

Novi koncepti opisovanja lezenja in preostala življenjska doba kovinskih materialov

The θ Projection Concept and Remanent Creep Life of Metals

T. Šuštar¹, B. Ule, IMT Ljubljana
T. Rodič, NTF, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-07-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-10-15

V članku so predstavljeni novi koncepti opisovanja lezenja, ki temeljijo na konstitutivnih enačbah, in zajemajo vpliv časa, napetosti in temperature na deformacijo z lezenjem. Tak način opisovanja lezenja zahteva bistveno manjši obseg preizkusov in hkrati omogoča uporabo sodobnih numeričnih metod. Preizkusi so krajši, saj jih izvajamo pri višjih temperaturah in obremenitvah. Rezultati kratkotrajnih preizkusov lezenja so osnova za določanje materialnih konstant v konstitutivnih enačbah, s katerimi lahko napovemo vedenje pri dolgotrajni eksploataciji, pa tudi preostala življenjska doba kovinskega materiala. Nov koncept opisovanja je predstavljen s projekcijo θ , metodo, ki se je v praksi najbolj uveljavila.

Ključne besede: lezenje, projekcija θ , preostala življenjska doba

New concepts based on constitutive equations relating the influence of time, stress and temperature to creep strain are presented for the description of creep. Such description requires an essentially shorter testing time and simultaneously enables the use of modern numerical methods. The tests are shorter and are performed at higher temperatures and loads. The data obtained at such short-term test are used for determining the material parameters in the constitutive equations which enable the prediction of the remanent creep life of service exposed components. The θ - projection method is one of the most commonly used methods among such concepts.

Key words: creep, θ projection, remanent life

1 Uvod

Lezenje in porušitev zaradi njega sta glavna faktorja, ki določata življenjsko dobo materiala, ki je izpostavljen hkratnim mehanskim in toplotnim obremenitvam v energetskih objektih. Kovinskemu materialu, ki je izpostavljen povišanim temperaturam, se slabšajo mehanske lastnosti, zato je ključnega pomena za varno obratovanje napovedovanje časa, do katerega bo material še imel zahtevane lastnosti.

Novi koncepti opisovanja procesa lezenja ne temeljijo več na stacionarnosti procesov, temveč upoštevajo, da se tudi pri visokih temperaturah stacionarna stanja ne vzpostavijo, zato ne govorimo več o stacionarni hitrosti lezenja temveč o njeni minimalni hitrosti. Opisovanje sekundarne faze lezenja kot stacionarnega procesa je nekdanj nedvomno pomenilo napredek, vendar danes predstavlja oviro za nadaljnji razvoj. K razvoju novih konceptov so veliko prispevala natančna opazovanja preizkusov lezenja pri konstantni napetosti.

2 Teoretični del

Glavni parameter, ki se je v praksi uporabljal za opisovanje, je bila stacionarna hitrost lezenja¹ $\dot{\epsilon}_m$. Njeno odvisnost oz. odvisnost porušitvenega časa od napetosti in temperature podaja potenčni zakon:

$$\frac{1}{t_r} \propto \dot{\epsilon}_m = A \sigma^n e^{-\frac{Q_c}{RT}} \quad (1)$$

kjer so:

- t ... čas do porušitve
- $\dot{\epsilon}_m$... stacionarna hitrost lezenja
- σ ... napetost
- Q_c ... aktivacijska energija lezenja
- A ... konstanta materiala
- R ... splošna plinska konstanta
- T ... temperatura
- n ... eksponent utrjevanja

Vendar pa se izkaže², da so A, Q_c in n konstante le v relativno ozkih temperaturnih in napetostnih območjih. Tako na primer koeficient utrjevanja n raste z naraščanjem napetosti. Razlog nekonstantnosti navedenih členov enačbe (1) je v spreminjanju mehanizmov lezenja s časom.

Napovedovanje lastnosti materiala se je v praksi izvajalo na podlagi parametrov, ki temeljijo na sekundarnem lezenju. Po Monkman - Grantu³ je čas do porušitve obratno sorazmeren minimalni hitrosti lezenja:

$$t_r = \frac{M}{\dot{\epsilon}_m} \quad (2)$$

kjer je M konstanta za širše področje napetosti in temperature. Z združitvijo enačb (1) in (2) ter logaritmiranjem sledi:

$$\ln(t_r) = \ln(A) f(\sigma) + \frac{Q_c}{RT} \quad (3)$$

¹ Tomaz ŠUŠTAR, dipl. inž.
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
1000 Ljubljana, Lepi pot 11

Odvisnost $\log(\sigma)$ - $\log(t_r)$ oz. $\log(\sigma)$ - $\log(\dot{\epsilon}_m)$ pa ni linearna, zato so različni avtorji v izraz (3) vpeljali parametre, ki so omogočili linearizacijo ter napovedovanje lastnosti z ekstrapolacijo k daljšim časom. Orr, Sherby in Dorn⁴ so predložili uvedbo časovno temperaturnega parametra, ki je karakterističen za določeno napetost:

$$P(\sigma) = \ln(t_r) - \frac{Y}{T} \quad (4)$$

kjer je Y empirično določena konstanta. Z vpeljavo časovno temperaturnega parametra zajamemo vpliv časa in temperature z eno spremenljivko. Rezultate preizkusov za širše območje obremenitev in temperatur vnašamo v diagrame P - σ , iz katerih je mogoče za različne napetosti ugotoviti vrednost parametra P , ki nam ob znani temperaturi omogoča izračun porušitvenega časa. Ker zveza P - σ ni linearna omogoča le zanesljivo interpolacijo ne pa tudi ekstrapolacije. Podoben parameter sta predložila Larson in Miller⁵:

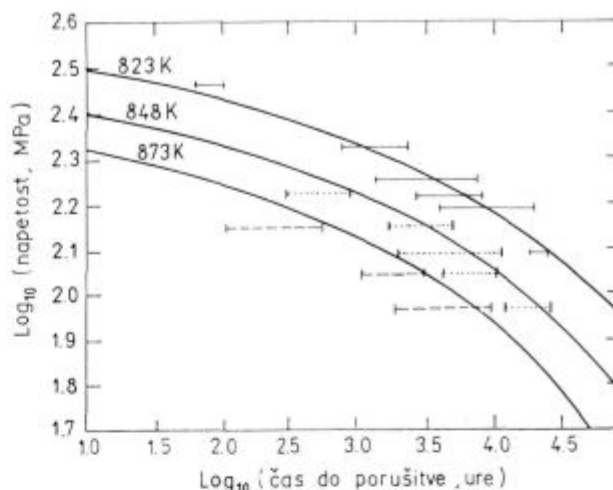
$$P = T(\ln(t_r) + C) \quad (5)$$

kjer je C Larson-Millerjeva konstanta. Tudi odvisnost Larson-Millerjevega parametra od napetosti ne omogoča zanesljive ekstrapolacije. Podobne slabosti zasledimo še pri drugih parametrih tega tipa, kot na primer pri Manson-Haferdu⁶. Za vse parametrične metode je zato ekstrapolacija rezultatov možna le do trikratnega časa trajanja najdaljšega še zanesljivega preizkusa⁷. Ravno ta omejitev je postala velika ovira predvsem za razvoj novih materialov, ki bi morali pred praktično uporabo preiti dolgotrajna preizkušanja; za oceno lastnosti: po 100000 urah bi na primer morali najdaljši preizkusi trajati vsaj 30000 ur, kar bi močno upočasnilo njihov razvoj. Parametrične metode so tudi neprimerne za uporabo v sodobnih numeričnih simulacijah lezenja. Zato je bilo potrebno poiskati nove koncepte opisovanja lezenja predvsem s konstitutivnimi enačbami, ki povezujejo vpliv temperature, napetosti in časa na deformacijo.

3 Novi koncepti opisovanja lezenja

Podatki o lezenju materialov so rezultat preizkušanja več laboratorijev. Preizkusi lezenja pri konstantni obremenitvi kažejo zelo velike razlike med posameznimi laboratoriji⁸. Odstopanja med njimi nazorno prikazuje diagram na **sliki 1**. Velik raztros rezultatov je predvsem posledica prevelikih nihanj temperature med preizkusom in ekscentričnosti obremenitve⁹.

Standardna obravnava preizkusov lezenja izkorišča le neznamen del informacij, ki jih tak preizkus nudi. Navadno ugotavljamo le čas do porušitve (t_r) in porušno deformacijo (ϵ_r). Redkeje ugotavljamo minimalno hitrost lezenja ($\dot{\epsilon}_m$) oz. čas, potreben za dosego določene deformacije. Taka obravnava popolnoma zanemara primarno in terciarno fazo lezenja, ki sta, v nasprotju z do sedaj uveljavljenim prepričanjem, pri velikem številu materialov prevladujoči. Na ta način ugotovimo le odvisnosti navedenih parametrov od temperature in napetosti, kar



Slika 1: Podatki o času do porušitve v odvisnosti od napetosti in temperature za jeklo $\frac{1}{2}\text{Cr}\frac{1}{2}\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$. Krivulje prikazujejo izračunane vrednosti s projekcijo θ , horizontalne linije pa prikazujejo raztros izmerjenih vrednosti v različnih laboratorijih¹⁰

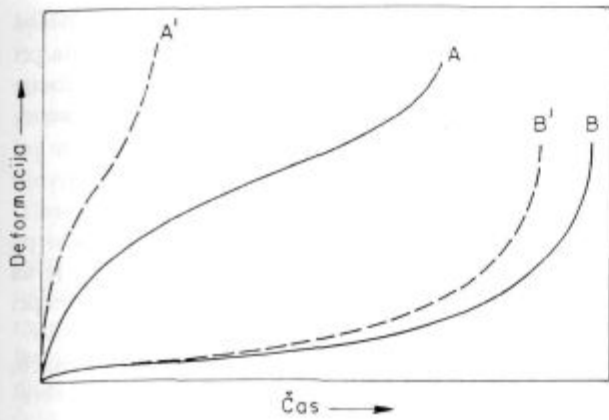
Figure 1: Creep rupture data for $\frac{1}{2}\text{Cr}\frac{1}{2}\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ steel. The lines predicted using the θ relationship to analyse short-term creep curves can be compared with the error bars associated with multi-laboratory stress-rupture data¹⁰

pa ne ustreza modernim načinom numeričnega modeliranja lezenja z metodo končnih elementov, ki zahtevajo odvisnost med deformacijo, časom, napetostjo in temperaturo za celotno krivuljo lezenja.

Novi koncepti opisovanja lezenja so pripeljali tudi do razvoja novih vrst preizkusov¹⁰. Ti temeljijo na konstantni napetosti namesto na konstantni obremenitvi. Za izvedbo takih preizkusov potrebujemo sicer dražjo merilno opremo, vendar je uporabnost dobljenih podatkov boljša, kar vodi do znatnega znižanja celotnih stroškov preizkušanja, saj se skupni čas znatno skrajša. Podatki, dobljeni s preizkusi pri konstantni napetosti, omogočajo natančen izračun materialnih konstant, ki nastopajo v konstitutivnih enačbah. Poudariti je potrebno, da lahko materialne konstante določimo tudi na podlagi preizkusov pri konstantni obremenitvi, vendar nam to močno omeji izbiro konstitutivnih enačb. Razlike med krivuljami, dobljenimi pri preizkusih s konstantno obremenitvijo in konstantno napetostjo, prikazuje **slika 2**. Razlike med krivuljami so posledica duktilnosti materiala. Za materiale z nizko duktilnostjo so razlike zelo majhne. Za tiste s srednjo in visoko duktilnostjo, kjer pride do močne lokalne zožitve v vratu preizkušanca, pa so razlike očitne. Iz **slike 2** je razvidno, da je razlika med krivuljami največja v primeru, ko ima material pri konstantni obremenitvi poudarjeno primarno fazo lezenja, najmanjša pa, ko ima poudarjeno tretjo fazo.

3.1 Konstitutivne enačbe

S pospešenim razvojem novih kovinskih materialov za visoke temperature in metod za numerično modeliranje lezenja se je v literaturi pojavilo več konstitutivnih enačb, od katerih se je najbolj uveljavila projekcija θ , ki



Slika 2: Shematski diagram prikazuje razlike med krivuljami lezenja pri konstantni napetosti (A in B) in krivuljami lezenja pri konstantni obremenitvi (A' in B').⁷

Figure 2: Schematic diagram illustrating differences in creep strain/time behaviour found using constant stress (A and B) and constant load test procedures (A' and B').⁷

sta jo predložila Evans in Wilshire¹¹. Glavni razlog za njeno uveljavitev je dejstvo, da upošteva mikromehanizme lezenja, za razliko od drugih metod, ki temeljijo predvsem na statistični analizi velike količine rezultatov preizkusov lezenja in upoštevajo le najbolj trivialno Arrheniusovo soodvisnost med temperaturo in časom.

3.1.1 Projekcija θ

Glavni razlog za razvoj projekcije θ je bil že omenjeni veliki raztros rezultatov preizkusov lezenja pri konstantni obremenitvi¹¹. Razvoj preizkusov pri konstantni napetosti je močno zmanjšal raztros rezultatov in s tem omogočil izpeljavo konstitutivnih enačb. Konstitutivna enačba projekcije θ se glasi:

$$\varepsilon = \theta_1(1 - e^{-\theta_1 t}) + \theta_3(e^{\theta_1 t} - 1) \quad (6)$$

kjer so:

θ_i ... parametri, odvisni od temperature in napetosti ($i=1...4$)

ε ... deformacija, povzročena z lezenjem

t ... čas

Odvisnost parametrov θ od temperature in napetosti podaja izraz:

$$\ln \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad (7)$$

kjer so a_i , b_i , c_i , d_i koeficienti, ki jih določimo eksperimentalno. Velika prednost θ parametrov je linearna odvisnost $\ln \theta_i$ od napetosti, kar omogoča zanesljivejšo ekstrapolacijo. Ekstrapolacija k daljšim časom je omejena s temperaturnim intervalom, v katerem so bili izvedeni preizkusi, na podlagi katerih smo določili koeficiente enačbe (7). Za razliko od klasične metode opisovanja lezenja obravnava projekcija θ lezenje kot rezultat dveh nasprotujočih si procesov. Prvi določa primarno lezenje,

za katerega je značilno zmanjševanje hitrosti lezenja, drugi pa terciarno, med katerim se hitrost močno poveča. Tako lahko celotno deformacijo z lezenjem razdelimo na dva dela:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_t \quad (8)$$

V tem primeru je druga faza lezenja le ravnovesje med tema dvema vplivoma.

V enačbi (6) ponazarja prvi člen:

$$\varepsilon_p = \theta_1(1 - e^{-\theta_1 t}); \dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} = \theta_1(\theta_1 + \varepsilon_p) \quad (9)$$

primarno fazo lezenja. Zmanjšanje hitrosti lezenja je posledica deformacijskega utrjevanja materiala. Enačba (9) kaže na linearno padajočo zvezo med deformacijo z lezenjem v primarni fazi in hitrostjo lezenja, kar je v skladu z mikromodelom lezenja. Tretjo fazo predstavlja drugi člen enačbe (6):

$$\varepsilon_t = \theta_3(e^{\theta_1 t} - 1); \dot{\varepsilon}_t = \frac{d\varepsilon_t}{dt} = \theta_4(\theta_3 + \varepsilon_p) \quad (10)$$

Za tretjo fazo je značilno povečanje hitrosti lezenja vse do porušitve. Naraščanje hitrosti lezenja je posledica združevanja por, ki se tvorijo med celotnim procesom. Odvisnost med terciarno deformacijo z lezenjem in hitrostjo lezenja je v tem primeru linearna, naraščajoča, kar je prav tako v skladu z že omenjenim.

Temperaturna odvisnost parametrov θ_1 in θ_3 je primerljiva s temperaturno odvisnostjo meje plastičnosti. V primarni fazi določa hitrost lezenja difuzijsko kontrolirano generiranje dislokacij in njihovo gibanje. Zato je tudi parameter θ_2 odvisen od procesa samodifuzije v materialu. V terciarni fazi prispeva k povečanju hitrosti lezenja več procesov z različnimi aktivacijskimi energijami. Ker pa noben od teh procesov ni prevladujoč, zajamemo njihov vpliv v parametru θ_4 s povprečno aktivacijsko energijo Q_4 , ki je praviloma odvisna še od napetostnega stanja.

Povezavo parametrov θ_i in veličin mikromodela lezenja podajajo enačbe¹⁰:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= G_1 e^{H_1(\frac{\sigma}{\sigma_0})} \\ \theta_2 &= G_2 e^{\frac{Q_2 - H_2 \sigma}{RT}} \\ \theta_3 &= G_3 e^{H_3(\frac{\sigma}{\sigma_0})} \\ \theta_4 &= G_4 e^{\frac{Q_4 - H_4 \sigma}{RT}} \end{aligned} \quad (11)$$

kjer so:

G_i, H_i ... materialne konstante

Q_2 ... aktivacijska energija primarne faze lezenja

Q_4 ... aktivacijska energija terciarne faze lezenja

Do odvisnosti hitrosti lezenja od parametrov θ pri-
demo z odvajanjem enačbe (6) po času:

$$\dot{\varepsilon} = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_1 t} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_1 t} \quad (12)$$

Minimalna hitrost lezenja nastopi ob pogoju $\frac{d\epsilon}{dt} = 0$, torej po času:

$$t' = \frac{1}{\theta_2 + \theta_4} \ln \frac{\theta_1 \theta_2^2}{\theta_3 \theta_4^2} \quad (13)$$

S projekcijo θ je mogoče enostavno napovedati življenjsko dobo materiala. Življenjsko dobo, določeno s porušno deformacijo ϵ_t , je zapisal Evans v obliki:

$$\ln \epsilon_t = a + b\sigma + cT + d\sigma T \quad (14)$$

v kateri nastopajo koeficienti a, b, c, d , ki jih prav tako določimo na podlagi rezultatov preizkusov lezenja. Porušni čas je mogoče izračunati z rešitvijo enačbe:

$$\theta_1 (1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3 (e^{\theta_4 t} - 1) - \epsilon_t = 0 \quad (15)$$

Iz navedenega je razvidno, da ob poznavanju 20 konstant iz enačb (7) in (14), ki jih določimo na podlagi kratkotrajnih preizkusov lezenja, opravljenih pri povišani napetosti, lahko brez težav izračunamo parametre θ in porušno deformacijo za obratovalne razmere. Določanje konstant poteka v dveh stopnjah. Najprej moramo določiti na podlagi posameznih krivulj lezenja parametre θ_i , nato pa še konstante enačbe (7), ki zajema njihovo odvisnost od temperature in napetosti. Z znanimi vrednostmi parametrov θ_i lahko z enačbo (6) napovemo lezenje materiala v željenih razmerah. Poudariti je potrebno, da so napovedi lastnosti omejene na temperaturni interval, v katerem so bili izvedeni preizkusi lezenja, na podlagi katerih smo določili konstante v enačbah (7) in (14). Zanesljivost napovedi je večja, če smo preizkuse lezenja opravili pri konstantni napetosti. Za napoved lastnosti krhkih materialov je primernejši izraz, do katerega pridemo z razvojem eksponentalnega dela drugega člena enačbe (6) v Taylorjevo vrsto:

$$\epsilon = \theta_1 (1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3 \theta_4 t \quad (16)$$

saj se pri krhkih materialih terciarna faza praktično ne pojavi.

3.1.2 Drugi konstitutivni zakoni

Poleg projekcije θ je znanih še več drugih konstitutivnih enačb. Za razliko od projekcije θ , ki se je v praksi že uveljavila^{12,15,2}, pa za nove enačbe v literaturi še ni mogoče najti dovolj podatkov o njihovi širši uporabi. Poti do novih enačb sta navadno dve. Bodisi gre za enačbe, ki temelje na statističnem vrednotenju velike količine rezultatov preizkusov lezenja, bodisi so enačbe izpeljane na podlagi mikromodelov in so zato že blizu konstitutivnim zakonom.

Oba načina imata svoje slabosti. V prvem primeru se pogosto pozablja na fizikalno ozadje procesov lezenja oziroma se išče povezave med vplivnimi veličinami, ki variirajo v preozkem območju, kjer vpliv posameznih ni očitno. V drugem primeru pa se pojavi težava zaradi nezmožnosti upoštevanja vseh procesov, ki se dogajajo med lezenjem. Procesi so odvisni tudi od vrste materiala, tako da je z notnim mikromodelom zelo težko opisati vedenje večjega števila kovinskih materialov.

Pomembno je poudariti, da je konstitutivna enačba projekcije θ izpeljana na podlagi preizkusov lezenja pri konstantni napetosti, zato je razumljivo poročanje nekaterih avtorjev¹³ o relativno slabem ujemanju napovedi, dobljenih s projekcijo θ na osnovi preizkusov pri konstantni obremenitvi. Znanih je več konstitutivnih enačb, ki so bile izpeljane na osnovi rezultatov preizkusov lezenja pri konstantni obremenitvi. Za prakso pa so te enačbe kljub vsemu še posebej zanimive, saj je na razpolago bistveno več rezultatov preizkusov lezenja pri konstantni obremenitvi, kot pa pri konstantni napetosti.

Navajamo nekaj zgledov konstitutivnih enačb, izpeljanih na podlagi preizkusov pri konstantni obremenitvi^{14,15}:

$$\epsilon = A_1 t^{A_2} + A_3 \log(1 - A_4 t) \quad (17)$$

$$\epsilon = A_1 (1 - e^{-A_2 t}) + A_3 \log(1 - A_4 t) + A_5 (1 - e^{-A_6 t}) \quad (18)$$

$$\epsilon = A_1 (1 - e^{-A_2 t^{A_3}}) + A_3 \log(1 - A_4 t) \quad (19)$$

$$\epsilon = A_1 (1 - e^{-A_2 t}) + A_3 \log(1 - A_4 t) \quad (20)$$

$$\epsilon = A_1 (1 - e^{-A_2 t^{A_3}}) + A_3 t^{A_4} + A_5 (e^{A_6 t} - 1) \quad (21)$$

$$\epsilon = A_1 t^{A_2} + A_3 (e^{A_4 t} - 1) \quad (22)$$

$$\epsilon = A_1 (1 - e^{-A_2 t^{A_3}}) + A_3 (e^{A_4 t} - 1) \quad (23)$$

$$\epsilon = A_3 \log(1 - A_4 t) \quad (24)$$

kjer so koeficienti A_i odvisni od napetosti in temperature.

3.2 Določanje preostale življenjske dobe materiala

Glavno področje uporabe izsledkov lezenja je določanje preostale življenjske dobe materiala, ki je že bil izpostavljen mehanskim in toplotnim obremenitvam. Z napovedovanjem preostale življenjske dobe omogočimo pravočasno naročanje in zamenjavo komponent, ki so podvržene lezenju, in s tem zagotavljanje varnega in nemotenega obratovanja sistemov. Slednje je ključnega pomena predvsem za delovanje energetskih objektov.

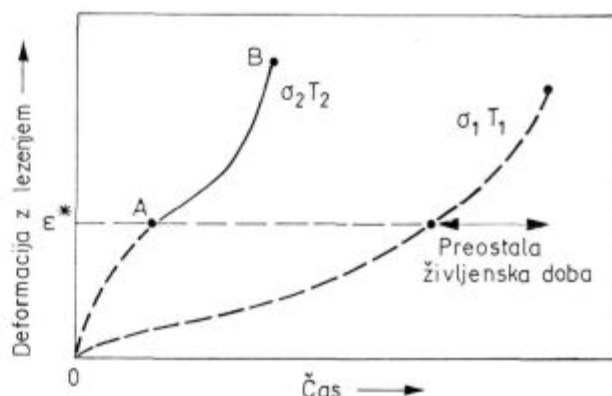
V praksi se je uveljavil način ocenjevanja preostale življenjske dobe materiala v treh stopnjah¹⁰. V prvi ocenimo preostalo življenjsko dobo le na podlagi podatkov, ki jih je upošteval in predložil projektant. V drugi ugotavljamo nakopičene poškodbe v materialu. Te preiskave zajemajo dimenzijske izmere komponent, metalografske preiskave površine z odvzetimi replikami, meritve trdote materiala in druge neporušne metode. V drugi fazi določimo, katere komponente so kritične za nemoteno delovanje sistema. V tretji izvršimo vzorčenje kritičnih komponent za preizkuse lezenja. Le te opravimo pri temperaturi, ki znatno ne presega obratovalne razmere in pri obremenitvi, ki je blizu obratovalni. Na ta način močno skrajšamo čas trajanja preizkusa in omogočimo ekstrapolacijo v področje obratovalnih temperatur. Ekstrapolacija rezultatov je mogoča ob predpostavki, da se med preizkusom lezenja konfiguracija dislokacij in mikrostruktura materiala bistveno ne

spremenita glede na obratovalne razmere, ki jim bo material v nadaljnji eksploataciji izpostavljen. Za oceno preostale življenjske dobe uporabljamo Robinsonovo pravilo¹⁶:

$$\sum_i \frac{t_i}{t_f} = 1 \quad (25)$$

kjer je t_i čas delovanja v določenih razmerah, t pa je najkrajša izmerjena življenjska doba materiala v enakih razmerah. Enačba (25) torej predpostavlja tudi za lezenje, podobno kot to velja za utrujanje materiala, kumulativno naravo porajanja poškodb v materialu, iz česar sledi aditivnost posameznih deležev, predstavljenih s kvocientu t_i/t_f . Na podlagi podatkov o obratovanju posamezne komponente in iz ugotovitev preiskav lahko ob upoštevanju Robinsonovega pravila ocenimo preostalo življenjsko dobo materiala. Praviloma delamo tako, da opravimo vrsto pospešenih preizkusov lezenja pri temperaturah, ki so višje od obratovalnih in pri predpostavljenih obratovalnih napetostih, nato pa ekstrapoliramo k obratovalnim temperaturam.

Prednosti, ki jih prinaša projekcija θ pri napovedovanju lastnosti materiala, lahko s pridom izkoristimo tudi pri napovedovanju preostale življenjske dobe materiala. Če smo načrtovanje komponent izvršili na podlagi projekcije θ , lahko z numeričnim modeliranjem določimo kritične komponente. Preizkuse lezenja vzorcev, odvzetih s kritičnih komponent v eksploataciji, lahko izvršimo pri povišani temperaturi in povišani obremenitvi, s čimer še dodatno skrajšamo čas preizkusa. Z možnostjo spreminjanja obremenitve se lahko izognemo težavam, ki nastopijo pri materialih, kjer se s povišano temperaturo močno spremeni mikrostruktura, konfiguracija dislokacij in zlasti vrsta in disperzija karbidnih precipitativ. Pri napovedovanju preostale življenjske dobe materiala, za razliko od klasične metode, ne uporabljamo Robinsonovega pravila, ki upošteva časovno utrjevanje materiala, ampak predpostavimo njegovo deformacijsko utrjevanje. Primerjava obeh metod je pokazala, da je povprečna ocena življenjske dobe po obeh metodah enaka, vendar je raztros rezultatov, dobljenih s projekcijo θ bistveno manjši¹⁰. Oceno preostale življenjske dobe materiala, ob predpostavki deformacijskega utrjevanja materiala, shematsko prikazuje **slika 3**. Ob poznavanju koeficientov enačb (7) in (14) za izvorni material lahko računsko določimo krivulje lezenja za razmere pospešenega preizkusa lezenja vzorcev iz materiala v eksploataciji (**krivulja 0-B, slika 3**). S primerjavo eksperimentalne krivulje lezenja vzorcev iz materiala v eksploataciji (**krivulja A-B**) in računске (**krivulja 0-B**) lahko določimo deformacijo, nastalo z lezenjem, do odvzema vzorca, ϵ^* , in sicer tako, da točka B s krivulje A-B sovпада z identično točko B na krivulji 0-B. Če se preselimo na krivuljo lezenja, ki jo izračunamo za obratovalne razmere (krivulja 0-C) lahko ob upoštevanju deformacijskega utrjevanja enostavno določimo preostalo življenjsko dobo materiala, ki je



Slika 3: Shematski diagram prikazuje krivuljo lezenja materiala pri obratovalnih razmerah (σ_1, T_1) ter krivuljo lezenja pospešenega preizkusa lezenja (σ_2, T_2). Izračunana krivulja za razmere pospešenega preizkusa lezenja (0-B) in eksperimentalna krivulja določata deformacijo, nastalo z lezenjem ϵ^{*10}

Figure 3: Schematic representation of creep curves under service conditions (σ_1, T_1) and accelerated test conditions (σ_2, T_2). The full creep curve (0-B) and post-exposure creep curve (A-B) at σ_2, T_2 defines the creep strain, ϵ^{*10}

enaka razliki med celotno življenjsko dobo materiala in časom, potrebnim za dosego deformacije z lezenjem ϵ^* .

Rezultate določanja preostale življenjske dobe s projekcijo θ lahko uporabimo tudi za določanje obratovalnih razmer, pri katerih bo komponenta varno delovala zahtevan čas.

4 Sklepi

Metoda projekcije θ omogoča premagovanje omejitev, ki so jih postavili klasični koncepti opisovanja lezenja, temelječi na sekundarni fazi lezenja oz. njeni stacionarni hitrosti lezenja. Glavna vsebinska novost projekcije θ je obravnava lezenja kot rezultata tekmovanja dveh nasprotujočih vplivov primarne in terciarne faze ter posledice njenega ravnotežja - sekundarne faze. Novost je tudi upoštevanje krivulje lezenja kot celote in ne le posameznih karakterističnih točk krivulje. Glavne prednosti, ki jih prinaša projekcija θ lahko strnemo takole:

- dobro ujemanje z mikromehanizmi lezenja
- napovedovanje vedenja kovinskega materiala na podlagi kratkotrajnih preizkusov lezenja
- enostavno določanje preostale življenjske dobe materiala
- zmanjšanje obsega in stroškov preizkušanja
- možnost uporabe sodobnih numeričnih metod.

5 Literatura

- ¹ R. W. Evans, B. Wilshire: *Creep of Metals and Alloys*, The Institute of Metals, London, 1985
- ² S. G. R. Brown, R. W. Evans, B. Wilshire: *Creep Strain and Creep Life Prediction for the Cast Nickel-based Superalloy IN-100*, *Materials Science and Engineering*, 1986, 147-156

- ³ F. C. Monkman, N. J. Grant, *Proc. ASTM*, 56, 1956, 593
- ⁴ R. L. Orr, O. D. Sherby, J. E. Dorn, *Trans. ASM*, 46, 1954, 113
- ⁵ F. R. Larson, J. Miller, *Trans. ASME*, 74, 1952, 765
- ⁶ S. S. Manson, A. V. Haferd, *NACA, TN2890*, 1953
- ⁷ R. Wilshire, R. W. Evans: *Acquisition and Analysis of Creep Data*, Creep of Materials and Structures, (Edited by: T. H. Hyde), Mechanical Engineering Publications, London, 1994, 1-7
- ⁸ R. W. Evans: Statistical scatter and variability of creep property estimates in θ projection method, *Materials Science and Technology*, 5, 1989, July, 699-707
- ⁹ D. R. Hayhurst: *On the Role of Creep Continuum Damage in Structural Mechanics*, Engineering Approaches to High Temperature Design, (Edited by: B. Wilshire, D. R. J. Owen), Pineridge Press, Swansea, UK, 1983, 85-177
- ¹⁰ R. W. Evans, J. D. Parker, B. Wilshire: The θ Projection concept - A Model-Based Approach to Design and Life Extension of Engineering Plant, *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 50, 1992, 147-160
- ¹¹ R. W. Evans, J. D. Parker, B. Wilshire: *Recent advances in creep and fracture of engineering materials and structures*, (Edited by: B. Wilshire, D. R. J. Owen), Pineridge Press, Swansea, 1982, 135
- ¹² H. Wolf, M. D. Mathew, S. L. Mannan, P. Rodriguez: *Prediction of creep parameters of type 316 stainless steel under service conditions using θ projection concept*, Materials Science
- ¹³ A. K. Koul, R. Castillo: A Critical Assessment of the θ Projection Concept for Creep Life Prediction of Nickel-Based Superalloy Components, *Materials Science and Engineering*, 1991, 213-219
- ¹⁴ H. Kastl, M. Naraghi: Material Laws for Inelastic Analyses on Elbows of 12% or 0.5% Cr-Steel up to Creep Rupture for 30 000 Hours Creep Tests At 550°C, *Nuclear Engineering and Design*, 119, 1990, 149-176
- ¹⁵ K. Maruyama, C. Tanaka, H. Oikawa: Long-Term Creep Curve Prediction Based on the Modified θ Projection Concept, *Trans. ASME*, 112, 1990, February, 92-97
- ¹⁶ E. L. Robinson, *Trans. ASME (E)*, 74, 1952, 777