

UDK 620.192.42:678.7

Prehodni pojavi pri preizkušanju relaksacije polimerov¹

IGOR EMRI

1. UVOD

Mehanske lastnosti polimerov se, za razliko od kovin, sčasoma zelo spreminja, zato je zveza med napetostnim in deformacijskim stanjem podana v obliki Stieltjes-Rimanovega integrala [1]:

$$\begin{aligned} S_{ij}(t) &= 2 \int_{-\infty}^t \mu(t-\xi) d\varepsilon_{ij}(\xi) \\ \sigma_{kk}(t) &= 3 \int_{-\infty}^t K(t-\xi) d\varepsilon_{kk}(\xi) \\ \sigma_{ij}(t) &= S_{ij}(t) + \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

Pri tem je $K(t)$ prostorninski modul stisljivosti, ki ga smemo imeti v prvi aproksimaciji za konstantnega [2], $\mu(t)$ pa je relaksacijska funkcija, ki ustreza strižnemu modulu elastičnosti pri kovinah. Medtem ko določimo strižni modul elastičnosti μ s preprostim kratkotrajnim strižnim preizkusom, je treba relaksacijsko krivuljo določiti z dolgotrajinim preizkusom relaksacije, ki lahko za nekatere materiale traja pri sobni temperaturi tudi nekaj let [2]. Ker bi bil tak preizkus praktično zelo težko izvedljiv, uporabljamo tako imenovani kratkotrajni preizkus pri zvišani temperaturi. Iz tako dobljenih rezultatov, v skladu z znanim časovno-temperurnim superpozicijskim načelom [3], določimo sumarno relaksacijsko krivuljo $\mu(t)$.

2. TEORETIČNA OSNOVA RELAKSACIJSKEGA PREIZKUSA

Pri izvedbi preizkusa relaksacije bi morali, v skladu z linearno teorijo viskoelastičnosti, obremeniti material z deformacijo oblike [4]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 h(t), \quad (2)$$

kjer pomeni

$$h(t) = \begin{cases} 0 : \text{za } t < 0 \\ 1 : \text{za } t \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Ce upoštevamo, da je

$$d\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \delta(t) dt, \quad (4)$$

kjer je $\delta(t)$ Diracova funkcija [4], lahko napetostno deformacijsko stanje v preizkušancu zapišemo

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \mu(t-\xi) \delta(\xi) d\xi = \varepsilon_0 \mu(t) \quad (5)$$

in od tod

$$\mu(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

¹ Za tisk prirejeno predavanje, ki ga je imel avtor na 4. Jugoslovanskem simpoziju o teoriji plastičnosti v juniju 1985 v Tuhejskih topicah.

in dobimo v navninskem pravu integrala

$d\varepsilon(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu(t) d\varepsilon(t)$

$c(t) \mu(t) + \log \sigma(t) = \int \mu$

Postavimo sedaj, da je obnašanje nekega materiala pri referenčni temperaturi T_{ref} podano v obliki pospoljenega Maxwellovega modela [4]

$$\mu(T_{ref}, t) = \mu_0 + \sum_{k=1}^N \mu_k \exp(-t/\varkappa_k) \quad (13)$$

Upoštevajoč razmerje (10) lahko opišemo krivuljo relaksacije pri poljubni temperaturi T_i :

$$\mu(T_i, t) = \mu_0 + \sum_{k=1}^N \mu_k \exp(-t a_i / \varkappa_k) \quad (14)$$

kjer je a_i podan z enačbo (11).

Iz navedenega izhaja, da bi bili v primeru idealno izvedenega preizkusa relaksacije pri poljubni temperaturi T_i — rezultati meritev podani z izrazom (14). Kakor je bilo že rečeno, pa v praksi začetna deformacija nima oblike koračne funkcije, temveč obliko približka (12), kar seveda pomeni neodpravljeni odstopek meritve.

Če upoštevamo razmerje (7), lahko napetostno stanje v preizkušancu, ki je bil obremenjen z deformacijo (12), zapišemo takole:

$$\begin{aligned} \sigma(T_i, t > t_1) = \\ = \frac{\varepsilon_0}{t_1} \int_0^{t_1} \left[\mu_0 + \sum_{k=1}^N \mu_k \exp\left(-\frac{(t-\xi)a_i}{\varkappa_k}\right) \right] d\xi + \\ + \varepsilon_0 \int_{t_1}^t \left[\mu_0 + \sum_{k=1}^N \mu_k \exp\left(-\frac{(t-\xi)a_i}{\varkappa_k}\right) \right] \delta(\xi - t_1) d\xi \end{aligned} \quad (15)$$

in od tod:

$$\begin{aligned} \sigma(T_i, t) = \varepsilon_0 \mu_0 + \\ + \frac{\varepsilon_0}{a_i} \sum_{k=1}^N \frac{\mu_k \varkappa_k}{t_1} \exp\left(-\frac{t a_i}{\varkappa_k}\right) \cdot \exp\left(\frac{t_1 a_i}{\varkappa_k} - 1\right) \end{aligned} \quad (16)$$

Relaksacijska funkcija, ki jo merimo, torej ni več podana z izrazom (14), temveč takole:

$$\begin{aligned} \mu(T_i, t) = \frac{\sigma(T_i, t)}{\varepsilon_0} = \mu_0 + \\ + \frac{1}{a_i} \sum_{k=1}^N \frac{\mu_k \varkappa_k}{t_1} \exp\left(-\frac{t a_i}{\varkappa_k}\right) \exp\left(\frac{t_1 a_i}{\varkappa_k} - 1\right) \end{aligned} \quad (17)$$

Hitro lahko ugotovimo, da velja

$$\lim_{t_1 \rightarrow 0} \mu(T_i, t) = \mu(T_i, t) \quad (18)$$

Neodpravljeni odstopek meritve metode je potem

$$\Delta \mu(T_i, t) = \hat{\mu}(T_i, t) - \mu(T_i, t) \quad (19)$$

Če upoštevamo (13) in (17), lahko odstopek meritve zapišemo v obliki:

$$\begin{aligned} \Delta \mu(T_i, t) = \\ = \sum_{k=1}^N \mu_k \exp\left(-\frac{t a_i}{\varkappa_k}\right) \left[\frac{\varkappa_k}{a_i t_1} \exp\left(\frac{t_1 a_i}{\varkappa_k} - 1\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Hitro lahko ugotovimo, da bo napaka meritve nič, če limitira t_1 proti nič. Izhaja

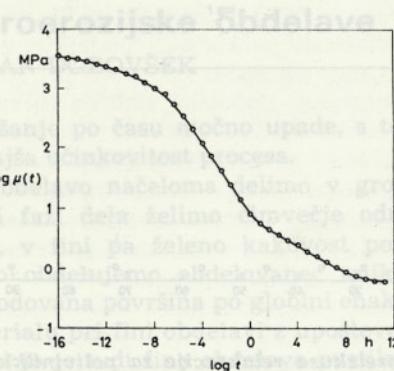
$$\lim_{t_1 \rightarrow 0} \Delta \mu(T_i, t) = 0 \quad (21)$$

4. PRIMER IN SKLEP

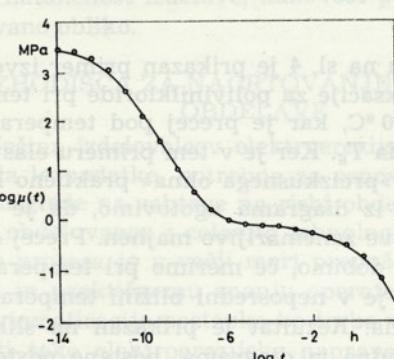
Za primer smo izbrali preizkusne podatke iz literature [6], za polivinilkloride in poliizobutilene, ki smo jih analitično opisali s pospoljenim Maxwellovim modelom [5], ki je podan z enačbo (13). Rezultata aproksimacije sta v obliki razpredelnic in diagramov prikazana na slikah 2 in 3. Analitično sta krivulji relaksacije po vrsti za polivinilkloride in poliizobutilene podani naslednje:

$$\mu(T_{ref}, t) = \mu_0 + \sum_{k=1}^{27} \mu_k \exp\left(-\frac{t}{\varkappa_k}\right); \quad T_{ref} = 43^\circ C \quad (22)$$

$$\mu(T_{ref}, t) = \mu_0 + \sum_{k=1}^{20} \mu_k \exp\left(-\frac{t}{\varkappa_k}\right); \quad T_{ref} = 25^\circ C \quad (23)$$



Sl. 2. Aproksimirana krivulja relaksacije za polivinilkloride, pri temperaturi $T_{ref} = 43.6^\circ C$



Sl. 3. Aproksimirana krivulja relaksacije za poliizobutilen pri temperaturi $T_{ref} = 25^\circ C$

Parametri modela:		
i	$\log \mu_i$	$\log 1/\varkappa_i$
0	-0.203	-0.099
1	-1.338	9.494
2	-1.170	8.654
3	0.829	7.987
4	0.745	7.749
5	0.507	6.294
6	0.382	5.412
7	-0.219	4.568
8	-0.182	3.597
9	-0.021	2.751
10	0.058	1.822
11	1.159	-0.099
12	0.871	0.621
13	1.155	-0.400
14	1.485	-0.557
15	1.175	-2.234
16	2.045	-3.026
17	2.261	-3.026
18	2.441	-3.853
19	2.478	-4.824
20	2.572	-5.738
21	2.558	-6.759
22	2.571	-7.750
23	2.563	-8.768
24	2.598	-9.745
25	2.482	-10.444
26	2.486	-11.889
27	2.426	-12.925

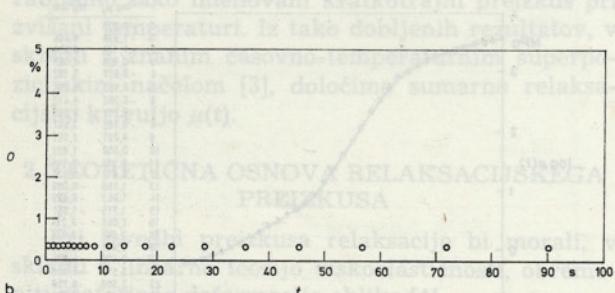
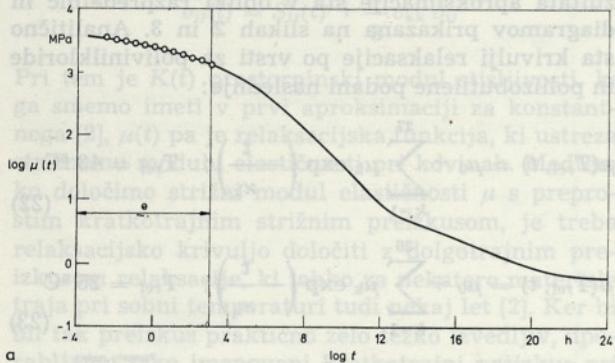
Parametri modela:		
i	$\log \mu_i$	$\log 1/\varkappa_i$
0	-2.282	-0.774
1	-1.204	0.475
2	-0.954	0.075
3	-0.872	-0.793
4	-0.825	-1.605
5	-0.537	-2.458
6	-0.007	3.329
7	-1.094	-4.214
8	-1.457	-5.378
9	-1.256	-5.976
10	-0.774	-6.295
11	-0.205	-6.527
12	0.338	-6.782
13	0.871	-7.050
14	1.168	-7.355
15	1.964	-7.557
16	2.498	-7.823
17	2.852	-8.259
18	2.914	-9.007
19	2.760	-9.961
20	2.604	-10.915

Z uvrstitvijo izrazov (22) in (23) v enačbe (14), (15) in (19) dobimo po vrsti velikost absolutne odstopke meritve za oba prej navedena materiala:

$$\Delta \mu(T_i, t) = \sum_{k=1}^{27} \mu_k \exp\left(-\frac{t a_i}{\chi_k}\right) \left[\frac{\chi_k}{a_i t_1} \exp\left(\frac{t_1 a_i}{\chi_k} - 1\right) - 1 \right] \quad (24)$$

in

$$\Delta \mu(T_i, t) = \sum_{k=1}^{20} \mu_k \exp\left(-\frac{t a_i}{\chi_k}\right) \left[\frac{\chi_k}{a_i t_1} \exp\left(\frac{t_1 a_i}{\chi_k} - 1\right) - 1 \right] \quad (25)$$

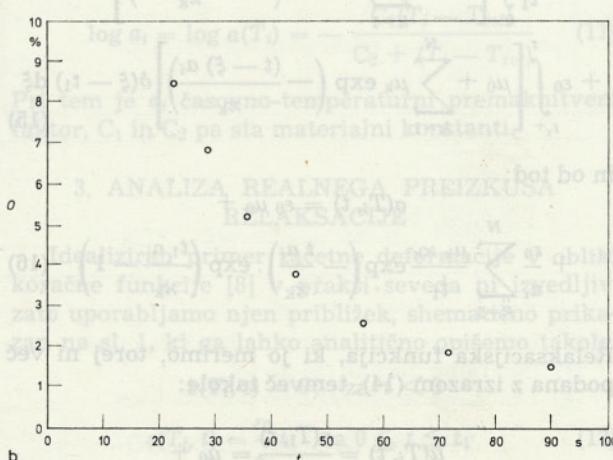
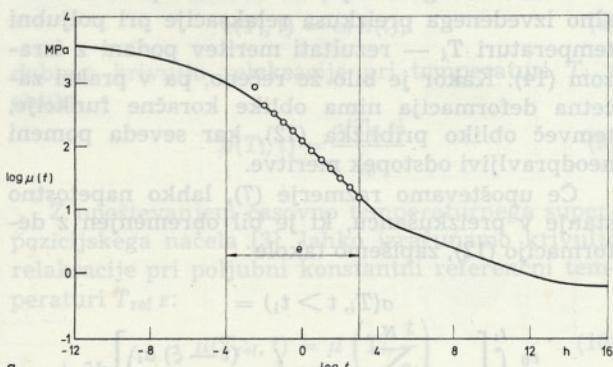


Sl. 4. Izvedba preizkusa relaksacije za polivinilkloride v časovnem intervalu $\Delta t = 1000$ ur, pri temperaturi $T = -30$ °C

a — primerjava idealne in realne meritve, b — velikost odstopka

V diagramu na sl. 4 je prikazan primer izvedbe preizkusa relaksacije za polivinilkloride pri temperaturi $T = -30$ °C, kar je precej pod temperaturo faznega prehoda T_g . Ker je v tem primeru elastični modul znotraj »preizkusnega okna« praktično konstanten, lahko iz diagrama ugotovimo, da je tudi odstopek meritve zanemarljivo majhen. Precej drugačno sliko pa dobimo, če merimo pri temperaturi $T = 23$ °C, kar je v neposredni bližini temperature faznega prehoda. Rezultat je prikazan na sliki 5. Kakor je razvidno iz diagrama, postane odstopek v tem primeru zanemarljivo majhen šele po približno 100 sekundah.

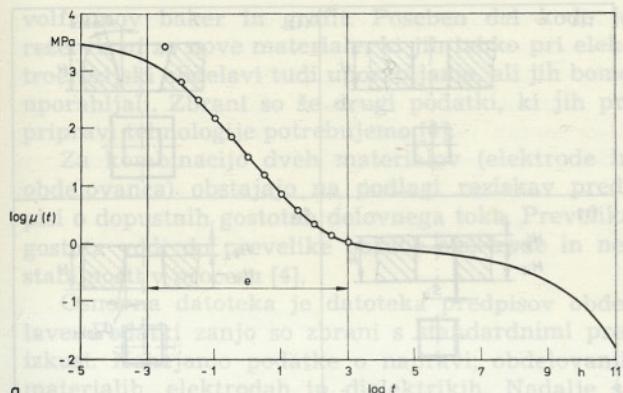
Na podlagi prikazanih dveh primerov lahko ugotovimo, da bo odstopek meritve tem večji, čim večja bo sprememba elastičnega modula znotraj »preizkusnega okna«, tj. med merjenjem. Iz izkušenj vemo, da pride do največje spremembe modula prav v okolici faznega prehoda, kar potrjuje tudi tretji primer preizkusa relaksacije za poliizobutilene; pri temperaturi $T = -60$ °C. V tem primeru pride do faznega prehoda znotraj »preizkusnega okna«, zato je v tem primeru odstopek meritve tudi precej večji (sl. 6).



Sl. 5. Izvedba preizkusa relaksacije za polivinilkloride v časovnem intervalu $\Delta t = 1000$ ur, pri temperaturi $T = 23$ °C

a — primerjava idealne in realne meritve, b — velikost odstopka

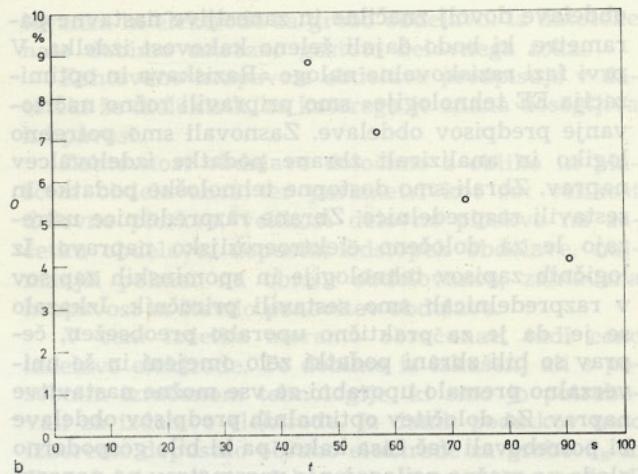
Iz opisanega lahko sklepamo, da je pri izvedbi kratkotrajnega preizkusa relaksacije pri zvišani temperaturi treba posebej pozoren na opisani odstopek meritve, saj bi lahko vodil do povsem napčnih rezultatov. Velikost odstopka je treba analizirati sproti in po potrebi podaljšati čas merjenja.



Sl. 6. Izvedba preizkusa relaksacije za poliizobutilen v časovnem intervalu $\Delta = 1000$ ur, pri temperaturi $T = -60^{\circ}\text{C}$
a — primerjava idealne in realne meritve, b — velikost odstopka

LITERATURA

- [1] M. E. Gurtin, E. Sternberg: »On the Linear Theory of Viscoelasticity«, Arch. Rat. Mech. Anal. Vol 11, pp 291, (1962).
- [2] J. D. Ferry: »Viscoelastic Properties of Polymers«, John Wiley, New York, (1970).
- [3] J. D. Ferry, M. L. Williams, R. F. Landel: The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. J. Am. Chem. Soc., Vol 77, pp. 3701, (1955).
- [4] W. N. Findley, J. S. Lai and K. Onaran: »Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials«, North-Holland, Amsterdam, (1976).



[5] I. Emri, Approximation of the relaxation functions and creep compliances with Prony-Dirichlet series with the aid of a desk computer, Proc. Int. Symp. POLYMER 85, pp. 434, Melbourne, Australia, (1985).

[6] A. V. Tobolsky, D. Carlson, N. Indictor: Viscoelastic Properties of Plasticized Polymers, ONR Technical Report RLT-40, Contract No 1858 (07) NR 356-377, Princeton University, New Jersey, (1951).

Avtorjev naslov: doc. dr. Igor Emri, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani

RAZISKOVALNE NALOGE

UDK 621.9.048.4

Načrtovanje postopkov elektroerozijske obdelave

FRANC ROETHEL — MARJAN DOBOVŠEK

1. UVOD

Elektroerozijski proces ne teče lokalno in časovno stalno v enakih razmerah in je naključne narave. Zaradi sprememb v dielektriku se delovna reža od vhoda dielektrika proti izhodu širi. Po drugi strani sam elektroerozijski proces ni stacionaren in se parametri procesa spremenjajo. Pri tem prihaja do neželenih oblik impulzov; so nenormalni, ki se vžgejo brez zakasnilnega časa, in kratkostični. Oboji povzročajo poškodbe oziroma neželeno obliko površin. Zato si vsi izdelovalci naprav prizadavajo, da bi krmili vplivne parametre tako, da bi bilo teh impulzov čim manj in bi bili v dopustnih mejah. Neželeni so še prosti impulzi, pri katerih ne pride do razelektritve. Želimo čim več delovnih razelektritev, s takim potekom energije, da je odvzem čimvečji in ne povzroča nenormalnih razelektritev. Delovne razelektritev se po obdelovani površini naključno časovno in prostorsko razporedi. Slaba stran nenormalnih razelektritev pa je, da se zelo rade zaporedno koncentrirajo na določeno mesto in povzročajo poškodbe oziroma obžige površin. Oblikovanje impulzov je močno odvisno od možnosti nastavitev in krmiljenja elektroerozijske naprave.

Nezaželenim razelektritvam se sicer lahko izognemo z ustrezнимi pogoji dela, vendar pri teh

odnašanje po času močno upade, s tem se pa tudi zmanjša učinkovitost procesa.

Obdelavo načeloma delimo v grobo in fino. V grobi fazi dela želimo čimvečje odnašanje materiala, v fini pa želeno kakovost površine. Grobo lahko obdelujemo obdelovanec toliko časa, da je poškodovana površina po globini enaka odnesenemu materialu pri fini obdelavi z upoštevanjem poškodbe, ki jo je tudi fina obdelava pustila. Predpis tehnologije na dani elektroerozijski napravi izberemo na podlagi zahtev obdelovanca glede na obliko robov, natančnost izdelave, kakovost površine in obdelovano obliko.

2. IZHODIŠČA ZA NAČRTOVANJE PREDPISOV OBDELAVE

Večina izdelovalcev elektroerozijskih naprav je zbrala le podatke, potrebne za osnovno nastavitev stroja glede na zahteve na risbi obdelovanca. Izdelava obdelovanca s celovito tehnologijo in krmiljenjem procesa je v večji meri prepričena iznajdljivosti in praktičnemu znanju operatorja. Za razvoj in avtomatizacijo postopka bo treba v prihodnje izdelati take elektroerozijske naprave, ki bodo nastavljene parametre vzdrževale in proces čim bolj ustalile. Po drugi strani moramo imeti za predpise