

# Vrednotenje shranjene energije v natezno trajno deformiranih bakrenih vzorcih komercialne čistote na osnovi dislokacijskih modelov deformacijskega utrjevanja in merjenja trdote

Matjaž Čebren<sup>1,\*</sup> – Franc Kosel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hidria Rotomatika, Slovenija, <sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenia

Od fizikalno osnovanih reoloških modelov v osnovi pričakujemo boljši opis mehanskega odziva materiala kot pri fenomenološko tvorjenih zvezah v širšem področju deformacij, hitrosti deformiranja in temperature. Zgodnji dislokacijski modeli so bili osredotočeni na opis tretje faze utrjevalnega procesa, za katero je značilen enakomeren padec stopnje utrjevanja. Zveza med napetostmi in deformacijami je v tem področju opisljiva z enoparametričnimi modeli, v katerih je strižna trdnost kristala odvisna od ene same notranje spremenljivke. Potreba po opisu dodatnih faz utrjevanja zaradi njihovega pomena v tehnoloških procesih izrazitega preoblikovanja kovin in odkritje nastanka celične dislokacijske strukture že kmalu po začetku trajnega deformiranja sta botrovala razvoju dvoparametričnih modelov, v katerih je material obravnavan kot dvofazni kompozit, sestavljen iz dislokacijskih celic z nizko gostoto dislokacij v notranjostih in visoko gostoto dislokacij v celičnih mejah. Modeli deformacijskega utrjevanja podajajo evoliucijske enačbe gostote dislokacij v odvisnosti od strižne deformacije ter zvezo med gostoto in strižno trdnostjo, povezava med mehanskim odzivom kristalov in vrednostmi napetosti in deformacij na velikostnem nivoju polikristaliničnega sestava pa je tvorjena z uporabo modelov deformiranja polikristalov. V prispevku sta dva dislokacijska modela utrjevanja (Bergström-ov in Estrin-ov) uporabljena v povezavi s Taylor-jevimi modelom polikristaliničnega deformiranja za opis napetostno-deformacijske krivulje standardno oblikovanih bakrenih vzorcev pri nateznem preizkusu.

Večina dela, opravljenega pri plastičnem deformiranju kovin, se pretvori v toploto in izgubi ob stiku materiala z okolico, manjši del pa ostane shranjen v materialu v obliki deformacijske energije napetostno-deformacijskega polja dislokacij. Pri enoparametričnih modelih je zveza med strižno trdnostjo kristalov in povprečno gostoto dislokacij enolična, v dvoparametričnih modelih pa lahko različna razporeditev dislokacij podaja isto vrednost strižne trdnosti. Ker imajo različne razporeditve dislokacij tudi različno shranjeno energijo, lahko ob podanem energijskem modelu dislokacijske strukture izmerjene vrednosti energije uporabimo za določanje parametrov ali vsaj za preverjanje dislokacijskih modelov deformacijskega utrjevanja.

Diferenčna dinamična kalorimetrija sodi med dvostopenjske metode termične analize in omogoča spremljanje termodinamičnih sprememb snovi ter merjenje prenosa toplote med procesi v odvisnosti od temperature in časa. Za merjenje shranjene energije v trajno deformiranih bakrenih vzorcih je uporabljen toplotno-tokovni kalorimeter, ki določa razliko v toplotnem toku med vzorcem in referenco z merjenjem temperaturne razlike med njima. Za ocenjevanje vrednosti shranjene energije je predlagana uporaba merjenja trdote, saj je le-ta odvisna od utrditve materiala in posledično od lokalne gostote dislokacij. Ugotovljeno je, da je mogoče zvezo med shranjeno energijo in kvadratom vrednosti meje tečenja pri enosnem obremenjevanju dobro aproksimirati z uporabo linearne enačbe, medtem ko izmerjena odvisnost trdote od meje tečenja s premosorazmerno zvezo ni dovolj dobro opisana.

Dislokacijski modeli deformacijskega utrjevanja postajajo predvsem zaradi dobrih opisnih lastnosti vse bolj razširjeni. V večini primerov uporabe modelov za opis mehanskega odziva konstrukcijskih elementov so materialni parametri prilagojeni le dobremu opisu eksperimentalnega napetostno-deformacijskega odziva, njihova fizikalna osnova pa je pri tem večkrat zanemarjena. Fizikalno osnovani modeli so tako uporabljeni za čisto fenomenološki opis utrjevanja. Določitev natančne vrednosti parametrov tako, da ti ohranjajo zvezo z dejanskimi procesi v materialu, predstavlja enega večjih izzivov na področju fizikalno osnovanih materialnih modelov. Eksperimentalna opredelitev vrednosti nekaterih parametrov je praktično neizvedljiva, študije natančne razporeditve dislokacij v heterogenih strukturah pa so še vedno zelo redke in le pogojno uporabne. Energijski modeli dislokacijske strukture in same meritve shranjene energije so v splošnem preveč nenatančni, da bi lahko preko njih opisali ali zaznali manjše spremembe v dislokacijski strukturi. Prikazana metoda preverjanja dislokacijskih modelov zato ne more predstavljati zamenjave neposrednemu opazovanju razvoja dislokacijske strukture med utrjevanjem ali drugim metodam natančnejšega določevanja gostote dislokacij. Uporabo energijskih modelov tako predlagamo le kot hiter in enostaven način zagotavljanja fizikalno še sprejemljivih vrednosti izračunanih veličin (npr. gostote dislokacij) in ne kot metodo preučevanja podrobnosti dislokacijske strukture.

**Ključne besede:** dislokacije, modeli deformacijskega utrjevanja, plastičnost kristalnih struktur, shranjena energija, kalorimetrija, trdota