

# Projekcija $\theta$ - nov koncept obravnave lezenja

## The $\theta$ Projection Concept - New Approach to Creep

T. Šuštar<sup>1</sup>, B. Ule, M. Lovrečič-Saražin, IMT Ljubljana  
T. Rodič, NTF, Univerza v Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

Visokotemperaturno staranje komercialnih nizkolegiranih jekel, ki se uporabljajo v energetiki in v petrokemiji progresivno zmanjšuje odpornost takšnih jekel proti lezenju. To je osnovni vzrok, zaradi katerega daje linearna ekstrapolacija odvisnosti med logaritmom napetosti in logaritmom časa do loma, ki je dobljena s kratkočasovnimi preiskusi lezenja, preveč optimistične ocene vedenja v eksploataciji pri nižjih temperaturah in obremenitvah. Po dosedaj znanih podatkih je lahko takšna ekstrapolacija omejena le na trikratno dolžino najdaljšega zanesljivega preskusa. Nov način opisovanja procesov lezenja, ki je znan kot projekcija  $\theta$ , pa temelji na konstitutivnih enačbah, ki kvantitativno opisujejo posamezne faze procesa lezenja ter spreminjanje oblike krivulje lezenja s spreminjanjem napetosti in temperature. S projekcijo  $\theta$  je z računalnikom mogoče dobiti vse podatke o materialu, ki so potrebni za načrtovano eksploatacijo pri visokih temperaturah. Z uporabo projekcije  $\theta$  lahko močno skrajšamo trajanje preskusov za določevanje preostale trajnosti, saj so takšni preskusi lahko opravljeni pri napetostih in temperaturah, ki so višje od delovnih, pri tem pa so ti popolnoma enakovredni tistim, ki bi jih opravili pri pogojih eksploatacije.

*Ključne besede:* lezenje, projekcija  $\theta$

The creep resistance of commercial low alloy steels used in energetics and petrochemistry is continuously decreased due to high temperature aging. This is the main reason why the linear extrapolation of  $\log(\text{stress})$  vs.  $\log(\text{time to rupture})$ , based on the results of short-term creep tests, seriously overestimates long-term materials performance. In accordance with the present knowledge, the extrapolation is limited to about three times the longest reliable data available. A new concept named  $\theta$  projection based on constitutive equations relating the influence of time, stress and temperature to creep strain, is 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.

*Key words:* creep,  $\theta$  projection

### 1 Uvod

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

Napovedovanje lastnosti materiala se je v praksi izvajalo predvsem na podlagi časovno-temperaturnih parametrov (npr. Orr-Sherby-Dorn<sup>1</sup>, Larson-Miller<sup>2</sup>, Manson-Hafner<sup>3</sup>), ki temeljijo na sekundarni fazi procesa lezenja. Na ta način ugotovimo le odvisnosti navedenih parametrov od temperature in napetosti. To ne ustreza numeričnemu modeliranju lezenja z metodo končnih elementov, ki zahteva odvisnost med deformacijo, časom, napetostjo in temperaturo za celotno krivuljo lezenja. Taka obravnava tudi popolnoma zanemara primarno in terciarno fazo lezenja, ki sta, v nasprotju z do sedaj uveljavljenim prepričanjem, prevladujoči pri velikem številu materialov. Poleg tega je za vse parametrične metode ekstrapolacija omejena na največ trikratni čas trajanja najdaljšega, še zanesljivega preizkusa lezenja. Ta omejitev je velika ovira za razvoj novih materialov, ki bi

morali pred praktično uporabo preiti dolgoletna preizkušanja, kar bi močno zavrlo njihov razvoj.

Z razvojem novih materialov, odpornih proti lezenju, in metod za numerično modeliranje, se je v literaturi pojavilo več konstitutivnih enačb, ki povezujejo vpliv časa, napetosti in temperature na deformacijo z lezenjem. Od predlaganih enačb se je najbolj uveljavila projekcija  $\theta$ , ki sta jo predložila Evans in Wilshire<sup>4</sup>. 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 preprosto Arrheniusovo soodvisnost med temperaturo in časom.

### 2 Projekcija $\theta$

Konstitutivna enačba projekcije  $\theta$  ima obliko:

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

kjer so:

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

$\epsilon$  ... deformacija, povzročena z lezenjem

$t$  ... čas

Odvisnost parametrov  $\theta$  od temperature ( $T$ ) in napetosti ( $\sigma$ ) podaja izraz:

$$\ln \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad (2)$$

<sup>1</sup> Tomaž ŠUŠTAR, dipl. inž. metal.  
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije  
1000 Ljubljana, Lepi pot 11

kjer so  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  koeficienti, ki jih določimo na podlagi rezultatov preizkusov lezenja pri različnih temperaturah in napetostih. Velika prednost  $\theta$  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 (2)<sup>5</sup>. Za razliko od klasične metode opisovanja lezenja obravnava projekcija  $\theta$  lezenje kot rezultat dveh nasprotujočih si procesov. Prvi člen v enačbi (1) zajema primarno lezenje, za katerega je značilno zmanjševanje hitrosti lezenja, drugi pa terciarno, med katerim se hitrost močno poveča. Tako je druga faza lezenja le ravnovesje med tema dvema vplivoma.

S projekcijo  $\theta$  je mogoče enostavno napovedati trajnost materiala. Le-to, določeno s porušno deformacijo  $\epsilon_f$ , je zapisal Evans v obliki:

$$\ln \epsilon_f = a + b\sigma + cT + d\sigma T \quad (3)$$

v kateri nastopajo koeficienti  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , ki jih prav tako določimo na podlagi rezultatov preizkusov lezenja.

### 3 Primer uporabe projekcije $\theta$

Iz navedenega je razvidno, da ob poznavanju 20 konstant iz enačb (2) in (3), ki jih določimo na podlagi kratkotrajnih preizkusov lezenja, opravljenih pri povišani napetosti, lahko brez težav izračunamo parametre  $\theta$  in porušno deformacijo za obratovalne razmere. Določanje konstant poteka v dveh stopnjah. Najprej moramo določiti na podlagi posameznih krivulj lezenja parametre  $\theta_i$ , nato pa še konstante enačbe (2), ki zajema njihovo odvisnost od temperature in napetosti. Z znanimi vrednostmi parametrov  $\theta_i$  lahko z enačbo (1) napovemo lezenje materiala v željenih razmerah. Poudariti je potrebno, da so napovedi omejene na temperaturni interval, v katerem so bili izvedeni preizkusi lezenja, na podlagi katerih smo določili konstante v enačbah (2) in (3).

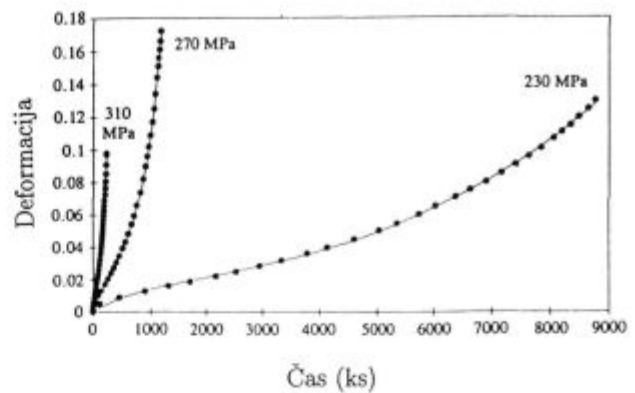
V tabeli 1 so podane konstante enačb (1) in (2) za rotorsko jeklo 1CrMoV.

**Tabela 1:** Konstante enačb (1) in (2) za rotorsko jeklo 1CrMoV za temperaturni interval od 783 do 863 K<sup>6</sup>

**Table 1:** Values of the coefficients in equations (1) and (2) for 1CrMoV rotor steel at 808 to 868 K<sup>6</sup>

Parameter	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
$\ln\theta_1$	-0.835253E+01	0.465321E-02	0.664594E-02	-0.109303E-04
$\ln\theta_2$	-0.851961E+02	0.360584E-01	0.738957E-01	0.113281E-04
$\ln\theta_3$	0.931979E+01	-0.868659E-01	-0.202403E-01	0.116654E-03
$\ln\theta_4$	-0.846887E+02	0.421137E-01	0.750269E-01	-0.596455E-05
$\ln\theta_f$	0.132164E+01	-0.196973E-01	-0.384753E-02	0.274366E-04

Primerjavo izmerjene in izračunane krivulje lezenja za obratovalne pogoje prikazuje slika 1. Iz slike je razvidno dobro ujemanje med meritvijo in izračunom.



**Slika 1:** Primerjava meritve in izračuna za rotorsko jeklo 1CrMoV pri temperaturi 823 K (linija - izračun, točke - meritve)<sup>6</sup>

**Figure 1:** Comparison between experimental creep curves and the creep curves fitted according to the  $\theta$  projection concept for 1CrMoV rotor steel at 823 K. The points represent the measured strain/time readings, while the solid line represents the fit achieved using the  $\theta$  projection<sup>6</sup>

### 4 Sklepi

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

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

### 5 Literatura

- <sup>1</sup> R. L. Orr, O. D. Sherby, J. E. Dorn, *Trans. ASM*, 46, 1954, 113
- <sup>2</sup> F. R. Larson, J. Miller, *Trans. ASME*, 74, 1952, 765
- <sup>3</sup> S. S. Manson, A. V. Haferd, *NACA, TN2890*, 1953
- <sup>4</sup> R. W. Evans, B. Wilshire: *Creep of Metals and Alloys*, The Institute of Metals, London, 1985
- <sup>5</sup> R. W. Evans, J. D. Parker, B. Wilshire: The  $\alpha$  Projection concept - A Model-Based Approach to Design and Life Extension of Engineering Plant, *The Interantional Journal of Pressure Vessels and Piping*, 50, 1992, 147-160
- <sup>6</sup> 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