NOMENKLATURA I TERMINOLOGIJA
iz područja polimera i polimernih materijala, VII.

DEFINICIJE POJMOVA KOJI SE ODNOSE NA MEHANIČKA SVOJSTVA POLIMERA U PODRUČJU DO LOMA, VII.4

Preporuke IUPAC 1998.
Preporuke HDKI i HKD 2009.

Preveli:
DRAŽAN KOZAK
MIRJANA LUCIĆ

Recenzenti
PERO RAOS
MLADEN ŠERCER

HDKI/Kemija u industriji
Zagreb 2009.

SADRŽAJ

Međunarodna unija za čistu i primijenjenu kemiju (IUPAC)
Sekcija za polimere
Podkomitet za terminologiju polimera*

KUI – 22/2009
Prispjelo 13. svibnja 2009.
Prihvaćeno 30. rujna 2009.

Definicije pojmova koji se odnose na mehanička svojstva polimera u području do loma,** VII. 4

Preporuke IUPAC 1998.

Preporuke HDKI i HKD 2009.

Za tisak priredila radna skupina:
A. Kaye (Velika Britanija), R. F. T. Stepto (Velika Britanija), W. J. Work (SAD), J. V. Alemán (Španjolska), A. Ya. Malkin (Rusija)

Preveli: Dražan Kozak[a] i Mirjana Lucić[b]

[a] Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2, HR-35000 Slavonski Brod, e-pošta: dkozak@sfsb.hr

[b] Državni inspektorat, Područna jedinica Osijek, Ispostava – Odsjek inspekcijskog nadzora u Slavonskom Brodu, Ulica Petra Krešimira IV br.1, HR-35000 Slavonski Brod, e-pošta: mlucic@sfsb.hr

Sažetak: *Dokument daje definicije pojmova koji se odnose na mehanička ponašanja polimernih materijala u području do loma, posebice za masovne polimere i koncentrirane otopine i njihova elastična i viskoelastična svojstva.*

Pojmovi koji su odabrani susreću se pri uobičajenom mehaničkom karakteriziranju izotropnih polimernih materijala. Ti su pojmovi dodatno ograničeni na one koji se mogu precizno definirati strogom matematičkom zakonitošću. Razvrstani su po poglavljima koja daju osnovne definicije naprezanja i deformacije, deformacije određene pokusom, naprezanja opaženih pri pokusu, veličina koje povezuju naprezanje i deformaciju, linearno viskoelastično ponašanje i titrajne deformacije i naprezanja pri pokusu s čvrstim tijelima.

Indeks, abecedni popis pojmova i popis oznaka dani su radi lakšeg snalaženja.

Ključne riječi: Deformacija elastičnog tijela, deformiranje ili tečenje viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela, rastezno i tlačno naprezanje, rastezna i smična popustljivost, linearno viskoelastično ponašanje kapljevine ili čvrstog tijela, Maxvellov model, Voigt-Kelvinov model, puzanje, viskoznost, slobodno i prisilno titranje, rastezno i savojno titranje, prigušenje, rezonancija.

Uvod

Ovaj dokument daje definicije pojmova koji se odnose na mehanička ponašanja polimernih materijala u području do loma, posebice za masovne polimere i koncentrirane otopine i njihova elastična i viskoelastična svojstva.

Ti su pojmovi raspoređeni po poglavljima koja daju osnovne definicije naprezanja i deformacije, deformacija određenih pokusom, naprezanja opažena pri pokusu, veličina koje povezuju naprezanje i deformaciju, linearno viskoelastično ponašanje, kao i titrajne deformacije i naprezanja pri pokusu s čvrstim tijelima. Pojmovi koji su odabrani susreću se pri uobičajenom mehaničkom karakteriziranju polimernih materijala.

Kod prikupljanja definicija upotrijebljeno je više izvora. Neke su od tih definicija preuzete su iz rukopisa Rječnika polimerstva/Plastics Vocabulary[1] Međunarodne organizacije za norme (International Standards Organization (ISO)). Nazivi za svojstva, njihove definicije i oznake su za linearno viskoelastična svojstva bili provjereni prema ranijim zbirkama nazivlja[2–6], gdje god je to bilo moguće. Ostali dokumenti koji su upotrebljavani su ASTM-ove publikacije.[7–13]

Dokument se ne bavi sa svojstvima anizotropnih materijala. To je široko područje s vlastitim definicijama, pa se čitatelj upućuje na specijalizirane tekstove[14,15] za informacije.

U sadržaju su glavni nazivi razdvojeni znakom/od alternativnih naziva, a u zagradama su dani pojmovi koji su definirani uz pomoć glavnog nazivlja, uobičajeno kao napomene na definicije glavnog nazivlja, s nazivima otisnutim podebljano u glavnom tekstu. Veličine s više komponenti (vektori, tenzori, matrice) otisnute su podebljanim slovima. Nazivi otisnuti kosim pismom definirani su drugdje u dokumentu i te se definicije mogu naći kao navodi u abecednom popisu pojmova.

---

* *Članovi Podkomiteta koji su sudjelovali u pripremi ovog dokumenta (1993.–1997. godine):*

***Naslovni članovi*:** R. E. Bareiss (Njemačka, do 1993. godine); M. Báron (Argentina, pridruženi član do 1995. godine, naslovni član od 1996. godine); K. Hatada (Japan); J. Kahovec (Češka Republika); E. Maréchal (Francuska); W. V. Metanomski (SAD); C. Noël (Francuska, do 1993. godine); V. P. Shibaev (Rusija, do 1995. godine, pridruženi član od 1996. godine); R. F. T. Stepto (Velika Britanija, predsjednik); W. J. Work (SAD, tajnik).

Pridruženi članovi *koji su sudjelovali u pripremi dokumenta*: J. V. Alemán (Španjolska, do 1995. godine); M. Hess (Njemačka, do 1996. godine); K. Horie (Japan, od 1996. godine); J.-I. Jin (Koreja, nacionalni predstavnik do 1993. godine, pridruženi član od 1994. godine); O. Kramer (Danska, od 1996. godine); P. Kubisa (Poljska, od 1996. godine); S. Penczek (Poljska, od 1994. godine); U. W. Suter (Švicarska, do 1993. godine).

***Ostali koji su sudjelovali u pripremi dokumenta*:** H. A. Barnes (Velika Britanija); R. B. Bird (SAD); C. E. Bucknall (Velika Britanija); J. M. Dealy (SAD); J. D. Ferry (SAD); R. B. Fox (SAD); W. W. Graessley (SAD); A. D. Jenkins (Velika Britanija); A. Kaye (Velika Britanija); P. Kratochvíl (Češka Republika); T. Masuda (Japan); I. Mita (Japan); D. R. Moore (Velika Britanija), te Komisija IV.2; K. Osaki (Japan); N. A. Platé (Rusija, nacionalni predstavnik); J. C. Rigg (Nizozemska); R. Simha (SAD); A. Sirigu (Italija, nacionalni predstavnik); R. I. Tanner (Australija); K. Walters (Velika Britanija).

** Definition of Terms Relating to Non-Ultimate Mechanical Properties of Polymers, Pure and Appl. Chem. **70** (3) (1998) pp. 701–754.

1. Osnovne definicije

U ovom poglavlju veličine su izražene u odnosu na pravokutne Kartezijeve koordinatne osi, Ox_1, Ox_2, Ox_3, osim ukoliko nije drugačije navedeno. Komponente vektora $\boldsymbol{V}$ su u odnosu na te osi označene kao V_1, V_2, V_3.

1.1 površinsko opterećenje/vektor naprezanja, $\boldsymbol{t}$
SI-jedinica: Pa
traction/stress vector

Vektor sile po jedinici površine na beskonačno malom elementu površine koja ima zadanu normalu u određenoj točki tijela.

Napomene

1. Komponente vektora $\boldsymbol{t}$ pišu se t_1, t_2, t_3.

2. Ponekad se $\boldsymbol{t}$ naziva *stvarno naprezanje*. Naziv *površinsko opterećenje* (ili *vektor naprezanja*) je prihvatljiviji, kako bi se izbjegle zabune s *tenzorom naprezanja* (pogledati **1.2** napomena 5).

1.2 tenzor naprezanja/naprezanje, $\boldsymbol{\sigma}$, SI-jedinica: Pa
stress tensor/stress

Tenzor s komponentama $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$, koje su komponente vektora naprezanja u smjeru Ox_i na element površine čija je normala u smjeru Ox_j.

Napomene

1. Jedinični vektor površine s normalom $\boldsymbol{n}$ može biti rastavljen u tri manje površine n_1, n_2, n_3 s normalama u smjerovima odgovarajućih koordinatnih osi. U skladu s tim, svaka komponenta *vektora naprezanja* na polaznu površinu može se smatrati zbrojem komponenti u istom smjeru na manjim površinama, što daje:

$$t_i = \sum_{j=1}^{3} \boldsymbol{\sigma}_{ij} n_j , \quad i = 1,\ 2,\ 3$$

2. Pri uobičajenim uvjetima, ukoliko tijela nisu povezana, vrijedi da je $\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \boldsymbol{\sigma}_{ji}$.

3. Za jednoliko naprezanje $\boldsymbol{\sigma}$ je jednako u svim točkama tijela.

4. Za nejednoliko naprezanje je $\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \boldsymbol{\sigma}_{ij}\ (x_1, x_2, x_3)$.

5. $\boldsymbol{\sigma}$ je **stvarno naprezanje**, budući da su njegove komponente sile po jedinici trenutne površine (usporediti 3, 4).

6. Ukoliko je $\boldsymbol{\sigma}_{13}$ $(= \boldsymbol{\sigma}_{31}) = \boldsymbol{\sigma}_{23}$ $(= \boldsymbol{\sigma}_{32}) = \boldsymbol{\sigma}_{33} = 0$, tada se naprezanje naziva **ravninsko naprezanje**. Ravninsko naprezanje je povezano s deformacijom sloja materijala u ravnini sloja.

1.3 deformacija elastičnog tijela
deformation of an elastic solid

Kod deformacije elastičnog tijela se materijalna točka tijela s koordinatama X_1, X_2, X_3, u nedeformiranom stanju giba do točke s koordinatama x_1, x_2, x_3 u deformiranom stanju, pa se deformacija definira kao:

$$x_i = x_i\ (X_1, X_2, X_3), \quad i = 1, 2, 3.$$

Napomene

1. **Jednolika deformacija** je ona kod koje se relacije između koordinata u nedeformiranom i deformiranom stanju svode na:

$$x_i = \sum_{j=1}^{3} f_{ij} X_j , \quad i = 1,\ 2,\ 3$$

gdje su f_{ij} konstante.

2. **Nejednolika deformacija** je ona kod koje su promjene porasta nedeformiranih i deformiranih koordinata povezane prema:

$$\mathrm{d}x_i = \sum_{j=1}^{3} f_{ij} \mathrm{d}X_j , \quad i = 1,\ 2,\ 3$$

gdje su $f_{ij} = \partial x_i / \partial X_j$, $i, j = 1, 2, 3$, te gdje su f_{ij} funkcije koordinata x_j.

3. U napomenama 1 i 2 navedeni f_{ij} su **gradijenti deformacije**.

1.4 tenzor gradijenta deformacije elastičnog tijela, $\boldsymbol{F}$
deformation gradient tensor for an elastic solid

Tenzor čije su komponente gradijenti deformacije elastičnog tijela.

Napomene

1. Komponente od $\boldsymbol{F}$ označavaju se kao f_{ij}.

2. Vidjeti **1.3** za definiciju f_{ij}.

1.5 deformacija viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela
deformation of a viscoelastic liquid or solid

Pri deformaciji viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela materijalna točka viskoelastične kapljevine ili čvrstog tijela s koordinatama x'_1, x'_2, x'_3 u vremenu t' pomakne se do točke s koordinatama x_1, x_2, x_3 u vremenu t, tako da postoje funkcije g_i, $i=1, 2, 3$, gdje je:

$$g_i\ (x'_1, x'_2, x'_3, t') = g_i\ (x_1, x_2, x_3, t).$$

Napomene

1. t' često označuje prošlo vrijeme, a t sadašnje vrijeme.

2. Odnosi između totalnih diferencijala funkcija g_i definiraju kako se materijalne čestice gibaju u odnosu jedna prema drugoj. Tako, ukoliko su dvije čestice na malom razmaku $\mathrm{d}x_1'$, $\mathrm{d}x_2'$, $\mathrm{d}x_3'$ u vremenu t , te na $\mathrm{d}x_1$, $\mathrm{d}x_2$, $\mathrm{d}x_3$ u vremenu t, tada vrijedi:

$$\sum_{j=1}^{3} g'_{ij} \mathrm{d}x'_j = \sum_{j=1}^{3} g_{ij} \mathrm{d}x_j ,$$

$$\text{gdje } g'_{ij}(x'_1, x'_2, x'_3, t') = \frac{\partial g_i (x'_1, x'_2, x'_3, t')}{\partial x'_j}$$

$$\text{i } g_{ij}(x_1, x_2, x_3, t) = \frac{\partial g_i (x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_j}$$

$i, j = 1, 2, 3.$

3. Matrica s elementima g_{ij} označava se kao $\boldsymbol{G}$, a matrica s elementima g_{ij}' označava se kao $\boldsymbol{G'}$.

4. **Jednolika deformacija** je ona kod koje su funkcije g_i linearne funkcije od x_j, $i, j = 1, 2, 3$. Kao posljedica su g_{ij} i $\boldsymbol{G}$ funkcije samo od t, pa jednadžbe koje određuju deformaciju postaju:

$$\sum_{j=1}^{3} g'_{ij}(t')x'_j = \sum_{j=1}^{3} g_{ij}(t)x_j .$$

5. **Jednolike deformacije** se uobičajeno primjenjuju ili pretpostavljaju u metodama koje služe za karakteriziranje mehaničkih svojstava viskoelastičnih polimernih kapljevina i viskoelastičnih čvrstih tijela.

1.6 gradijenti deformacije za viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo, f_{ij}
deformation gradients in a viscoelastic liquid or solid

Ukoliko su dvije materijalne točke kapljevine na maloj udaljenosti dx_1', dx_2', dx_3' u vremenu t', tada su gradijenti deformacije brzine promjene dx' u odnosu na dx_j , $i, j= 1, 2, 3$.

Napomene

$$f_{ij} = \partial x'_i / \partial x_j , \; i, j = 1, 2, 3$$

1.7 tenzor gradijenta deformacije za viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo, $\boldsymbol{F}$
deformation gradient tensor for a viscoelastic liquid or solid

Tenzor čije su komponente gradijenti deformacije u viskoelastičnoj kapljevini ili viskoelastičnom čvrstom tijelu.

Napomene

1. Komponente od $\boldsymbol{F}$ označavaju se kao f_{ij}.

2. Vidjeti **1.6** za definiciju f_{ij}.

3. Pri množenju matrice $\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{G}')^{-1}\boldsymbol{G}$ definicije matrica $\boldsymbol{G}'$ i $\boldsymbol{G}$ dane su u **1.5**.

1.8 tenzor deformacije
strain tensor

Simetrični tenzor koji nastaje prelaskom tenzora gradijenta deformacije u rotacijski tenzor kojem slijedi ili prethodi simetrični tenzor.

Napomene

1. Tenzor deformacije je mjera relativnog pomaka materijalnih točaka tijela.

2. Tenzor gradijenta deformacije $\boldsymbol{F}$ može se definirati kao:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{R}\,\boldsymbol{U} = \boldsymbol{V}\,\boldsymbol{R},$$

gdje je $\boldsymbol{R}$ ortogonalna matrica koja predstavlja rotaciju, a $\boldsymbol{U}$ i $\boldsymbol{V}$ su tenzori deformacija koji su simetrični.

3. Često su pogodniji alternativni tenzori deformacije. Primjerice:

Cauchyev tenzor, $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{U}^2 = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}$
Greenov tenzor, $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{V}^2 = \boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}$
Fingerov tenzor, $\boldsymbol{C}^{-1}$
Piolain tenzor, $\boldsymbol{B}^{-1}$

gdje "T" označava transponirani, a "–1" inverzni tenzor. Tenzor $\boldsymbol{B}$ najčešće se upotrebljava za čvrsta tijela, a $\boldsymbol{C}$ i $\boldsymbol{C}^{-1}$ za viskoelastične kapljevine i viskoelastična čvrsta tijela.

4. Kad su elementi 1,3; 3,1; 2,3; 3,2; 3,3 tenzora deformacije jednaki nuli, tada se deformacija naziva **ravninska deformacija**.

1.9 Cauchyev tenzor, $\boldsymbol{C}$
Cauchy tensor

Tenzor deformacije za viskoelastične kapljevine ili viskoelastična čvrsta tijela, čiji su elementi:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial x'_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x'_k}{\partial x_j},$$

gdje su x_i' i x_i koordinate čestice u vremenu t', odnosno t.

Napomene

1. Vidjeti **1.5** za definiciju x_i' i x_i .
2. Vidjeti **1.8** za definiciju *tenzora deformacije*.

1.10 Greenov tenzor, $\boldsymbol{B}$
Green tensor

Tenzor deformacije za elastično tijelo, čiji su elementi:

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial x_i}{\partial X_k} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial X_k},$$

gdje su X_i i x_i koordinate čestice u nedeformiranom, odnosno deformiranom stanju.

Napomene

1. Vidjeti **1.3** za definiciju X_i i x_i.
2. Vidjeti **1.8** za definiciju *tenzora deformacije*.
3. Za male deformacije, **B** se može izraziti jednadžbom:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{I} + 2\varepsilon,$$

gdje je $\boldsymbol{I}$ jedinična matrica trećeg reda, a ε ***je* tenzor malih deformacija**. Komponente od ε *su*

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right),$$

gdje su $u_k = x_k - X_k$, $k = 1, 2, 3$ pomaci zbog deformacije.

1.11 Fingerov tenzor, $\boldsymbol{C}^{-1}$
Finger tensor

Tenzor deformacije za viskoelastične kapljevine ili viskoelastična čvrsta tijela, čiji su elementi:

$$c_{ij}^{-1} = \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial x_i}{\partial x'_k} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial x'_k},$$

gdje su x_i' i x_i koordinate čestice u vremenu t', odnosno t.

Napomene

1. Vidjeti **1.5** za definiciju x_i' i x_i.
2. Vidjeti **1.8** za definiciju *tenzora deformacije*.

1.12 tenzor brzine deformacije, *D*, SI-jedinica: s^{-1}
rate-of-strain tensor

Vremenska derivacija tenzora deformacije za viskoelastične kapljevine ili viskoelastična čvrsta tijela pri jednolikoj deformaciji u određenom vremenu *t*.

Napomene

1. Pri *nejednolikoj deformaciji* mora se primijeniti materijalna derivacija za određivanje vremenske derivacije deformacije.

2. $\boldsymbol{D} = \lim\limits_{t' \to t}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t'}\right) = \lim\limits_{t' \to t}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t'}\right)$, gdje su ***U*** i ***V*** definirani u **1.8**, napomena 2.

3. Elementi ***D*** jednaki su:

$$d_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right),$$

gdje su v_k komponente brzine $\boldsymbol{v}$ po *x* i vremenu *t*.

1.13 tenzor vrtložnosti, *W*, SI-jedinica: s^{-1}
vorticity tensor

Derivacija rotacijskog dijela gradijenta tenzora deformacije pri određenom vremenu *t* za viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo pri jednolikoj deformaciji.

Napomene

1. Pri *nejednolikoj deformaciji* treba se primijeniti materijalna derivacija.

2. $\boldsymbol{W} = \lim\limits_{t' \to t}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{R}}{\partial t'}\right)$, gdje je ***R*** definiran u **1.8**, napomena 2.

3. Elementi ***W*** jednaki su:

$$w_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right),$$

gdje su v_k komponente brzine $\boldsymbol{v}$ po *x* i vremenu *t*.

1.14 Rivlin-Ericksenovi tenzori, A_n, SI-jedinica: s^{-n}
Rivlin-Ericksen tensors

Rivlin-Ericksenov tenzor *n*-tog reda viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela pri jednolikoj deformaciji jednak je *n*-toj vremenskoj derivaciji Cauchyevog tenzora deformacije pri određenom vremenu *t*.

Napomene

1. Za *nejednoliku deformaciju* treba uzeti materijalnu derivaciju.

2. $\boldsymbol{A}_n = \lim\limits_{t' \to t}\left(\dfrac{\partial^n \boldsymbol{C}}{\partial t'^n}\right)$, gdje je ***C*** definirano u **1.9**.

3. $\boldsymbol{A}_0 = \boldsymbol{I}$, gdje je ***I*** jedinična matrica trećeg reda.

4. $\boldsymbol{A}_1 = \dot{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{T}} + \dot{\boldsymbol{F}} = 2\boldsymbol{D}$, gdje je ***F*** *tenzor gradijenta deformacije* (vidjeti **1.7**), $\dot{\boldsymbol{F}} = \lim\limits_{t' \to t}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial t'}\right)$, 'T' označava transponirani tenzor, a ***D*** je *tenzor brzine deformacije* (vidjeti **1.12**).

5. Općenito, $\boldsymbol{A}_{n+1} = \dot{\boldsymbol{A}}_n + \dot{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_n + \boldsymbol{A}_n\dot{\boldsymbol{F}},\ n = 0, 1, 2, \ldots$

2. Deformacije određene pokusom

Pri uobičajenim mjerenjima mehaničkih svojstava sve se vrste nastalih deformacija interpretiraju pomoću *jednolike deformacije*.

2.1 opća ortogonalna jednolika deformacija elastičnog tijela
general orthogonal homogeneous deformation of an elastic solid

Deformacija pri kojoj se materijalna točka tijela s koordinatama X_1, X_2, X_3 u nedeformiranom stanju giba do točke s koordinatama x_1, x_2, x_3 u deformiranom stanju, pri čemu je:

$$x_i = \lambda_i \cdot X_i, \quad i = 1, 2, 3$$

gdje su λ_i konstante.

Napomene

1. Odnosi između x_i i X_i za ortogonalnu jednoliku deformaciju poseban su slučaj opće relacije dane u **1.3**, pod uvjetom da deformacija ne uključuje rotaciju, a koordinatne osi su tako izabrane da se podudaraju s glavnim smjerovima deformacije.

2. Članovi λ_i su u biti **gradijenti deformacije** ili, za konačne deformacije, **deformacijski omjeri** koji karakteriziraju deformaciju.

3. Za nestlačivi materijal vrijedi

$$\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1.$$

4. Članovi λ_i su elementi gradijenta tenzora deformacije ***F*** (vidjeti **1.4**), a rezultirajući *Cauchyevi* i *Greenovi tenzori* ***C*** i ***B*** (vidjeti **1.9** i **1.10**) su:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix}$$

2.2 jednoosna deformacija elastičnog tijela
uniaxial deformation of an elastic solid

Ortogonalna jednolika deformacija u kojoj je

$$\lambda_1 = \lambda$$

i

$$\lambda_2 = \lambda_3.$$

Napomene

1. Vidjeti **2.1** za definiciju λ_i, $i = 1, 2, 3$.

2. Za nestlačivi materijal

$$\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\lambda^{1/2}.$$

2.3 omjer jednoosne deformacije/omjer deformacije, λ
uniaxial deformation ratio/deformation ratio

Omjer duljine (*l*) uzorka pri jednoosnom rastezanju ili stlačivanju i njegove početne duljine (l_0)

$$\lambda = l/l_0.$$

Napomene

1. Pri istezanju se λ (>1) može nazvati **omjer istezanja.**

2. Kod stlačivanja se λ (<1) može nazvati **omjer stlačivanja.**

3. U **2.1** i **2.2** λ je jednak λ_1.

2.4 jednoosna deformacija/inženjerska deformacija, ε
uniaxial strain/engineering strain

Promjena duljine uzorka kod jednoosnog rasteznog ili tlačnog deformiranja podijeljena s njegovom početnom duljinom

$$\varepsilon = (l_1 - l_0)/l_0,,$$

gdje su l_0 i l_1, početna odnosno konačna duljina.

Napomene

1. $\varepsilon = \lambda - 1$, gdje je λ *omjer jednoosne deformacije* (vidjeti **2.3).**

2. $\varepsilon > 0$ se naziva **(jednoosna) rastezna deformacija.**

3. $\varepsilon < 0$ se naziva **(jednoosna) tlačna deformacija.**

2.5 Henckyjeva deformacija, ε_H
Hencky strain

Integral ukupne promjene duljine uzorka s porastom deformacije kod jednoosnog rasteznog deformiranja

$$\varepsilon_H = \int_{l_0}^{l_1} \mathrm{d}l/l = \ln(l_1/l_0)$$

l_0 , l_1 i l su početna, konačna odnosno trenutna duljina.

Napomene

1. Vidjeti *jednoosna deformacija* (**2.4**).

2. Istom se jednadžbom može definirati veličina ε_H (<0) kod stlačivanja.

2.6 Poissonov omjer, μ
Poisson's ratio

U uzorku pri maloj jednoosnoj deformaciji negativni omjer poprečne deformacije ($\varepsilon_{\mathrm{lat}}$) i duljinske deformacije ($\varepsilon_{\mathrm{long}}$) u smjeru jednoosne sile

$$\mu = -\left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{lat}}}{\varepsilon_{\mathrm{long}}}\right)$$

Napomene

1. **Poprečna deformacija** $\varepsilon_{\mathrm{lat}}$ je deformacija okomita na *jednoosno deformiranje*.

$\varepsilon_{\mathrm{lat}} = \lambda_2 - 1 = \lambda_3 - 1$ (vidjeti **2.2** i **2.4**).

2. Za izotropne, nestlačive materijale $\mu = 0,5$. Važno je napomenuti da kod materijala koji se nazivaju nestlačivima zapravo dolazi do promjene obujma prilikom deformacije, no ta se promjena može zanemariti.

3. Za anizotropni materijal μ se mijenja ovisno o smjeru *jednoosnog deformiranja*.

4. *Poissonov omjer* se također ponekad naziva **poprečni omjer stezanja,** te se ponekad primjenjuje kod nelinearnog deformiranja. Ovdje opisana definicija neće se primjenjivati u tim slučajevima.

2.7 čisti smik elastičnog tijela
pure shear of an elastic solid

Ortogonalno jednoliko deformiranje kod kojeg je

$$\lambda_1 = \lambda$$
$$\lambda_2 = 1/\lambda$$
$$\lambda_3 = 1.$$

Napomene

Vidjeti **2.1** za definiciju λ_i , $i = 1,2,3$.

2.8 jednostavni smik elastičnog tijela
simple shear of an elastic solid

Jednoliko deformiranje pri kojem se materijalna točka tijela s koordinatama X_1, X_2, X_3 u nedeformiranom stanju giba do točke s koordinatama x_1, x_2, x_3 u deformiranom stanju, prema

$$x_1 = X_1 + \gamma X_2$$
$$x_2 = X_2$$
$$x_3 = X_3,$$

gdje je γ konstanta.

Napomene

1. Odnos između x_i i X_i, $i = 1, 2, 3$ pri jednostavnom smiku poseban je slučaj opće relacije dane u **1.3**.

2. γ je poznata kao **smik** ili **smična deformacija.**

3. *Tenzor gradijenta deformacije* za jednostavni smik elastičnog tijela (vidjeti **1.4**) je

$$\boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

i *Cauchyev* (***C***) i *Greenov* (***B***) *tenzor deformacija* (vidjeti **1.9** i **1.10**) su

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ \gamma & 1+\gamma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad i \quad \boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 1+\gamma^2 & \gamma & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.9 obujamna stlačivost, χ
bulk compression

Djelomično smanjenje obujma (V) uzrokovano hidrostatskim tlakom

$$\chi = -\Delta V / V.$$

Napomene

Također se navodi kao **volumna stlačivost**, **izotropna stlačivost**, **izotropno stlačivanje** i **deformacija pri obujamnom stlačivanju**.

2.10 opće jednoliko deformiranje ili tečenje viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela
general homogeneous deformation or flow of a viscoelastic liquid or solid

Tečenje ili deformiranje pri kojem se čestica viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela s koordinatnim vektorom $\boldsymbol{X'}$ u vremenu t' pomakne do točke s koordinatnim vektorom $\boldsymbol{X}$ u vremenu t pri čemu je

$$\boldsymbol{G'X'} = \boldsymbol{GX},$$

gdje su $\boldsymbol{G'}$ i $\boldsymbol{G}$ tenzori koji određuju vrstu deformiranja ili tečenja i samo su vremenske funkcije.

Napomene

1. Definicija je jednaka onoj danoj u **1.5** napomena 4. Sukladno tomu elementi $\boldsymbol{G'}$ i $\boldsymbol{G}$ označeni su kao i $g_{ij}'(t')$ te od $\boldsymbol{X'}$ i $\boldsymbol{X}$, kao (x_1', x_2', x_3') i (x_1, x_2, x_3).

2. Za nestlačive je materijale

$$\det \boldsymbol{G} = 1,$$

gdje je det $\boldsymbol{G}$ determinanta od $\boldsymbol{G}$.

3. Pri uobičajenim mjerenjima svojstava viskoelastičnih kapljevina i viskoelastičnih čvrstih tijela rezultati deformacije i tečenja interpretiraju se uz pretpostavku nestlačivosti.

2.11 jednoliko ortogonalno deformiranje ili tečenje nestlačive viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela

homogeneous orthogonal deformation or flow of an incompressible viscoelastic liquid or solid

Deformiranje ili tečenje, definirani u **2.10**, tako da je

$$\boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} g_{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & g_{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & g_{33}(t) \end{pmatrix}$$

Napomene

1. Članovi g_{ii} definirani su u **1.5**, napomene 2 do 4.

2. Kada je $g_{22} = g_{33} = 1/g_{11}^{1/2}$, tada je rastezno deformiranje ili tečenje **jednoosno.**

3. *Fingerov tenzor deformacija* je za jednoliko ortogonalno deformiranje ili tečenje nestlačive, viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela (vidjeti **1.11**):

$$\boldsymbol{C}^{-1} = \begin{pmatrix} \left(\dfrac{g_{11}'(t')}{g_{11}(t)}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\dfrac{g_{22}'(t')}{g_{22}(t)}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\dfrac{g_{33}'(t')}{g_{33}(t)}\right)^2 \end{pmatrix}.$$

2.12 stacionarno jednoosno jednoliko rastezno deformiranje ili tečenje nestlačive viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela

steady uniaxial homogeneous elongational deformation or flow of an incompressible viscoelastic liquid or solid

Jednoosno jednoliko rastezno tečenje za koje je

$$g_{11}(t) = \exp(-\dot{\gamma}_E t),$$

gdje je $\dot{\gamma}_E$ konstanta, i $g_{22} = g_{33} = 1/g_{11}^{1/2}$.

Napomene

1. $g_{11}(t)$, $g_{22}(t)$ i $g_{33}(t)$ su elementi tenzora $\boldsymbol{G}$ definiranog u **1.5**.

2. Iz definicije za opće jednoliko tečenje (**1.5**) ($\boldsymbol{G'X'} = \boldsymbol{GX}$ = const), u posebnom slučaju *stacionarnog jednoosnog rasteznog tečenja*

$$x_1 g_{11}(t) = x_1 \exp\left(-\dot{\gamma}_E t\right) = const$$

te diferenciranje po vremenu daje

$$\dot{\gamma}_E = (1/x_1)/(\mathrm{d}x_1/\mathrm{d}t),$$

gdje je $\dot{\gamma}_E$ **brzina istezanja ili brzina rastezne deformacije.**

3. *Fingerov tenzor deformacije* za stacionarno jednoosno jednoliko deformiranje ili tečenje nestlačive viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela (vidjeti **1.11**) je

$$\boldsymbol{C}^{-1} = \begin{pmatrix} \exp(2\dot{\gamma}_E(t-t')) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\dot{\gamma}_E(t-t')) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\dot{\gamma}_E(t-t')) \end{pmatrix}.$$

2.13 jednoliko jednostavno smično deformiranje ili tečenje nestlačive viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela

homogeneous simple shear deformation or flow of an incompressible viscoelastic liquid or solid

Tečenje ili deformiranje takvo da je

$$\boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma(t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

gdje je $\gamma(t)$ smik.

Napomene

1. Opći tenzor $\boldsymbol{G}$ definiran je u **1.5**.

2. $\dot{\gamma} = \mathrm{d}\gamma(t)/\mathrm{d}t$ je **smična brzina.** Jedinica za $\dot{\gamma}$ je s^{-1}.

3. Ukoliko je $\gamma(t) = \dot{\gamma} \cdot t$, gdje je $\dot{\gamma}$ konstanta, tada tečenje ima konstantnu smičnu brzinu i naziva se **stacionarno (jednostavno) smično tečenje.**

4. Ukoliko je $\gamma(t) = \gamma_0 \sin 2\pi\nu t$, tada je tečenje **titrajno (jednostavno) smično tečenje** frekvencije ν i amplitude γ_0. Jedinica od ν je Hz.

5. *Fingerov tenzor deformacija* za *jednostavno smično tečenje* (vidjeti **1.11**) je

$$\boldsymbol{C}^{-1} = \begin{pmatrix} 1+(\gamma(t)-\gamma(t'))^2 & \gamma(t)-\gamma(t') & 0 \\ \gamma(t)-\gamma(t') & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

gdje je $\gamma(t) - \gamma(t')$ količina *smicanja* predanog kapljevini između vremenâ t' i t.

Za *stacionarno jednostavno smično* tečenje $\boldsymbol{C}^{-1}$postaje

$$\boldsymbol{C}^{-1} = \begin{pmatrix} 1+\dot{\gamma}^2(t-t') & \dot{\gamma}(t-t') & 0 \\ \dot{\gamma}(t-t') & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

3. Naprezanja opažena pri pokusu

Pri primijenjenom deformiranju ili tečenju nastalo naprezanje ovisi o materijalu. Međutim, *tenzor naprezanja* (vidjeti **1.2**) poprima posebne opće oblike za deformacije nastale pri pokusu (vidjeti **poglavlje 2**). Ove definicije vrijede za elastična tijela te viskoelastične kapljevine i viskoelastična čvrsta tijela.

3.1 tenzor naprezanja koji nastaje zbog ortogonalnog deformiranja ili tečenja, $\boldsymbol{\sigma}$, SI-jedinica: Pa
stress tensor resulting from an orthogonal deformation or flow

Za ortogonalno deformiranje ili tečenje tenzor naprezanja je dijagonalan prema

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

Napomene

1. Vidjeti **1.2** za opću definiciju $\boldsymbol{\sigma}$.

2. Ako je *tenzor deformacije* dijagonalan za svako vrijeme, tada je i *tenzor naprezanja* dijagonalan za izotropne materijale za svako vrijeme**.**

3. Za **jednoosno (ortogonalno) deformiranje ili tečenje** $\sigma_{22} = \sigma_{33}$.

4. Za **čisto smično deformiranje ili tečenje** naprezanja (σ_{11}, σ_{22}, σ_{33}) se obično međusobno razlikuju.

5. *Tenzor naprezanja* koji nastaje zbog *čistog smičnog deformiranja ili tečenja* naziva se **čisto smično naprezanje.**

3.2 rastezno naprezanje, σ, SI-jedinica: Pa
tensile stress

Komponenta σ_{11} tenzora naprezanja koja nastaje zbog jednoosnog rasteznog deformiranja.

Napomene

1. *Tenzor naprezanja* za *jednoosno deformiranje* dan je u **3.1**.

2. Smjer Ox_1 izabran je kao smjer *jednoosnog deformiranja*.

3.3 tlačno naprezanje, $\boldsymbol{\sigma}$, SI-jedinica: Pa
compressive stress

Komponenta σ_{11} tenzora naprezanja koja nastaje zbog jednoosnog tlačnog deformiranja.

Napomene

Vidjeti napomene 1 i 2 u **3.2**.

3.4 nazivno naprezanje/inženjersko naprezanje, σ, SI-jedinica: Pa
nominal stress/engineering stress

Sila koja nastaje zbog rasteznog ili tlačnog jednoosnog deformiranja podijeljena početnom ploštinom poprečnog presjeka uzorka okomito na primijenjenu deformaciju.

Napomene

Pojam *inženjersko* ili *nazivno naprezanje* često se upotrebljava kada deformiranje tijela nije beskonačno malo i kada se mijenja ploština poprečnog presjeka.

3.5 tenzor naprezanja koji nastaje zbog jednostavnog smičnog deformiranja ili tečenja, $\boldsymbol{\sigma}$, SI-jedinica: Pa
stress tensor resulting from a simple shear deformation or flow

Za jednostavno smično deformiranje ili tečenje tenzor naprezanja je oblika

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix},$$

gdje je σ_{21} brojčano jednak σ_{12}.

Napomene

1. Vidjeti **1.2** za opću definiciju $\boldsymbol{\sigma}$.

2. σ_{ii}, i = 1, 2, 3 nazivaju se **normalna naprezanja**.

3. σ_{12} se naziva **smično naprezanje**.

3.6 prva razlika normalnih naprezanja/prva funkcija normalnih naprezanja, N_1, SI-jedinica: Pa
first normal-stress difference/first normal-stress function

Razlika između prva dva normalna naprezanja σ_{11} i σ_{22} pri jednostavnom smičnom tečenju

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22}.$$

Napomene

1. Vidjeti **3.5** za definiciju σ_{11} i σ_{22}.

2. Za njutnovske kapljevine (vidjeti **4.2** napomena 3) $N_1 = 0$.

3.7 druga razlika normalnih naprezanja/druga funkcija normalnih naprezanja, N_2, SI-jedinica: Pa
second normal-stress difference/second normal-stress function

Razlika između drugog i trećeg normalnog naprezanja ($\sigma_{22} - \sigma_{33}$) pri jednostavnom smičnom tečenju.

$$N_2 = \sigma_{22} - \sigma_{33.}$$

Napomene

1. Vidjeti **3.5** za definicije σ_{22} i σ_{33}.

2. Za *njutnovske kapljevine* (vidjeti **4.2** napomena 3), $N_2 = 0$.

4. Veličine koje povezuju naprezanje i deformaciju

4.1 konstitutivna jednadžba elastičnog tijela
constitutive equation for an elastic solid

Jednadžba koja povezuje naprezanje i deformaciju elastičnog tijela.

Napomene

1. Za elastično tijelo se konstitutivna jednadžba može izraziti kao

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{I_3^{1/2}} \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \boldsymbol{B} + \frac{\partial W}{\partial I_2} (I_1 \boldsymbol{B} - \boldsymbol{B}^2) + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} \boldsymbol{I} \right),$$

gdje je $\boldsymbol{B}$ *Greenov tenzor deformacija* (vidjeti **1.10**).

I_1, I_2, I_3 su invarijante od $\boldsymbol{B}$,
sa $I_1 = \mathrm{Tr}(\boldsymbol{B})$
$I_2 = 1/2\ ((\mathrm{Tr}(\boldsymbol{B}))^2 - \mathrm{Tr}(\boldsymbol{B}^2))$
$I_3 = \det(\boldsymbol{B})$,

gdje "Tr" označava trag i "det" označava determinantu. (Invarijante su neovisne o izabranim koordinatnim osima, a za simetrične tenzore postoje tri neovisne invarijante.)

W je funkcija od I_1, I_2, i I_3, te je poznata kao **funkcija pohranjene energije** te predstavlja porast energije (pohranjene energije) po jedinici obujma uslijed deformiranja.

2. Za male deformacije konstitutivna se jednadžba može izraziti kao

$$\boldsymbol{\sigma} = 2G\varepsilon + l\,\boldsymbol{I}\,\mathrm{Tr}(\varepsilon),$$

gdje je G modul smika (vidjeti **4.10**), ε je *tenzor malih deformacija* (vidjeti **1.10**, napomena 3) i l je **Laméova konstanta.**

3. *Laméova konstanta* (l) povezana je s modulom smika (G) i Youngovim modulom (E) (vidjeti **4.7**) pomoću jednadžbe:

$$l = G(2G - E) / (E - 3G).$$

4. Za nestlačivo elastično tijelo konstitutivna jednadžba se može izraziti kao:

$$\boldsymbol{\sigma}+P\boldsymbol{I} = 2\frac{\partial W}{\partial I_1}\boldsymbol{B} - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}\boldsymbol{B}^{-1},$$

gdje je P hidrostatski (ili izotropni) tlak, $I_3 = 1$, a W je funkcija samo od I_1 i I_2.

5. Za male deformacije nestlačivog neelastičnog tijela konstitutivna jednadžba se može izraziti kao

$$\boldsymbol{\sigma} + P\boldsymbol{I} = 2G\varepsilon.$$

4.2 konstitutivna jednadžba za nestlačivu viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo
constitutive equation for an incompressible viscoelastic liquid or solid

Jednadžba koja povezuje naprezanje i deformaciju u nestlačivoj viskoelastičnoj kapljevini ili viskoelastičnom čvrstom tijelu.

Napomene

1. Mogući je opći oblik konstitutivne jednadžbe kada ne postoji ovisnost naprezanja o veličini deformacije

$$\boldsymbol{\sigma} + P\boldsymbol{I} = f(\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \ldots, \boldsymbol{A}_n),$$

gdje su $\boldsymbol{A}_1$, $\boldsymbol{A}_2$, ... *Rivlin-Ericksenovi tenzori* (vidjeti **1.14**)

2. Za *nenjutnovske kapljevine* (vidjeti napomenu 3) može se upotrebljavati opći oblik konstitutivne jednadžbe

$$\boldsymbol{\sigma} + P\boldsymbol{I} = \eta\boldsymbol{A}_1^{\,2} + \alpha\boldsymbol{A}_1 + \beta\boldsymbol{A}_2,$$

gdje je η *viskoznost* (vidjeti **4.12**), a α i β su konstante.

3. **Njutnovska kapljevina** je kapljevina za koju se konstitutivna jednadžba može izraziti kao

$$\boldsymbol{\sigma} + P\boldsymbol{I} = \eta\boldsymbol{A}_1 = 2\eta\boldsymbol{D},$$

gdje je $\boldsymbol{D}$ *tenzor brzine deformacije* (vidjeti **1.12**). Kapljevine koje se ne podvrgavaju toj konstitutivnoj jednadžbi nazivaju se **nenjutnovske kapljevine**.

4. U slučajevima kada postoji ovisnost naprezanja o povijesti deformacije, može se primijeniti sljedeća konstitutivna jednadžba:

$$\boldsymbol{\sigma} + P\boldsymbol{I} = 2\int_{-\infty}^{t}\left(\frac{\partial\Omega}{\partial I_1}\boldsymbol{C}^{-1} - \frac{\partial\Omega}{\partial I_2}\boldsymbol{C}\right)\mathrm{d}t',$$

gdje je $\boldsymbol{C}$ *Cauchyev tenzor deformacije* (vidjeti **1.9**), a Ω je funkcija invarijanti I_1, I_2 i I_3 od $\boldsymbol{C}^{-1}$ i vremenskog intervala $t - t'$. Ω je formalno jednak funkciji pohranjivosti energije tijela W (vidjeti **4.1** napomena 4).

4.3 modul, općenito M, SI-jedinica: Pa
modul, pri obujamnom tlačnom deformiranju K, SI-jedinica: Pa
modul, pri jednoosnom deformiranju E, SI-jedinica: Pa
modul, pri smičnom deformiranju G, SI-jedinica: Pa
modulus

Omjer naprezanja i deformacije gdje su vrsta naprezanja i deformacije definirane vrstom primijenjenog deformiranja.

Napomene

1. Detaljne definicije K, E i G dane su u **4.5, 4.7** i **4.10**.

2. **Elastični modul** ili **modul elastičnosti** je modul tijela koje slijedi Hookeov zakon (naprezanje $\propto$ deformacija).

4.4 popustljivost, općenito C, SI-jedinica: Pa^{-1}
popustljivost, pri obujamnom općenitom deformiranju B, SI-jedinica: Pa^{-1}
popustljivost, pri jednoosnom deformiranju D, SI-jedinica: Pa^{-1}
popustljivost, pri smičnom deformiranju J, SI-jedinica: Pa^{-1}
compliance

Omjer deformacije i naprezanja gdje su vrsta naprezanja i deformacije definirani prema vrsti primijenjenog deformiranja.

Napomene

1. $C = 1/M$, gdje je M modul (vidjeti **4.3**).

2. Pojedinosti definicija B, D i J dane su u **4.6, 4.8** i **4.11**.

4.5 modul stlačivosti, K, SI-jedinica: Pa
bulk modulus

Omjer hidrostatskog tlaka (P) i obujamne stlačivosti (χ)

$$K = P/\chi.$$

Napomene

1. Poznat je i kao **modul pri obujamnom stlačivanju**.

2. Za definiciju χ vidjeti **2.9**.

3. Pri malim deformacijama modul stlačivosti povezan je s *Youngovim modulom* (E) (vidjeti **4.7**) prema

$$K = E/(3(1 - 2\mu)),$$

gdje je μ *Poissonov omjer* (vidjeti **2.6**).

4.6 obujamna popustljivost, *B*, SI-jedinica: Pa^{-1}
bulk compliance

Omjer obujamne stlačivosti (χ) i hidrostatskog tlaka (P)

$$B = \chi/P.$$

Napomene

1. Također poznata i kao **obujamna tlačna popustljivost.**
2. Za definiciju χ vidjeti **2.9**.
3. $B = 1/K$, gdje je *K modul stlačivosti* (vidjeti **4.5**)

4.7 Youngov modul, *E*, SI-jedinica: Pa
Young's modulus

Omjer jednoosnog naprezanja (σ) i deformacije (ε) kad deformacija teži nuli.

$$E = \lim_{\varepsilon \to 0} (\sigma / \varepsilon)$$

Napomene

1. Naprezanje je *stvarno naprezanje*, kao u **3.2** i **3.3**, i nije *nazivno naprezanje*, kao u **3.4**.

2. ε je definiran u **2.4**.

3. *Youngov modul* može se odrediti pri *rasteznom* ili *tlačnom jednoosnom deformiranju* (vidjeti **2.4**). Ukoliko se određuje pri *rasteznom* deformiranju, tada se može nazvati **modul rasteznosti.**

4. Za nehukovske materijale (vidjeti **4.3**) *Youngov modul* se ponekad određuje kao:

(i) **sekantni modul** – omjer *naprezanja* (σ) i deformacije pri nekoj nominalnoj deformaciji (ε) pri čemu je

$$E = \sigma/\varepsilon$$

(ii) **tangentni modul** – nagib krivulje naprezanje-deformacija pri nekoj nominalnoj deformaciji (ε'), pri čemu je tada

$$E = (\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon'}.$$

4.8 jednoosna popustljivost, *D*, SI-jedinica: Pa^{-1}
uniaxial compliance

Omjer jednoosne deformacije (ε) i jednoosnog naprezanja (σ) kad deformacija teži nuli

$$D = \lim_{\varepsilon \to 0} (\varepsilon / \sigma)$$

Napomene

1. Naprezanje je *stvarno naprezanje* kao u **3.2** i **3.3**, i nije *nazivno naprezanje*, kao u **3.4**.

2. ε je definirano u **2.4**.

3. Jednoosna popustljivost može se odrediti pri *rasteznom* ili *tlačnom jednoosnom deformiranju* (vidjeti **2.4**). Ukoliko se određuje pri rasteznom deformiranju, tada se može nazivati **rastezna popustljivost**.

4. $D = 1/E$, gdje je *E Youngov modul* (vidjeti **4.7**).

4.9 rastezna viskoznost/produljna viskoznost, η_E, SI-jedinica: Pa·s
extensional viscosity/elongational viscosity

Omjer razlike uzdužnog (σ_{11}) i poprečnog naprezanja (σ_{22}) i brzine rastezne deformacije ($\dot{\gamma}_E$) pri stacionarnom jednoosnom tečenju

$$\eta_E = (\sigma_{11} - \sigma_{22})/\dot{\gamma}_E.$$

Napomene

Vidjeti **3.1** i **2.12** za definicije σ_{11}, σ_{22} i $\dot{\gamma}_E$.

4.10 modul smika, *G*, SI-jedinica: Pa
shear modulus

Omjer smičnog naprezanja (σ_{12}) i smične deformacije (γ)

$$G = \sigma_{12}/\gamma.$$

Napomene

1. Vidjeti **2.8** za definicije γ elastičnog tijela i **3.5** za σ_{12}.

2. *Modul smika* povezan je s *Youngovim modulom* (*E*) (vidjeti **4.7**) prema jednadžbi

$$G = E/(2(1+\mu))$$

gdje je μ *Poissonov omjer* (vidjeti **2.6).**

3. Za elastomere, za koje se pretpostavlja da su nestlačivi, modul se često određuje pri *jednoosnom rasteznom* ili *tlačnom deformiranju* uz $(\lambda - \lambda^{-2})$ kao funkciju deformacije (gdje je λ *omjer jednoosne deformacije* (vidjeti **2.3**)). Pri rubnoj nultoj deformaciji *modul smika* se definira kao

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}(\lambda - \lambda^{-2})} = \frac{E}{3} = G \text{ (za } \mu = 0{,}5),$$

gdje je σ *rastezno* ili *tlačno naprezanje* (vidjeti **3.2** i **3.3**).

4.11 smična popustljivost, *J*, SI-jedinica: Pa^{-1}
shear compliance

Omjer smične deformacije (γ) i smičnog naprezanja (σ_{12})

$$J = \gamma/\sigma_{12}.$$

Napomene

1. Vidjeti **2.8** za definiciju γ elastičnog tijela i **3.5** za definiciju σ_{12}.
2. $J = 1/G$, gdje je *G modul smika* (vidjeti **4.10**).

4.12 smična viskoznost/koeficijent viskoznosti/viskoznost, η, SI-jedinica: Pa·s
shear viscosity/coefficient of viscosity/viscosity

Omjer smičnog naprezanja (σ_{12}) i smične brzine ($\dot{\gamma}$) pri stacionarnom jednostavnom smičnom tečenju

$$\eta = \sigma_{12}/\dot{\gamma}.$$

Napomene

1. Vidjeti **3.5** i **2.13** za definicije σ_{12} i $\dot{\gamma}$.

2. Za *njutnovske kapljevine* (vidjeti **4.2** napomena 3) σ_{12} je izravno proporcionalan s $\dot{\gamma}$ i η je konstanta.

3. Za *nenjutnovske kapljevine* (vidjeti **4.2** napomena 3), kada $\dot{\gamma}_{12}$ nije izravno proporcionalan s $\dot{\gamma}$, η se mijenja s $\dot{\gamma}$. Vrijednost η određena za danu vrijednost $\dot{\gamma}$ naziva se **nenjutnovska viskoznost**.

4. Neke eksperimentalne metode, kao što su kapilarno tečenje i tečenje između paralelnih ploha, omogućuju mjerenja u rasponu smičnih brzina. Vrijednost η određena pri nekoj nazivnoj srednjoj vrijednosti $\dot{\gamma}$ naziva se **prividna viskoznost** i označuje se kao η_{app}. Nužno je napomenuti da

je *prividna viskoznost* nedovoljno precizno definirana veličina.

5. Ekstrapolacija η ili η_{app} *nenjutnovskih kapljevina* za nultu vrijednost $\dot{\gamma}$ daje **nultu smičnu viskoznost**, koja se označava kao η_0.

6. Ekstrapolacija η i η_{app} *nenjutnovskih kapljevina* pri beskonačnoj vrijednosti $\dot{\gamma}$ daje **beskonačnu smičnu viskoznost**, koja se označava kao η_∞.

4.13 prvi koeficijent normalnog naprezanja, ψ_1,
SI-jedinica: Pa·s^2
first normal-stress coefficient

Omjer prve razlike normalnog naprezanja (N_1) i kvadrata smične brzine ($\dot{\gamma}$) kad smična brzina teži nuli

$$\psi_1 = \lim_{\dot{\gamma}\to 0}(N_1/\dot{\gamma}^2).$$

Napomene

Vidjeti **3.6** i **2.13** za definicije N_1 i $\dot{\gamma}$.

4.14 drugi koeficijent normalnog naprezanja, ψ_2,
SI-jedinica: Pa·s^2
second normal-stress coefficient

Omjer druge razlike normalnog naprezanja (N_2) i kvadrata smične brzine ($\dot{\gamma}$) kad smična brzina teži nuli

$$\psi_2 = \lim_{\dot{\gamma}\to 0}(N_2/\dot{\gamma}^2).$$

Napomene

Vidjeti **3.7** i **2.13** za definicije N_2 i $\dot{\gamma}$.

5. Linearno viskoelastično ponašanje

5.1 viskoelastičnost
viscoelasticity

Vremenska ovisnost odziva kapljevine ili čvrstog tijela podvrgnute naprezanju ili deformaciji.

Napomene

1. Za opis viskoelastičnog ponašanja na naprezanje ili deformaciju nužna su oba odziva, viskozni i elastični.

2. Viskoelastična svojstva uobičajeno se mjere kao odzivi na trenutno primijenjeno ili uklonjeno **konstantno** naprezanje ili deformaciju ili na **dinamičko** naprezanje ili deformaciju. Dinamičko mjerenje određeno je sinusoidnim naprezanjem ili deformacijom male amplitude, koja može ili ne mora opadati s vremenom.

5.2 linearno viskoelastično ponašanje
linear viscoelastic behaviour

Prikaz viskoelastičnog ponašanja kapljevine ili čvrstog tijela pri *jednostavnom smičnom* ili *jednoosnom deformiranju* tako da je

$$P(D)\sigma = Q(D)\gamma,$$

gdje je σ smično naprezanje ili jednoosno naprezanje, γ je smična deformacija ili jednoosna deformacija, a $P(D)$ i $Q(D)$ su polinomi u D, gdje je D diferencijski koeficijentni operator d/dt.

Napomene

1. Za *linearno viskoelastično ponašanje*, pretpostavlja se da su naprezanje i deformacija mali tako da se njihovi kvadrati i više potencije od σ i γ mogu zanemariti.

2. Pogledati **3.5** i **2.13** za definicije σ i γ pri *jednostavnom smiku*.

3. Pogledati **3.2** i **2.12** za definicije σ i γ ($\equiv\gamma_E$) pri *jednoosnom deformiranju*.

4. Polinomi $Q(D)$ i $P(D)$ imaju oblik:

$Q(D) = a(D + q_0) \, . \, . \, . \, . \, . \, (D + q_n)$
(polinom reda n + 1)

$P(D) = (D + p_0)\,(D + p_1) \, . \, . \, . \, (D + p_n)$
(polinom reda n + 1)

i

$P(D) = (D + p_0)\,(D + p_1) \, . \, . \, . \, (D + p_{n-1})$
(polinom reda n)

gdje je
(i) a konstanta
(ii) $q_0 \geq 0$, $p_0 > 0$ i p_s, $q_s > 0$, $s = 1, …, n$.
(iii) $q_i < p_i < q_{i+1}$ i $q_n < p_n$ (ukoliko postoji p_n)

p_i i q_i su povezani s vremenima relaksacije, odnosno retardacije (vidjeti **5.6 – 5.9**).

5. Ukoliko je $q_0 = 0$, tada je materijal **kapljevina**, u drugim slučajevima je **čvrsto tijelo**.

6. Ukoliko je $Q(D)$ polinom reda n + 1; te ukoliko je $P(D)$ također reda n + 1, tada materijal pokazuje trenutnu elastičnost; ukoliko je $P(D)$ reda n, tada materijal ne pokazuje trenutnu elastičnost (tj. elastičnost odmah pri narinuću deformacije).

7. Postoje definicije linearne viskoelastičnosti koje se temelje na integralnim jednadžbama umjesto diferencijalnih jednadžbi kao u definiciji **5.2.** (Pogledati primjerice ref. 11.). Takve su definicije pogodnije radi njihove matematičke općenitosti. Ipak, pristup primijenjen u ovom dokumentu, u obliku diferencijalnih jednadžbi, pogodniji je radi toga što definicije i opisi različitih viskoelastičnih svojstava mogu biti u oblicima koji se uobičajeno primjenjuju u mehano-matematičkim modelima (primjerice Maxwellov model i Voigt-Kelvinov model).

5.3 Maxwellov model/Maxwellov element
Maxwell model/Maxwell element

Model linearnog viskoelastičnog ponašanja kapljevine u kojem je

$$(\alpha D + \beta)\sigma = D\gamma,$$

gdje su α i β pozitivne konstante, D je diferencijski koeficijentni operator d/dt i σ i γ su naprezanje i deformacija pri *jednostavnom smiku* ili *jednoosnom deformiranju*.

Napomene

1. Pogledati **5.2** za raspravu o σ i γ.

2. Relacija koja određuje *Maxwellov model* može se izraziti kao

$$d\sigma/dt + (\beta/\alpha)\sigma = (1/\alpha)d\gamma/dt.$$

3. Usporedba s općom definicijom za *linearno viskoelastično ponašanje* (**5.2**) pokazuje da su polinomi $P(D)$ i $Q(D)$ prvog reda, $q_0=0$, $p_0=\beta/\alpha$ i $a=1/\alpha$. Dakle, materijal opisan *Maxwellovim modelom* je *kapljevina* ($q_0 = 0$) koja pokazuje trenutnu elastičnost $P(D)$ i $Q(D)$ su istog reda).

4. *Maxwellov model* može se opisati kao opruga i prigušnica ispunjena s *njutnovskom kapljevinom* u nizu, pri čemu je $1/\alpha$ **konstanta opruge** (sila = $(1/\alpha)\cdot$ istezanje) i $1/\beta$ je **konstanta prigušnice** (sila = $(1/\beta)\cdot$ brzina istezanja).

5.4 Voigt-Kelvinov model/Voigt-Kelvinov element
Voigt-Kelvin model/Voigt-Kelvin element

Model *linearnog viskoelastičnog ponašanja* tijela kod kojeg je

$$\sigma = (\alpha + \beta D)\gamma,$$

gdje su α i β pozitivne konstante, D je diferencijski koeficijentni operator d/dt, i σ i γ su naprezanje i deformacija pri *jednostavnom smiku* ili *jednoosnom deformiranju*.

Napomene

1. Voigt-Kelvinov model je također poznat kao **Voigtov model** ili **Voigtov element**.

2. Pogledati **5.2** za raspravu o σ i γ.

3. Relacija koja definira *Voigt-Kelvinov model* može se izraziti kao

$$\sigma = \alpha\gamma + \alpha\beta\,(d\gamma/dt).$$

4. Usporedba s općom definicijom za *linearno viskoelastično ponašanje* (**5.2**) pokazuje da je polinom $P(D)$ nultog reda, $Q(D)$ je prvog reda, a $q_0 = \alpha$, i $a = \beta$. Dakle, materijal opisan s *Voigt-Kelvinovim modelom* je *tijelo* ($q_0 > 0$) koje ne pokazuje trenutnu elastičnost ($P(D)$ je za red niži polinom od $Q(D)$).

5. **Voigt-Kelvinov model** može se predstaviti oprugom i prigušnicom koja je ispunjena njutnovskom kapljevinom u paralelnom spoju, pri čemu je α **konstanta opruge** (sila = $\alpha\cdot$ istezanje) i β je **konstanta prigušnice** (sila = $\beta\cdot$ brzina istezanja).

5.5 standardno linearno viskoelastično tijelo
standard linear viscoelastic solid

Model linearnog viskoelastičnog ponašanja tijela kod kojeg je

$$(\alpha_1 + \beta_1 D)\sigma = (\alpha_2 + \beta_2 D)\gamma,$$

gdje su α_1, β_1, α_2 i β_2 pozitivne konstante, D je diferencijski koeficijentni operator d/dt, i σ i γ su naprezanje i deformacija pri *jednostavnom smiku* ili *jednoosnom deformiranju*.

Napomene

1. Vidjeti **5.2** za raspravu o σ i γ.

2. Relacija koja određuje *standardno linearno viskoelastično tijelo* može se izraziti kao

$$\alpha_1\sigma + \beta_1(d\sigma/dt) = \alpha_2\gamma + \beta_2(d\gamma/dt).$$

3. Usporedba s općom definicijom za *linearno viskoelastično ponašanje* (**5.2**) pokazuje da su polinomi $P(D)$ i $Q(D)$ prvog reda, $q_0 = \alpha_2/\beta_2$, $a = \alpha_2/\beta_1$ i $p_0 = \alpha_1/\alpha_2$. Dakle, *standardno linearno viskoelastično tijelo* je tijelo ($aq_0 > 0$) koje pokazuje trenutnu elastičnost $P(D)$ i $Q(D)$ su jednakog reda).

4. *Standardno linearno viskoelastično tijelo* može se predstaviti kao:

(i) Maxwellov *model* (konstanta opruge h_2 i konstanta prigušnice k_2) u paralelnom spoju s oprugom (konstanta opruge h_1) pri čemu je tada $\alpha_1 = h_2$, $\beta_1 = k_2$, $\alpha_2 = h_1h_2$ i $\beta_2 = h_1k_2 + h_2k_2$.

(ii) *Voigt-Kelvinov model* (konstanta opruge h_2 i konstanta prigušnice k_2) u nizu s oprugom (konstanta opruge h_1) pri čemu je tada $\alpha_1 = h_1 + h_2$, $\beta_1 = k_2$, $\alpha_2 = h_1h_2$ i $\beta_2 = h_1k_2$.

5. *Standardno linearno viskoelastično tijelo* može poslužiti i za opis *puzanja* (usporediti **5.9**) i *relaksacije naprezanja* (usporediti **5.7**) materijala u obliku pojedinog retardacijskog odnosno relaksacijskog vremena.

5.6 relaksacijsko vrijeme, τ, SI-jedinica: s
relaxation time

Vrijeme koje karakterizira odziv viskoelastične kapljevine ili viskoelastičnog čvrstog tijela na trenutnu primjenu konstantne deformacije.

Napomene

1. Odziv materijala na trenutnu primjenu konstantne deformacije naziva se *relaksacija naprezanja* (vidjeti **5.7**).

2. Vrijeme relaksacije *Maxwellovog elementa* (**5.3**) je $\tau = 1/p_0 = \alpha/\beta$.

3. *Vrijeme relaksacije standardnog linearnog viskoelastičnog tijela* (**5.5**) je $\tau = 1/p_0 = \beta_1/\alpha_1$.

4. Općenito, *linearno viskoelastični materijal* ima spektar relaksacijskih vremena koja su inverzne vrijednosti od p_i, $i = 0, 1, \ldots, n$ u polinomu $P(D)$ (pogledati **5.2**).

5. **Relaksacijski spektar** (spektar relaksacijskih vremena) koji opisuje *relaksaciju naprezanja* u polimerima može se smatrati da potječe od skupine paralelno spojenih *Maxwellovih elemenata* (pogledati **5.7**).

5.7 relaksacija naprezanja
stress relaxation

Promjena naprezanja s vremenom nakon trenutne primjene konstantne deformacije.

Napomene

1. Primijenjena deformacija je u obliku $\gamma = 0$ za $t < 0$ i $\gamma = \gamma_0$ za $t > 0$, i uobičajeno je *jednoosno rastezanje* ili *jednostavni smik* (vidjeti **5.2**).

2. Za *linearno viskoelastično ponašanje* naprezanje poprima oblik

$$\sigma(t) = (c + \overline{\psi}(t))\gamma_0$$

c je konstanta koja je različita od ništice ukoliko materijal pokazuje trenutnu elastičnost i $\overline{\psi}(t)$ je **relaksacijska funkcija**.

3. $\overline{\psi}(t)$ ima oblik

$$\overline{\psi}(t) = \sum_{i=0}^{n} \beta_i e^{-p_i t},$$

gdje su β_i funkcije od p_i i q_i polinoma $P(D)$ i $Q(D)$ koji određuju *linearno viskoelastični materijal* (pogledati **5.1**).

4. Relaksacijska vremena materijala su $1/p_i$ (pogledati **5.6**).

5.8 **retardacijsko vrijeme**, τ, SI-jedinica: s
retardation time

Vrijeme koje karakterizira odziv viskoelastičnog materijala na trenutnu primjenu stalnog naprezanja.

Napomene

1. Odziv materijala na trenutnu primjenu stalnog naprezanja naziva se *puzanje* (vidjeti **5.9**).

2. *Vrijeme retardacije Voigt-Kelvinovog elementa* je $\tau = 1/q_0 = \beta/\alpha =$ (konstanta prigušnice)/(konstanta opruge).

3. *Vrijeme retardacije standardnog linearno viskoelastičnog tijela* (**5.5**) je $\tau = 1/q_0 = \beta_2/\alpha_2$.

4. Općenito, *linearno viskoelastični materijal* pokazuje spektar *retardacijskih vremena*, koja su inverzne vrijednosti od q_i, $i = 0, 1, \ldots, n$ u polinomu $Q(D)$ (pogledati **5.2**).

5. **Retardacijski spektar** (spektar retardacijskih vremena) koji opisuje *puzanje* u polimerima može se smatrati posljedicom grupe *Voigt-Kelvinovih elemenata* spojenih serijski (vidjeti **5.9**).

5.9 **puzanje**
creep

Promjena deformacije s vremenom nakon trenutne primjene konstantnog naprezanja.

Napomene

1. Primijenjeno naprezanje je oblika $\sigma = 0$ za $t < 0$ i $\sigma = \sigma_0$ za $t > 0$ te je uobičajeno *jednoosno naprezanje* ili *jednostavno smično naprezanje* (pogledati **5.2**).

2. Za *linearno viskoelastično ponašanje deformacija* je uobičajeno oblika

$$\gamma(t) = (a + bt + \psi(t))\sigma_0$$

a je konstanta različita od ništice, ukoliko materijal posjeduje trenutnu elastičnost i b je konstanta različita od ništice, ukoliko je materijal kapljevina. $\psi(t)$ je **funkcija puzanja**. Pored toga se

$$J(t) = \gamma(t)/\sigma_0$$

ponekad naziva **popustljivost pri puzanju**.

3. **Funkcija puzanja** ima oblik:

$$\psi(t) = \sum_i A_i e^{-q_i t},$$

gdje se zbraja od $i = 0$ do n za *čvrsto tijelo* i od 1 do n za *kapljevinu*. Članovi A_i su funkcije od p_i i q_i polinoma $P(D)$ i $Q(D)$ koji određuju *linearno viskoelastični materijal* i q_i su članovi q_i polinoma $Q(D)$ (pogledati **5.1**).

4. *Retardacijska vremena* materijala su $1/q_i$ (pogledati **5.8**).

5. Puzanje se ponekad opisuje u obliku nelinearnog viskoelastičnog ponašanja, što dovodi, primjerice, do procjene obnovljive smične i stacionarne obnovljive smične popustljivosti. Definicije tih pojmova izvan su opsega ovog dokumenta.

5.10 **prisilno titranje**
forced oscillation

Deformiranje materijala primjenom male sinusoidne deformacije (γ) takve da je

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t,$$

gdje su γ_0 i ω pozitivne konstante.

Napomene

1. Primijenjeno γ može biti pri *jednostavnom smiku* (pogledati **2.8** i **2.13**) ili *jednoosnom deformiranju* (često označeno s ε, pogledati **2.4**).

2. γ_0 je **amplituda deformacije**.

3. ω je **kutna brzina** kružnog gibanja koja odgovara sinusoidnoj frekvenciji ν, gdje je $\omega = 2\pi\nu$. Jedinica za ω je rad · s^{-1}.

4. Za *linearno viskoelastično ponašanje* sinusoidno naprezanje (σ) nastaje radi sinusoidne deformacije sa

$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cos \delta \cdot \cos \omega t - \sigma_0 \sin \delta \cdot \sin \omega t.$$

σ_0 je **amplituda naprezanja**. δ je **fazni kut** ili **kut gubitaka** između naprezanja i deformacije.

5. Alternativni opisi sinusoidnog naprezanja i deformacije za viskoelastični materijal pri prisilnom titranju:

(*i*) $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) = \sigma_0 \sin \delta \cdot \cos \omega t + \sigma_0 \cos \delta \cdot \sin \omega t$$

(*ii*) $\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta) = \gamma_0 \cos \delta \cdot \cos \omega t + \gamma_0 \sin \delta \cdot \sin \omega t$

$$\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$$

5.11 **faktor gubitaka/tangens gubitaka,** $\tan \delta$
loss factor/loss tangent

Tangens razlike faznog kuta (δ) između naprezanja i deformacije za vrijeme prisilnog titranja.

Napomene

1. $\tan \delta$ se izračunava kao

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t \quad \text{i} \quad \sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \qquad \text{(pogledati 5.10).}$$

2. $\tan \delta$ je također jednak omjeru *modula gubitaka* i *modula pohrane* (pogledati **5.12 i 5.13**).

3. Grafički prikaz $\tan \delta$ prema temperaturi ili frekvenciji poznat je kao **krivulja gubitaka**.

5.12 **modul pohrane**, općenito M', SI-jedinica: Pa
modul pohrane, pri jednostavnom smičnom deformiranju G', SI-jedinica: Pa
modul pohrane, pri jednoosnom deformiranju E', SI-jedinica: Pa
storage modulus

Omjer amplitude naprezanja u fazi s deformacijom ($\sigma_0 \cos \delta$) i amplitude deformacije (γ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$M' = (\sigma_0 \cos \delta)/\gamma_0.$$

Napomena

Pogledati **5.10** za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta)$.

5.13 modul gubitaka, općenito M'', SI-jedinica: Pa
modul gubitaka, pri jednostavnom smičnom deformiranju G'', SI-jedinica: Pa
modul gubitaka, pri jednoosnom deformiranju E'', SI-jedinica: Pa
loss modulus

Omjer amplitude naprezanja za 90° izvan faze s deformacijom ($\sigma_0 \sin \delta$) i amplitude deformacije (γ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$M'' = (\sigma_0 \sin \delta)/\gamma_0.$$

Napomene

Pogledati **5.10** za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \cos (\omega t + \delta)$.

5.14 apsolutni modul, općenito $|M^*|$, SI-jedinica: Pa
apsolutni modul, pri jednostavnom smičnom deformiranju $|G^*|$, SI-jedinica: Pa
apsolutni modul, pri jednoosnom deformiranju $|E^*|$, SI-jedinica: Pa
absolute modulus

Omjer amplitude naprezanja (σ_0) i amplitude deformacije (γ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$|M^*| = \sigma_0/\gamma_0.$$

Napomene

1. Pogledati **5.10** za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \cos (\omega t + \delta)$.

2. Apsolutni modul povezan je s *modulom pohrane* (**5.12**) i *modulom gubitaka* (**5.13**) prema

$$M^* = \left(\frac{\sigma_0^2 \cos^2 \delta}{\gamma_0^2} + \frac{\sigma_0^2 \sin^2 \delta}{\gamma_0^2} \right) = (M'^2 + M''^2)^{1/2}.$$

5.15 kompleksni modul, općenito M^*, SI-jedinica: Pa
kompleksni modul, pri jednostavnom smičnom deformiranju G^*, SI-jedinica: Pa
kompleksni modul, pri jednoosnom deformiranju E^*, SI-jedinica: Pa
complex modulus

Omjer kompleksnog naprezanja (σ^*) i kompleksne deformacije (γ^*) pri prisilnom titranju materijala

$$M^* = \sigma^*/\gamma^*.$$

Napomene

1. Pogledati **5.10** za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \cos (\omega t + \delta)$.

2. **Kompleksna deformacija** $\gamma^* = \gamma_0 e^{i\omega t} = \gamma_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$, gdje je $i = \sqrt{-1}$, tako da je realni član kompleksne deformacije onaj koji je stvarno primijenjen na materijal.

3. **Kompleksno naprezanje** $\sigma^* = \sigma_0\ e^{i(\omega\tau+\delta)} = \sigma_0(\cos(\omega t + \delta) + i \sin(\omega t + \delta))$, tako da je realni član kompleksne deformacije uistinu ostvaren na materijalu.

4. *Kompleksni modul* je povezan s *modulima pohrane* i *gubitaka* s relacijom

$$M^* = \sigma^* / \gamma^* = \sigma_0 e^{i\delta} / \gamma_0 = (\sigma_0/\gamma_0)(\cos\delta + i \sin\delta) = M' + iM''.$$

5. Za linearno viskoelastično ponašanje prikazano u obliku *kompleksnog naprezanja* i *deformacije* (pogledati napomene 2, 3)

$$P(D)\sigma^* = Q(D)\gamma^*$$

(pogledati **5.2**). Nadalje, kako je: $D\sigma^* = d\sigma^*/dt = i\omega\sigma^*$, i $D\gamma^* = i\omega\gamma^*$,

$$M^* = \sigma^*/\gamma^* = Q(i\omega)/P(i\omega)$$

5.16 pohranjena popustljivost, općenito C', SI-jedinica: Pa^{-1}
pohranjena popustljivost, pri jednostavnom smičnom deformiranju J', SI-jedinica: Pa^{-1}
pohranjena popustljivost, pri jednoosnom deformiranju D', SI-jedinica: Pa^{-1}
storage compliance

Omjer amplitude deformacije u fazi s naprezanjem ($\gamma_0 \cos \delta$) i amplitude naprezanja (σ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$C' = (\gamma_0 \cos \delta)/\sigma_0 .$$

Napomene

Pogledati **5.10,** napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos (\omega t - \delta)$ i $\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$.

5.17 gubitna popustljivost, općenito C'', SI-jedinica: Pa^{-1}
gubitna popustljivost, pri jednostavnom smičnom deformiranju J'', SI-jedinica: Pa^{-1}
gubitna popustljivost, pri jednoosnom deformiranju D'', SI-jedinica: Pa^{-1}
loss compliance

Omjer amplitude deformacije za 90° izvan faze s naprezanjem ($\gamma_0 \sin \delta$) i amplitude naprezanja (σ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$C'' = (\gamma_0 \sin \delta) / \sigma_0.$$

Napomene

Pogledati **5.10,** napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos (\omega t - \delta)$ i $\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$.

5.18 apsolutna popustljivost, općenito $|C^*|$, SI-jedinica: Pa^{-1}
apsolutna popustljivost, pri jednostavnom smičnom deformiranju $|J^*|$, SI-jedinica: Pa^{-1}
apsolutna popustljivost, pri jednoosnom deformiranju $|D^*|$, SI-jedinica: Pa^{-1}
absolute compliance

Omjer amplitude deformacije (γ_0) i amplitude naprezanja (σ_0) pri prisilnom titranju materijala

$$|C^*| = \gamma_0/\sigma_0.$$

Napomene

1. Pogledati **5.10** napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos (\omega t - \delta)$ i $\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$.

2. Apsolutna popustljivost povezana je s *pohranjenom popustljivosti* (**5.16**) i *gubitnom popustljivosti* (**5.17**) prema

$$|C^*| = \left(\frac{\gamma_0^2 \cos^2 \delta}{\sigma_0^2} + \frac{\gamma_0^2 \sin^2 \delta}{\sigma_0^2} \right)^{1/2} = (C'^2 + C''^2)^{1/2}.$$

3. Apsolutna popustljivost je obrnuto proporcionalna *apsolutnom modulu* (**5.14**).

$$|C^*| = 1/|M^*|.$$

5.19 kompleksna popustljivost, općenito C^*,
SI-jedinica: Pa^{-1}
kompleksna popustljivost, pri jednostavnom smičnom deformiranju J^*, SI-jedinica: Pa^{-1}
kompleksna popustljivost, pri jednoosnom deformiranju D^*, SI-jedinica: Pa^{-1}
complex compliance

Omjer kompleksne deformacije (γ^*) i kompleksnog naprezanja (σ^*) pri prisilnom titranju materijala

$$C^* = \gamma^*/\sigma^*.$$

Napomene

1. Pogledati **5.10** za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta)$ i $\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$.

2. **Kompleksna deformacija** $\gamma^* = \gamma_0 e^{i(\omega t - \delta)} = \gamma_0 (\cos(\omega t - \delta) + i \sin(\omega t - \delta))$, gdje je $i = \sqrt{-1}$, tako da je realni član kompleksne deformacije stvarno ostvaren na materijalu.

3. **Kompleksno naprezanje** $\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} = \sigma_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$, tako da je realni član kompleksnog naprezanja stvarno primijenjen na materijal.

4. Kompleksna popustljivost je povezana s *pohranjenom i gubitnom popustljivosti* (**5.16** i **5.17**) kroz relacije

$$C^* = \gamma^*/\sigma^* = \gamma_0 e^{-i\delta}/\sigma_0 = (\gamma_0/\sigma_0)(\cos \delta - i \sin \delta) = C' - iC''$$

5. Kompleksna popustljivost je obrnuto proporcionalna *kompleksnom modulu*

$$C^* = 1/M^*.$$

5.20 dinamička viskoznost, η', SI-jedinica: Pa·s
dynamic viscosity

Omjer naprezanja koje je u fazi s brzinom deformiranja ($\sigma_0 \sin \delta$) i amplitude brzine deformiranja ($\omega\gamma_0$) pri prisilnom titranju materijala

$$\eta' = (\sigma_0 \sin \delta)/(\omega\gamma_0).$$

Napomene

1. Pogledati **5.10**, napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$, tako da je $\dot{\gamma} = \omega\gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \sin \delta \cdot \cos \omega t + \sigma_0 \cos \delta \cdot \sin \omega t$.

2. Pogledati **5.2**, napomena 6: $\eta' = M''/\omega$ može poslužiti za određivanje *dinamičke viskoznosti*. Isti izraz se često rabi za određivanje *smične viskoznosti*. Takav pristup određivanja *smične viskoznosti* nije preporučljiv.

5.21 izvanfazna viskoznost, η'', *SI-jedinica: Pa*·s
out-of-phase viscosity

Omjer naprezanja koje je za 90° izvan faze s brzinom deformiranja ($\sigma_0 \cos \delta$) i amplitude brzine deformiranja ($\omega\gamma_0$) pri prisilnom titranju materijala

$$\eta'' = (\sigma_0 \cos \delta)/(\omega\gamma_0).$$

Napomene

1. Pogledati **5.10**, napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$, tako da je $\dot{\gamma} = \omega\gamma_0 \cos \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \sin \delta \cdot \cos \omega t + \sigma_0 \cos \delta \cdot \sin \omega t$.

2. Pogledati **5.22**, napomena 6: $\eta'' = M'/\omega$ može poslužiti za određivanje *izvan-fazne viskoznosti*.

5.22 kompleksna viskoznost, η^*, SI-jedinica: Pa · s
complex viscosity

Omjer kompleksnog naprezanja (σ^*) i kompleksne brzine deformiranja ($\dot{\gamma}^*$) pri prisilnom titranju materijala

$$\eta^* = \sigma^*/\dot{\gamma}^*.$$

Napomene

1. Pogledati **5.10**, napomena 5 za definiciju *prisilnog titranja* za koje je $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ i $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$ te brzina deformiranja $\dot{\gamma} = \omega_0 \cos \omega t$.

2. **Kompleksna brzina deformiranja** $\dot{\gamma}^* = i\omega\gamma_0 e^{i\omega t} = i\omega\gamma_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t)$, gdje je $i = \sqrt{-1}$

3. **Kompleksno naprezanje** $\sigma^* = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} = \sigma_0 (\cos(\omega t + \delta) + i \sin(\omega t + \delta))$.

4. *Kompleksna viskoznost* može se drugačije izraziti kao

$$\eta^* = \sigma^*/\dot{\gamma}^* = (\sigma_0 e^{i\delta})/(i\,\omega\gamma_0) = M^*/i\,\omega,$$

gdje je M^* *kompleksni modul* (pogledati **5.15**).

5. *Kompleksna viskoznost* povezana je s *dinamičkom* i *izvan-faznom viskoznosti* prema

$$\eta^* = \sigma^*/\dot{\gamma}^* = \sigma_0 (\cos \delta + i \sin \delta)/(i\,\omega\gamma_0) = \eta' - i\,\eta''.$$

6. *Dinamička* i *izvan-fazna viskoznost* povezane su s *modulima pohrane i gubitaka* (**5.11** i **5.13**) prema $\eta^* = \eta' - i\,\eta'' = M^*/i\,\omega = (M'' + i M')/i\,\omega$, tako da je $\eta' = M''/\omega$ i $\eta'' = M'/\omega$.

6. Titrajne deformacije i naprezanja pri pokusu

Tri su vrste **slobodnog** i **prisilnog** titrajnog deformiranja koje se uobičajeno primjenjuju pri pokusima: **uvojno (torzijsko) titranje**, **jednoosno rastezno titranje** i **savojno titranje.**

Titrajne deformacije i naprezanja primjenjivi su za čvrsta tijela i kapljevine. Međutim, uređaji koji se upotrebljavaju za njihova mjerenja uobičajeno su dizajnirani za čvrsta tijela. U načelu, ti uređaji se mogu modificirati za mjerenja s kapljevinama.

Dobiveni rezultati ovise o obliku uzorka, o tome uzima li se u obzir ili ne raspodjela mase u uzorku i o pretpostavljenom modelu linearnih viskoelastičnih svojstava materijala. Sljedeći pojmovi odnose se na analize koje obično pretpostavljaju male deformacije, uzorke jednolikog poprečnog presjeka, nerazdijeljenu masu i Voigt-Kelvinovo tijelo (pogledati **5.4**). To su uobičajene pretpostavke.

6.1 slobodno titranje
free oscillation

Titrajno deformiranje materijala uzorka, pri čemu do gibanja dolazi i kada nema kontinuirane primjene vanjske sile.

Napomene

Za svaki stvarni uzorak materijala smanjuje se amplituda nastale titrajne deformacije.

6.2 krivulja prigušenja
damping curve

Opadajuće deformiranje materijala uzorka u vremenu kada je uzorak izložen slobodnom titranju.

Napomene

1. Pogledati **6.1** za definiciju *slobodnog titranja*.

2. Pojam "krivulja prigušenja" ponekad se rabi za opis *krivulje gubitaka* (pogledati **5.11**).

3. *Krivulja prigušenja* se uobičajeno dobiva mjerenjem s **uvojnim** (**torzijskim) klatnom**, što uključuje mjerenje opadajućeg osnog, uvojnog pomaka uzorka jednolikog poprečnog presjeka poznatog oblika, s pomakom od uvijanja iniciranim torzijskim štapom poznatog momenta tromosti.

4. *Krivulje prigušenja* se dogovorno analiziraju na primjeru *Voigt-Kelvinovog* tijela (pogledati **5.4**) što daje opadajuću amplitudu i jednu frekvenciju.

5. Uz poznata svojstva *Voigt-Kelvinovog* tijela, krivulja prigušenja se opisuje jednadžbom

$$X = A \exp(-\beta t) \cdot \sin(\omega t - \phi),$$

gdje je X pomak iz ravnoteže (kod torzije je to $X = \theta$, kutni zakret), t je vrijeme, A je amplituda, β je *konstanta prigušenja* (pogledati **6.3**), ω je *kutna brzina* koja odgovara *opadajućoj frekvenciji* (pogledati **5.10** i **6.4**) i ϕ je fazni kut.

6.3 konstanta prigušenja, β, SI-jedinica: s^{-1}
decay constant

Eksponencijski koeficijent vremenski ovisnog slabljenja prigušne krivulje, pretpostavljajući Voigt-Kelvinovo ponašanje.

Napomene

1. Pogledati *krivulju prigušenja* (**6.2**) i tamo dane jednadžbe (**6.2**, napomena 5).

2. Pogledati *Voigt-Kelvinovo* tijelo (**5.4**).

3. Za malo prigušenje je β povezano s *modulom gubitaka* (M''), pogledati **5.13**, prema jednadžbi

$$M'' = 2\beta\omega/H.$$

ω je kutna brzina koja odgovara *opadajućoj frekvenciji* (pogledati **5.10** i **6.4**). H ovisi o obliku poprečnog presjeka uzorka i vrsti deformiranja. (Primjerice, za osnu torziju okrugle šipke polumjera a i duljine l na *torzijskom klatnu* (pogledati **6.2**, napomena 3) s torzijskim štapom momenta tromosti I

$$H = \pi a^4/(2Il)$$

i $M'' \cong G''$, modul gubitaka pri jednostavnom smiku).

6.4 frekvencija prigušenja, ν, SI-jedinica: Hz
decay frequency

Frekvencija krivulje prigušenja pretpostavljajući Voigt-Kelvinovo ponašanje.

Napomene

1. Pogledati *krivulja prigušenja* (**6.2**) i tamo dane jednadžbe (**6.2**, napomena 5).

2. Pogledati *Voigt-Kelvinovo* tijelo (**5.4**).

3. $\nu = \omega/2\pi$, gdje je ω *kutna brzina* koja odgovara ν (pogledati **5.10**).

4. Za mala prigušenja, *modul pohrane* (M'), pogledati **5.12**, se može izraziti s ω prema jednadžbi

$$M' = \omega^2/H,$$

gdje je H raspravljen u **6.3**, napomena 3. Također, za torziju, $M' \cong G'$, *modul pohrane* pri jednostavnom smiku.

6.5 logaritamsko sniženje, Λ
logarithmic decrement

Prirodni logaritam omjera pomaka krivulje prigušenja razdvojene za jedan period pomaka.

Napomene

1. *Voigt-Kelvinovo* ponašanje (pogledati **5.4**) je pretpostavljeno tako da pomak opada u jednom periodu T, gdje je

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$$

uz ν kao frekvenciju i ω kao kutnu brzinu koja odgovara ν (pogledati **6.4**).

2. *Logaritamsko sniženje* se primjenjuje za određivanje *konstante prigušenja* $\pi\beta$ (pogledati **6.3**).

Iz jednadžbe za *krivulju prigušenja* Voigt-Kelvinovog tijela (vidjeti **6.2**, napomena 5).

$$\Lambda = \ln(X_n/X_{n+1}) = \beta(t_{n+1} - t_n) = \beta \cdot T,$$

gdje su X_n i t_n pomak i vrijeme u izabranoj točki (uobičajeno blizu maksimuma) u n-tom periodu opadanja, i X_{n+1} i t_{n+1} su odgovarajući pomak i vrijeme za jedan period kasnije.

3. Λ može biti određeno pomacima koji su za k perioda razmaknuti, s

$$\Lambda = (1/k)\ln(X_n/X_{n+k}).$$

4. Za mala prigušenja Λ je povezano s *tangensom gubitaka*, $\tan\delta$ (pogledati **5.11**) prema

$$\tan\delta = M''/M' = 2\beta/\omega = 2\Lambda/T\omega = \Lambda/\pi$$

(Pogledati **6.3** i **6.4** za izraze za M' i M'').

6.6 prisilno jednoosno rastezno titranje
forced uniaxial extensional oscillation

Jednoosno rastezno deformiranje materijalnog uzorka jednolike površine poprečnog presjeka duž njegove dulje osi primjenom kontinuirane sinusoidne sile konstantne amplitude.

Napomene

Za uzorak zanemarive mase, linearno-viskoelastičan prikaz nastalih deformacija je

$$(A/L)\, Q(D)\, l = P(D)\, f_0 \cos\omega t,$$

gdje su $P(D)$ i $Q(D)$ polinomi u $D(=\mathrm{d}/\mathrm{d}t)$ koji karakteriziraju *linearno-viskoelastično ponašanje* (pogledati **5.2**), A je površina poprečnog presjeka uzorka, L njegova izvorna duljina, l je ovdje promjena duljine, f_0 amplituda primijenjene sile čija je *kutna brzina* ω (pogledati **5.10**, napomena 3) i t vrijeme.

Za *Voigt-Kelvinovo* tijelo (pogledati **5.4**), s $P(D)=1$ i $Q(D) = \alpha+\beta D$, gdje je α konstanta opruge i β konstanta prigušenja, jednadžba koja opisuje deformacije postaje

$$(A/L)\beta(\mathrm{d}l/\mathrm{d}t) + (A/L)\alpha l = f_0 \cos \omega t$$

ili, izražena preko *naprezanja* i *deformacije*,

$$\alpha\varepsilon + \beta\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \sigma_0 \cos \omega t,$$

gdje je $\varepsilon = l/L$ *jednoosna deformacija* (pogledati **2.4** i **5.10**) i $\sigma_0 = f_0/A$ je *amplituda naprezanja* (pogledati **5.10**). Rješenje jednadžbe je

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{(\alpha^2+\beta^2\omega^2)^{1/2}}\cos(\omega t - \delta) = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \delta),$$

gdje je δ *fazni kut* (pogledati **5.10**) s $\tan \delta = \beta\omega/\alpha$.

3. Iz **5.14**, *apsolutni modul* pri *jednoosnom deformiranju*

$$|E^*| = \sigma_0/\varepsilon_0 = (\alpha^2+\beta^2\omega^2)^{1/2},$$

gdje je $\alpha = E''$, $\beta\omega = E''$ i $\tan \delta = E''/E'$ jednak *tangensu gubitaka* (vidjeti **5.11**).

4. Ukoliko je jedan kraj uzorka učvršćen, a masa m je dodana na gibljivi kraj, *linearno viskoelastično* poopćenje nastalih deformacija daje

$$m \cdot P(D)(\mathrm{d}^2l/\mathrm{d}t^2)+(A/L)Q(D)l = P(D)f_0 \cos \omega t,$$

gdje oznake imaju jednako značenje kao u napomeni 1.

5. Za *Voigt-Kelvinovo* tijelo (pogledati napomenu 2) jednadžba u napomeni 4 koja opisuje deformaciju postaje

$$m(\mathrm{d}^2l/\mathrm{d}t^2)+(A/L)\beta(\mathrm{d}l/\mathrm{d}t)+(A/L)\alpha \cdot l = f_0 \cos \omega t$$

s rješenjem

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0 \cdot (A/(Lm))}{\left(\left(\frac{A_\infty}{Lm} - \omega^2\right)^2 + \omega^2\left(\frac{A\beta}{Lm}\right)^2\right)^{1/2}}\cos(\omega t - \theta) = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \theta),$$

gdje je $\tan \theta = \dfrac{((A\beta)/(Lm)) \cdot \omega}{((A\alpha)/(Lm)) - \omega^2}$ i oznake imaju jednako značenje kao u napomenama 1 i 2.

6. Amplituda deformacije ε_0 je najveća kada je

$$\omega^2 = A\alpha/(Lm) = \omega_R^2,$$

što daje vrijednost kutne brzine (ω_R) *rezonantne frekvencije* uzorka (pogledati **6.12**) pri prisilnom jednoosnom rasteznom titranju.

7. Napomene 2 i 5 pokazuju da primjena sinusoidne jednoosne sile na Voigt-*Kelvinovo* tijelo zanemarive mase, s dodanom ili bez dodane mase, dovodi do izvan-faznog sinusoidnog jednoosnog rasteznog titranja s jednakom frekvencijom.

6.7 prisilno savojno titranje
forced flexural oscillation

Savojno deformiranje materijalnog uzorka jednolike površine poprečnog presjeka okomito na njegovu dulju os kontinuiranom primjenom sinusoidne sile konstantne amplitude.

Napomene

1. Tri su uobičajena načina savijanja.

(i) Primjena savojne sile na jednom kraju uzorka pri čemu je drugi kraj učvršćen.

(ii) Primjena savojne sile na sredini uzorka, čija su dva kraja učvršćena (**fleksija** ili **savijanje u tri točke**).

(iii) Primjena savojne sile na sredini uzorka, čija se dva kraja slobodno oslanjaju na podlogu (**fleksija** ili **savijanje u tri točke**).

2. Za uzorke *koji nemaju masu* prikaz linearno viskoelastičnih deformacija slijedi diferencijalnu jednadžbu jednakog oblika kao i za *jednoosno rastezno prisilno titranje* (pogledati **6.6**, napomena 1), naime

$$(HJ/L^3)\, Q(D)\, y = P(D)\, f_0 \cos \omega t,$$

gdje $P(D)$, $Q(D)$, f_0, ω i t imaju jednako značenje kao i za *prisilno jednoosno rastezno titranje* (pogledati **6.6**, napomena 1) i H je konstanta. Duljina uzorka je $2L$. Za savojne načine (i) $H = 3$, za (ii) $H = 24$ i za (iii) $H = 6$ (pogledati napomenu 1). J je **drugi moment površine** uzorka, definiran kao

$$J = \int_A q^2 \mathrm{d}A.$$

gdje je dA element površine poprečnog presjeka uzorka (A), a q je udaljenost tog elementa od **neutralne osi ili ravnine** uzorka, koja leži u sredini uzorka i određena je s točkama koje ne podliježu ni skraćivanju niti istezanju tijekom savijanja. Za uzorak kružnog poprečnog presjeka vrijedi $J = \pi r^4/4$, gdje je r polumjer, a za uzorak pravokutnog poprečnog presjeka $J = 4ab^3/3$, gdje su $2a$ i $2b$ dimenzije poprečnog presjeka pri savijanju uzduž dimenzije b. Konačno, y je *progib zbog savijanja* (pogledati **6.9**) uzorka na mjestu primjene sile, bilo na krajevima (savojni način (i)) ili u sredini (savojni načini (ii) i (iii)).

3. Za *Voigt-Kelvinovo* tijelo jednadžba koja opisuje deformacije postaje

$$(HJ/L^3)\alpha \cdot y + (HJ/L^3)\beta(\mathrm{d}y/\mathrm{d}t) = f_0 \cos \omega t$$

s rješenjem

$$y = \frac{f_0L^3}{HJ(\alpha^2 + \beta^2\omega^2)^{1/2}}\cos(\omega t - \delta),$$

gdje je δ *fazni kut* s

$$\tan \delta = \beta\omega/\alpha$$

jednak *tangensu gubitaka* (pogledati **5.11**).

4. Za razliku od deformacija pri *prisilnom jednoosnom rasteznom titranju*, deformacije pri *prisilnom savojnom deformiranju* nisu jednolike. Pri tom načinu deformiranja deformacije se razlikuju od točke do točke uzorka. Dakle, jednadžba koja definira pomak y u obliku amplitude primijenjene sile (f_0) ne može biti prevedena u onu koja određuje deformaciju u obliku amplitude naprezanja.

5. Ukoliko je masa m pričvršćena na uzorak na mjestu primjene sile, linearno viskoelastično objašnjenje nastalih deformacija daje

$$m \cdot P(D)\,(d^2y/dt^2) + (HJ/L^3)Q(D)y = P(D)f_0 \cos \omega t$$

(usp. **6.6**, napomena 4).

6. Za *Voigt-Kelvinovo tijelo* (usp. napomene 3 i **6.6**, napomena 5) jednadžba koja opisuje deformaciju postaje

$$m(d^2y/dt^2)+(HJ/L^3)\beta(\delta y/dt)+(HJ/L^3)\alpha \cdot y = f_0 \cos \omega t$$

s rješenjem

$$y = \frac{f_0/m}{\left(\left(\frac{HJ\alpha}{L^3m}-\omega^2\right)^2+\omega^2\left(\frac{HJ\beta}{L^3m}\right)^2\right)^{1/2}}\cos(\omega t-\delta),$$

gdje je $\tan\delta = \frac{(HJ\beta/(L^3m))\omega}{((HJ\alpha/(L^3m))-\omega^2)}$

7. *Progib zbog savijanja y* (pogledati **6.9**) je najveći kada je

$$\omega^2 = HJ\alpha/(L^3m) = \omega_R^2,$$

što daje vrijednost **kutne brzine** (ω_R) **rezonancijske frekvencije** uzorka (pogledati **6.6**, napomena 6) pri prisilnom savojnom titranju.

8. Napomene 3 i 6 pokazuju da primjena određene sinusoidne savojne sile (i), (ii) i (iii) (napomena 1) na *Voigt-Kelvinovo* tijelo zanemarive mase, s dodanom ili bez dodane mase u točkama primjene sile, dovodi do izvanravninskog sinusoidnog savojnog titranja s jednakom frekvencijom.

6.8 savojna sila, f_0, SI-jedinica: N
flexural force

Amplituda sile primijenjene na materijalni uzorak koja uzrokuje prisilno savojno titranje.

Napomene

1. Pogledati **6.7** za definiciju i objašnjenje *prisilnog savojnog titranja*.

2. Srodna veličina je **savojno naprezanje,** koje je donekle proizvoljno definirano kao amplituda naprezanja na konveksnu, vanjsku površinu materijalnog uzorka pri prisilnom savojnom titranju.

6.9 progib zbog savijanja, y, SI-jedinica: m
flexural deflection

Progib uzorka podvrgnutog prisilnom savojnom titranju u točki primjene savojne sile.

Napomene

1. Pogledati **6.7** za definiciju i objašnjenje *prisilnog savojnog titranja*.

2. Pogledati **6.8** za definiciju *savojne sile*.

6.10 savojni modul, $|E^*|$, SI-jedinica: Pa
flexural modulus

Modul mjeren pri prisilnom savojnom titranju.

Napomene

1. Pogledati **6.7** za definiciju i objašnjenje *prisilnog savojnog titranja*.

2. Za *Voigt-Kelvinovo tijelo* (pogledati **5.4**) zanemarive mase, apsolutni modul se može izvesti iz omjera *savojne sile* (f_0) i amplitude *savojnog progiba* (y) prema

$$f_0/Y_0 = (HJ/L^3)(\alpha^2 + \beta^2\,\omega^2)^{1/2},$$

gdje je Y_0 amplituda *savojnog pomaka* (pogledati **6.7**, napomena 3, **6.8** i **6.9**),

$$|E^*| = (\alpha^2 + \beta^2\omega^2)^{1/2}$$

(pogledati **5.14** i **6.6**, napomena 3) i druge oznake su određene u **6.7**, napomena 2.

3. Omjer gubitka spram savojnog modula pohrane (E''/E') *izvodi se iz tangensa gubitaka* ($\tan\delta$) za *prisilno savojno titranje* prema

$$\tan\delta = \beta\omega/\alpha = E''/E'$$

(pogledati **5.11** i **6.7**, napomena 3).

4. Savojni modul ima jednaku oznaku kao i *apsolutni modul* pri jednoosnom deformiranju (pogledati **5.14**) budući da je jednak toj veličini uz granični uvjet nulte amplitude primijenjene sile i deformacije. Pri stvarnim pokusnim uvjetima to se često rabi kao aproksimacija za $|E^*|$.

6.11 krivulja rezonancije, $A(\nu)$, SI-jedinica: jednaka jedinici amplitude A
resonance curve

Krivulja ovisnosti frekvencije amplitude pomaka materijalnog uzorka podvrgnutog prisilnom titranju, u području rezonantne frekvencije.

Napomene

1. Pogledati **6.6** i **6.7** za opis uobičajenih načina prisilnog titranja.

2. Pogledati **6.12** za definiciju *frekvencije rezonancije*.

6.12 frekvencija rezonancije, ν_R, Jedinica: Hz
resonance frequency

Frekvencija pri maksimumu krivulje rezonancije.

Napomene

1. Pogledati **6.11** za definiciju *krivulje rezonancije*.

2. Materijalni uzorci podvrgnuti *prisilnom titranju* (pogledati **6.6** i **6.7**) općenito pokazuju spektar frekvencija rezonancije.

3. Za slučajeve jedne *frekvencije rezonancije frekvencija rezonancije* je razmjerna kvadratnom korijenu *modula pohrane* materijala (M') *(pogledati* **5.12**).

4. Materijalni uzorak koji se ponaša kao *Voigt-Kelvinovo tijelo* pri prisilnom titranju s masom dodanom u točki primjene primijenjene titrajne sile ima jednu rezonantnu frekvenciju.

5. Pri *prisilnom jednoosnom rasteznom titranju* rezonantna frekvencija

$$\nu_R = \omega_R/2\pi = \left(\frac{A\alpha}{Lm}\right)^{1/2}\Big/2\pi = \left(\frac{AE'}{Lm}\right)^{1/2}\Big/2\pi$$

(pogledati **6.6** za izvorni oblik jednadžbe i za definicije oznaka). *E′ je modul pohrane pri jednoosnom rastezanju* (pogledati **5.12**).

6. Pri *prisilnom savojnom titranju* frekvencija rezonancije

$$\nu_R = \omega_R/2\pi = \left(\frac{HJ\alpha}{L^3 m}\right)^{1/2} \Bigg/ 2\pi = \left(\frac{HJE'}{L^3 m}\right)^{1/2} \Bigg/ 2\pi$$

(pogledati **6.7** za izvornik jednadžbe i za definicije oznaka).

6.13 širina krivulje rezonancije, $\Delta\nu$, SI-jedinica: Hz
width of the resonance curve

Razlika u frekvenciji između dviju točaka na rezonantnoj krivulji na obje strane ν_R koje imaju amplitude jednake $(1/\sqrt{2})\ A\ (\nu_R)$.

Napomene

1. Za materijalni uzorak koji se ponaša kao *Voigt-Kelvinovo tijelo* pri *prisilnom jednoosnom rasteznom titranju* s masom dodanom u točki primjene primijenjene titrajne

sile, $\Delta\nu$ je razmjerna s *modulom gubitaka* (*E′′*) *(pogledati* **5.13**).

$$2\pi\Delta\nu = \frac{A}{Lm}\cdot\beta = \frac{A}{Lm}\cdot\frac{E''}{\omega_R}.$$

Pored toga (**6.6**, napomena 6), *modul pohrane* (*E′*) *(vidjeti* **5.12**) može biti izveden iz

$$\omega_R^2 = \frac{A}{Lm}\cdot\alpha = \frac{A}{Lm}\cdot E'$$

(pogledati **6.6** za definicije oznaka).

2. Za materijalni uzorak koji se ponaša kao *Voigt-Kelvinovo tijelo* pri prisilnom savojnom titranju s masom dodanom u točki primjene primijenjene titrajne sile, $\Delta\nu$ je razmjerna s modulom gubitaka (*E′′*) *(pogledati* **5.13**)

$$2\pi\Delta\nu = \frac{HJ}{L^3 m}\cdot\beta = \frac{HJ}{L^3 m}\cdot\frac{E''}{\omega_R}.$$

Pored toga, *modul pohrane* (*E′*) *(pogledati* **5.12**) može biti izveden iz

$$\omega_R^2 = \frac{HJ}{L^3 m}\cdot\alpha = \frac{HJ}{L^3 m}\cdot E'$$

(pogledati **6.7** za definicije oznaka).

3. Za *Voigt-Kelvinova* ponašanja opisana u napomenama 1 i 2, omjer $\Delta\nu$ i frekvencije rezonancije (ϖ_R) jednak je *tangensu gubitaka* (tan δ).

Pri *prisilnom jednoosnom rasteznom titranju*

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_R} = \left(\frac{A}{Lm}\right)\beta\omega_R\cdot\frac{Lm}{A\alpha} = \frac{\beta}{\alpha}\,\omega_R = \frac{E''}{E'} = \tan\delta.$$

Pri *prisilnom savojnom titranju*

$$\frac{\Delta\nu_R}{\nu_R} = \left(\frac{HJ}{L^3 m}\right)\beta\omega_R\cdot\frac{L^3 m}{HJ\alpha} = \frac{\beta}{\alpha}\omega_R = \frac{E''}{E'} = \tan\delta$$

(pogledati **5.11** za definiciju tan δ).

Literatura:

1. ISO 472, ISO TC-61, Dec. 1991 Draft, Plastics Vocabulary.
2. *C. L. Sieglaff*, Trans. Soc. Rheol. **20** (1976) 311.
3. *D. W. Hadley, J. D. Weber,* Rheol. Acta **14** (1975) 1098.
4. *D. W. Hadley, J. D. Weber,* Bull. Br. Soc. Rheol. **22** (1979) 4.
5. *M. Reiner, G. W. Scott Blair*, Rheology, Vol. **4**, ed. *F. R. Eirich*, Academic Press, New York, 1967.
6. *J. M. Dealy,* J. Rheol. **28** (1984) 181; **39** (1995) 253.
7. ASTM E 6-88, "Standard Definitions of Terms Relating to Methods of Mechanical Testing", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.03, 1989, p. 672.
8. ASTM D4092-83a, "Standard Definitions and Descriptions of Terms Relating to Dynamical Mechanical Measurements on Plastics", Annual Book ASTM Standards, Vol. 8.03, 1989, p. 334.
9. ASTM D 883-88, "Standard Definitions of Terms Relating to Plastics", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01, 1989, p. 333.
10. *G. Astarita, G. Marucci*, "Principles of Non-Newtonian Fluid Mechanics", McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd., Maidenhead, 1974.
11. *J. D. Ferry,* "Viscoelastic Properties of Polymers", John Wiley and Sons, New York, third edition, 1980.
12. *R. I. Tanner,* "Engineering Rheology", Clarendon Press, Oxford, 1985.
13. *H. A. Barnes, J. F. Hutton and K. Walters,* "An Introduction to Rheology", Elsevier, Amsterdam, 1989.
14. *J. F. Nye*, "Physical Properties of Crystals", Oxford University Press, 1969.
15. *I. M. Ward, D. W. Hadley*, "An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers", John Wiley and Sons, Chichester, 1993.

Popis oznaka

$A(\nu)$	krivulja rezonancije resonance curve (6.11)
$\boldsymbol{A}_n$	Rivlin-Ericksenovi tenzori Rivlin-Ericksen tensors (1.14)
B	popustljivost pri obujamnom tlačnom deformiranju/obujamna popustljivost/obujamna tlačna popustljivost compliance in bulk compressive deformation (4.4)/bulk compliance/bulk compressive compliance (4.6)
$\boldsymbol{B}$	Greenov tenzor Green tensor (1.8, 1.10)
$\boldsymbol{B}^{-1}$	Piolin tenzor Piola tensor (1.8)
C	popustljivost (općenito) compliance (general symbol) (4.4)
C'	pohranjena popustljivost (općenito) storage compliance (general symbol) (5.16)
C''	gubitna popustljivost (općenito) loss compliance (general symbol) (5.17)
C^*	kompleksna popustljivost (općenito) complex compliance (general symbol) (5.19)
$\|C^*\|$	apsolutna popustljivost (općenito) absolute compliance (general symbol) (5.18)
$\boldsymbol{C}$	Cauchyjev tenzor Cauchy tensor (1.8, 1.9)
$\boldsymbol{C}^{-1}$	Fingerov tenzor Finger tensor (1.8, 1.11)
D	popustljivost pri jednoosnom deformiranju/jednoosna popustljivost/rastezna popustljivost compliance in uniaxial deformation (4.4)/uniaxial compliance/tensile compliance (4.8)

D' pohranjena popustljivost pri jednoosnom deformiranju
storage compliance in uniaxial deformation (5.16)

D'' gubitna popustljivost pri jednoosnom deformiranju
loss compliance in uniaxial deformation (5.17)

D^* kompleksna popustljivost pri jednoosnom deformiranju
complex compliance in uniaxial deformation (5.19)

$|D^*|$ apsolutna popustljivost pri jednoosnom deformiranju
absolute compliance in uniaxial deformation (5.18)

$\boldsymbol{D}$ tenzor brzine deformacije
rate-of-strain tensor (1.12)

E modul pri jednoosnom deformiranju/Youngov modul/modul rasteznosti/sekantni modul/tangentni modul
modulus in uniaxial deformation (4.3)/Young's modulus/tensile modulus/secant modulus/tangent modulus (4.7)

E' modul pohrane pri jednoosnom deformiranju
storage modulus in uniaxial deformation (5.12)

E'' modul gubitaka pri jednoosnom deformiranju
loss modulus in uniaxial deformation (5.13)

E^* kompleksni modul pri jednoosnom deformiranju
complex modulus in uniaxial deformation (5.15)

$|E^*|$ apsolutni modul pri jednoosnom deformiranju
absolute modulus in uniaxial deformation (5.14)

$|E^*|$ savojni modul [modul savitljivosti]
flexural modulus (6.10)

$\boldsymbol{F}$ tenzor gradijenta deformacije elastičnog tijela i tenzor gradijenta deformacije za viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo
deformation gradient tensor for an elastic solid (1.4) and for a viscoelastic liquid or solid (1.7)

f_0 savojna sila
flexural force (6.8)

f_{ij} gradijenti deformacije za viskoelastičnu kapljevinu ili viskoelastično čvrsto tijelo
deformation gradients in a viscoelastic liquid or solid (1.6)

G modul pri smičnom deformiranju/modul smika
modulus in shear deformation (4.3)/shear modulus (4.10)

G' modul pohrane pri jednostavnom smičnom deformiranju
storage modulus in simple shear deformation (5.12)

G'' modul gubitaka pri jednostavnom smičnom deformiranju
loss modulus in simple shear deformation (5.13)

G^* kompleksni modul pri jednostavnom smičnom deformiranju
complex modulus in simple shear deformation (5.15)

$|G^*|$ apsolutni modul pri jednostavnom smičnom deformiranju
absolute modulus in simple shear deformation (5.14)

J popustljivost pri smičnom deformiranju/smična popustljivost/popustljivost pri puzanju
compliance in shear deformation (4.7)/shear compliance (4.11)/creep compliance (5.9)

J second moment of area (in a forced flexural oscillation) (6.7)
drugi moment površine (pri prisilnom savojnom titranju)

J' pohranjena popustljivost pri jednostavnom smičnom deformiranju
storage compliance in simple shear deformation (5.16)

J'' gubitna popustljivost pri jednostavnom smičnom deformiranju
loss compliance in simple shear deformation (5.17)

J^* kompleksna popustljivost pri jednostavnom smičnom deformiranju
complex compliance in simple shear deformation (5.19)

$|J^*|$ apsolutna popustljivost pri jednostavnom smičnom deformiranju
absolute compliance in simple shear deformation (5.18)

K modul pri obujamnom tlačnom deformiranju/modul stlačivosti/modul pri obujamnom stlačivanju
modulus in bulk compressive deformation (4.3)/bulk modulus/bulk compressive modulus (4.5)

M modul (općenito)
modulus (general symbol) (4.3)

M' modul pohrane (općenito)
storage modulus (general symbol) (5.12)

M'' modul gubitaka (općenito)
loss modulus (general symbol) (5.13)

M^* kompleksni modul (općenito)
complex modulus (general symbol) (5.15)

$|M^*|$ apsolutni modul (općenito)
absolute modulus (general symbol) (5.14)

N_1 prva razlika normalnih naprezanja/prva funkcija normalnih naprezanja
first normal-stress difference/first normal-stress function (3.6)

N_2 druga razlika normalnih naprezanja/druga funkcija normalnih naprezanja
second normal-stress difference/second normal-stress function (3.7)

$\boldsymbol{t}$ površinsko opterećenje/vektor naprezanja
traction (1.1)

$\tan\delta$ faktor gubitaka/tangens gubitaka
loss factor/loss tangent (5.11)

W funkcija pohranjene energije
stored energy function (4.1)

$\boldsymbol{W}$ tenzor vrtložnosti
vorticity tensor (1.13)

y progib zbog savijanja
flexural deflection (6.9)

β konstanta prigušenja (krivulje prigušenja)
decay constant (of a damping curve) (6.2, 6.3)

$\Delta\nu$ širina krivulje rezonancije
width of the resonance curve (6.13)

γ smik/smična deformacija
shear/shear strain (2.8)

$\dot{\gamma}$ smična brzina
shear rate (2.13)

γ_0 amplituda deformacije (kod prisilnog titranja)
strain amplitude (of a forced oscillation) (5.10)

$\dot{\gamma}_E$ brzina rastezne deformacije/brzina produljne deformacije
elongational strain rate/extension strain rate (2.12)

γ^* kompleksna deformacija (kod prisilnog titranja)
complex strain (of a forced oscillation) (5.15, 5.19)

$\dot{\gamma}^*$ kompleksna brzina deformacije (kod prisilnog titranja)
complex rate of strain (of a forced oscillation) (5.22)

δ fazni kut (kod prisilnog titranja)/kut gubitaka kod prisilnog titranja
phase angle (of a forced oscillation)/loss angle of a forced oscillation (5.10)

ε jednoosna deformacija/inženjerska deformacija/(jednoosna) rastezna deformacija/(jednoosna) tlačna deformacija
uniaxial strain/engineering strain/(uniaxial) tensile strain/(uniaxial) compressive strain (2.4)

$\boldsymbol{\varepsilon}$ tenzor malih deformacija
small-strain tensor (1.10)

ε_H Henckyeva deformacija
Hencky strain (2.5)

ε_{lat} poprečna deformacija
lateral strain (2.6)

η smična viskoznost/koeficijent viskoznosti/viskoznost
shear viscosity/coefficient of viscosity/viscosity (4.12)

η' dinamička viskoznost
dynamic viscosity (5.20)

η'' izvan-fazna viskoznost
out-of-phase viscosity (5.21)

η_{app} prividna viskoznost
apparent viscosity (4.12)

η_E rastezna viskoznost/produljna viskoznost
extensional viscosity/elongational viscosity (4.9)

η_0 nulta smična viskoznost
zero shear viscosity (4.12)

η^* kompleksna viskoznost
complex viscosity (5.22)

η_∞ beskonačna smična viskoznost
infinite-shear viscosity (4.12)

λ omjer jednoosne deformacije/deformacijski omjer/omjer istezanja/omjer stlačivanja
uniaxial deformation ratio/deformation ratio/extension ratio/compression ratio (2.3)

λ_i gradijenti deformacije/deformacijski omjeri; $i = 1, 2, 3$
deformation gradients/deformation ratios; $i = 1, 2, 3$ (2.1)

Λ logaritamsko sniženje (krivulje prigušenja)
logarithmic decrement (of a decay curve) (6.5)s

μ Poissonov omjer
Poisson's ratio (2.6)

ν frekvencija prigušenja (krivulje prigušenja)
decay frequency (of a damping curve) (6.4)

ν_R frekvencija rezonancije
resonance frequency (6.12)

σ rastezno naprezanje
tensile stress (3.2)

σ tlačno naprezanje
compressive stress (3.3)

σ inženjersko naprezanje
engineering stress (3.4)

σ_{ii} normalna naprezanja; $i = 1, 2, 3$
normal stresses; $i = 1,2,3$ (3.5)

σ_0 amplituda naprezanja (kod prisilnog titranja)
stress amplitude (of a forced oscillation) (5.10)

σ_{12} smično naprezanje
shear stress (3.5)

$\boldsymbol{\sigma}$ naprezanje/tenzor naprezanja/
stress/stress tensor (1.2, 3.1, 3.5)

σ^* kompleksno naprezanje (kod prisilnog titranja)
complex stress (in a forced oscillation) (5.15, 5.19, 5.22)

τ relaksacijsko vrijeme/retardacijsko vrijeme
relaxation time (5.6)/retardation time (5.8)

χ deformacija pri obujamnom stlačivanju
bulk compression/volume compression/isotropic compression/bulk compressive strain (2.9)

ψ_1 prvi koeficijent normalnog naprezanja
first normal-stress coefficient (4.13)

ψ_2 drugi koeficijent normalnog naprezanja
second normal-stress coefficient (4.14)

$\psi(t)$ funkcija puzanja
creep function (5.9)

$\overline{\psi}(t)$ relaksacijska funkcija
relaxation function (5.7)

ω kutna brzina (kod prisilnog titranja)
angular velocity (of a forced oscillation) (5.10)

ω kutna brzina (frekvencije prigušenja)
angular velocity (of a decay frequency) (6.2)

ω_R kutna brzina frekvencije rezonancije (pri prisilnom savojnom titranju)
angular velocity of the resonance frequency (of a forced flexural oscillation) (6.7)

ABECEDNO KAZALO NAZIVA

SUMMARY

Definition of Terms Relating to Non-Ultimate Mechanical Properties of Polymers

(IUPAC Recommendations 1998)

D. Kozak[a] and M. Lucić[b]

The basic definitions of terms related to the elastic and viscoelastic behaviour of different kinds of bulk polymers, which are often in everyday use, have been given clearly in this IUPAC Recommendations. The document gives basic explanations of physical quantities with corresponding mathematical expressions for elastic solids, such as stress tensor, deformation tensor, deformation gradient, deformation ratio, shear of an elastic solid etc., but also for viscoelastic liquids or solids, such as deformation or flow of a viscoelastic liquid or solid, rate-of-strain tensor, vorticity tensor, shear flow, etc. Also given are constitutive equations for an elastic solid and for an incompressible viscoelastic liquid or solid. Important measures connected to stresses with appropriate deformations, such as tensile and shear modulus, compliance and viscosity are also considered in the paper. Special attention has been paid to the viscoelastic behaviour of liquid or solid. The Maxwell and Voigt-Kelvin model have been analyzed in details. Terms relating to viscoelastic behaviour of liquid or solid when constant stress or deformation has been applied, such as relaxation time, retardation time and creep, have been defined. When forced oscillation is present in the viscoelastic material, characteristic parameters, such as loss factor, storage modulus, storage compliance, dynamic viscosity etc., have been discussed. The last chapter deals with stresses and deformations in solids exposed to the free or forced oscillations. The basic terms, such as damping curve, decay constant and frequency, resonance frequency and resonance curve have been explained for the case of torsion pendulum and three-point bending tests.

[a] *Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2 HR-35000 Slavonski brod, Hrvatska*

[b] *Državni inspektorat, Područna jedinica Osijek, Ispostava – Odsjek inspekcijskog nadzora u Slavonskom brodu, Ulica Petra Krešimira IV br. 1 HR-35000 Slavonski brod, Hrvatska*

Received April 21, 2008
Accepted July 13, 2009