

**LONG-TERM MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF QUASISOTROPIC POLYMER COMPOSITES****DLOUHODOBÉ MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY
KVAZIIZOTROPNÍCH POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ**

Jiří Minster

The paper refers to usefulness and confines of linearised idealisations of rheological behaviour for long-term prognoses of mechanical properties. A non-linear regression of relaxation and retardation data as far as bilateral transitions between these responses by means of the Laplace transform are briefly discussed.

ÚVOD

Plněné a částicové kompozity patří mezi materiály, jež jejich jednotlivé fáze se spolu s matricí účastní na přenosu působícího zatížení. Třidimensionální tvar částic vede ke kvaziizotropním vlastnostem. Úloha matrice je ovšem u těchto materiálů významná až převažující a proto se reologickým projevům částicových a plněných kompozitů s polymerní matricí věnuje značná pozornost.

Nejvhodnějším teoretickým modelem časově závislého chování je teorie vazkopružnosti, která umožňuje idealizovaný popis okamžitých i zpožděných vratných i nevratných dějů. Množina možných přístupů je neobyčejně rozsáhlá (viz např. [1]), ale pro praktická řešení mají největší význam teorie linearizované. Jejich výhodou je skutečnost, že umožňují ošetřit neizotermické podmínky (teplota je zde významným vlivovým faktorem) analogii čas-teplota a okrajové problémy užitím korespondenčního principu a pružného řešení. Anisotropie působí pouze formální komplikace.

Experimentální identifikace mechanických charakteristik se nejčastěji opírá o analýzu odezvy na podmínky zatížení aplikované v určitý okamžik, které se dále v průběhu času nemění. Jde zejména o creep za stálého zatížení, relaxaci napětí za konstantní deformace a přetváření za konstantní rychlosti deformace nebo napětí. Časovou náročnost uvedených, relativně jednoduchých experimentálních postupů je možno za jistých předpokladů redukovat užitím akcelerovaných metod. Vedle situací, za kterých jsou takto získaná data použitelná přímo, mají svou cenu i jako odhady limitního chování v případech občasného nebo střídavého zatížení.

Cílem tohoto příspěvku je dokumentovat na případu kvaziizotropních polymerních kompozitů užitečnost i ohraničenost linearizované idealizace reologického chování pro odhady dlouhodobého průběhu mechanických charakteristik.

VAZKOPRUŽNÁ IDEALIZACE

Výchozími informacemi pro stanovení fyzikálních veličin v konstitutivních rovnicích jsou převážně creepová a relaxační data, případně výsledky zkoušek s konstantními rychlostmi změn napětí nebo deformace. Pro nelineární vazkopružné idealizace, které zahrnují efekty závislé na úrovni zatížení, jeho historii a na vzájemném vlivu jeho jednotlivých složek, je příznačné, že vystihují s dostatečnou přesností většinou jen procesy sledované a jim blízké. Rozhodujícím testovacím kriteriem míry obecnosti zvoleného přístupu je modelování vícestupňového vícedimenzionálního zatížení a odtížení. Příkladem nelineární konstitutivní rovnice izotropního materiálu je vztah uváděný Aboudim [2]

$$\varepsilon_{ij} = [1 + \nu(t)] \{D\} \sigma_{ij} - \nu(t) \{D\} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (1)$$

kde operace $\{D\} \sigma_{ij}$ je definována výrazem

$$\{D\} \sigma_{ij} = g_0 D_0 \sigma_{ij}(t) + g_1 \int_0^t \Delta D(\xi - \xi') \frac{\partial}{\partial \tau} [g_2 \sigma_{ij}(\tau)] d\tau \quad (2)$$

a redukovaný čas $\xi(t) = 1/a_\sigma \int_0^t d\tau$. Předpokládá se, že funkce g_0, g_1, g_2, a_σ závisí na úrovni

napětí σ . D označuje creepovou poddajnost, a_σ je časový posuvný faktor, $\nu(t)$ Poissonův koeficient. Popis přetváření kompozitního materiálu pomocí rovnice (1) vede na několikanásobné řešení soustavy lineárních algebraických rovnic pro jednotlivé malé časové přírůstky Δt . Funkce g_i se určují pomocí řady experimentů s různou úrovní působícího napětí.

Přechodovou složku creepové poddajnosti $\Delta D(\xi) = D(\xi) - D_0$ je nutno na základě experimentálních výsledků analyticky aproximovat. Použití podobných, z hlediska experimentální identifikace mechanických charakteristik náročných modelů je proto odůvodněné pouze v případech hodných zvláštního zřetele.

Přechodem k hodnotám $g_0 = g_1 = g_2 = a_\sigma = 1$ v (1) a (2) se získají známé konstitutivní rovnice lineární teorie vazkopružnosti za izotermických podmínek. Relaxační a creepové materiálové charakteristiky tohoto modelu jsou vázány vztahy na úrovni komplexních funkcí, creepových a relaxačních funkcí i distribučních relaxačních a retardačních spekter (viz [3]). Vzájemná teoretická provázanost charakteristik umožňuje redukovat rozsah experimentálních prací. U "čistých" polymerů byly pro přechod mezi oběma reologickými procesy využívány zejména integrální transformační rovnice mezi spektry a ještě častěji přibližné metody na nich založené [4].

Pro kompozitní materiály s projevy lineárního vazkopružného chování má značný význam vztah mezi Laplaceovými obrazy efektivních hodnot creepové poddajnosti J (zahrnující složku

okamžitou, časově zpožděnou i nevratnou) a relaxačního modulu G (s okamžitou pružnou a časově zpožděnou částí) ve tvaru

$$\hat{G}(s) \hat{J}(s) = s^{-2} \quad (3)$$

Využití rovnice (3) k omezení experimentálního programu a k prognózám je obzvlášť jednoduché v případě diskretních spekter a numerického zpracování výsledků.

DISKRÉTNÍ SPEKTRA

Klasický fenomenologický popis reologického chování s užitím diskretních hodnot se opírá o exponenciální vyjádření relaxačního modulu a creepové poddajnosti ve tvaru

$$G(t) = G_1 \delta(t) + G_e + \sum_{i=1}^M g_i \exp(-t/\lambda_i) \quad (4)$$

$$J(t) = J_g + t/\eta + \sum_{k=1}^N c_k [1 - \exp(-t/\Lambda_k)]$$

G_1 zde označuje odezvu na rázové zatížení, G_e rovnovážný modul, J_g okamžitou poddajnost, η koeficient viskozity a členy za sumačními znaky časově zpožděný modul a poddajnost s konstantami g_i a c_k a relaxačními a retardačními časy λ_i , Λ_k . Je třeba zdůraznit, že veličiny definující časově zpožděné odezvy nemají žádnou bezprostřední souvislost se strukturálními charakteristikami sledovaného materiálu. Získají se regresi na experimentální výsledky. Pro omezený počet členů řad (4) je přiřazení jednoznačné, což má pro přechod od jednoho spektra k druhému rozhodující význam. Například pro známá creepová data vede aplikace předpokladu vyjádřeného rovnicemi (4) a (3) k řešení dvou problémů

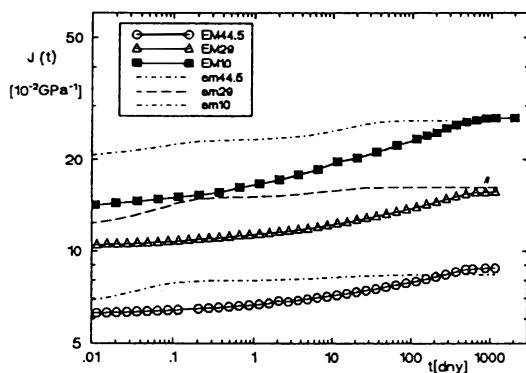
$$\frac{1}{G_e} \prod_{i=1}^N (s + 1/\lambda_i) - s \sum_{i=1}^N c_i \prod_{k=1, k \neq i}^N (s + 1/\Lambda_k) \equiv J_g \prod_{i=1}^N (s + 1/\lambda_i) \quad (5a)$$

$$\frac{1}{J_g} \prod_{i=1}^N (s + 1/\Lambda_i) - \left(J_g + \sum_{i=1}^N c_i \right)^{-1} \prod_{i=1}^N (s + 1/\lambda_i) \equiv s \sum_{i=1}^N g_i \prod_{k=1, k \neq i}^N (s + 1/\lambda_k) \quad (5b)$$

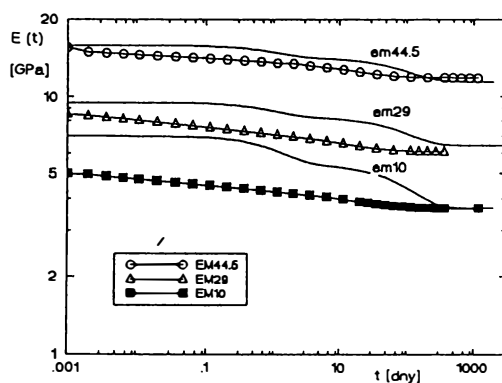
Pomocí rovnice (5a) se stanoví relaxační časy, rovnice (5b) představuje systém N lineárních rovnic pro neznámé g_i . Přechod od Laplaceových obrazů k originálům ovšem nezaručuje, že některé z relaxačních pevností g_i nebo časů nebudou záporné a tím ztratí fyzikální smysl.

Díky rozvoji numerických metod může být postup od analytického vyjádření jedné reologické funkce až ke stanovení originálu druhé automatisovaný. Výsledky takového oboustranného převodu dokumentují obrázky 1 a 2. Jsou na nich porovnány experimentální (EM - body a křivky podle (4)) a teoretické (em) hodnoty creepové poddajnosti (obr.1) a relaxačního modulu (obr.2) tří druhů polymerního kompozitu dispersně plněného 10, 29 a 44.5 objemovými procenty mikromletého vápence (bližší informace o kompozitu viz [5]) za jednoosého tlaku. Je zřejmé, že užití idealizace (4) (která samozřejmě není jediné možná) k nelineární regresi experimentálních dat poskytuje ve všech případech velmi dobré výsledky.

Teoretické odhady založené na oboustranném přechodu reologických funkcí vázaných vztahem (3) se přibližují experimentálním výsledkům s rostoucí hodnotou plnění (tj. se zvyšujícím se podílem pružné složky kompozitu) a s rostoucím časem. Nelineární vlastnosti matrice by v případě potřeby vedly k modelování krátkodobého chování odpovídajícími prostředky. Pro časy delší než 100 dnů jsou však teoretické odhady přijatelné.



Obr.1



Obr.2

LITERATURA:

- [1] Lockett, F. J. : Nonlinear Viscoelastic Solids, Academic Press, 1972
- [2] Aboudi, J. : Mechanics of Composite Materials, Elsevier, 1991
- [3] Gross, B. : Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity, Hermann & Cie, 1953
- [4] Ferry, J. D. : Viscoelastic Properties of Polymers, Wiley, 1980
- [5] Hristova, J., Münster, J. : *Theoretical and Applied Rheology*, Elsevier, Vol.2, 853, 1992

Ing. Jiří MINSTER, CSc.

Institute of Theoretical and Applied Mechanics ASCR

Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2

Telephone +42 2 - 299171 / Telefax +42 2 - 295903