

Temeljne mehanske lastnosti konstrukcijskih materialov

Fundamental mechanical properties of structural materials

M. Marinček, Gregorčičeva 11, 61000 Ljubljana

Temeljne mehanske lastnosti so tiste, ki so osnova za nelinearno računalniško simulacijo konstrukcij glede na mejna stanja. Predvsem so izražene s krivuljo odnosa napetost-raztezek pri enoosnem stanju napetosti, dobljenim z nateznim preizkusom. To krivuljo predstavljajo parametri: togost (začetni modul elastičnosti), konec Hookove premice (meja proporcionalnosti ali meja tečenja), oblika krivulje (eksponent utrditve) in konec krivulje (pravi lomni raztezek oziroma natezna lomna duktilnost). Pri nižjih temperaturah, višjih hitrostih raztezkov in neugodnem triosnem stanju napetosti ter drugih vplivih se lahko pojavi krhki lom sicer duktilnih materialov. Degradacijo materiala s časom izrazimo s spremembo navedenih parametrov.

Ključne besede: konstrukcije, mejna stanja, odnos napetost-raztezek, triosnost, zareze, duktilnost

The fundamental mechanical properties of materials are those which are the basis for the nonlinear computer simulation of structures with regard to their limit states. They are presented first of all by the uniaxial stress-strain curve obtained with a tensile test. This curve is expressed with the following parameters: stiffness (initial elastic modulus), the end of the Hook's straight line (proportional limit or yield strength), the shape of the curve (strain hardening exponent) and the end of the curve (true fracture strain and tensile fracture ductility respectively). At lower temperatures, higher strain rates and unfavorable triaxial stress state, brittle fracture of otherwise ductile materials can occur. Degradation of the material with time is expressed with the change of the quoted parameters.

Key words: structures, limit states, stress-strain relationship, triaxiality, notches, ductility

1 Uvod

V industrijsko razvitih državah ocenjujejo, da znaša škoda zaradi zlomov konstrukcij okoli 4% bruto nacionalnega produkta. To bi pomenilo za Slovenijo blizu 40 milijard tolarjev. Z dobrim poznavanjem sodobne mehanike materiala in konstrukcij lahko v znatni meri zmanjšamo takšno škodo, zlasti še, če upoštevamo sedanje izjemne možnosti računalniške simulacije elasto-plastičnega obnašanja konstrukcij, z namenom določanja njihovih mejnih stanj. Le s poznavanjem mejnih stanj konstrukcij lahko racionalno ocenjujemo varnost, zanesljivost in trajnost konstrukcij pri predvidenih obremenitvah.

Računalniška simulacija konstrukcij je osnovana na reševanju treh skupin enačb za napetostne elemente konstrukcij. To so ravnovesni pogoji glede napetosti, kinematični pogoji glede pomikov ter raztezkov in še zakonitost materiala, to je odnos med napetostmi in raztezki. Medtem ko so ravnovesni in kinematični pogoji čisto matematični odnosi, je zakonitost materiala odvisna od laboratorijskih eksperimentov za enoosna, dvoosna in triosna stanja napetosti. Temeljna mehanska lastnost je

predvsem zakonitost pri enoosnem stanju napetosti vse do zloma. Dobimo jo v obliki krivulje z nateznim preizkusom gladkega preizkušanca.

Krivuljo napetost-raztezek lahko izrazimo s štirimi parametri: togost (začetni modul elastičnosti), konec Hookove premice (meja proporcionalnosti ali meja tečenja), oblika krivulje (en sam eksponent utrditve v najenostavnejšem primeru) in konec krivulje (pravi lomni raztezek odnosno natezna lomna duktilnost).

Krivulja napetost-raztezek za enoosno stanje napetosti je osnovni podatek o materialu za računalniško simulacijo mehanskega obnašanja konstrukcij. Parametri te krivulje se spreminjajo s temperaturo, hitrostjo raztezkov, in tudi pod vplivom triosnosti stanja napetosti.

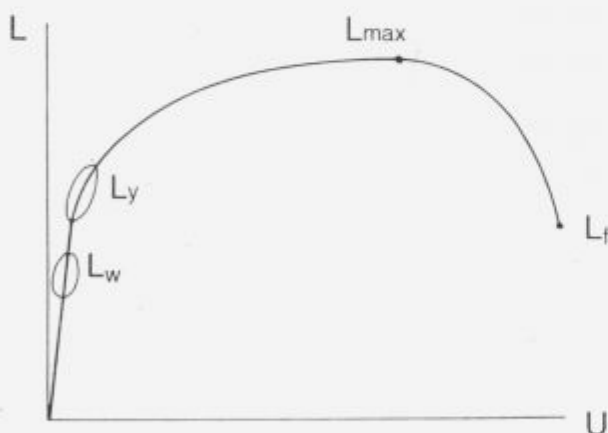
Karakterizacija materiala glede na mehansko obnašanje naj bi zajela vse zgoraj navedene parametre. Z njimi je možno izvesti tudi smotno klasifikacijo materiala glede na mehanske lastnosti. To je še posebno važno pri sedanjem ustvarjanju mednarodnih zbirk podatkov o materialih v zvezi z uporabo pri CAD/CAM. Kemična sestava pove že

precej o materialu. O mehanskem obnašanju nam več odkrije mikrostruktura. Vendar pa so kot osnova za kvantitativno presojo varnosti in zanesljivosti konstrukcij odločilne temeljne mehanske lastnosti materiala. Pri zareznihi učinkih je zelo pomembna natezna lomna duktilnost, ne le pri statični, temveč tudi pri udarni ter ponavljajoči se obremenitvi. Natezna lomna duktilnost je zelo odločilen parameter v korelacijskih enačbah za različne žilavosti v mehaniki loma ter v konstantah materiala v zvezi z utrujanjem in lezenjem. Zelo pomembna je tudi pri plastičnem preoblikovanju.

Znanost o materialih razlaga vzroke za različne lastnosti, ki jih merimo pri mehanski preiskavi materiala. Zato pomeni mehanska preiskava materiala stičišče interesov med znanostjo o materialih in mehaniko kontinuuma.

2 Mejna stanja konstrukcij

Za dano obtežno pot dobimo s pomočjo računalniške simulacije elasto-plastičnega obnašanja konstrukcij kot rezultat pomike, raztezke in napetosti v poljubni točki konstrukcije. Vprašanje je, kaj početi z dobljenimi pomiki, raztezki in napetostmi. Odgovor je v upoštevanju mejnih stanj konstrukcij. Mejna stanja konstrukcij nam pokaže karakteristični diagram obtežba-pomik (slika 1). Na začetku imamo običajno linearno področje z L_w kot delovno obtežbo. Pri L_y se prične opaziti plastični pomik. Pri L_{max} je dosežena največja nosilnost s pripadajočo duktilnostjo konstrukcije. Včasih je važno tudi poznavanje padajočega dela krivulje do dejanskega zloma pri L_f .



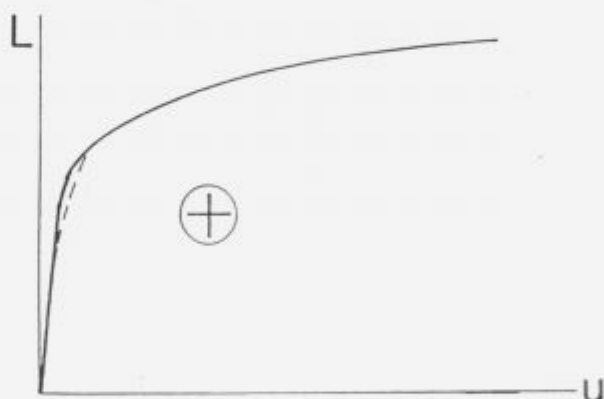
Slika 1: Mejna stanja konstrukcij
Figure 1: Limit states of structures

Pri L_w je pomembno mejno stanje uporabnosti. Določeno je z mejnim elastičnim karakterističnim pomikom ali z omejitvijo nihanja. Modul elastičnosti je tu odločilna mehanska lastnost. Ob uporabi ustreznega faktorja varnosti je mejno stanje uporabnosti možno določiti na osnovi začetka plastičnega poškodovanja L_y ali kar največje nosilnosti L_{max} , vendar tu ob uporabi primerno večjega faktorja varnosti. Začetka plastičnega poškodovanja L_y ne določamo z doseganjem meje proporcionalnosti ali meje tečenja materiala v eni točki, kar upošteva metoda dopustnih napetosti za dimenzioniranje. Pri dimenzioniranju ali ocenjevanju kon-

strukcij po metodi mejnih stanj se dopušča upoštevanje večjih ali manjših plastičnih pomikov in raztezkov, seveda odvisno tudi od vrste obremenitve in namena konstrukcije. Začetka plastičnih deformacij se ni treba bati, če zaradi njih ni zmanjšana nosilnost ali trajnost. Vendar je pri tem za računalniško presojo varnosti potrebno upoštevati nelinearno obnašanje materiala, ki se začne s preseganjem meje proporcionalnosti.

Pri numeričnem določanju največje nosilnosti konstrukcije L_{max} ima nelinearnost materiala še večjo vlogo. Največji nosilnosti pripadajoča duktilnost konstrukcije je lahko zelo pomembna. Pomeni predhodno opozorilo za nevarno stanje, pa tudi važno sposobnost disipacije kinetične energije pri udarni ali seizmični obtežbi. Razmerje med L_{max} in L_y kaže na plastično rezervo nosilnosti.

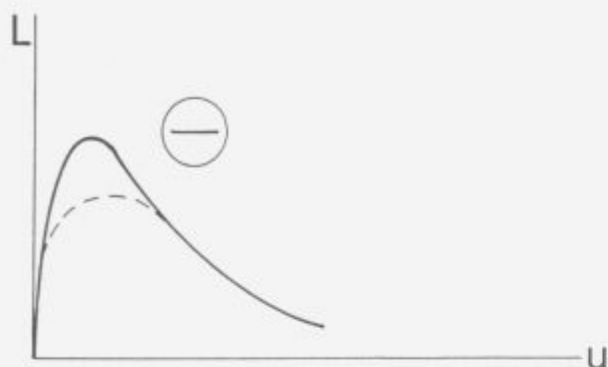
Vpliv zaostalih napetosti na karakteristični diagram za natezno palico iz duktilnega materiala in brez zareznihi učinkov prikazuje slika 2. Zaradi zaostalih napetosti se tu nosilnost ne zmanjšuje, le nekoliko se povečajo pomiki v območju začetka nastajanja neelastičnih deformacij, kot kaže prekinjena črta. Pri krhkih materialih in pri zareznihi učinkih pa imajo lahko zaostale napetosti odločilen neugoden vpliv z zmanjšanjem nosilnosti in deformabilnosti. Tudi pri tlačnih palicah lahko zaostale napetosti znatno zmanjšajo uklonsko nosilnost v obsegu srednjih vitkosti, kot je to razvidno s prekinjeno črto v sliki 3.



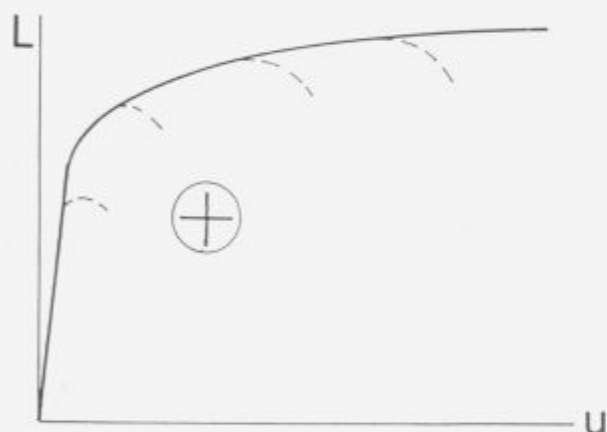
Slika 2: Vpliv zaostalih napetosti pri natezni palici
Figure 2: Influence of residual stresses on a tension bar

Uporaba manj duktilnega materiala v konstrukciji oziroma dopuščanje večje rasti razpoke na kritičnem mestu, npr. zaradi utrujanja ali napetostne korozije, povzroči, da se karakteristični diagram obtežba-pomik spreminja kot kažejo prekinjene črte v sliki 4. Pri tem se ne zmanjšuje le varnost glede na nosilnost, ampak se manjša tudi pripadajoča duktilnost konstrukcije, vse do rabne obtežbe pri L_w , ko se konstrukcija brez preobremenitve poruši.

V primeru uporabe materiala, ki ima značilnosti lezenja (elastoviskoplastičnost), torej večanja deformacij pri stalni obtežbi, se karakteristični diagram konstrukcije obtežba-pomik dopolnjuje s krivuljo pomika v odvisnosti od časa t , tako kot kažeta sliki 5 in 6. V prvem primeru ostane konstrukcija stabilna. V drugem nastopi nestabilnost, npr. za-



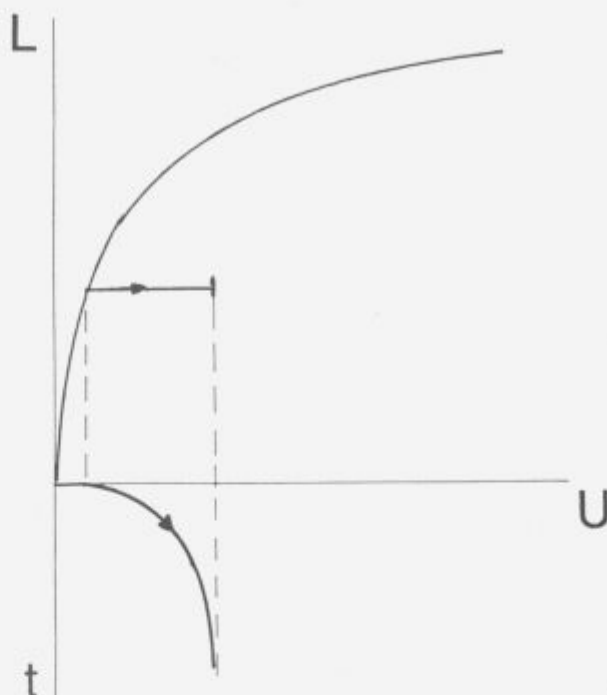
Slika 3: Vpliv zaostalnih napetosti pri tlačeni palici
Figure 3: Influence of residual stresses on compressed bar



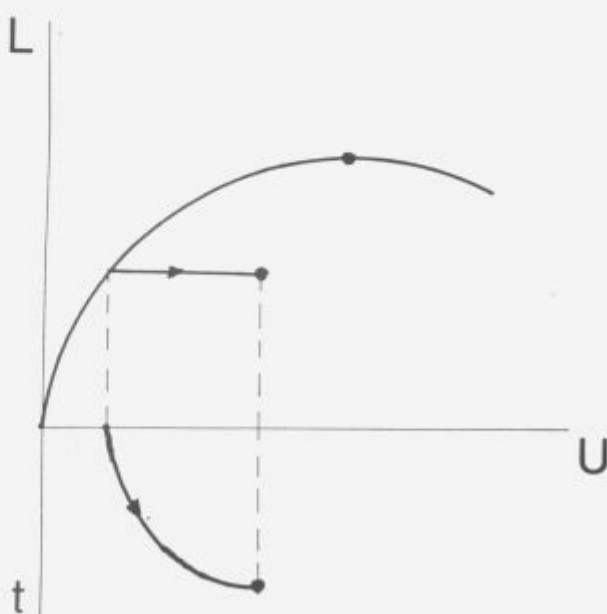
Slika 4: Vpliv rasti razpoke na zmanjšanje nosilnosti in duktilnosti
Figure 4: Influence of crack growth on the decreasing of carrying capacity and ductility

radi geometrijsko nelinearnega obnašanja pri ekscentrični uklonski palici ali zaradi plastične nestabilnosti v nategu.

Na osnovi navedenega o mejnih stanjih konstrukcij je razvidno, da lahko uporabnik presoja konstrukcije pravzaprav le po nosilnosti in deformabilnosti, upoštevajoč pri presoji trajnosti seveda tudi njih spremembe pod vplivom časa. Raztezki in napetosti so zato predvsem pripomočki pri računanju diagramov obtežba-pomik in seveda



Slika 5: Vpliv lezenja - stabilni primer
Figure 5: Influence of creep - case of stability



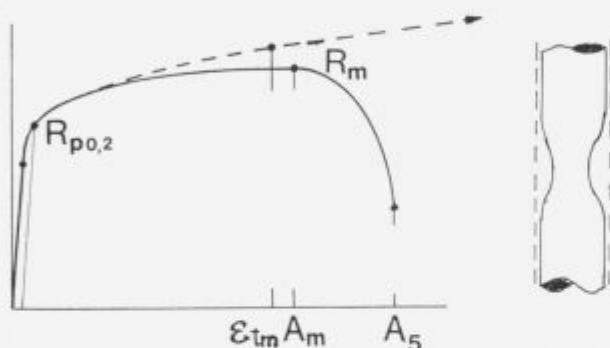
Slika 6: Vpliv lezenja - nestabilni primer
Figure 6: Influence of creep - case of instability

pri karakterizaciji materiala s temeljnimi mehanskimi lastnostmi.

Seveda je pri racionalnem ocenjevanju varnosti in trajnosti konstrukcij primeren tudi probabilistični pristop, tako glede obremenitev kot tudi glede nosilnosti konstrukcij. Tudi tu je potrebno jasno deterministično poznavanje mejnih stanj.

3 Enoosni natezni diagram

Na **sliki 7** je prikazana kontinuirana krivulja napetost-raztezek kot rezultat nateznega preiskusa z gladkim preizkušancem iz duktilnega materiala, ki pri doseganju največje sile pri preizkusu izkazuje lokalno kontrakcijo. Polno izvlečena črta predstavlja nominalni diagram napetost-raztezek, prekinjena pa pravi diagram napetost-raztezek. Pri polno izvlečeni krivulji je nominalna napetost sila, deljena s konstantno začetno površino preseka preizkušanca, in nominalni raztezek se nanaša na znatno merilno dolžino (v Evropi običajno petkratni premer preseka preizkušanca). Pri prekinjeni krivulji v **sliki 7** je prava napetost sila, deljena s pravo površino preseka, ki se zaradi plastične deformacije zmanjšuje, nazadnje z intenzivno lokalno kontrakcijo. Pravi raztezek se nanaša na zelo majhno merilno dolžino na mestu lokalne kontrakcije.



Slika 7: Nominalni in pravi odnos napetost-raztezek
Figure 7: Nominal and true stress-strain relationship

Nominalna napetost R_m je znana kot natezna trdnost. Predstavlja silo plastične nestabilnosti v nategu. Pri tem je pripadajoči enakomerni raztezek A_m mera lomne duktilnosti dolgih nateznih palic, ko lokalna kontrakcija praktično nima vpliva. Nominalni raztezek ob porušitvi žal še vedno služi kot mera lomne duktilnosti, npr. A_5 v **sliki 7**. Za računalniško simulacijo konstrukcij z upoštevanjem velikih plastičnih raztezkov (npr. za plastično preoblikovanje ali za določanje lomnih raztezkov in napetosti pri zarezah) ima povsem neuporabno vrednost, saj predstavlja le povprečje iz enakomernega razteška A_m in zelo spremenljivega pri lokalni kontrakciji. Odvisen je od merilne dolžine. Zato je nominalni raztezek ob porušitvi kot mera lomne duktilnosti neprimeren. Treba ga je zamenjati z enakomernim raztezkom A_m in s pravim lomnim raztezkom A_f . Slednjega dobimo enostavno iz lomne kontrakcije Z_f ob upoštevanju pogoja konstantnosti prostornine pri plastični deformaciji, torej $A_f = Z_f \cdot (1 - Z_f)$. Enakomerni raztezek A_m lahko služi za približni izračun eksponenta utrjevanja prave krivulje napetost-raztezek, medtem ko pravi lomni raztezek določa konec te krivulje. Primerno bi bilo, če bi zaradi enostavnosti in preglednosti rezultat meritev in za karakterizacijo in klasifikacijo materiala uporabljali, tako za enakomerni raztezek kot tudi za lomno duktilnost, vselej le linearni raztezek in ne logaritmičnega.

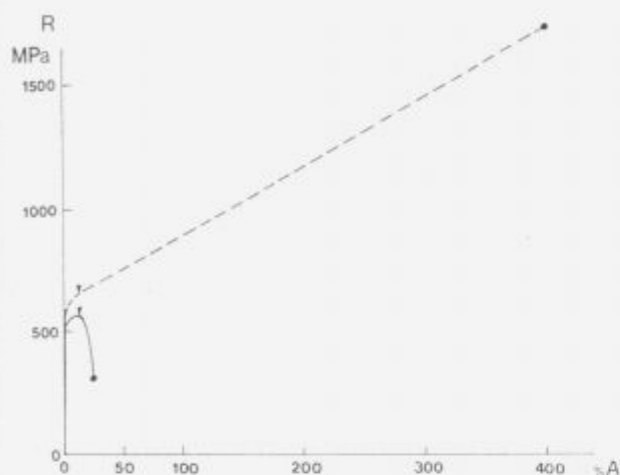
Med nateznim preizkušanjem okrogle palice pri lokalni kontrakciji nastanejo takšna triosna stanja napetosti, da material postane trši. Ta triosnost je odvisna predvsem od najmanjše zakrivljenosti konture kontrakcije. Potrebno je napraviti korekcijo na enoosno stanje. Zlom se začne v sredini prereza, kjer je tudi največja napetost. Pri enaki hitrosti razmikanja glave preizkuševalnega stroja se hitrost raztezkov na najožjem mestu lokalne kontrakcije znatno poveča. Na to vpliva tudi togost stroja. Zaradi pospešene plastične deformacije se poviša temperatura na najbolj zoženem mestu tudi do 200°C . Zato je določanje prave lomne trdnosti R_f s tem da enostavno delimo lomno silo z lomno površino preseka, seveda le približno. Na osnovi mnogih raziskav v svetu, pa tudi pri nas, v zvezi z napetostno deformacijskimi razmerami v območju lokalne kontrakcije pri nateznem preizkusu okroglih preizkušancev bi bilo zelo koristno izdelati napotke za točnejšo presojo prave lomne trdnosti kot tudi prave lomne duktilnosti. Zelo približno lahko ocenimo lomno trdnost tudi z ekstrapolacijo prave krivulje napetost-raztezek na osnovi eksponenta utrjevanja, ki velja za območje enakomernega razteška.

S spremembami opisanih štirih parametrov, ki jih dobimo z nateznim preizkusom, je primerno presojati vpliv toplotne in mehanske obdelave, staranja, nevtronskega sevanja, lezenja, nizkocikličnega utrujanja ipd. Ugotavljamo lahko tudi anizotropijo in nehomogenost materiala, npr. v posameznih toplotno vplivanih conah zvarov.

Splošna tendenca je, da se z večjo trdnostjo materiala prava lomna duktilnost praviloma zmanjšuje. Na to zmanjšanje vplivajo predvsem nečistoče v materialih, to je prisotnost raznih vključkov, ki vplivajo v smislu poroznosti in zato tudi na zmanjšanje lomne duktilnosti. Seveda je važna oblika vključkov in njih orientacija ter razporeditev. Ker imajo vključki zelo verjetno tudi vpliv pri koroziji, eroziji, obrabi, kavitaciji ipd., je primerno, da se pri karakterizaciji materiala s tem v zvezi vselej ugotavlja zlasti še prava lomna duktilnost.

Velik uspeh je napraviti material z visoko trdnostjo in hkrati s čim večjo duktilnostjo. V **sliki 8** sta prikazana nominalni in pravi diagram napetost-raztezek za mikrolegirano jeklo Niomol 490 jeseniške železarne. Prava lomna duktilnost, izražena z linearnim raztezkom, znaša tu kar 400%. To pomeni, da se delček dolžine en milimeter podaljša na pet milimetrov, preden se pretrga. Jasno je, da ima tak material tudi veliko žilavost in zato znatne prednosti pri preobremenitvi ob prisotnosti razpok, npr. zaradi utrujanja.

Velikosti raznih lomnih žilavosti materiala, ugotovljene na preizkušancih različnih geometrijskih oblik, so zelo povezane z lomno duktilnostjo, dobljeno z nateznim preizkusom. Lahko pa rečemo, da je osnovna žilavost materiala, ki je neodvisna od raznih oblik preizkušancev, delo, ki ga predstavlja površina izpod pravega diagrama napetost-raztezek. Zato bi ga kazalo izkazovati pri nateznih preizkusih, zlasti še v zvezi z raziskovanjem v lomni mehaniki in s preoblikovanjem.

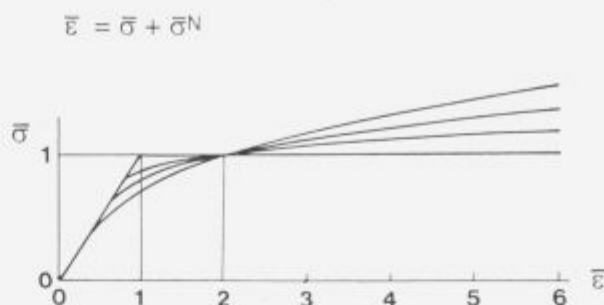


Slika 8: Nominalni in pravi odnos napetost-raztezek za jeklo Niomol 490

Figure 8: Nominal and true stress-strain relationship for Niomol 490 steel

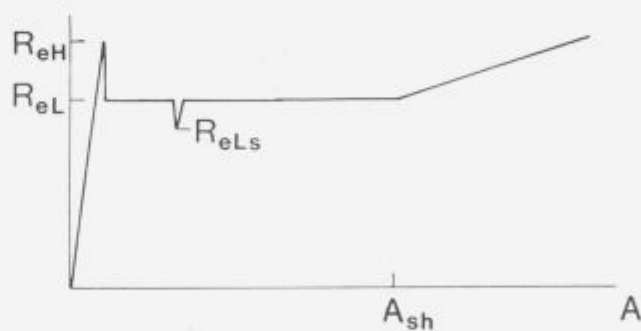
Na sliki 9 so brezdimenzionalni kontinuirani diagrami napetost-raztezek po Ramberg-Osgoodu za različne eksponente utrjevanja. Ti so zelo pripravi za parametrične študije o vplivu eksponenta utrjevanja pri računalniški simulaciji elasto-plastičnega obnašanja konstrukcij, pri problemih z majhnimi, srednjimi in velikimi raztezki. S tem da pri kontinuiranih diagramih zamenjamo običajno mejo tečenja $R_{p0,2}$ s tisto napetostjo, pri kateri sta elastični in plastični raztezek enaka, dobimo brezdimenzionalne diagrame napetost-raztezek z enim samim parametrom, to je z eksponentom utrjevanja N . S tem ko normiramo napetosti s to drugače definirano mejo tečenja, raztezke pa s pripadajočim elastičnim raztezkom, gredo vse krivulje na sliki 9 z različnimi eksponenti utrjevanja skozi skupno točko s koordinatama 1 in 2, neodvisno od meje tečenja in elastičnega modula. Z ustrezno izbiro nekaj reprezentativnih eksponentov utrjevanja N bi se lahko s pomočjo računalniške simulacije karakterističnih elementarnih trdnostnih problemov izdelalo brezdimenzionalne diagrame za normirane poteke pomikov, raztezkov in napetosti, v odvisnosti od normirane obtežbe. Ti diagrami za presojo vpliva eksponenta utrjevanja bi lahko služili kot pripomočki konstruktorjem in tudi pri izobraževanju. Vredno bi jih bilo izdelati z mednarodnim sodelovanjem, potem ko bi se doseglo soglasje o ustrezni izbiri reprezentativnih eksponentov utrjevanja.

Slika 10 prikazuje diagram napetost-raztezek za kovine, ki izkazujejo plastični plato. Tu je meja proporcionalnosti identična z mejo tečenja. Plastični plato je posledica postopnega hipnega nastajanja lokalnih Luderjevih plastičnih pasov pod kotom 45° , ki povzročajo skokovito



Slika 9: Brezdimenzionalen odnos po Ramberg-Osgoodu
Figure 9: Dimensionless relationship according to Ramberg-Osgood

nehomogenost raztezkov vse do začetka utrjevanja. Vsekakor je za karakterizacijo materiala koristno, da se dolžina plastičnega platoja navede v certifikatu o nateznem preizkusu. Dolžina plastičnega platoja lahko doseže tudi do 6% raztežka. Plastični plato je zaradi enostavnosti pogosto uporabljen za matematično modeliranje. Vendar pa je upoštevanje postopnega hipnega širjenja Luderjevih pasov pri računalniški simulaciji dejanskega napetostno-deformacijskega obnašanja izredno komplicirano.

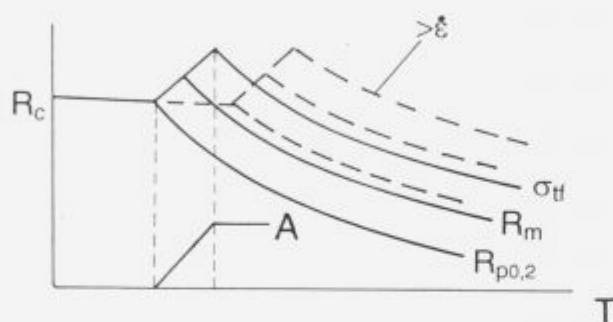


Slika 10: Razmere pri plastičnem platoju

Figure 10: Relations at plastic plateau

Vprašanje je tudi, kaj početi pri računalniški simulaciji z gornjo mejo tečenja R_{eH} . Ta lahko doseže tudi za 60% višjo vrednost od spodnje meje tečenja R_{eL} , če se izvede zelo precizen natezni preizkus. Pri nekoliko ekscentričnosti pa R_{eH} izgine. Torej ima R_{eH} zelo nestabilno vrednost. Zato naj ne služi za izražanje trdnostne stopnje materiala, kar se včasih v literaturi še vedno navaja. Za trdnostne izračune globalnega obnašanja naj se vedno uporablja spodnja meja tečenja R_{eL} . Opozoriti je potrebno, da se lahko R_{eL} pri nateznem preizkusu zniža tudi za 20%, na statično mejo tečenja R_{eLs} , če pri vijačnem nateznem stroju zastanemo z obremenjevanjem.

Osnovni natezni preizkus se izvaja pri sobni temperaturi in pri takšni standardni hitrosti raztezkov, da preizkus ne traja predolgo. Pri nižjih in višjih temperaturah ter pri večjih in manjših hitrostih raztezkov se spreminjajo parametri pravega diagrama napetost-raztezek. **Slika 11** kaže, kako se večajo trdnostne vrednosti enoosnega diagrama napetost-raztezek z nižjo temperaturo in z višjo hitrostjo raztezkov. Pri določenih nižjih temperaturah imamo lahko prehod iz duktilnega v povsem krhko stanje. Na tem prehodu pade plastični lomni raztezek na nič in material se pretrga pri kohezijski trdnosti R_c . Videti je, da je R_c najbolj osnovna trdnostna lastnost materiala, saj je skoraj neodvisna od temperature, hitrosti raztezka in tudi od triosnosti stanja napetosti.



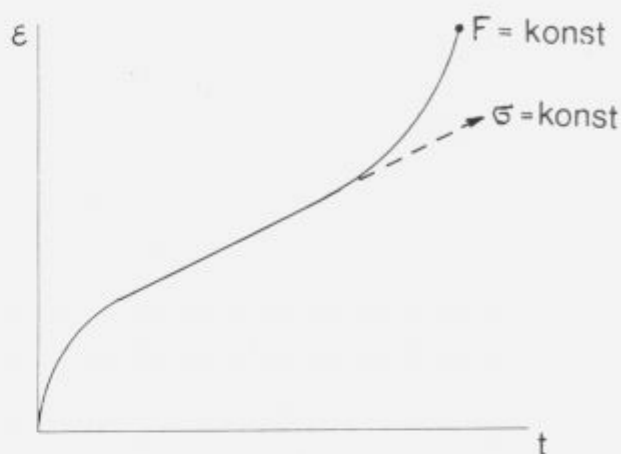
Slika 11: Vpliv temperature in hitrosti raztezkov
Figure 11: Influence of temperature and strain rate

Za prikaz rezultatov lezenja materiala na preizkušancih s konstantno silo so znani diagrami po **sliki 12**, z območjem primarnega, sekundarnega in terciarnega lezenja. Pri terciarnem lezenju je lokalna kontrakcija vzrok za navzgor obrnjeno krivuljo. Za obravnavo vpliva lezenja v razpokah (creep cracking) bi se zato, ker tam ni lokalne kontrakcije, morali izvajati preizkusi lezenja s konstantno napetostjo na najožjem mestu kontrakcije in ne s konstantno silo. Pri tem bi morali napraviti tudi korekcijo iz triosnega v enoosno stanje napetosti zaradi kontrakcije. Tako bi v terciarnem območju dobili za krivuljo lezenja podaljšek premice sekundarnega območja, kot je prikazano v **sliki 12** s prekinjeno črto. To črto moramo uporabiti pri računalniški simulaciji vpliva lezenja v območju zarez ali razpok.

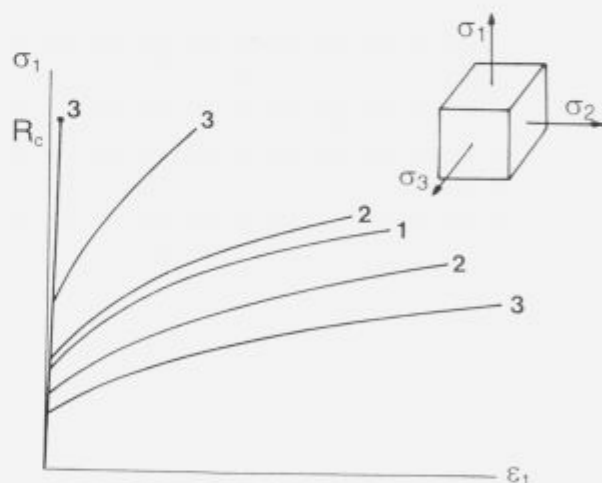
4 Vpliv triosnosti stanja napetosti

Na **sliki 13** se vidi, kako se prava enoosna krivulja napetost-raztezek (1) spreminja pod vplivom dvoosnega (2-2) oziroma triosnega stanja napetosti (3-3-3). Tu ima vlogo tudi spreminjanje Poissonovega števila zaradi plastičnosti. Najbolj mehek postane material zaradi triosnega stanja napetosti pri tanjšanju žice z vlečenjem in pri tem se mu lomna duktilnost poveča. Najbolj trd in hkrati povsem krhek pa bi material postal pri čistem hidrostatičnem nategu, ko je dosežena kohezijska trdnost R_c . Hidrostatične komponente nateznega triosnega stanja napetosti vplivajo torej na prehod v krhko stanje, podobno kot nizke temperature in visoke hitrosti

raztezkov pri enoosnem nategu. Vsi ti vplivi na prehod v krhko stanje se seveda lahko neugodno seštevajo.



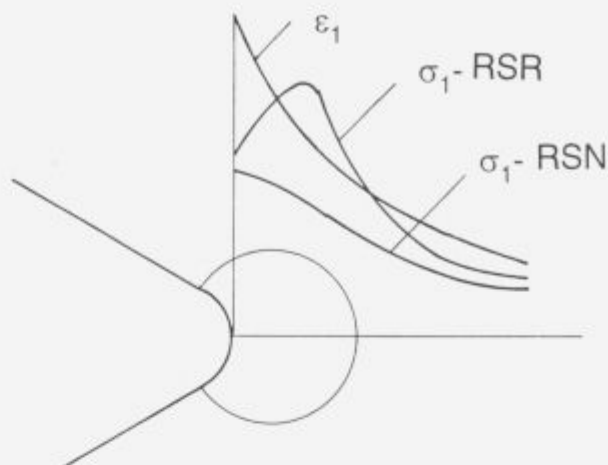
Slika 12: Korekcija pri terciarnem tečenju
Figure 12: Correction at tertiary creep



Slika 13: Vpliv triosnosti napetosti
Figure 13: Influence of stress triaxiality

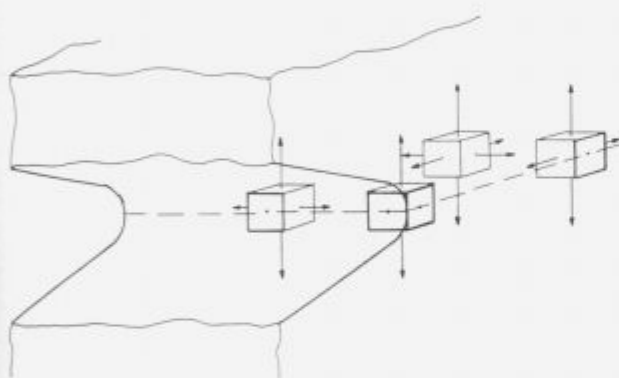
Potrebno se je zavedati neugodnega večosnega stanja nateznih napetosti ob dnu natezne zareze, kot kaže **slika 14**. Tu imamo dodaten vpliv koncentracije napetosti in raztezkov, seveda odvisno od ostrine in globine zareze. Le na vogalu v dnu zareze je enoosni nateg. Na površini v dnu zareze in na zunanji površini ob zarezi obstaja dvoosno stanje napetosti. V notranjosti ob zarezi pa je triosno stanje nateznih napetosti, ki lahko privede do krhkega loma. Na **sliki 15** je prikazan potek največjih glavnih raztezkov in napetosti za primer upoštevanja linearne

teorije elastičnosti. Konice poteka raztezkov in napetosti so tu vselej na dnu zarez. Na **sliki 16** so prikazani poteki največjih glavnih raztezkov in napetosti za primer upoštevanja elasto-plastične teorije, in sicer za ravninsko stanje napetosti (RSN) pri tankih ploščah ter za ravninsko stanje raztezkov (RSR) v srednji ravnini debelih plošč. V obeh primerih ima potek največjih raztezkov konico na dnu zarez. Toda medtem ko ima potek napetosti pri RSN še vedno konico na dnu zarez, sicer ublaženo zaradi plastičnosti, pa ima potek napetosti pri RSR, torej v sredini debelih plošč, konico največje napetosti zaradi neugodne triosnosti znotraj, tako kot kaže **slika 16**. Pri RSR imamo dva možna vzroka za začetek zloma pri konstrukcijskih elementih z natezno zarez: zaradi doseganja lomnega razteška na površini dna zarez ali pa zaradi doseganja kohezijske trdnosti v konici največje normalne napetosti znotraj pri dnu zarez. S tem nastopi stabilno širjenje razpoke. Nestabilno širjenje pa nastopi pri višji obtežbi takrat, ko postane prirastek sproščene elastične energije pri širjenju razpoke večji od energije, ki se pri tem porabi za trganje.



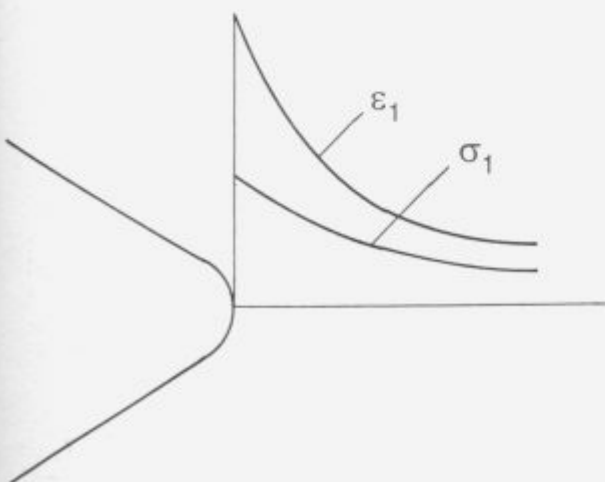
Slika 16: Največje napetosti in raztezki pri elasto-plastični rešitvi

Figure 16: Maximum stresses and strains at elasto-plastic solution



Slika 14: Stanja napetosti ob dnu natezne zarez

Figure 14: Stress states at the bottom of a tensile notch



Slika 15: Največje napetosti in raztezki pri elastični rešitvi

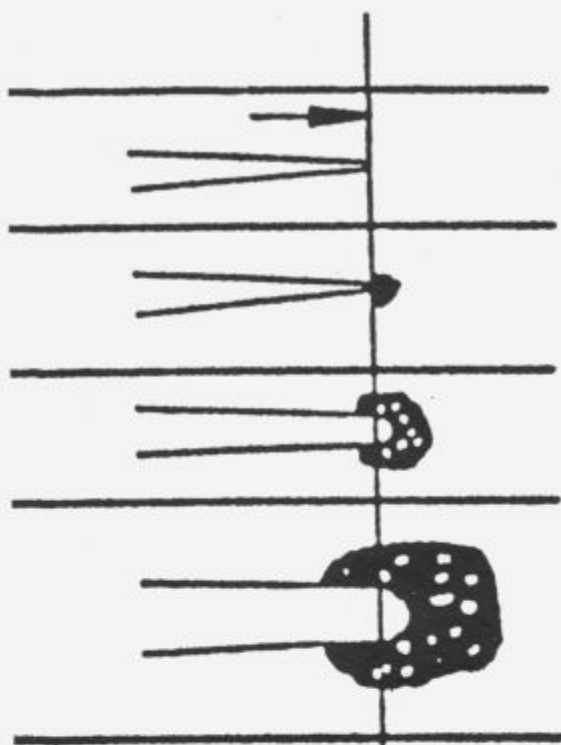
Figure 15: Maximum stresses and strains at elastic solution

Pri razpokah so razmere bolj izrazite kot pri blagih zarezah. **Slika 17** nazorno prikazuje, kako velik pomen ima tu večja duktilnost materiala. Pri monotonom večanju preobremenitve se plastično območje širi in pri veliki lomni duktilnosti ostra zarez znatno otopi. Zato konice in neugodna triosnost postanejo blažje. Razpoka začne stabilno rasti takrat, ko se izčrpa lomna duktilnost. Omenjeno je že bilo, da imajo vključki in praznine na duktilnost materiala bistven vpliv, saj ga napravijo pri znatni obremenitvi še bolj poroznega. Zato je potrebno v tako imenovani procesni coni zarezni učinkov zakonitost materiala za računalniško simulacijo spreminjanja napetostno deformacijskega stanja ustrezno dopolniti.

Material se lahko znatno spremeni glede temeljnih mehanskih lastnosti pod vplivom časa. Pri nizkocikličnem utrujanju, to je pri izmenični plastični deformaciji, lahko nastopi mehčanje ali ohrditev materiala, predvsem pa se zmanjšuje njegova lomna duktilnost in tako se zaradi izčrpanja duktilnosti sčasoma pojavi začetek rasti razpoke. Čim večja je začetna duktilnost materiala, tem večja je njegova odpornost na nizko ciklično utrujanje. Tudi pri visoko cikličnem utrujanju, kjer je rast razpoke posledica zelo lokalne izmenične plastične deformacije, ima zato lomna duktilnost važno vlogo. Pri statični, udarni ali ciklični obremenitvi, zlasti ob prisotnosti razpok, lahko znatno vpliva na degradacijo materiala tudi agresivnost okolja. To je potrebno vedno upoštevati pri rasti razpok ob lezenju, napetostni koroziji ter pri nizko cikličnem in visoko cikličnem utrujanju. Pri vsakem eksperimentalnem preizkusu v zvezi s temi pojavi je potrebno navesti vse parametre enoosne krivulje napetost-raztezek, saj se ti parametri pojavljajo v korelacijskih enačbah pri lomni mehaniki (K_{Ic} , J_{Ic} , CTOD, da/dN). Lomno mehanski preizkusi so dragi in zamudni. Zato imajo korelacijske enačbe z uporabo temeljnih mehanskih lastnosti materiala za nas še poseben pomen.

5 Zaključek

Najprej je treba poudariti potrebo, da se pri nateznem preizkusu, če material izkazuje lokalno kontrakcijo, doslej



Slika 17: Natezna razpoka in duktilnost

Figure 17: Tension crack and ductility

običajni povprečni lomni raztezek opusti kot mera duktilnosti in se ga nadomesti z enakomernim raztezkom ter s pravo lomno duktilnostjo. Le tako dobimo vse parametre, ki izražajo kompletno pravo enoosno krivuljo napetost-raztezek vse do zloma. Ta je potrebna kot vhodni podatek zlasti za računalniško simulacijo pri trdnostnih problemih z velikimi raztezi, npr. pri plastičnem preoblikovanju in še posebej pri vplivu zareznihi učinkov ter s tem povezanim vprašanju trajnosti, zanesljivosti in varnosti konstrukcij v zvezi s staranjem. Zelo pomembno je, da se parametri prave enoosne krivulje napetost-raztezek pojavljajo v korelacijskih enačbah za razne žilavosti v lomni mehaniki ter v konstantah materiala v zvezi z utrujanjem in lezenjem. Potrebno bo predstandardizacijsko delo zaradi modifikacije standardov v zvezi z nateznim preizkusom. Ustanovitev slovenskega združenja za integriteto konstrukcij bi omogočila povezavo strokovnjakov, zainteresiranih za izmenjavo mnenj in idej ter za koordinacijo pri ustvarjanju novega znanja, zlasti za prenos izbranih spoznanj in izkušenj iz najbolj razvitih držav v korist našemu izobraževanju ter raziskovanju, predvsem pa naši industriji oziroma gospodarstvu.