



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK

Tézisfüzet

a Gépészeti Tudományok PhD programban benyújtott

Térfogatilag összenyomható anyagok konstitutív modellezése viszkoelasztikus-viszkoplasztikus hatások esetén

című disszertációhoz

Szerző:

Berezvai Szabolcs

Témavezető:

Dr. Kossa Attila, egyetemi docens

Benyújtva a

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Pattantyús
Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskolája számára

Budapest, 2020

A disszertáció áttekintése

A modern polimer anyagok mechanikai viselkedése különféle típusú jelenségeket mutathat egyszerű terhelési esetekben is, mint például kúszás, feszültség relaxáció, viszkózus folyás és maradó deformációk. Az anyagmodellezés (vagy konstitutív modellezés) folyamatának célja e jelenségek matematikai leírása és összetett terhelési esetekben az anyagi viselkedés előrejelzése. A külső hatásokra adott anyagi válasz modellezésének két fő megközelítése létezik: a mikromechanikai és a fenomenológiai modellezés.

A mikromechanikai (vagy mikrostrukturális) modellek az eredő anyagi választ a lokális anyagi viselkedés és interakciók alapján becsülik meg, ideértve a monomerek atomi szintű kölcsönhatásait és deformációs mechanizmusait valamint a láncmolekulák kölcsönhatását molekuláris szinten. Ezzel szemben a fenomenológiai modellezési megközelítés elősorban a mérhető makroszkopikus mennyiségek (pl. feszültség, alakváltozás, hőmérséklet, deformációsebesség) közötti megfelelő matematikai összefüggések felírásán alapul, a modellezni kívánt jelenségekre vonatkozó mérési adatok felhasználásával. Ugyanakkor, ezek a modellek nem képesek az anyag makroszkopikus viselkedését meghatározó mikromechanikai deformációs mechanizmusok leírására.

A polimerek mechanikai viselkedése általában nagy alakváltozásokkal és nagy deformációkkal jár, erősen nemlineáris hatásokkal kombinálva. Ezért, az ilyen jellegű mechanikai viselkedés leírásához, véges alakváltozások (vagy nagy alakváltozások) elméletén alapuló kontinuummechanikai megközelítés szükséges. A nemlineárisan rugalmas viselkedés mellett a polimerek deformációi gyakran mutatnak lineáris vagy nemlineáris sebességfüggő, illetve lineáris vagy nemlineáris folyási tulajdonságokat. A kereskedelmi végelemek szoftverekben (ABAQUS, ANSYS, MSC MARC) rendelkezésre álló konstitutív modellek (rugalmas, viszkoelasztikus, viszkoplasztikus) hatékonyan alkalmazhatók fémek véges rugalmas alakváltozások esetén érvényes deformációinak pontos numerikus modellezésére. Ezeknek az anyagmodelleknek természetesen vannak korlátai, de a tudományos és mérnöki közösség széles körben elfogadja és al-

kalmazza azokat. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a polimerek véges alakváltozásokkal, viszkoelasztikus és viszkoplasztikus tulajdonságokkal járó viselkedését leíró, általános érvényű anyagmodell nem létezik, ezért a szakirodalomban általában saját konstitutív modelleket fejlesztenek a vizsgált anyag mechanikai viselkedése alapján. A polimerek nemlineáris viszkoelasztikus-viszkoplasztikus viselkedésének modellezésének általánosan alkalmazott módszere az úgynevezett hiperelasztikus konstitutív egyenlet kombinációja a nemlineáris viszkózus és képlékeny hatásokat jellemző reológiai alapelemekből álló hálózattal. A hiperelasztikus modellezési megközelítés eleinte gumyszerű anyagok esetére lett fejlesztve, amelyeket teljesen (vagy közel) összenyomhatatlannak tekinthetünk. Azóta számos összenyomható hiperelasztikus anyagmodell került publikálásra a szakirodalomban. Számos polimer azonban jelentős térfogati deformációt mutat, amelyet általában az alakváltozási energiasűrűségfüggvény volumetrikus taggal történő kiegészítésével közelíthetünk. A szakirodalomban és kereskedelmi vége-selemes szoftverekben, a véges alakváltozások esetén értelmezett összenyomható hiperelasztikus anyagmodellek száma korlátozott, míg az iparban jelentős az igény az ilyen anyagi viselkedés pontos modellezésére.

A disszertáció témája a különféle viszkoelasztikus és viszkoplasztikus tulajdonságokat mutató polimer anyagok mechanikai modellezése véges alakváltozások esetén. Három alapvető konstitutív modellezési megközelítést vizsgáltam és kombináltam: összenyomható hiperelasztikus, viszkoelasztikus és viszkoplasztikus. A hiperelasztikus konstitutív modelleket nemlineárisan rugalmas deformációk modellezése esetén alkalmazhatjuk véges alakváltozások esetén. A viszkoelasztikus megközelítést akkor alkalmazhatjuk, ha az anyagi viselkedést leíró egyenletek és az anyagi viselkedés deformációsebesség-függő viselkedést vagy „memória-hatást” mutat maradó alakváltozások nélkül. Végül a viszkoplasztikus anyagmodelleket azokra az anyagokra alkalmazhatunk, amikor a képlékeny folyás is deformáció-sebesség-függő. Doktori értekezésemben mindhárom modellezési megközelítést vizsgáltam valós mérnöki problémákhoz kötődő példák és esettanulmányok alapján.

A dolgozatban bemutatott tézisek a nemzetközi tudományos eredményekhez a kidolgozott kísérleti, elméleti és numerikus alapon nyugvó anyagmodellezési eljárások, valamint a nyílt- és zárt-cellás polimer habok, a mikrocellás hőre lágyuló polimer habok valamint a polimer airsoft golyó mechanikai leírására vonatkozó anyagmodellek ismertetésével járul hozzá. Az ilyen anyagok mechanikai modellezése aktívan kutatott terület, széleskörű felhasználásuk és ipari jelentőségük miatt. A dolgozat elsődleges motivációja olyan fenomenológiai modellek, paraméter-illesztési algoritmusok és stratégiák kidolgozása volt, amelyek hatékonyan alkalmazhatók valós mérnöki feladatok megoldása során, és további kutatások alapjául szolgálhatnak. A dolgozat további célja a bemutatott modellek alkalmazhatóságának és az anyagi viselkedés összetett terhelési esethez kapcsolódó becslésének vizsgálata. E célból dolgozatomban részletes kísérleti validációs módszereket is kidolgoztam és javasoltam.

Modellezési módszerek

Az első vizsgált mérnöki probléma a nyílt- és zárt-cellás polimer habok tisztán rugalmas modellezése az Ogden–Hill-féle összenyomható hiperelasztikus (vagy Hyperfoam) anyagmodell használatával. Ezt a modellt széles körben alkalmazzák habok modellezésére, és az ABAQUS szoftverben is implementálásra került. Ugyanakkor az anyagmodellezést jelentősen befolyásolják a keresztirányú hatások, amelyekről leggyakrabban eltekintenek. A dolgozat ezen részében részletes, mechanikai nyomóméréseket és képfeldolgozási módszereket is tartalmazó kísérleti munka alapján elemeztem a modellezési eljárásokat és tettem javaslatot új algoritmusokra (*1. tézispont*).

Ezt követően a nyílt cellás habok („memóriahabok”) deformációsebesség-függő viselkedésével foglalkoztam, amely során egy véges alakváltozások esetén alkalmazott viszko-hiperelasztikus anyagmodellt javasoltam a korábban ismertetett Hyperfoam anyagmodell alapján. Az anyagmodell zárt-alakú feszültség válaszának bevezetését követően (*2. tézispont*), azok alkalmazhatóságát vizsgáltam a paraméter-illesztési eljárásban, ami jelentősen javítja az illeszté-

si pontosságot a szakirodalomban elérhető szétválasztható eljárásokkal szemben. A zárt-alakú illesztési módszer előnyeit az ágy-matracokban alkalmazott memóriahabok esettanulmányán keresztül szemléltettem és elemeztem (*3. tézispont*).

A következő mérnöki feladat a világítástechnikában alkalmazott, hőre lágyuló mikrocellás polietilén-tereftalát hab (MC-PET) anyagmodellezése, amely legfontosabb gyártási eljárása a hőformázás. Ebben az esetben az anyag viselkedése a rugalmas deformációk mellett jelentős deformációssebesség-függő tulajdonságokkal és maradó alakváltozásokkal rendelkezik. Itt az anyagi választ leírására egy párhuzamos viszkoelasztikus-viszkoplasztikus modell került bevezetésre a hőformázás szempontjából jelentős hőmérséklettartományon (*4. tézispont*). A paraméter-illesztési feladathoz egy véges-elemes szimuláción alapuló eljárást alkalmaztam, míg az illesztett anyagmodell validációjára egy benyomódási-teszten és lézeres letapogatáson alapuló eljárást alkalmaztam. Ezen kívül elvégeztem az anyagparaméterek hőmérsékletfüggésének és érzékenységének vizsgálatát is (*5. tézispont*).

Végül az airsoft golyó becsapódása és impulzusgerjesztésként való alkalmazhatósága került vizsgálatra. Ezt a témát a nagy sebességgel forgó szerszámok megfelelő gerjesztési módszereinek hiánya motiválta, hiszen köszönhetően a felmerülő biztonsági kockázatoknak a gerjesztés modális kalapácsokkal megvalósíthatatlan. Az airsoft golyós gerjesztés releváns gerjesztési frekvenciatartományát numerikus szimulációkkal határoztam meg. A mechanikai tesztek alapján az airsoft golyó az MC-PET habokhoz hasonló deformációs mechanizmusokkal rendelkezik. Emiatt a korábbi modellezési módszerek kerültek bővítésre, és az airsoft golyó becsapódásának hatékony alkalmazhatóságát numerikus szimulációkkal is igazoltam (*6. tézispont*).

1. Tézis

Megvizsgáltam a polimer habok tisztán rugalmas viselkedését az Ogden–Hill-féle összenyomható hiperelasztikus anyagmodell segítségével, különös tekintettel jelentős keresztirányú deformációk esetén. Megfogalmaztam egy új, analitikus Drucker-féle stabilitási feltételt a nyílt cellás polimer habok esetére, valamint kísérleti úton vizsgáltam egy zárt-cellás polietilén hab konstitutív modellezését egytengelyű és kéttengelyű mechanikai nyomómérések valamint képfeldolgozás alapján. Javaslatot tettem új paraméterillesztési stratégiákra, amelyek az egytengelyű keresztirányú nyúlás egyszerűsítésén, valamint kéttengelyű esetben annak becslésén alapulnak. Az ABAQUS végeleemes szoftver paraméterillesztő algoritmusával történő összehasonlító elemzést követően az alábbi tézis mondható ki.

A) Tekintsük az N -ed rendű Ogden–Hill-féle hiperelasztikus (Hyperfoam) anyagmodellt olyan anyagok esetére, amelyeknél a keresztirányú deformációk elhanyagolhatók (pl. nyílt cellás polimer habok). Ekkor, a hiperelasztikus paraméterre vonatkozó $\beta_i = 0$ feltételből következik, hogy az anyag megfelel a Drucker-féle stabilitás $d\tau : dh > 0$ feltételének akkor és csak akkor, ha a μ_i és α_i hiperelasztikus paraméterek kielégítik a

$$\sum_{i=1}^N \mu_i \lambda_k^{\alpha_i} > 0, \quad k = 1, 2, 3$$

feltételt, bármely tetszőleges deformációhoz tartozó valamennyi λ_k főnyúlás esetén.

B) A jelentős keresztirányú hatásokkal rendelkező, zárt-cellás polimer habok Ogden—Hill-féle hiperelasztikus (Hyperfoam) anyagmodellel történő paraméterillesztése esetén

közelítse az λ_T^{UN} egytengelyű keresztirányú megnyúlást a

$$\lambda_T^{\text{UN}} = \lambda^{-\nu^*},$$

összefüggés, amelyben ν^* az ún. véges alakváltozások esetére általánosított Poisson-tényező, míg λ a terhelési irányhoz tartozó megnyúlás. Ebben az esetben a λ_T^{EB} kéttengelyű keresztirányú megnyúlás közelíthető az egytengelyű keresztirányú megnyúlás segítségével, mint

$$\lambda_T^{\text{EB}} = 2\lambda_T^{\text{UN}} + 1.$$

A fenti közelítés segítségével az anyagparaméterillesztés pontossága jelentősen javítható, amennyiben az optimalizációs kritériumot az egytengelyű mérési adatok mellett, kéttengelyű mérési adatokra is előírjuk, mint

$$Q = Q_1^{\text{UN}} + Q_T^{\text{UN}} + Q_1^{\text{EB}} + Q_T^{\text{EB}},$$

amelyben Q_1^{UN} és Q_1^{EB} a terhelési irányhoz tartozó feszültség-bebecslés hibája, míg Q_T^{UN} és Q_T^{EB} a zérus keresztirányú feszültség hibája.

Kapcsolódó publikációk [1],[2],[3]

2. Tézis

Megvizsgáltam a polimer habok véges alakváltozásokkal járó viszkoelasztikus viselkedését az általánosított Standard Solid modell viszko-hiperelasztikus kiterjesztésével és a Hyperfoam modellel történő összekapcsolásával. Levezettem a fenti anyagmodell feszültség-megoldását feszültség relaxációs "ramp" teszt esetén gátolt homogén terhelési esetekben, valamint nyílt-cellás polimer habok esetén, ahol a keresztirányú hatások elhanyagolhatók. Ez alapján kimondható a következő tézis.

Tekintsük az Abaqus véges alakváltozások esetén érvényes viszko-hiperelasztikus modelljét a

$$\tau^D(t) = \tau_0^D(t) - \text{SYM} \left[\sum_{k=1}^P \frac{g_k}{\tau_k} \int_0^t \mathbf{F}_t^{-1}(t-s) \tau_0^D(t-s) \mathbf{F}_t(t-s) e^{-s/\tau_k} \mathbf{d}s \right],$$

$$\tau^H(t) = \tau_0^H(t) - \sum_{k=1}^P \frac{g_k}{\tau_k} \int_0^t \tau_0^H(t-s) e^{-s/\tau_k} \mathbf{d}s$$

alakban, ahol τ^D és τ^H a deviátoros és hidrosztatikus Kirchhoff-féle feszültségek, míg g_k és τ_k a lineáris feszültség relaxációt jellemző Prony-paraméterek. Amikor a (τ_0^D, τ_0^H) pillanatnyi feszültség választ az Ogden—Hill-féle hiperelasztikus modell írja le, a terhelési- és keresztirányhoz tartozó τ_L és τ_T feszültség válaszok homogén gátolt “ramp” teszt esetén kifejezhetők zárt alakban, mint

$$\tau_L(t) = \begin{cases} \tau_{L0}(t) - \sum_{k=1}^P g_k \left(\sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \eta_{ik} \right) & t \leq T, \\ \tau_{L0}(T) \left(1 - \sum_{k=1}^P g_k \left(1 - e^{-\frac{T-t}{\tau_k}} \right) \right) - \sum_{k=1}^P g_k \left(\sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \vartheta_{ik} \right) & t > T, \end{cases}$$

$$\tau_T(t) = \begin{cases} \tau_{T0}(t) - \sum_{k=1}^P g_k \left(\sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \hat{\eta}_{ik} \right) & t \leq T, \\ \tau_{T0}(T) \left(1 - \sum_{k=1}^P g_k \left(1 - e^{-\frac{T-t}{\tau_k}} \right) \right) - \sum_{k=1}^P g_k \left(\sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \hat{\vartheta}_{ik} \right) & t > T, \end{cases}$$

ahol N és P jelöli a Hyperfoam modell és a Prony-sor rendjét, T a felterhelés idejét, míg $\Gamma[\nu, x]$ az felső-nemteljes Gamma-függvényt. A kifejezésben szereplő $\eta_{ik}, \vartheta_{ik}, \hat{\eta}_{ik}, \hat{\vartheta}_{ik}$ amásodrendű paraméter tenzorok pedig megadhatóak az M terhelési paraméter segítségével, mint

$$\begin{aligned}
\eta_{ik} &= e^{-\frac{t-1/\dot{\varepsilon}}{\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{M\alpha_i\beta_i} \left(\Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1-t\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right) \\
&\quad + e^{-\frac{t+1/\dot{\varepsilon}}{\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{-\alpha_i} \left(\Gamma \left[1 + \alpha_i, -\frac{1+t\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 + \alpha_i, -\frac{1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right), \\
\vartheta_{ik} &= e^{-\frac{t-1/\dot{\varepsilon}}{\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{M\alpha_i\beta_i} \left(\Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1-T\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right) + \\
&\quad + e^{-\frac{-1-\dot{\varepsilon}t}{\dot{\varepsilon}\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{-\alpha_i} \left(\Gamma \left[1 + \alpha_i, \frac{-1-T\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 + \alpha_i, \frac{-1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right), \\
\hat{\eta}_{ik} &= e^{-\frac{t-1/\dot{\varepsilon}}{\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{M\alpha_i\beta_i} \left(\Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1-t\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right) \\
&\quad + 1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}, \\
\hat{\vartheta}_{ik} &= e^{-\frac{t-1/\dot{\varepsilon}}{\tau_k}} \left(\frac{-1}{\dot{\varepsilon}\tau_k} \right)^{M\alpha_i\beta_i} \left(\Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] - \Gamma \left[1 - M\alpha_i\beta_i, \frac{-1-t\dot{\varepsilon}}{\tau_k\dot{\varepsilon}} \right] \right) \\
&\quad + e^{-\frac{t-T}{\tau_k}} - e^{-\frac{t}{\tau_k}}.
\end{aligned}$$

Kapcsolódó publikációk: [1],[4],[5],[6]

3. Tézis

Egy nyílt-cellás memóriahab részletes esettanulmányán keresztül igazoltam, hogy a zárt-alakú feszültség megoldás hatékonyan alkalmazható az anyagparaméterillesztés során. Az illesztés eredményét összevettem a szakirodalomban elérhető szétválasztott illesztési módszerekkel. Ez alapján kimondható az alábbi tézis.

Tekintsük a jelentős viszkoelasztikus és elhanyagolható keresztirányú hatásokkal (vagyis $\beta_i = 0$) rendelkező nyílt-cellás polietilén memória hab anyagparaméterillesztési problémáját az Ogden—Hill-féle hiperelasztikus anyagmodellen alapuló, véges alakváltozások esetén értelmezett

viszko-hiperelasztikus anyagmodell alapján. Ebben az esetben, a $2N$ db Hyperfoam és a $2P$ db Prony-paraméter egy lépésben, nagy pontossággal ($R^2 > 0,98$) illeszthető az egytengelyű feszültség relaxációs teszt („ramp” teszt) adataira a „ramp” tesztre vonatkozó zárt-alakú feszültség-megoldás felhasználásával, szemben az szétválasztott illesztési módszerekkel (pl. Zapas–Phillips, Factor-of-ten, Solvari–Malinen), amelyek jelentős hibát tartalmaznak a „ramp” teszt idealizálásának köszönhetően.

Kapcsolódó publikációk: [1],[4],[5],[6]

4. Tézis

Részletes mechanikai mérési sorozat segítségével kísérleti úton vizsgáltam a mikrocellás polietilén-tereftalát hab anyagi viselkedését széles hőmérséklettartományon. Javaslatot tettem egy párhuzamos viszkoelasztikus-viszkoplasztikus anyagmodellre, amely a teljes hőmérséklettartományon pontosan modellezi az anyagi viselkedést. Továbbá egy bemutattam egy benyódási-teszten alapuló validációs eljárást az illesztett anyagmodell nem-homogén deformációk és összetett geometriák esetén történő ellenőrzésére. Az bemutatott anyagmodell alkalmazhatóságának és pontosságának vizsgálatát követően az alábbi tézispont mondható ki.

A hőre lágyuló (termoplasztikus) mikrocellás polietilén-tereftalát hab anyagi viselkedése jelentős rugalmas, sebességfüggő és maradó deformációkat mutat a hőformázás szempontjából releváns 21–210 °C-os hőmérséklet-tartományon.

A fenti anyagi viselkedés a teljes hőmérséklet-tartományon hatékonyan modellezhető egy párhuzamos kialakítású viszkoelasztikus-viszkoplasztikus anyagmodell segítségével véges alakváltozások esetén, ahol a viszkoelasztikus tulaj-

donságok nemlineáris alakváltozás- valamint idő-szerint keményedő kúszási hatványfüggvényel, míg a folyási viselkedés lineáris, izotrop keményedő és Mises-féle képlékenységi feltételen alapuló társított folyási törvénnyel írhatók le. Az anyagmodell érzékenysége a hőmérséklet emelkedésével jelentősen növekszik.

Egytengelyű terhelés esetén az alakváltozás- és idő-szerint keményedő kúszási törvények pontossága csak elhanyagolható eltérést mutat, míg az anyagmodell elfogadható hibával ad becslést a benyomódás-tesztek erő-elmozdulás karakterisztikájára is.

Kapcsolódó publikációk: [7],[8],[9],[10]

5. Tézis

Részletes mechanikai mérési sorozat alapján elvégeztem a mikrocéllás polietilén-tereftalát hab anyagi konstitutív modellezését széles hőmérséklet-tartományon. A végeselemes szimuláción alapuló paraméterillesztési eljárás segítségével meghatároztam a párhuzamos viszkoelasztikus-viszkoplasztikus anyagmodell paramétereit valemennyi vizsgált hőmérséklet esetén. Az anyagparaméterek hőmérsékletfüggő viselkedésének leírására analitikus függvényeket vezettem be. Ez alapján kimondható az alábbi tézis.

Tekintsük a hőre lágyuló mikrocéllás polietilén-tereftalát hab viselkedését modellező párhuzamos kialakítású viszkoelasztikus-viszkoplasztikus anyagmodellt, amely egy lineárisan keményedő, Mises-féle képlékenységi feltételen alapuló rugalmas-képlékeny ág és egy nemlineáris idő és alakváltozás szerint keményedő hatványfüggvény alakú kúszással leírt Maxwell-modell párhuzamos kombinációja. Az anyagmodellben szereplő anyagparaméterek, vagyis az E rugalmassági modulus, σ_{y0} kezdeti folyáshatás, H keményedési modulus, f_e rugalmas részarány, A kúszási együttható,

valamint n és m kúszási exponensek hőmérséklet függése leírható a T aktuális hőmérséklet függvényeként valamint a T_g üvegesedési átmeneti hőmérséklet segítségével monoton, folytonos függvényekkel az alábbi alakban:

$$\begin{aligned}
 E(T) &= E_1 \arctan(E_2(T - T_g)) + E_3, \\
 H(T) &= H_1 \arctan(H_2(T - T_g)) + H_3, \\
 n(T) &= n_1 \arctan(n_2(T - T_g + n_3)) + n_4, \\
 m(T) &= m_1 \arctan(m_2(T - T_g + m_3)) + m_4, \\
 \sigma_{y0}(T) &= \begin{cases} Y_2(T - T_g)^2 + Y_1(T - T_g) + Y_0, & T \leq T_g \\ Y_3(T - T_g) + Y_0, & T > T_g \end{cases}, \\
 A(T) &= \begin{cases} A_1(T - T_g) + A_0, & T \leq T_g \\ A_3(T - T_g)^2 + A_2(T - T_g) + A_0, & T > T_g \end{cases}, \quad \text{és} \\
 f_e(T) &= \begin{cases} f_{e1}(T - T_g) + f_{e0}, & T \leq T_g \\ f_{e2}(T - T_g) + f_{e0}, & T > T_g \end{cases}.
 \end{aligned}$$

Kapcsolódó publikációk: [7],[8],[10]

6. Tézis

Az airsoft golyón elvégzett kvázi-statisztikus mechanikai mérések alapján kimutattam, hogy az anyagi viselkedése viszkózus-rugalmas-képlékeny tulajdonságokat mutat. A golyó becsapódásának explicit dinamikai szimulációjához bevettem a párhuzamos viszkoelasztikus-viszkoplasztikus anyagmodell pillanatnyi és végtelen-lassú deformációsebességhez tartozó rugalmas-képlékeny határmodelljeit. Az anyagmodell validálását gyorskamerás felvételek és az impulzus gerjesztés összehasonlító vizsgálatával végeztem el. Az airsoft golyó és a modális kalapácsok teljesítményének összehasonlítása alapján az alábbi tézis mondható ki.

Az impulzus gerjesztésként alkalmazott polimer airsoft golyó becsapódása során viszkózus-rugalmas-képlékeny deformációkkal rendelkező mechanikai viselkedést mutat, amely hatékonyan modellezhető párhuzamos viszkoelasztikus- viszkoplasztikus anyagmodell segítségével. Az ütközés karakterisztikája becsülhető az anyagmodell pillanatnyi és végtelen-lassú rugalmas-képlékeny határmodelljei alapján explicit dinamikai végeleemes szimuláció segítségével. Az airsoft golyó alkalmazhatóságának határa, mint impulzus gerjesztési módszer, megadható a ^{rel}f releváns frekvencia segítségével, amely az a legnagyobb f frekvencia, amelyre

$$\log |\Phi_{rel}(\omega)| > -1.5,$$

teljesül, minden $\omega \in [0, 2\pi f]$, esetén, ahol

$$\Phi_{rel}(\omega) = \frac{|\Phi(\omega)|}{\max_{\omega \geq 0} |\Phi(\omega)|},$$

a becsapódási erőspektrum. A bemutatott módszer 24 kHz-es frekvenciáig biztosít optimális gerjesztést HIPS golyó esetén, amely jelentősen magasabb, mint a klasszikus gumi-, polimer- és fémfejű modális kalapácsokkal történő gerjesztés határa. A v becsapódási sebesség növelésével a releváns frekvenciatartomány a

$$^{rel}f(v) = c_2v + c_1\sqrt{v} + c_0,$$

összefüggés szerinti monoton növekedő karakterisztikát mutat, ahol az összefüggésben szereplő c_0 , c_1 és c_2 konstansok kísérleti úton meghatározhatók különböző golyók esetére.

Kapcsolódó publikációk: [11],[12],[13],[14]

Irodalomjegyzék

- [1] S. Berezvai and A. Kossa. Closed-form solution of the Ogden–Hill’s compressible hyperelastic model for ramp loading. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 21(2):263–286, 2016.
- [2] S. Berezvai and A. Kossa. Effect of the skin layer on the overall behavior of closed-cell polyethylene foam sheets. *Journal of Cellular Plastics*, 52(2):215–229, 2015.
- [3] A. Kossa and S. Berezvai. Novel strategy for the hyperelastic parameter fitting procedure of polymer foam materials. *Polymer Testing*, 53:149–155, 2016.
- [4] A. Kossa and S. Berezvai. Visco-hyperelastic characterization of polymeric foam materials. *Materials Today: Proceedings*, 3(4):1003–1008, 2016.
- [5] S. Berezvai and A. Kossa. Memóriahabok mechanikai modellezése. *XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Déva, Románia*, pages 47–50, 2006.
- [6] S. Berezvai and A. Kossa. Nonlinear viscoelastic characterization of polymeric foams. *Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2016.
- [7] S. Berezvai and A. Kossa. Performance of a parallel viscoelastic-viscoplastic model for a microcellular thermoplastic foam on wide temperature range. *Polymer Testing*, 84:106395, 2020.
- [8] S. Berezvai and A. Kossa. Characterization of a thermoplastic foam material with the two-layer viscoplastic model. *Materials Today: Proceedings*, 4(5):5749–5754, 2017.
- [9] S. Berezvai, A. Kossa, and A. K. Kiss. Validation method for thickness variation of thermoplastic microcellular foams using punch-tests. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [10] S. Berezvai and A. Kossa. Vizskózus-rugalmas-képlékeny anyagmo-

- dellek vizsgálata mikrocellás polimer hab hőformázása esetén. *XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc*, 2019.
- [11] S. Berezvai, A. Kossa, D. Bachrathy, and G. Stepan. Numerical and experimental investigation of the applicability of pellet impacts for impulse excitation. *International Journal of Impact Engineering*, 115:19–31, 2018.
- [12] S. Berezvai, A. Kossa, and G. Stepan. Airsoft lövedék viszkózusrugalmas-képlékeny ütközésének szimulációja és alkalmazása. *XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, Marosvásárhely, Románia*, pages 39–42, 2018.
- [13] S. Berezvai, A. Kossa, and G. Stepan. Nonlinear material modelling of an airsoft pellet applied for impulse excitation. *European Nonlinear Oscillations Conference, Budapest, Hungary*, 2017.
- [14] S. Berezvai, A. Kossa, and G. Stepan. Investigation of the performance of the two-layer viscoplastic model applied for simulating airsoft ball impacts. *Computational Plasticity Conference, Barcelona, Spain*, 2017.

Publikációs besorolás

Folyóiratcikk: [1], [2], [3], [7], [11]

Konferenciatickk: [4], [8], [9]

Konferenciatickk magyar nyelven: [5], [12]

Konferencia absztrakt: [6], [13], [14]

Konferencia absztrakt magyar nyelven: [10]

