading, is 'n gepaste maasgrootte op die samestel aangebring nadat 'n konvergenstudies uitgeoef is deur die grootte van die maas geleidelik te verklein totdat 'n resultaat met hoë akkuraatheid (bo 90%) by 'n middelmatige berekeningstyd verkry is. Die uitkoms van die konvergenstudies wat uitgeoef is, word grafies in Figuur 5(a) geïllustreer, en die maas van die samestel wat in Figuur 5(b) geïllustreer word, toon dat 'n maasgrootte van 50 mm geskik is vir die analise. 92 196 DC3D8-elementtipes ("lineêre 8-nodus-hitteoordragstene") is in die hitteoordraganalise gebruik, terwyl 92 196 C3D8R-elementtipes ("lineêre 8-nodus-stene met verminderde integrasie en uurglasbeheer") in die kruipanalise gebruik is (Salifu, et al., 2021a).



Figuur 5: (a) Maaskonvergensiegrafiek en (b) maas in samestel van pypisolasiemantel

Tydens die berekening van die kruipvervorming wat in die pyp ontwikkel is vir die verskillende bedryfstoeestande wat oorweeg, bereken Abaqus eers die termomeganiese spanning wat in die pyp ontwikkel is as gevolg van die verskillende werksdrukwaardes en temperature soos gespesifiseer in die verskillende siklusse waaraan die pyp onderwerp is. Daarna word die waarde van die ontwikkelde spanning in samehang met die kruipmateriaalkonstantes vir die pyp geïnkorporeer in die uitdrukking van die kruipmodel (konvensionele hiperboliese sinuskruipmodel) wat in die analise gebruik is. Vir die kruipmodel is 'n gebruikerssubroetine skryf in Fortran geskryf en deur middel van 'n spesiale gebruikerssubroetine prosedure geïmplementeer. Dit word in die agtergrond van die sagteware tydens die ontleding uitgevoer om die kruipgedrag en die patrone van spanningsvermindering vir die bedryfsiklusse wat oorweeg word te produseer.

Kruipnutsduur

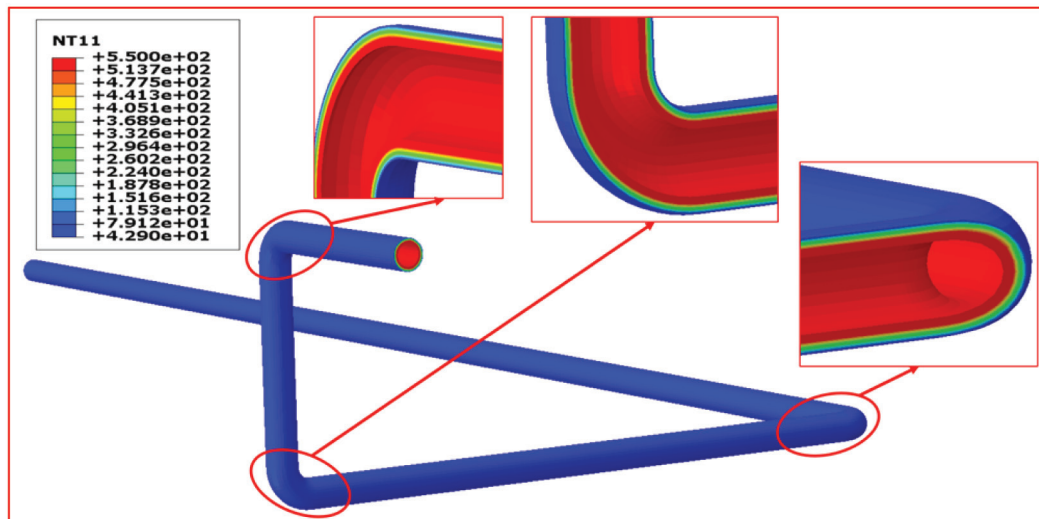
Nadat die kruipanalise in Abaqus CAE/2020 gedoen is, is die uitvoerdatabasisresultate (odb-resultate) wat uit die kruipanalise verkry is, uitgevoer en in die naverwerkingsagteware, fe-safe-Turbolife, gebruik om die pypkruipskade en die nutsduur te bereken vir die verskillende toestande wat oorweeg is. Tydens die ontledings is daar aan die pype 'n masjienafgewerkte oppervlak met 'n oppervlakgrofheid binne die bestek van

$16 < Ra \leq 40 \mu\text{m}$ toegewys, en Morrow-spanningskorreksie is in die analise gebruik [39] by al die bedryfstoeestande wat oorweeg is.

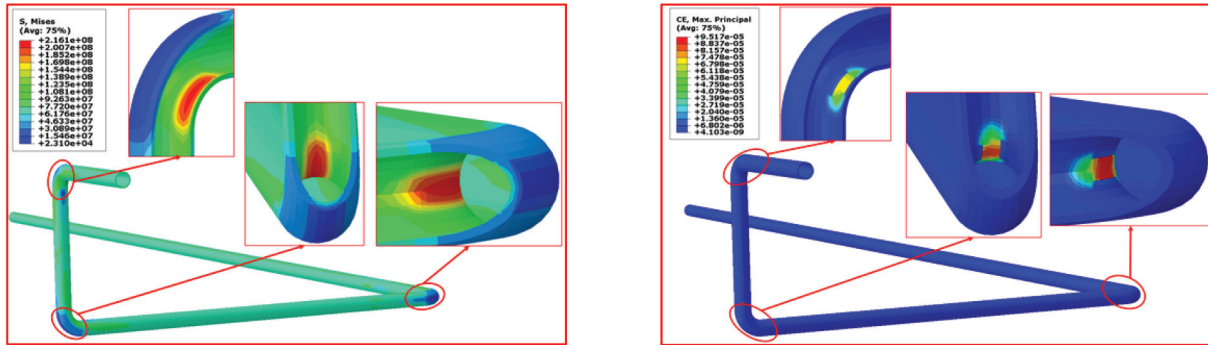
Resultate en bespreking

Die grafiese voorstelling van die temperatuurverspreiding oor die dikte van die pyp-en-isolasie-samestel tydens 'n bestendigetoestand-kruipanalise word in Figuur 6 uitgebeeld. Dit is duidelik uit die figuur dat die toegepaste werkstemperatuur van binne die pype behou is, soos aangetoon deur die waarde van die maksimumkontoergrafiek wat binne die pyp ontwikkel het. Die laetemperatuurwaarde () wat op die buiteoppervlak van die samestel verkry word, is ook 'n aanduiding van die feit dat die pyp behoorlik geïsoleer is en dat minimale hitteverlies tydens werking plaasvind. Gevolglik kan pyrogeel geklassifiseer word in die kategorie van geskikte isolasie vir hoëtemperatuurkomponente soos stoompype.

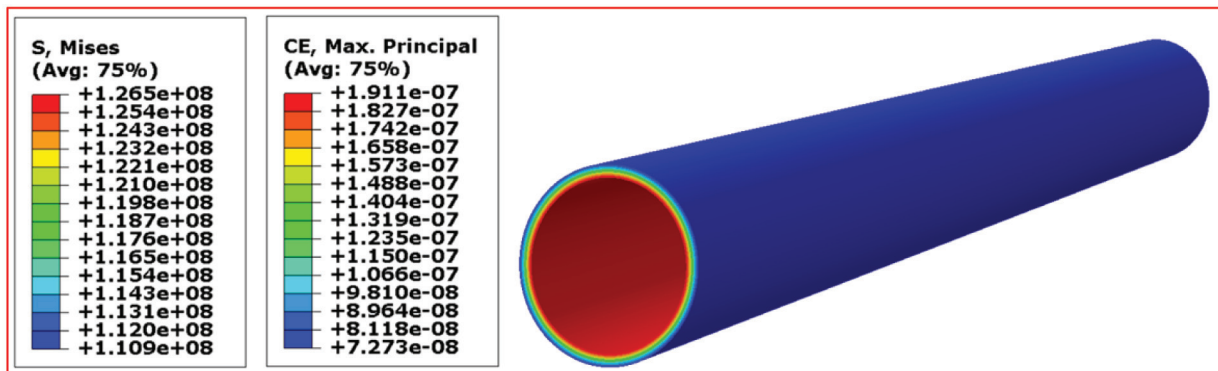
Onder die bestendigetoestandwerking van die stoompype word die kruipspanning en -vervorming wat ná 'n uur van die analise ontwikkel het, in Figuur 6 (a) en (b) uitgebeeld. Uit beide syfers was dit duidelik dat die optimum kruipspanning en vervorming in die pype by die binnewelwing geleë is, en daar is waargeneem dat die kruipspanning en vervorming afneem na gelang stoom wegvloei van die pype se binnewelwing. Die hoogste kruipvervorming (216,1 MPa) en vervormingswaarde



Figuur 6: Temperatuurverspreidingsprofiel van stoompype in



Figuur 7: Stoompyp-profiel: (a) grafiese voorstelling van kruipspanning en (b) kruipvervorming



Figuur 8: Ontwikkelde kruipspanning en vervorming na 1-uur-bestendigetoestandanalise in 'n reguit pyp

was dus by die pype se binnewelwing geleë, wat die binnewelwing die vatbaarste maak vir kruipfaling, vergeleke met die ander areas.

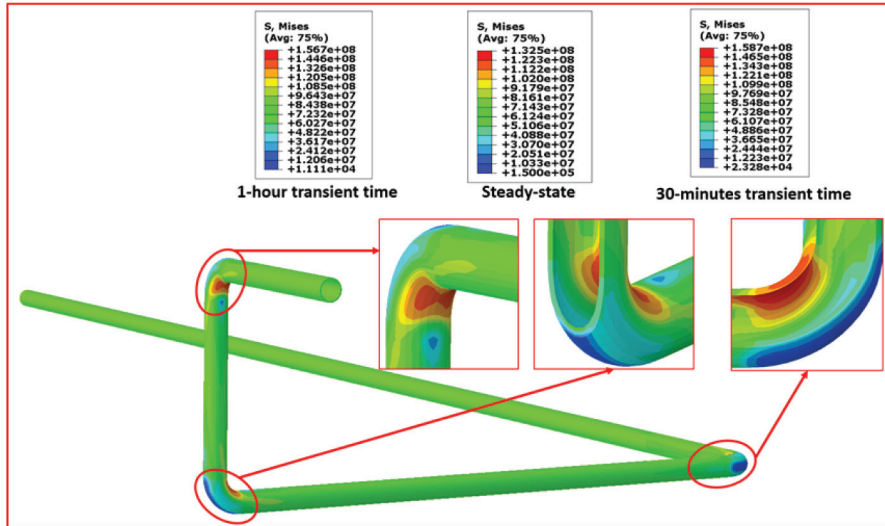
In 'n reguit area ver van die pypelmbog en binnewelwing is die ontwikkelde spanning en vervorming as gevolg van kruiping laer as dié wat by die binnewelwing ontwikkel is. In Figuur 7 word die profiel geïllustreer van spanning en vervorming as gevolg van kruiping wat ontwikkel word in die reguit pypsegment, op 'n plek ver weg van die binnewelwing, wanneer die pype vir 1 uur aan bestendigetoestandanalise onderwerp word. As gevolg van die eenvoud van hierdie area van die pype ('n reguit pypsegment), word die kruipspanningswaarde (126,5 MPa) en kruipvervormingswaarde vir die analitiese geldigheidsbepaling van die model gebruik.

Die ontwikkelde grafiese voorstelling van die spannings- en vervormingskontoer as gevolg van kruiping by faling wanneer die stoompyp by die drie genoemde toestande bedryf word, word in Figuur 9 (a) en (b) uitgebeeld. Ongeag die bedryfstoestand waaraan die pype onderwerp is, was die maksimum spanning en vervorming as gevolg van kruiping wat ontwikkel het by die pype se binnewelwing geleë. In teenstelling met die analise (bestendige toestand) wat vir een uur uitgevoer is, waarvan die resultate in Figuur 8 aangetoon word, is die maksimum spanning en vervorming as gevolg van kruiping by faling duidelik en kan dit op die buiteoppervlak van die pyp gesien word. By faling is die laagste spanning (132,5 MPa) tydens bestendigetoestandanalise verkry, terwyl die analise met 30-minuut-oorgangstye die hoogste spanning (158,7 MPa)

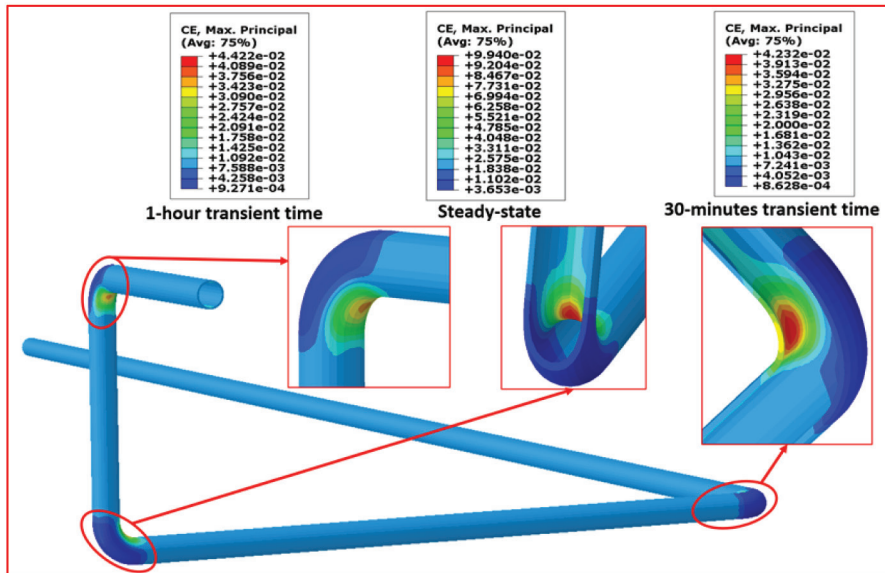
ontwikkel het. Hierdie gedrag word toegeskryf aan die hoeveelheid tyd of die duur van die verskillende ontledings in die hoëtemperatuurkruipomgewing, want hoe langer die tyd is wat in die hoëtemperatuuromgewing deurgebring word, hoe vinniger is die spanningsvermindering. Die verminderde spanningswaarde van die analise wat 1-uur-oorgangstye behels, is ook effens laer as dié met die 30-minuut-oorgangstye omdat dit vergelykenderwys minder tyd buite spits tyd deurgebring het.

In teenstelling met die patroon van die spanningsvermindering wat afneem namate die bedryfstyd toeneem, neem die kruipvervorming toe met 'n toename in bedryfstyd, wat sodanig is dat die hoogste kruipvervorming in die bestendigetoestandanalise verkry is, terwyl die minste kruipvervorming in die analise met siklus 2A (30-minuut-oorgangstye) verkry is. Die vergelykbaar lae kruipvervorming wat in siklus 2A vergeleke met siklus 1A en die bestendige toestand ondervind is, kan vergelyk word met die duur van elke analise in die hoëtemperatuuromgewing.

Uitgebeeld in Figuur 10 is die kruipskadeakkumulering vir die siklusse wat oorweeg is. Uit die grafiek word waargeneem dat die analise met die 1-uur-oorgangstye (siklus A1) die vinnigste akkumulering van kruipskade het, gevolg deur die analise met die 30-minuut-oorgangstye (siklus A2), en dan die bestendigetoestandanalise. Op grond hiervan is dit duidelik dat die bedryfsiklus wat deur die aanskakelsiklus en afskakelsiklus gekenmerk word, verantwoordelik is vir die tempo van skadeakkumulering wat in die pype ervaar word. Hierdie patrone beïnvloed op hulle beurt weer die nutsduur van die pype.

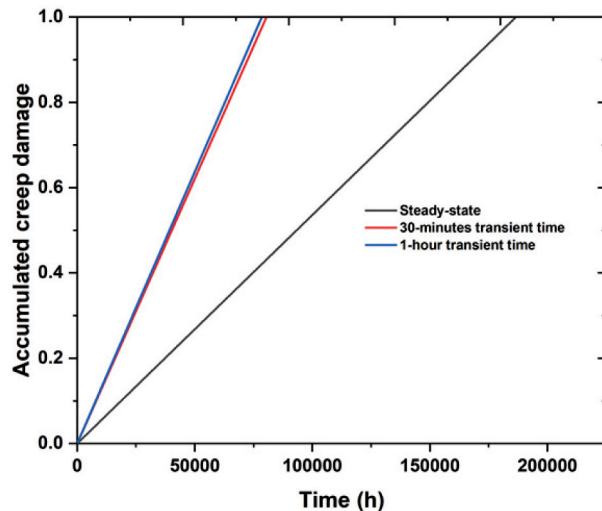


(a)

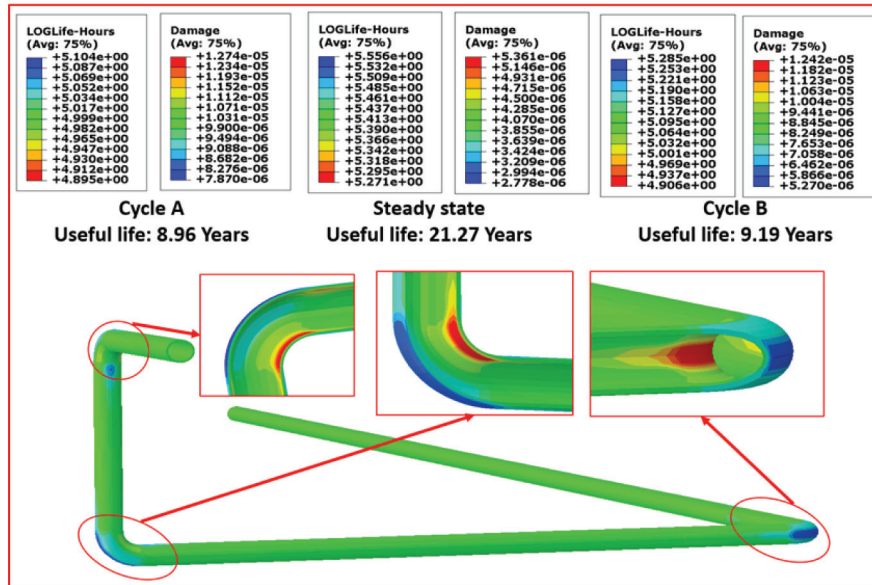


(b)

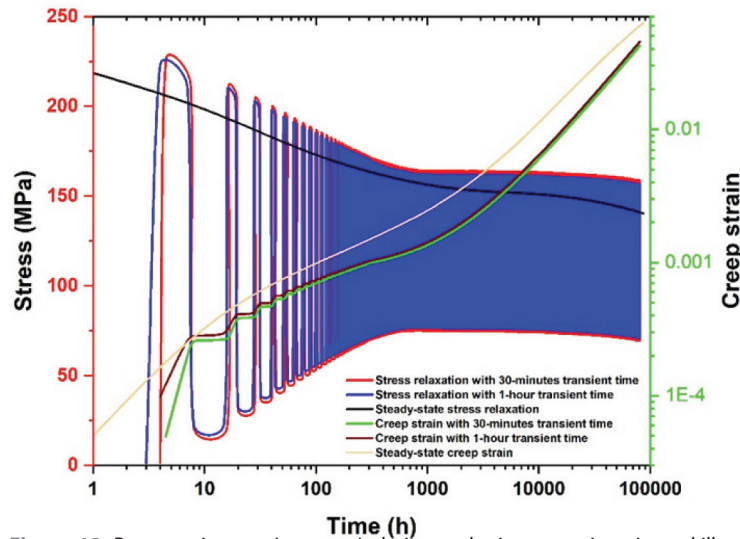
Figuur 9: Grafiese voorstelling van kontoerprofiel vir (a) kruipspanning en (b) kruipvervorming by faling



Figuur 10: Kruipkadeakkumulatie van stoompepe vir die verskillende siklusse wat oorweeg is



Figuur 11: Stoompypkruipskade en nutsduur by faling vir bedryfsiklusse



Figuur 12: Patroon vir spanningsvermindering en kruipvervorming vir verskillende bedryfsiklusse

Die grafiese voorstelling van die kontoerprofiel vir kruipskade en die nutsduur van die pype vir die verskillende siklusse wat oorweeg is, word in Figuur 11 uitgebeeld. Net soos die spanning en vervorming as gevolg van kruip, is die swakste nutsduur by die binnewelwing van die pype ontwikkel. Die bestendige-toestandanalise het egter die hoogste kruipnutsduur (21,27 jaar), terwyl die ontleding met 1-uur-oorgangstye die laagste nutsduur (8,96 jaar) opgelewer het. Hierdie verskil in die nutsduur van die pype word toegeskryf aan die skadeakkumulasiepatrone tydens werking. As gevolg van die vinnige skadeakkumulasie van die analise met 'n 1-uur-oorgangstye (siklus 1), het dit die laagste kruipnutsduur, terwyl die bestendige-toestandanalise met die stadigste kruipskadeakkumulasie die hoogste kruipnutsduur opgelewer het.

'n Grafiese voorstelling van die spanningspatroon van die stoompyp vir die verskillende siklusse wat oorweeg word, word in Figuur 12 uitgebeeld. Aangesien die hele bedryfstyd tydens die bestendige-toestandanalise in die hoëtemperatuurrom-

gewing deurgebring word, is die spanningsvermindering daarvan vinniger as by die ander twee ontledings waar slegs 'n fraksie van die hele tydsduur daarvan in die hoëtemperatuurkruipomgewing deurgebring word. Ook is die spanningsvermindering van die analise met 1-uur-oorgangstye (siklus 1A) vinniger as dié met 30-minuut-oorgangstye (siklus 2) omdat die analise met 30-minuut-oorgangstye (siklus 2) 'n langer tyd buite spyttyd deurbreng vergeleke met dié met 1-uur-oorgangstye (siklus 1).

Verder is waargeneem dat die kruipvervorming by elke tydsinkrement hoër is in die bestendige-toestandanalise vergeleke met dié waar daar siklusse is. Die rede vir hierdie gedrag word toegeskryf aan die tydsduur van elke ontleding in die hoëtemperatuurkruipomgewing. Aangesien daar by die ontleding met 1-uur-oorgangstye minder tyd buite spyttyd deurgebring is, is die kruipvervorming effens hoër as by dié met 30-minuutoorgangstye.

Geldigheidsbepaling van kruipvervorming

Om die geldigheid van die ontwikkelde kruipvervorming in die pyp analities te bepaal, is dit noodsaaklik om 'n uitdrukking te hê wat in staat is om die ontwikkelde spanning tydens bedryf te bereken. Nietemin maak die kompleksiteit van die pype, gekenmerk deur die teenwoordigheid van elmoë, die geldigheidsbepaling van die kruipvervorming in die pype in die geheel feitlik onmoontlik. Die gebruik van Lame se vergelyking vir die berekening van die meganiese spanning (Vergelyking 1-5), en die vergelykings vir bepaling van termiese spanning (Vergelyking 6-8) het egter in 'n reguit, dikwandige pyp ontwikkel, en die uitdrukking van die kruipmodel (Vergelyking 10) wat in hierdie studie gebruik is, maak voorsiening vir die analitiese geldigheidsbepaling van die ontwikkelde kruipvervorming by die reguit gedeeltes van die pype ná 1 uur se bestendigetoestandwerking. Die waarde van kruipvervorming by die reguit gedeeltes van die pyp na een uur van bestendigetoestandkruipanalise deur FEA verkry is (aangetoon in Figuur 8), en wat analities bereken is deur gebruik te maak van Vergelyking 1-10, word in Tabel VI uitgebeeld. Die vergelyking van beide resultate deur gebruik te maak van hul persentasie afwyking toon dat daar 'n sterk korrelasie is tussen die FEA- en berekende kruipvervorming in die reguit gedeeltes van die stoompyp.

Tabel VI: Vergelyking van FEA- en analities berekende kruipvervorming by die reguit pypgedeeltes

Kruipvervorming		% afwyking
FEA ($\times 10^{-7}$)	Analities bereken ($\times 10^{-7}$)	
1,911	1,951	2,05

Gevolgtrekking

In hierdie studie is eindige-elementanalisesagteware, Abaqus in samewerking met fesafe/Turbolife-naverwerkingsagteware gebruik om die kruipgedrag te bepaal van P92- martensitiese vlekvrystaalstoompype wat onderwerp was aan verskillende bedryfstoestande wat dikwels in die elektriese-energie-opwekkingsbedrywe ervaar word. Gevolglik is die volgende afleidings uit die analise gemaak:

- Die toegepaste werkstemperatuur is binne die pype behou, en die waarde van die temperatuur wat op die isolasiemantel ontwikkel is, dui daarop dat pyrogel geskik is vir gebruik as isolasie vir hoëtemperatuurtoerusting soos stoompype. Ook kan die buitetemperatuur van die isolasiemantel verder verlaag word deur die dikte van die mantel te verhoog.
- Die maksimum kruipspanning en vervorming wat ontwikkel is, was geleë by die binnewelwing van die pyp in die verskillende ontledings wat oorweeg is, en hierdie spanning en vervorming word duidelik by faling, soos aangedui deur die kontoergrafieke. Die binnewelwing is dus die vatbaarste vir faling in die hele pypsamestel.

- 'n Relatief vinnige vermindering in die spanning met 'n ooreenstemmend hoër kruipvervorming is in die bestendigetoestandkruipanalise ervaar, vergeleke met die analise wat gekenmerk is deur daaglikse bedryfskifte. Die rede vir hierdie gedrag is toegeskryf aan die verskillende tydsdure wat die pype in die hoëtemperatuurkruipomgewing was.
- Die bedryfspatroon eerder as die kruipvervorming is verantwoordelik vir die tempo van kruipskadeakkumulatie. Vandaar die vinniger akkumulatie van kruipskade tydens die daaglikse sikliese lading.
- As gevolg van die kenmerkende vinnige akkumulatie van kruipskade wat deur die analise met daaglikse sikliese belading gely is, het die pype wat aan bestendigetoestandwerking onderworpe was, die hoogste kruipnutsduur gelewer.
- 'n Sterk korrelasie is verkry tussen die FEA-kruipvervorming en dit wat analities bereken is.
- Laastens, enige vorm van daaglikse sikliese lading lei tot vinniger akkumulatie van skade, wat op sy beurt die kruipnutsduur van die pype beduidend verminder. Gevolglik bly 'n bestendige toestand die mees ideale bedryfstoestand vir stoompype.

Erkennings

Hierdie navorsing is ondersteun deur Tshwane Universiteit van Tegnologie en die Universiteit van Pretoria in Suid-Afrika. Die skrywers het ook opregte waardering vir die ondersteuning van die Eskom-instituut vir Kragentrale-ingenieurswese (Republiek van Suid-Afrika).

Datums

Ontvang: 19/06/2022
 Aanvaar: 06/09/2022
 Gepubliseer: 26/10/2022

Bronnelys

Dassault-Systemes, 2017, fe-safe/TURBOLife user manual, *Dassault Systems, Providence, RI*, 122.

Eggeler, G., Ramteke, A., Coleman, M., et al., 1994, Analysis of creep in a welded 'P91' pressure vessel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 60(3), 237-257. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(94\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(94)90125-2).

Fameso, F., Ramakokovhu, U., Desai, D., et al., 2021, Effects of manufacturing-induced operating-conditions amplified stresses on fatigue-life prediction of micro gas turbine blades-A simulation-based Study, *Journal of Physics: Conference Series* 2224, 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2224/1/012043>.

Hyde, T.H., Sun, W., Williams, J.A., 2002a, Life estimation of pressurised pipe bends using steady-state creep reference rupture stresses, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79(12), 799-805. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00134-5](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00134-5).

Hyde, T.H., Yaghi, A., Becker, A.A., et al., 2002b, Finite element creep continuum damage mechanics analysis of pressurised pipe bends with ovality, *JSM International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering* 45(1), 84-89. <https://doi.org/10.1299/jsmea.45.84>.

Hyde, T.H., Becker, A.A., Sun, W., et al., 2006, Finite-element creep damage analyses of P91 pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83(11-12), 853-863. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.08.013>.

- Hyde, T.H., Saber, M., Sun, W., 2010, Testing and modelling of creep crack growth in compact tension specimens from a P91 weld at 650 °C, *Engineering Fracture Mechanics* 77(15), 2946-2957. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.03.043>.
- Kandil, A., El-Kady, A., El-Kafrawy, A., 1995, Transient thermal stress analysis of thick-walled cylinders, *International Journal of Mechanical Sciences*, 37(7), 721-732. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)00105-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)00105-5).
- Kanlıkama, B., Abuşoğlu, A., Güzelbey, İ.H., 2013, Coupled thermoelastic analysis of thick-walled pressurized cylinders, *International Journal of Energy and Power Engineering* 2(2), 60-68. <https://doi.org/10.11648/j.ijep.20130202.15>.
- Kral, P., Dvorak, J., Sklenicka, V., et al., 2018, The effect of ultrafine-grained microstructure on creep behaviour of 9% Cr steel, *Materials* 11(5), 787. <https://doi.org/10.3390/ma11050787>.
- Laha, K., Chandravathi, K.S., Rao K.B.S., et al., 2001, An assessment of creep deformation and fracture behavior of 2.25 Cr-1Mo similar and dissimilar weld joints, *Metallurgical and Materials Transactions A* 32(1), 115-124. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0107-9>.
- Lan, X., Xu, H., Yang, L., et al., 2018, Influence of initial ovality on creep life of P92 pipe bends subjected to in-plane bending, *Materials at High Temperatures* 35(5), 418-426. <https://doi.org/10.1080/09603409.2017.1367156>.
- Liu, D., Pons, D.J., Wong, E.H., 2017, Creep-integrated fatigue equation for metals, *International Journal of Fatigue* 98, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.030>.
- Montes, J.M., Cuevas, F.G., Cintas, J., 2012, New creep law, *Materials Science and Technology* 28(3), 377-379. <https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000029>.
- Ogunbiyi, O.F., Salifu, S.A., Jamiru, T., et al., 2019, Thermo-mechanical simulation of steam turbine blade with spark plasma sintering fabricated Inconel 738LC superalloy properties, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 655, 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/655/1/012046>.
- Pesonen, V., 2014, Online Creep and Fatigue Monitoring in Power Plants, *Master's Dissertation, Tampere University of Technology*.
- Pyrogel-XTE-Datasheet. High-performance aerogel insulation for industrial and commercial applications. Available: https://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Data%20Sheets/Pyrogel-XTE-Datasheet.pdf.
- Rasiawan, T., 2017, The influence of prior creep damage on the fracture localisation in X20 CrMoV12-1 cross-weld creep tests, *Master's Dissertation, University of Cape Town*.
- Robinson, E.L., 1952, Effect of temperature variation on the long-time rupture strength of steels, *Journal of Fluids Engineering* 77, 777-780. <https://doi.org/10.1115/1.4015916>.
- Rouse, J.P., Leom, M.Z., Sun, W., et al., 2013, Steady-state creep peak rupture stresses in 90° power plant pipe bends with manufacture induced cross-section dimension variations, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 105, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.02.002>.
- Saber, M., Tanner, D.W.J., Sun, W., et al., 2011, Determination of creep and damage properties for P92 at 675 °C, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 46(8), 842-851. <https://doi.org/10.1177/0309324711413012>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., et al., 2019, Thermo-mechanical stress simulation of unconstrained region of straight X20 steam pipe, *Procedia Manufacturing* 35, 1330-1336. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.021>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2020a, Comparative evaluation of creep response of X20 and P91 steam piping networks in operation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109(7), 1987-1996. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05727-7>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2020b, Prediction and comparison of creep behavior of X20 steam plant piping network with different phenomenological creep models, *Journal of Materials Engineering and Performance* 29, 7382-7395. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05235-5>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2020c, Creep-fatigue interaction of P91 steam piping subjected to typical start-up and shutdown cycles, *Journal of Failure Analysis and Prevention* 20, 1055-1064. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00908-8>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2021a, Influence of diverse operating cycles on the useful creep life of P92 steam piping, *Journal of Failure Analysis and Prevention* 21, 983-992. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01144-4>.
- Salifu, S., Desai, D., Fameso, F., et al., 2021b, Thermo-mechanical analysis of bolted X20 steam pipe-flange assembly, *Materials Today: Proceedings* 38(2), 842-849. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.882>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2021c, Numerical simulation and creep-life prediction of X20 steam piping, *Materials Today: Proceedings* 38(2), 893-898. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.125>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2021d, Numerical investigation of creep-fatigue interaction of straight P91 steam pipe subjected to start-up and shutdown cycles, *Materials Today: Proceedings* 38(2), 1018-1023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.613>.
- Salifu, S., Desai, D., Kok, S., 2021e, Numerical simulation of stress relaxation and creep response of X20 steam piping under diverse operating conditions, *International Journal of Engineering Research in Africa* 57, 19-32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.57.19>.
- Šeruga, D., Fajdiga, M., Nagode, M., 2011, Creep damage calculation for thermo mechanical fatigue, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57(5), 371-378. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.108>.
- Song, Y., Ma, Y., Chen, H., et al., 2021, The effects of tensile and compressive dwells on creep-fatigue behavior and fracture mechanism in welded joint of P92 steel, *Materials Science and Engineering: A* 813(5), 141129. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141129>.
- Strang, A., Greenwood, G.W., 1998, Microstructural stability of creep resistant alloys for high temperature plant applications. *IOM Communications (London)*, 1998.
- Sugiura, R., Yokobori Jr, A.T., Suzuki, K., et al., 2010, Characterization of incubation time on creep crack growth for weldments of P92, *Engineering Fracture Mechanics* 77(15), 3053-3065. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.04.025>.
- Susmel, L. and Taylor, D., 2003, Two methods for predicting the multiaxial fatigue limits of sharp notches, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 26(9), 821-833. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00683.x>.
- Tu, S.T., 2002, Creep behavior of crack near bi-material interface characterized by integral parameters, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 38(2), 203-209. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(02)00088-5).
- Vaillant, J.C., Vandenberghe, B., Hahn, B., et al., 2008, T/P23, 24, 911 and 92: New grades for advanced coal-fired power plants-Properties and experience, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85(1-2), 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.06.011>.
- Wang, X., Zhang, W., Gong, J., et al., 2018, Low cycle fatigue and creep fatigue interaction behavior of 9Cr-0.5 Mo-1.8 W-Nb heat-resistant steel at high temperature, *Journal of Nuclear Materials* 505, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.03.055>.
- Wang, X., Zhang, W., Zhang, T., et al., 2019, A new empirical life prediction model for 9-12% Cr steels under low cycle fatigue and creep fatigue interaction loadings, *Metals* 9(2), 183. <https://doi.org/10.3390/met9020183>.