

# A kúszási alakváltozás és a relaxáció leírása növelt hőmérsékleten

Lehofer Kornél

## Abstract

**Writing up of the creep strain and relaxation at elevated temperature.** Combined the equations concerning to the creep rate (Eq. 1 by [3]) and the secondary creep rate (Eq. 9 by [5]) being valid for the precipitation hardened alloys relations are demonstrated for the creep strain (Eq. 3), the creep limit (Eq. 10 and 10/a) and the relaxation (Eq. 14 and 15).

Since the metal structure of the precipitation hardened alloys can be characterized by their yield strength measured at 20°C, therefore there such alloys having the same but different chemical composition solid solution matrix (e.g. precipitation hardened ferritic steels) form an alloy group and their many data can be together evaluated by the relations writing up the creep properties [5]. So the probable values of relation's constants (e.g. see in Table 1 and  $\varepsilon_{MG}$ ,  $\nu$  and  $c$ ) can be also determined. The intelligent database [1] stores there creep relations and their constants concerning to an alloy group and this can be used to calculate the creep and relaxation properties of an alloy falling under the alloy group (e.g. Fig. 1–3 and Table 1–3).

## Összefoglalás

Az intelligens adatbázis-képzés módszerét a legutóbbi lapszámban ismertettük [1]. Rámutattunk arra, hogy az ilyen adatbázisok alkalmazása minőségileg többet nyújtanak a szokásos, az ötvözetek kémiai összetétele szerint kezelt, ún. elsődleges adatbázisoknál. Ennek alátámasztására jelen tanulmányunkban a növelt hőmérsékleten végbemenő kúszási alakváltozás és relaxáció leírását tárgyaljuk. Az inkoherens kiválásokkal keményített ötvözetekre érvényes összefüggéseket és az ilyen anyagszerkezetű ferrites acélok csoportjára korábban már meghatározott (lásd, pl. [2]), a megújulással végbemenő kúszásra érvényes állandókat tartalmazó intelligens adatbázis felhasználásával elvégzett számításokat összevetjük a statisztikailag is értékelhető kúszás- és relaxáció-vizsgálatok eredményeivel.

## A kúszási alakváltozás leírása

Threadgill, P. L. és Wilshire, B. részletesen elemezték a kiválásosan keményített ausztenites acélok és ötvözetek kúszási mechanizmusát a kezdeti és az állandósult tartományban (1972, [3]). Megállapították – a korábbi kutatásokkal összhangban (1956, [4]) – a mechanizmus azonosságát, ezért a kúszás sebessége leírható az állandósult tartomány sebességével, mégpedig:

$$\dot{\varepsilon} = [\nu \cdot \exp(-mt) + 1] \cdot \dot{\varepsilon}_s \quad (1)$$

ahol  $m$  a kezdeti kúszási sebesség „kimerülésére” jellemző paraméter, amely a  $T$  hőmérsékleten a  $\sigma$  terhelés függvénye, mégpedig az  $\dot{\varepsilon}_s$ -t leíró feszültségfüggvénnyel egyenesen arányos:

$$m = c \cdot \exp(B \cdot \sigma) \quad (2)$$

A  $\nu$  tényező értéke a kiválásokkal keményített ausztenites acélokra [3]:  $\nu = 3$ . Az (1)-ből az is következik, hogy  $t = 0$  esetén a kúszás kezdeti sebessége:

$$\dot{\varepsilon}_0 = (\nu + 1) \dot{\varepsilon}_s \quad (1/a)$$

Közvetve meg kell jegyeznünk, hogy mivel a kiválásokkal keményített ferrites acéloknak a velük azonos  $R_{p0,2/20}$  folyáshatárú, kiválásokkal keményített ausztenites acélokhöz képest az azonos ( $\sigma$ ,  $T$ )

kúszási igénybevételhez tartozó állandósult kúszási sebességük nagyságrendekkel nagyobb, ezért a ferrites acélokra  $\nu > 3$ , de a  $\nu$  értékét a kísérleti adatokból kellett meghatározni, és értékére  $\nu = 11$  adódott.

Integrálva az (1)-t, a kúszási alakváltozást (valódi nyúlást) a kezdeti és az állandósult tartományban a (3) összefüggés írja le:

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}_s \left[ \frac{\nu}{m} (1 - \exp(-mt)) + t \right] \cong \dot{\varepsilon}_s \left[ \frac{\nu}{m} + t \right] \quad (3)$$

Korábban kimutattuk (1970, [5], 1971, [6]), hogy a megújulással végbemenő kúszás hőmérséklet-tartományában ( $T \geq 0,4 T_{melt}$  olvadáspont, K), állandó húzóterhelés mellett, a kiválásos keményedés relatív stabil állapotában lévő ötvözetek kúszási sebessége (azaz a valódi nyúlás időegységre eső változása) az állandósult kúszási szakaszban az

$$\dot{\varepsilon}_s = S \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT} + B\sigma\right) \quad (4)$$

összefüggéssel – mely alakját tekintve Dorntól származik (1956, [4]) – kielégítő pontossággal leírható. Az összefüggésben az állandó értékű  $S$  szerkezeti tényező a kiválások átlagos távolságával ( $L_0$ ) egyenesen arányos és kifejezhető a 20°C-on mért folyáshatárral [5].

Kimutattuk továbbá, hogy a kiválásokkal keményített ötvözetekre is érvényes a Monkman–Grant-féle törési kritérium (1956, [7]):

$$\dot{\varepsilon}_s \cdot t_B = \varepsilon_{MG} \quad (5)$$

amelyben  $\varepsilon_{MG}$  a feszültségtől és a hőmérséklettől független, állandó értékű nyúlásban kifejezett törést okozó károsodás. Az (5) érvényességét mind a vizsgálati tapasztalat (1961, [8]; 1974, [9] és az 1. ábra), mind a fémfizikai, például a törést okozó üregképződés képlekeny növekedési modellje (1977, [10]) szerinti, és újabban a termodinamikai megfontolások is (1997, [11]) alátámasztják.

Mindezeket felhasználva a  $t_B$  kúszási élettartamra (szakadási időre) a következő összefüggést vezettük le (1970, [5]):

$$t_B = \exp\left(A \cdot R_{p0,2/20} + \frac{Q}{RT} + K\right) \cdot \exp(-B\sigma) \quad (6)$$

A (2 és 4–6) egyenletekben szereplő tényezők a következők:

$T$  – az igénybevétel hőmérséklete (K)

$\sigma$  – a terhelő feszültség (MPa)

$R$  – a gázállandó: 8,314 (J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)

$Q$  – a megújulással végbemenő kúszás termikus aktiválási energiája, amely csak az ötvözet szerkezetétől és annak jellemzésére bevezetett, 20°C-on mért  $R_{p0,2/20}$  (MPa) folyáshatárától függ, mégpedig:

$$Q = Q_0 \cdot R_{p0,2/20} + Q_T, \quad (J \cdot mol^{-1}) \quad (7)$$

$B$  – az ötvözet bázisfémjére jellemző fázisátalakulás  $T_k$  és az igénybevétel  $T$  hőmérséklettől függő tényező:

$$B = \frac{B_0}{R(T_k - T)} \quad (8)$$

Az egyenletekben szereplő állandók értékeit az egyes ötvözetcsoportokra – az együttértékelhetőség előnyeit kihasználva – nagy statisztikai biztonsággal határoztuk meg. Ezek kerültek – a vonatkozó egyenletekkel együtt – az intelligens adatbázisba. Az 1. táblázat a relatív stabil állapotra hőkezelt, inkoherens kiválásokkal keményített ferrites és ausztenites acélok csoportjaira érvényes állandókat tartalmazza. Az ezekkel végzett számításoknál a  $t_B$  és általában a  $t$  élettartamra a (h) dimenzió érvényes. Továbbá, mivel az 1. táblázatban szereplő állandók értékei a korábbi, nem SI egységekben (és a kerekítve használt  $R = 1,99$  cal·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> gázállandóval) meghatározottak SI-re átszámított értékei,

ezért a táblázat állandóit használva  $R = 8,33 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  értékkel célszerű számolni.

**1. táblázat.** A kiválásokkal keményített acélcsoportok állandói  
**Table 1** Constants of the precipitation hardened ferritic and austenitic steel groups

Az állandók	Ferrites acélokra	Auszténites acélokra
$Q_0$ (J.mol <sup>-1</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	48	154
$Q_T$ (J.mol <sup>-1</sup> )	241 416	238 229
$B_0$ (J.mol <sup>-1</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	67	258
$T_k$ (K)	1 042	1 809
$A$ (MPa <sup>-1</sup> )	-9,2.10 <sup>-5</sup>	-10 <sup>-2</sup>
$K$ (-)	-24,20	-19,70

Megjegyezzük, hogy mivel az ötvözetcsoporthoz érvényes állandók meghatározásához kellő számban a  $\sigma_{B/H/T}$  kúszási szilárdság (időszilárdság) adatok álltak (és állnak még ma is) rendelkezésünkre, ezért  $K$  a  $K^*$  és a törési kritériumként használt  $\varepsilon_{MG}$  értékeit tartalmazó összetett állandó, mégpedig:

$$K = \ln \varepsilon_{MG} - K^* \quad (5/a)$$

Az állandósult kúszás sebességére – az (4), (5), (5/a), (7) és (8) figyelembevételével – végül is a (9) összefüggést állapítottuk meg:

$$\dot{\varepsilon} = \exp\left(-AR_{p0,2/20} - \frac{Q}{RT} + \ln \varepsilon_{MG} + K\right) \exp(B\sigma) \quad (9)$$

Azonos anyagot ( $R_{p0,2/20}$  = állandó) a  $T$  = állandó hőmérsékleten vizsgálva az állandósult kúszás sebessége csak a húzóterhelés függvénye:

$$\dot{\varepsilon}_s = K_s \exp(B\sigma) \quad (9/a)$$

A (2) és a (9/a) összefüggést beírva a (3) közelítően egyenlő összefüggésbe, és az egyenletet  $\sigma$ -ra rendezve – figyelembe véve, hogy  $\frac{\varepsilon}{K_s} \gg \frac{v}{c}$  (mintegy két nagyságrenddel kisebb), majd a  $K_s$ -et visszaírva – megkapjuk az  $\varepsilon$  maradó nyúláshoz, az ( $\varepsilon$ ,  $t$ ,  $T$ ) értékekhez tartozó  $\sigma_{\varepsilon/t/T}$  kúszáshatárt:

$$\sigma_{\varepsilon/t/T} = \frac{1}{B} \ln t + \frac{1}{B} \left( \ln \varepsilon + AR_{p0,2/20} + \frac{Q}{RT} \ln \varepsilon_{MG} + K \right) \quad (10)$$

Ahhoz, hogy a (3), a (9) és a (10) összefüggésekkel ötvözetcsoporthoz érvényesen számításokat végezhessünk, ki kellett egészítenünk az intelligens adatbázist, azaz meg kellett határozni az  $\varepsilon_{MG}$  nyúlás, a  $c$  és a  $v$  tényező értékét.

Ennek egyik módja, hogy ehhez az ötvözetcsoporthoz tartozó anyagok kúszásvizsgálattal felvett – és az állandósult tartomány stabil kialakulását mutató –  $\varepsilon(t)$  kúszásgörbéit használhatjuk. Ezt tettük a kiválásokkal keményített ferrites acélok csoportjára érvényes, dimenzió nélküli  $v$  értékének ( $v = 11$ ), illetve a  $c$  ( $\text{h}^{-1}$ ) tényező értékének a meghatározásakor. A ferrites acélcsoportra a  $c$  értéke az alábbi tapasztalati összefüggéssel becsülhető [ $T$  (K),  $R_{p0,2/20}$  (MPa)]:

$$c = \exp\left[-4,6 \cdot T^{-1} + 1,07 \cdot 10^{-3}\right] R_{p0,2/20} + 0,031 \cdot T - 30,810 \quad (\text{h}^{-1}) \quad (11)$$

Az  $\varepsilon_{MG}$  meghatározásának statisztikailag megbízható módjára a (10) összefüggés kínál lehetőséget. Ugyanis, átrendezve az egyenletet, a kúszáshatár az anyagszerkezetre jellemző  $R_{p0,2/20}$  folyáshatár lineáris függvénye [csakúgy, mint a (6)-ból a kúszási szilárdság]:

$$\sigma_{\varepsilon/t/T} = \frac{1}{B} \left( A + \frac{Q_0}{RT} \right) R_{p0,2/20} + \frac{1}{B} \left( \ln \varepsilon + \frac{Q_T}{RT} - \ln \varepsilon_{MG} + K + \ln t \right) \quad (10/a)$$

Az [5] értekezésünkben már igazoltuk a kísérleti adatok statisztikus feldolgozásával a (10/a) érvényességét. Felhasználva az ötvözetcsoporthoz érvényes  $\sigma_{\varepsilon/t/T} = aR_{p0,2/20} + b$  korrelációs összefüggés  $b$  állandóját és az 1. táblázatban közölt állandókat, a Monkman–Grant-törési kritérium, az  $\varepsilon_{MG}$  nyúlás várható értéke a (12) összefüggéssel meghatározható:

$$\varepsilon_{MG} = \exp\left(\ln \varepsilon + \frac{Q_T}{RT} + K - \ln t - B \cdot b\right) \quad (12)$$

Felhasználva a folyáshatár szóba jöhető tartományában kiegyensúlyozottan rendelkezésre álló, 550 °C-on mért  $\sigma_{1/10^4/550}$  kúszáshatár adatokra illesztett korreláció  $b$  állandóját (1970, [5]), meghatároztuk a relatív stabil állapotú, inkoherens kiválásokkal keményített ferrites acélokra érvényes Monkman–Grant-törési kritérium nyúlásértékét:  $\varepsilon_{MG} = 0,045$ .

Az  $\varepsilon_{MG}$  ily módon meghatározott értékével – mint ötvözetcsoporthoz jellemző állandóval – és az 1. táblázatban közölt állandókkal (ún. közvetett módszer) kiszámítottuk a ferrites acélcsoportra 500, 550 és 600 °C-on érvényes, (10/a) szerinti  $\sigma_{1/10^4/T}$  kúszáshatár-folyáshatár összefüggéseket:

$$\sigma_{1/10^4/500} = 0,249 R_{p0,2/20} + 9,4 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{1/10^4/550} = 0,190 R_{p0,2/20} + 1,2 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{1/10^4/600} = 0,141 R_{p0,2/20} - 3,2 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

és összevetettük a különböző minőségű acélokon mért vizsgálati adatokkal (ezeket még kp/mm<sup>2</sup>-ben közölték) [12–18]. Ezt szemlélteti az 1. ábra. Látható, hogy a mérési adatok nagy többsége a közvetett módszerrel számított egyenesek  $\pm 10$  rel.% szórási sávjain belül helyezkednek el, azaz – az elmélettel összhangban – a Monkman–Grant-törési kritérium  $\varepsilon_{MG}$  nyúlása ötvözetcsoporthoz érvényes, a hőmérséklettől és a terheléstől független, állandó érték.

Felhasználva a ferrites acélcsoportra érvényes intelligens adatbázist, azaz az  $\varepsilon_{MG} = 0,045$  értéket és az 1. táblázatban közölt állandókat, és figyelembe véve a Csepel Művek Központi Anyagvizsgáló Osztályán – a Vaskut Anyagvizsgáló Osztályával együttműködve – az 1960-as években végzett kúszásvizsgálat-sorozat (1966, [19]) feltételeit ( $R_{p0,2/20} = 383$  átlag és max. 400 ill. min. 360 MPa,  $T = 550$  átlag és max 552, ill. min 548 °C,  $\sigma = 49$  MPa,  $c = 8,26 \cdot 10^4 \text{ h}^{-1}$  átlag és  $7,50 \cdot 10^4$ , ill.  $9,53 \cdot 10^4 \text{ h}^{-1}$  és  $v = 11$ ) a közvetett módszerrel – a (9) képlettel – számításokat végeztünk. A kúszás átlagos állandósult sebességére  $\dot{\varepsilon}_s = 2,746 \cdot 10^{-7} \text{ (h}^{-1}\text{)}$  értéket kaptunk (a szélsőértékekre pedig: a max.  $\dot{\varepsilon}_s = 3,72 \cdot 10^{-7}$  és a min.  $\dot{\varepsilon}_s = 2,19 \cdot 10^{-7}$ ), míg a kúszásgörbe menetére jellemző, a (3) összefüggéssel számított maradó nyúlás átlagértékeit és terjedelmét, összevetve a kísérleti adatokkal, a 2. táblázatban és a 2. ábrában foglaltuk össze.

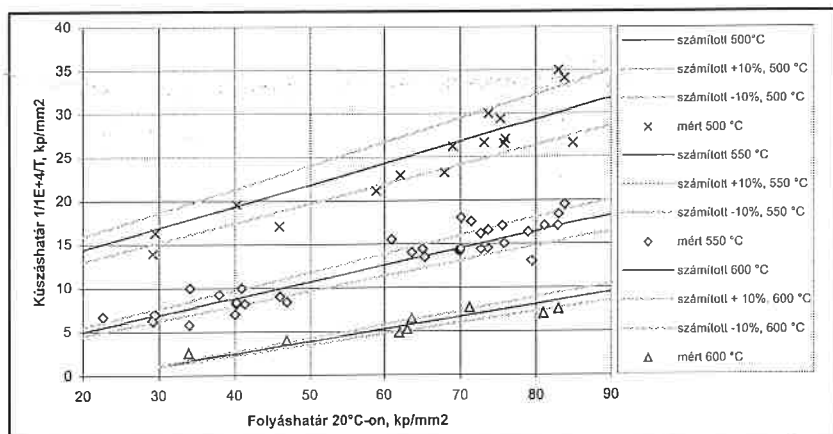
Az összevetésből kiténik, hogy a kúszásgörbe számított menete és szórássterjedelme jól megegyezik a kúszásvizsgálat mérési adataival.

**2. táblázat.** Az 550 °C-on,  $\sigma = 49$  MPa terheléssel 10<sup>4</sup> óráig vizsgált Cr5Mo45.47 acél mért és számított  $\varepsilon(t)$  kúszásgörbéje adatainak összevetése

**Table 2** Comparing of the measured (mért) and calculated (számolt) creep strain data of  $\varepsilon(t)$  creep curve concerning to the Cr5Mo45.47 steel tested to 10<sup>4</sup> hours at 550 °C and  $\sigma = 49$  MPa

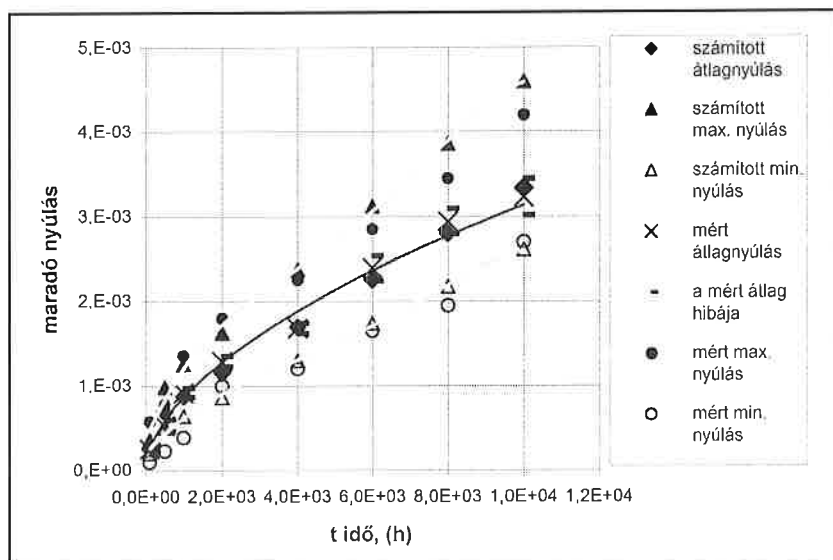
$t$ idő, h	10 <sup>2</sup>	5.10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	2.10 <sup>3</sup>	4.10 <sup>3</sup>	6.10 <sup>3</sup>	8.10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
$\bar{\varepsilon}$ mért	2,57.10 <sup>-4</sup>	5,30.10 <sup>-4</sup>	9,18.10 <sup>-4</sup>	1,29.10 <sup>-3</sup>	1,68.10 <sup>-3</sup>	2,39.10 <sup>-3</sup>	2,94.10 <sup>-3</sup>	3,23.10 <sup>-3</sup>
$\bar{\varepsilon}$ hibája	4,30.10 <sup>-5</sup>	6,60.10 <sup>-5</sup>	5,43.10 <sup>-5</sup>	6,00.10 <sup>-5</sup>	5,94.10 <sup>-5</sup>	1,42.10 <sup>-4</sup>	1,51.10 <sup>-4</sup>	2,12.10 <sup>-4</sup>
$\bar{\varepsilon}$ szórása	1,15.10 <sup>-4</sup>	1,88.10 <sup>-4</sup>	2,87.10 <sup>-4</sup>	3,00.10 <sup>-4</sup>	2,85.10 <sup>-4</sup>	4,02.10 <sup>-4</sup>	4,27.10 <sup>-4</sup>	6,00.10 <sup>-4</sup>
– max. $\varepsilon$	5,80.10 <sup>-4</sup>	7,80.10 <sup>-4</sup>	1,35.10 <sup>-3</sup>	1,80.10 <sup>-3</sup>	2,25.10 <sup>-3</sup>	2,85.10 <sup>-3</sup>	3,45.10 <sup>-3</sup>	4,20.10 <sup>-3</sup>
– min. $\varepsilon$	1,00.10 <sup>-4</sup>	2,30.10 <sup>-4</sup>	3,90.10 <sup>-4</sup>	1,00.10 <sup>-3</sup>	1,20.10 <sup>-3</sup>	1,65.10 <sup>-3</sup>	1,95.10 <sup>-3</sup>	2,70.10 <sup>-3</sup>
számolt $\bar{\varepsilon}$	2,65.10 <sup>-4</sup>	6,92.10 <sup>-4</sup>	8,75.10 <sup>-4</sup>	1,15.10 <sup>-3</sup>	1,70.10 <sup>-3</sup>	2,25.10 <sup>-3</sup>	2,80.10 <sup>-3</sup>	3,35.10 <sup>-3</sup>
– max. $\varepsilon$	3,65.10 <sup>-4</sup>	9,84.10 <sup>-4</sup>	1,25.10 <sup>-3</sup>	1,63.10 <sup>-3</sup>	2,37.10 <sup>-3</sup>	3,12.10 <sup>-3</sup>	3,86.10 <sup>-3</sup>	4,60.10 <sup>-3</sup>
– min. $\varepsilon$	2,06.10 <sup>-4</sup>	5,09.10 <sup>-4</sup>	6,42.10 <sup>-4</sup>	8,62.10 <sup>-4</sup>	1,30.10 <sup>-3</sup>	1,74.10 <sup>-3</sup>	2,17.10 <sup>-3</sup>	2,61.10 <sup>-3</sup>

Érdemes rámutatni – tekintettel az előírt alakváltozásra méretezés esetére –, hogy a (3) egyenletből meghatározható az a  $t$  időtartam, amely alatt az adott ( $\sigma$ ,  $T$ ) kúszási igénybevétel mellett bekövetkezik a megengedett  $\varepsilon$  maradó nyúlás.



1. ábra. A ferrites melegszilárd acélok közvetett módszer, a (10/a) szerinti  $\sigma_{1/10^4 T}$  kúszáshatár–folyáshatár összefüggéseinek egyezése a kísérleti [12–18] adatokkal. Az  $\epsilon_{MG} \neq f(\sigma, T)$  kísérleti bizonyítása.

Fig. 1 The measured creep limit data by [12–18] corresponding with the creep limit–yield strength relations calculated by Eq.(10/a). Experimental proof of the  $\epsilon_{MG} \neq f(\sigma, T)$  of Monkman–Grant’s fracture criterion



2. ábra. A kúszásgörbe számított és mért lefutásának összevetése (acél: Cr5Mo45.47, T = 550°C,  $\sigma = 49$  MPa)

Fig. 2 Comparing of the measured and calculated  $\epsilon(t)$  creep curve

3. táblázat. A német–angol relaxációs vizsgálat mért [20] és számított eredménye  
Table 3 Relaxation test’s results calculated by Eq. (14) and (15) and measured by the German–English round robin testing [20]

t (h)	1	10	30	50	100	300	500	1000	1250	1750	2000
$\bar{\sigma}$ MPa	285,3	259,8	242,7	234,6	221,0	188,8	167,2	133,5	124,1	111,8	106,9
$\sigma_{max}$	313,9	290,4	265,8	256,5	244,1	209,9	194,4	166,0	155,0	140,3	134,9
$\sigma_{min}$	271,7	233,3	222,5	220,7	199,1	153,0	132,4	105,9	98,1	86,3	81,4
$\bar{\sigma}$ szám	312	277	248	232	210	174	158	135	127	116	111
dσ/dt	-3,011	-1,381	-0,814	-0,631	-0,413	-0,156	-0,083	-0,031	-0,023	-0,016	-0,014

A relaxáció leírása

A megújulással végbemenő kúszás hőmérsékletén, állandó értéken tartva a húzóterheléssel létrehozott, nagyrészt rugalmas alakváltozást ( $\epsilon_p$ ), a kezdeti  $\sigma_0$  feszültség folyamatosan csökken, mivel az alakváltozás rugalmas összetevője folyamatosan maradó nyúlássá ( $\epsilon_p$ ) változik.

A t idő szerint deriválva az állandó értéken tartott nyúlásra vonatkozó

$$\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_p = \text{állandó}$$

összefüggést és a rugalmas összetevőre érvényes Hooke-törvényt:  $\sigma = E \cdot \epsilon_p$  felírhatjuk a relaxáció differenciálegyenletét:

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad (13)$$

ahol E az anyag rugalmassági modulusa a T = állandó hőmérsékleten.

A megújulással végbemenő kúszás hőmérséklet-tartományában a képlékeny nyúlás sebességére a (12) összefüggés érvényes. Ezt beírva (13)-ba – figyelembe véve a (2) és a (9/a) összefüggéseket is – a relaxáció differenciálegyenlete végül is a következő:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -K_s E \cdot \{ \nu \exp[-ct \exp(B\sigma) + B\sigma] + \exp(B\sigma) \} \quad (14)$$

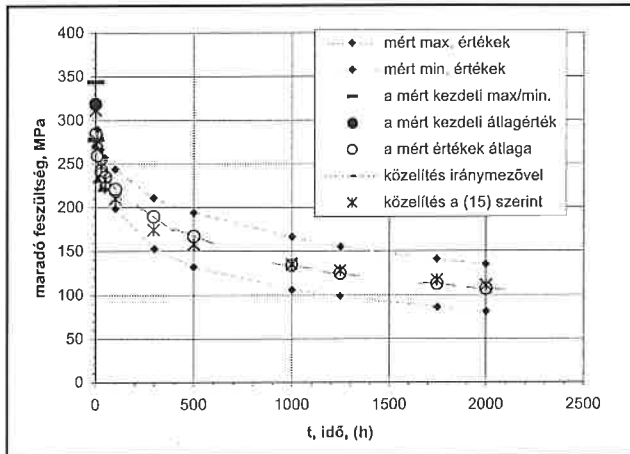
A (14) differenciálegyenlet a változók szétválasztásával, zárt alakban nem oldható meg. Közelítő megoldásokra kényszerülünk. Például a (14)-gyel kiszámíthatjuk és ábrázolhatjuk a megoldást tartalmazó iránymező, és a  $t = 0, \sigma = \sigma_0$  kezdeti feltételből kiindulva grafikus módon megszerkeszthetjük  $\sigma(t)$  relaxációs görbét.

Zárt alakú közelítő megoldásra juthatunk, ha a (13)-ban a képlékeny nyúlás sebességét a (1/a) szerinti kezdeti nyúlássebességgel helyettesítjük. Így – a változók szétválasztása és integrálás után – a  $\sigma(t)$  relaxációs görbe egyenletére a (15) összefüggést kapjuk:

$$\sigma = -\frac{1}{B} \ln \{ \exp(-B\sigma_0) + (\nu+1)BK_s E t \} \quad (15)$$

A (14) és a (15) összefüggések kísérleti ellenőrzéséhez a statisztikailag is értékelt német–angol közös vizsgálatok eredményeit használhattuk (1972, [20]). A nagy szilárdságú, kiválókkal keményített, ferrites 1%CrMoV-acél hőkezelés után ellenőrzött mintáin kilenc angol és hat német laboratóriumban végeztek egytengelyű húzással relaxációs vizsgálatot a BS 3500, illetve a DIN 50118 szabvány előírásai szerint, összesen 34 db próbatesten, mégpedig 500°C-on egészen 2000 óráig. Az állandó értéken tartott össznyúlás átlagértéke: 0,2%, a kezdeti feszültség átlagértéke pedig 319 MPa volt. Az acél 20°C-on mért átlagos folyáshatára:  $R_{p0,2/20} = 729$  MPa, rugalmassági modulusa 500°C-on:  $E = 1,64 \cdot 10^5$  MPa. A mért [20] és a (15) összefüggéssel számított adatokat a 3. táblázatban és a 3. ábrában foglaltuk össze. Az ábrán feltüntettük a (14)-gyel számított iránymezőből a  $t = 0, \sigma_0 = 319$  MPa kezdeti feltételhez és a mért átlagos feszültségekhez tartozó érintőket is. A számítást az 1. táblázatban közölt, a ferrites acélcsoportra érvényes állandókkal, valamint  $\epsilon_{MG} = 0,045, \nu = 11$  és  $c = 10^{-6} h^{-1}$  értékekkel végeztük.

A mért és a számított adatokat összehasonlítva megállapítható, hogy a (14)-gyel számított iránymezőből a kezdeti feltételhez és a mért átlagértékekhez hozzárendelt dσ/dt érintők kielégítően követik a mért relaxációs görbe átlagos menetét, továbbá, hogy ezt a kezdeti



3. ábra. A relaxáció mért [20] és számított eredményeinek összehasonlítása

Fig. 3 Comparing of the measured [20] and calculated [by Eq. (14) and (15)] relaxation results

nyúlássebesség közelítéssel meghatározott (15) összefüggés is kielégítően pontosan leírja.

## Irodalom

1. Lehofer, K.: A mechanikai tulajdonságok intelligens adatbázisai, *Anyagvizsgálók Lapja* 14 (2004) 4. pp. 110–113.
2. Lehofer, K.: A kifáradási élettartam meghatározása nagy hőmérsékleten, *Gép XXIX.* (1977) 3. pp. 100–108.
3. Threadgill, P. L., Wilshire, B.: Mechanisms of transient and steady-state creep in a  $\gamma'$ -hardened austenitic steel; in Proc. of conf. on creep strength in steel and high-temperature alloys, Sheffield, 1972., pp. 8–14.
4. Dorn, J. E.: Some fundamental experiments of high temperature creep. Proc. of a symposium held at the NPL. London, 1956. pp. 89–132.
5. Lehofer, K.: Osszefüggések a kiválóan keményedő ötvözetek szövetszerkezete és kúszási tulajdonságai között. Kandidátusi értekezés. MTA. 1970.
6. Lehofer, K.: New method for appreciation of recovery creep properties of the precipitation hardened alloys ... Proc. 4<sup>th</sup> Conf. on Dimensioning, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971. p. 89.
7. Monkman, F. C., Grant, N. J.: Proc. ASTM, 56 (1956) pp.593–605.
8. Davies, P. W., Wilshire, B.: Structural processes in creep, London, 1961., p. 34.
9. Viswanathan, R.: Metals Technology, I. (1974) 6. p. 284.
10. Nix, W. D., Matlock, D. K., Dimelfi, R. J.: A model of creep fracture based on the plastic growth of cavities..., *Acta Metallurgica*, Vol 25 (1977) 5. p. 495.
11. Krasowsky, A. J., Tóth, L.: A thermodynamic analysis of the empirical power relationships for creep rate and rupture time, *Metallurgical and Materials Transactions A Vol 28A* (1997) pp.1–12.
12. Ergebnisse Deutscher Zeitstandversuche Langer Dauer, Hrsg.: VDEh., Düsseldorf 1969.
13. Jahn, E.: Archiv f. Eisenhüttenwesen 28 (1967) 5/6, pp. 259–267.
14. Holdt, H., Grün, P.: Archiv f. Eisenhüttenwesen 28 (1967) 5/6, pp. 269–285.
15. Krisch, A.: Archiv f. Eisenhüttenwesen 37 (1966) 4, pp. 317–324.
16. Belka, G., Melzer, B.: Neue Hütte 13 (1968) pp. 234–239.
17. Mumme, P., Belka, G.: Neue Hütte 9 (1964) pp. 736–742.
18. Krisch, A., Naumann, F. K., Keller, H., Kudielka, H.: Archiv f. Eisenhüttenwesen 41 (1970) 1, pp. 43–53.
19. Csepel Művek Központi Anyagvizsgáló Osztály 1/1966 témaszámú jelentése (Kúszás közben végbemenő anyagszerkezeti változások vizsgálata (témavezető: Lehofer, K.)
20. Hacon, J., Krause, M.: Streuung der Spannungsrelaxation eines 1%CrMoV-Schraubenbolzenstahls unter einachsiger Zugbeanspruchung. Internationale Tagung für Eigenschaften warmfester Stähle, Düsseldorf 1972., Bd. 2. S. V.1. 1–16. Hrsg.: VDEh., Düsseldorf.

## SZABVÁNYOSÍTÁS

**Új ISO-szabványok**, amelyek 2004. február 21-e és augusztus 23-a között jelentek meg. (Az ISO Bulletin alapján készült tájékoztató címfordítások.)

- ISO 18175:2004; Roncsolásmentes vizsgálatok. Ultrahangos impulzusvisszhang-vizsgáló rendszerek teljesítményjellemzőinek értékelése elektronikus mérőműszerek nélkül.
- ISO 13936-1–2:2004; Textílek. A fonalak elcsúszással szembeni ellenállásának meghatározása a szőtt anyagok varrtaiban. 1. rész: Rögzített varratos nyílt módszer. 2. rész: Rögzített terheléses módszer.
- ISO 34-1:2004; Vulkanizált és hőre lágyuló gumi. A szakítószilárdság meghatározása. 1. rész: Nadrág, átlós és ívelt próbatestek.
- ISO 6914-1:2004; Vulkanizált és hőre lágyuló gumi. A kopási jellemzők meghatározása a feszültségcsökkenés mérésével.
- ISO/TS 21748:2004; Irányelvek az ismételtetéshez, a reprodukálhatósághoz és a valódiság becsléséhez a bizonytalanságbecslés mérésében.
- ISO 2575:2004; Közúti járművek. Törésvizsgálati eljárás a törésvédelmi rendszerek értékelésére a frontális ütközések szimulációjával.
- ISO 15828:2004; Közúti járművek. Ellensúlyozó frontális törésvizsgálati eljárások.
- ISO/TR 18569:2004; Gépek biztonsága. Irányelvek a gépek biztonságáról szóló szabványok értelmezéséhez és használatához.
- ISO 1209-1–2:2004; Szilárd habosított műanyagok. A hajlítási tulajdonságok meghatározása. 1. rész: Alapvető hajlítóvizsgálatok. 2. rész: A hajlítószilárdság és a látszólagos rugalmas hajlítási modulus meghatározása.
- ISO 21207:2004; Korrózióvizsgálatok mesterséges atmoszférában. Gyorsított korrózióvizsgálatok, beleértve a korróziót elősegítő gázokat. Semleges só szórása és szárítás váltakozó hatásának vizsgálata.
- ISO 21270:2004; Felületi vegyi analízis. Röntgensugaras fotoelektron- és Auger-elektron-spektrométerek. Az intenzitási skála linearitása.
- ISO 2810:2004; Festékek és lakkok. Bevonatok természetes időjárásállósága. Kitérés és értékelés.
- ISO 15612:2004; Fémes anyagok hegesztési eljárásainak előírásai és minősítése. Minősítés szabványos hegesztési eljárással.
- ISO 16012:2004; Műanyagok. A vizsgálati mintadarabok lineáris méreteinek meghatározása.
- ISO 1920-7:2004; Beton vizsgálata. A megcsúszott beton roncsolásmentes vizsgálata.
- ISO 19232-1–5:2004; Roncsolásmentes vizsgálatok. A radiográfiai felvételek minősége. 1. rész: Képmínőségjelzők (huzalos). A képmínőségérték meghatározása. 2. rész: Képmínőségjelzők (lépcsős/turatos). A képmínőségérték meghatározása. 3. rész: Képmínőség-osztályok vasalapú ötvözetekhez. 4. rész: A képmínőségi értékek és táblázatok tapasztalati értékelése. 5. rész: Képmínőségjelzők (kéthuzalos). A képéletlenségi értékek meghatározása.
- ISO 16664:2004; Gázok elemzése. Kalibrálószerek és gázkeverékek kezelése. Irányelvek.
- ISO 19819:2004; Fémes anyagok. Szakítópróba folyékony héliumban.