

# Modeliranje nelinearne viskoelastične nanoindentacije PVAc pri različnih hitrostih razbremenjevanja

Yilmaz Kucuk

Univerza Bartin, Fakulteta za strojništvo, Turčija

Nelinearno viskoelastično vedenje polimernih materialov se v zadnjih letih preizkuša predvsem z metodo nanoindentacije. Nanoindentacija, znana tudi kot vtiskavanje z zaznavanjem globine, je učinkovita tehnika za merjenje lokalnih mehanskih lastnosti na mikro- in nanoravni. Oliver in Pharr sta razvila pristop za merjenje mehanskih lastnosti, kot sta modul elastičnosti in trdote brez neposrednega opazovanja projicirane površine vtiska. Doerner in Nix sta nakazala, da je trdoto in modul elastičnosti mogoče izračunati tudi iz podatkov obremenilne krivulje in naklona razbremenilne krivulje.

Tehnika nanoindentacije se je dobro uveljavila pri izotropnih materialih, ki niso časovno odvisni. V zadnjih letih pa je vse več zanimanja tudi za analizo odziva viskoelastičnih materialov pri nanoindentacijskem preizkusu. V tej študiji je bila uporabljena tehnika nanoindentacije za določitev nelinearnega viskoelastičnega vedenja polivinil acetata (PVAc) s temperaturo steklastega prehoda 29 °C. Podatki nanoindentacijskega preskusa so sestavljeni iz dveh glavnih delov: obremenitve in razbremenitve. Večina analitičnih študij polimerov se je ukvarjala samo z obremenitvenim delom odziva viskoelastičnih materialov, čeprav se veliko informacij skriva tudi v razbremenitvenem delu odziva. Oliver-Pharrov metoda npr. ni primerna za razne polimere zlasti če krivulja razbremenitve pri analizi rezultatov nanoindentacije izkazuje negativno togost oz obliko nosu. Ta problem se pojavlja zlasti pri majhnih hitrostih obremenjevanja in razbremenjevanja, ki se uporabljajo pri nanoindentaciji viskoelastičnih materialov.

V literaturi je opisanih veliko nelinearnih modelov viskoelastičnosti, noben pa ne pokriva vseh primerov. Modeli materialov so lahko izdelani na osnovi empiričnih opažanj ali fizikalnih zakonitosti. Fizikalne modele za nelinearne viskoelastične materiale je zelo težko razvijati in uporabljati. V tej študiji je bil za izhodišče zaradi enostavnosti in izvedljivosti vzet fenomenološki model po študiji Marina in Paa. Ta model je v splošnem linearnem primeru štiriparametrski Burgersov model, oblikovan z zaporedno vezavo Maxwelllove trdine in Voigtove enote. Burgersov nelinearni viskoelastični model, ki sestoji iz Maxwelllove in Voigtove enote, je bil prirejen za paket ABAQUS-FEA s subrutino aUMAT.

Preskusi nanoindentacije so bili opravljeni z Berkovičevim vtiskalom pri konstantni hitrosti obremenitve in različnih hitrostih razbremenitve. Nabor parametrov nelinearnega Burgersovega modela je bil prilagojen krivulji obremenitev–deformacij pri nanoindentaciji z vršno obremenitvijo 8 mN in hitrosti obremenjevanja/razbremenjevanja 0,05 mN/s, vse nadaljnje simulacije pa so bile izvedene s temi parametri. Po zlaganju krivulj obremenitev–deformacij s simuliranimi odzivi so bili pridobljeni parametri nelinearnih Maxwelllovih in Voigtovih elementov za analizo nelinearnega viskoelastičnega vedenja PVAc.

Rezultati kažejo, da ima PVAc negativno togost pri majhnih hitrostih razbremenitev (0,05 in 0,1 mN/s). Če je hitrost razbremenitve večja od 0,1 mN/s, je vedenje PVAc bolj elastično. Doseženo je bilo dobro ujemanje med simulacijami in eksperimenti nanoindentacije pri različnih hitrostih razbremenitve. Rezultati kažejo, da je z nelinearnim Burgersovim modelom mogoče popisati nelinearno vedenje PVAc pri različnih hitrostih razbremenitve od 0,05 do 0,8 mN/s. Povečanje hitrosti razbremenitve omogoča tudi povečanje zmogljivosti obnovitve vzorca PVAc. Določiti pa je mogoče tudi nelinearne viskoelastične lastnosti PVAc kot so prehodni in stacionarni parametri.

**Ključne besede:** nanoindentacija, nelinearno viskoelastično vedenje, nelinearen Burgersov model, polimer, PVAc, metoda končnih elementov, viskoelastičnost, simulacija