

Tolerancije u veličini su prema DIN 40680. Izrađujemo standardne lonce za topljenje u serijskoj proizvodnji, a specifični oblici i veličine su također dostupne prema zahtjevima kupaca.

2.5.12. Keramička oplata, šljunak za mješanje i mljevenje

Keramičke oplate od 95% Al_2O_3 pronalaze široku primjenu u kemijskoj industriji, razdvajanju rude, kuharstvu, itd. zbog svojih odličnih mehaničkih, kemijskih i termalnih svojstava. Ova keramika se koristi za presvlačenje cijevi, lukova i poprečnih elemenata u prenosnim vodovima za abrazivna i izgrizajuća sredstva, itd. Uopšteno ovi elementi su jedan metar dugi sa dijametrom sve do 300mm; napravljeni su od čelika, bezrdajućeg čelika, plastike, itd. Debljina oplate može da varira od 10 do 20 mm, u ovisnosti o radnim uslovima i mjestu gdje se postavlja.



Pored ovih elemenata, mi također presvlačimo centrifugalne razdvajače, koji mogu da budu u potpunosti keramički, kao i cjevaste naprave, ventilatore, lopatice (oštrice), razne žlijebove (lijevke) i druge slične elemente koji su podložni velikom habanju i visokim temperaturama a, primjenjuju se u mlinovima u papirnoj industriji, rudnicima, postrojenjima za erijep (opeku), itd.

Po presvlačenju nekog mlina sa keramičkom oplatom, njegov životni vijek se produžava više od 5 godina; korištenjem keramičkog šljunka eliminiše se kontaminacija materijala koji se melje čelikom (usljed upotrebe čeličnog šljunka). Tako se težina mlina smanjuje a povećava njegov kapacitet.

2.6. MEHANIČKE OSOBINE – UOPŠTE

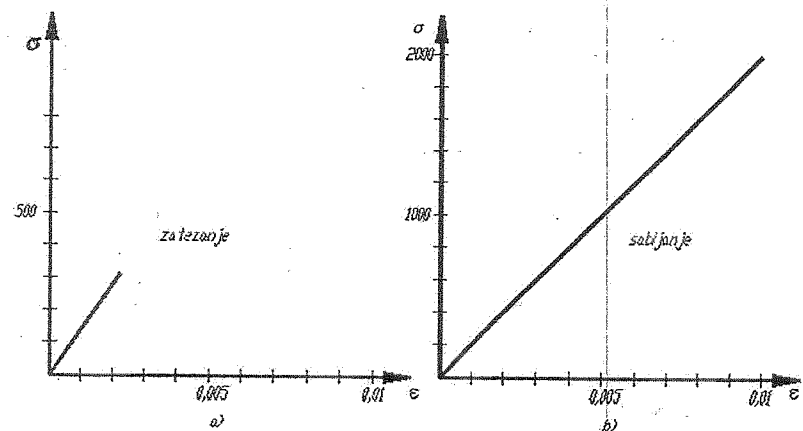
Keramika pokazuje široku raznovrsnost mehaničkih ponašanja. Vrste mehaničkih osobina koje su važne za strukturalnu potrebu su: elastičnost, lom i plastičnost. Procesima koji kontrolišu reakcije pod datim opterećenjem te karakteristikama i stanjima okoline rukovodi mikrostruktura materijala i interatomsko vezivanje.

Određene studije eksperimentalnog ponašanja koriste se kroz naredna poglavlja, a tema je ograničiti uvođenje teoretskog rada na onaj dio koji je potreban da se objasne, ili postave u kontekst, eksperimentalna zapažanja.

Kombinacije elastičnih konstanti koje su karakteristične za polikristalnu keramiku, dvofaznu keramiku i poroznu keramiku se razmatraju i porede sa eksperimentalnim zapažanjima. Uopšteno, elastične osobine keramike se veoma dobro opisuju preko razmatranja fizike interatomskog vezivanja i mehanike mikrostrukturnog međudjelovanja, iako jednostavna specifikacija modula poroznih materijala nije moguća.

Osobine loma opisane su u sljedećim poglavljima sa naglaskom na djelovanje mikrostrukture na iniciranje pukotine i otpornosti loma, te na potrebu za odgovarajućom karakterizacijom pukotina kako bi se objasnile uočene jačine loma.

Opće je poznato da metalne legure imaju značajan iznos plastične deformacije kod zatezanja. Nasuprot, keramike se lome bez prethodne uočljive deformacije. U svojstvu primjera na slici 2.7: prikazan je karakterističan rezultat za jednoaksijalno opterećenje gustog, polikristalnog Al_2O_3 .



Slika 2.7. Priroda loma u keramici ilustrirana krivom napon – deformacija koja pokazuje linearno elastično ponašanje

Na sl.2.7. lom uzorka javlja se u elastičnom području. Ovaj kruti prelom karakterističan je za keramiku i staklo. Jednako važna karakteristika ilustrirana je razlikom između dijelova slike 2.7. a i b.

Dio (a) ilustrira prekid čvrstoće pri ispitivanju zatezanjem (280 MPa), a dio (b) je isto to za test sabijanja. Ovdje je specijalno dramatičan primjer činjenica da je keramika relativno slaba na zatezanje, a relativno jaka na sabijanje. U istom poglavlju bit će razrađeni mjerni odnosi za stabilne i nestabilne pukotine u okviru ravnoteže energije, a oni su popraćeni analognim odnosima razrađenim u jednom okviru za pritisak. Ovi drugi pomenuti odnosi koriste se za razmatranje iniciranja pukotine u različitim keramičkim mikrostrukturama. Varijacije u otpornosti loma upoređuju se sa modelima mikrostrukturnog međudjelovanja tokom širenja pukotine.

Raspravlja se i o utjecaju okoline na neuravnoteženo širenje pukotine te se razmatraju posljedice po neuspjeh koji ovisi od vremena. Cjelokupni okvir za lom veoma dobro opisuje sve uočene osobine loma u keramici. Međutim, okvir se bazira na mehanici i ostvaruje dosta manju povezanost sa kvantitativnim detaljima kod procesa prekidanja veze koji su odgovorni za lom, nego sa mikrostrukturnim detaljima. Keramike su, naravno, klasični lomljivi materijali, i iz ovog razloga pri bilo kakvoj diskusiji njihovih mehaničkih osobina mora se velikim dijelom posvetiti pažnja osobini lomljivosti.

Keramike se mogu plastično deformisati te se u poglavlju 5 razmatraju uslovi pod kojim se uočava plastičnost kao i mehanizmi koji je stvaraju. Prvo se razmatra plastičnost do koje dolazi usljed jednostavnog kliženja dislokacije. Kliženje je dominantni mehanizam deformisanja u keramici poput alkalij halidnih soli, koje se uglavnom mogu plastično deformisati do velikih istezanja, čak i na sobnoj temperaturi.

Ovo je popraćeno deformisanjem na visokim temperaturama, gdje pored kliženja, plastično istezanje može biti izazvano difuzijom, sklizavanjem granica zrna i uspinjanjem dislokacije. Potom se razmatraju specifična mikrostrukturna djelovanja i djelovanja okruženja na puzanje keramike na visokoj temperaturi. Specifični atomski i mikrostrukturni mehanizmi odgovorni za ponašanje puzanja se predstavljaju kako bi se primjenili u odgovarajućim studijama puzanja, a modeli koji su razvijeni da bi se opisalo puzanje su mnogo više zaokupljeni atomskim detaljima nego oni za lom. Puzanje je mnogo važnije u keramici zbog njene visokotemperaturne primjene.

Uloga difuzionog mehanizma u puzanju keramike kompleksnija je nego kod metala, jer je difuzija mnogo kompleksnija kod keramike. Zahtjev za neutralnošću naboja i različita difuzivnost kationa i aniona doprinose ovoj kompleksnosti.

Pored pomenutih mehaničkih osobina koje će u narednim poglavljima biti detaljno razrađeni bitno je pomenuti osobinu "termičkog šoka", koja je uzrok korištenja keramike kod visokih temperatura kombinovano sa njihovom

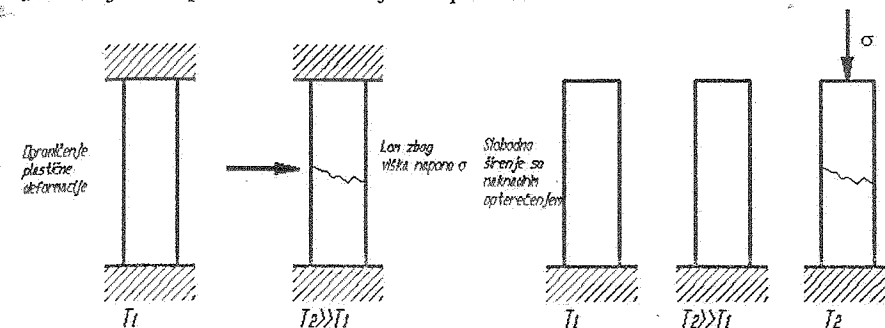
inherentnom krtošću. Ovo se može definirati kao lom (djelimičan ili potpun) materijala kao rezultat promjene temperature – obično iznenadnog hlađenja.

Za procjenu mehanizma termičkog šoka postoje dva fundamentalna termička svojstva:

- a) termičko širenje
- b) termička provodivost.

Prvo, naponsko oštećenje može nastati formiranjem pritiska uslijed uniformnog termičkog širenja.

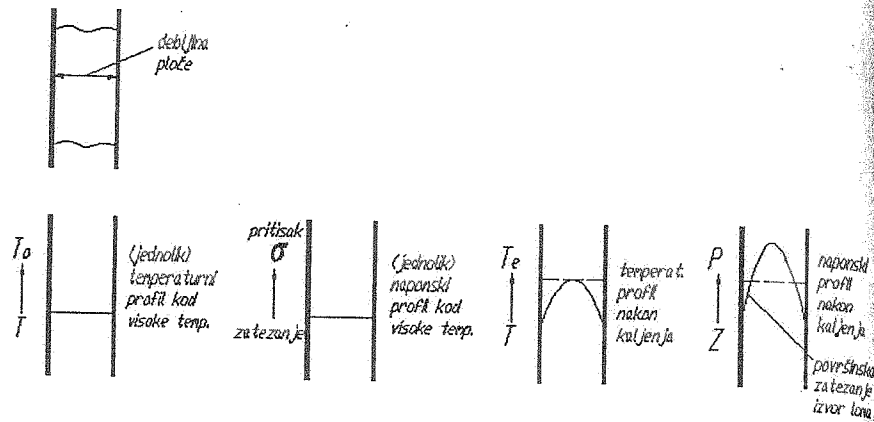
Drugo, promjena temperature proizvodi privremeni temperaturni gradijent u materijalu sa pratećim unutarnjim naponom.



Slika 2.8. Termički šok kao rezultat ograničenja jednolike termičke ekspanzije

Slika 2.8. predstavlja jednostranu ilustraciju prvog slučaja. To je ekvivalentno sa dopuštenim slobodnim širenjem i naknadnom mehaničkom kompresijom šipke na početnu dužinu.

Čak i bez vanjskog ograničenja termički šok se može javiti zbog temperaturnih gradijenata kao rezultat konačne termičke provodnosti. Slika 2.9. ilustrira kako je brzo hlađenje površine zida visoke temperature praćeno površinskim zatežućim naponom.

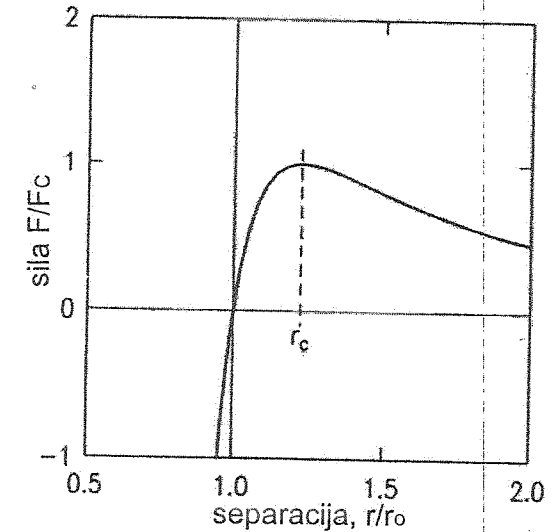


Slika 2.9. Termički šok kao rezultat temperaturnog gradijenta nastalog kod konačnog termičkog provođenja. Brzo hlađenje proizvodi površinski zatezni napon

2.7. LOM

2.7.1. Lom na atomskom nivou

Da bi razmotrili lom na atomskom nivou potrebna nam je funkcija separacije – sile $F_{apl}(r)$, za jednu atomsku vezu. Ova funkcija je data na slici 2.10. Može se vidjeti da postoji kritična primjenjena sila, F_c , iznad koje interatomska veza ne može stabilno podnijeti povećano širenje.



Slika 2.10. Krivulja $F_{apl}(r)$ što odgovara jednom ionskom krutom tijelu, a $F_c = F(r_c)$. Separacija r_c je kritično proširenje iznad kojeg veza ne može više stabilno podnijeti primijenjenu silu, i dolazi do loma

Kod kritične separacije r_c pojavljuje se nestabilnost tj. širenje pri maksimalnoj sili.

Tabela 2.10. daje uočene vrijednosti čvrstoće, za neke uobičajene keramike: tipična čvrstoća loma jednog keramičkog materijala je oko 400 MPa, dok je tipični Young-ov modul oko 200 GPa.

Uočena istezanja kod loma za keramiku su reda 0,2 %, očigledno dosta manja od onih koja su potrebna da izazovu homogenu separaciju interatomske veze preko ravni loma. Stoga, neki mehanizam za koncentraciju istezanja (i pritiska) mora djelovati kako bi se stvorili nužni uvjeti za prekid veze, i tako makroskopski lom, na stvarnim materijalima.

Tabela 2.10. Vrijednosti snage otpornosti loma i tvrdoće keramike

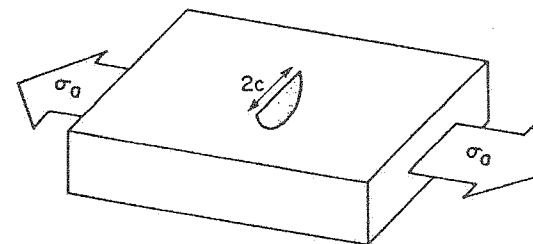
Materijal	Čvrstoća (MPa)	Otpornost na lom ($\text{Jm}^{-3/2}$)	Tvrdoća (MPa)
Stakla:			
Soda-vapno	140	8	0,75
Stopljeni silicij:			
volumen	90	8	0,75
vlakna	1000	8	0,75
Polikristali:			
<u>Al_2O_3</u>			
$\lambda=3\mu\text{m}$	488	39	3,9
$\lambda=11\mu\text{m}$	400	36	3,3
$\lambda=25\mu\text{m}$	302	54	4,6
MgO	275	10	1,8
Y_2O_3	300	13	1,5
SiC	600	39	4,1
Si_3N_4	520	65	4,4
<u>ZrO_2</u>			
Ca-PS2	800	500	10
Y-TP2	2200	125	5
BaTiO_3	124	10	1,1
Staklena keramika:			
Pirokeramika	300	60	2,5
Makor	170	51	1,8

Čvrstoće su one koje su uočene kod uglačanih šipki ili diskova, vrijednosti tvrdoće i otpora loma su one koje su uočene za potpunu zasićenost bilo kojih mikrostrukturnih efekata otvrdnjavanja. λ - veličina zrna.

Inglis (1913) je pokazao da je napon, σ_{tip} na vrhu jedne eliptičke rupe u jednom krutom tijelu koje je pod pritiskom (slika 2.11.) dobiven preko:

$$\sigma_{\text{tip}} = \left(\frac{2c}{b} \right) \sigma_a$$

gdje je σ_a primjenjeni napon, koji je jednoličan na velikim udaljenostima od rupe, $2c$ je dužina glavne ose elipse, a $2b$ je dužina manje ose.



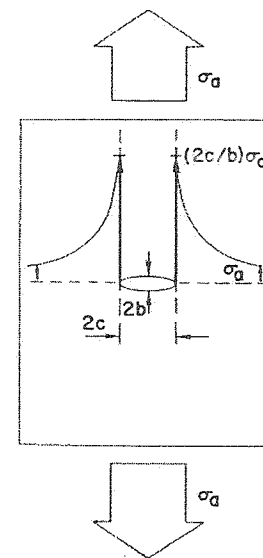
Slika 2.11. Šematski prikaz polja napona oko eliptičkog otvora u krutom tijelu jednoosnog napona

približavaju onim koja su neophodna za nestabilnost.

2.7.2. Energija ravnoteže u lomu

2.7.2.1. Nestabilna uravnoteženost: Griffith-ova jednačina

Iako Inglis-ova analiza daje jedan mehanizam za lom, preko koncentracije napona na vezu vrha pukotine, analiza ne dopušta da se izvedu bilo kakvi mehanizmi, pošto je napon koji je razvijen mjerna invarijanta (nepromjenjiva vrijednost): velike i male pukotine istog odnosa položaja (c/b) imaju isti napon na vrhu pukotine, i stoga bi se očekivalo da popuste pod istim primijenjenim naponom.

Slika 2.12. Šematski prikaz jednog krutog tijela koji sadrži pukotinu karakteristične dimenzije c pod jednoličnim naponom veličine σ_a

U keramičkim materijalima pukotine imaju dimenzije od $c \approx 10\mu\text{m}$, sa otvorima od $b \approx 20\text{nm}$, tako da se dobiju koncentracije od približno 1000.

Lom se vidi kao sekvencijalni prekid interatomskih veza, sa naponima istezanja blizu vrha pukotine koja se

Veza između veličine pukotine i čvrstoće uzorka, i početaka mehanizama loma načinio je Griffith (1920).

Prema Griffith-u kritični uslov za lom uzorka koji ima pukotinu je manifestacija kritične ravnoteže energije. Prva polovina ravnoteže energije bila je energija površine koja je uvedena u sistem preko prekinutih veza na površini pukotine. Kod nekog uzorka koji ima pukotinu dimenzije c usljed jednoličnog primijenjenog napona slika 2.12, doprinos energije površine U_s , može se pisati kao:

$$U_s = 2\gamma c^2 = 2\gamma A$$

γ - višak energije po jediničnoj površini koji je povezan sa stvaranjem jedne uravnotežene površine krutog tijela u datom okruženju.

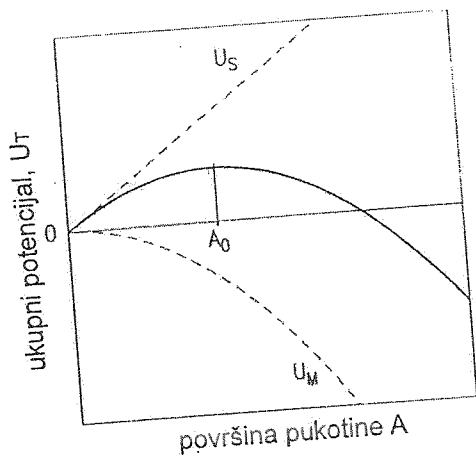
Druga polovina ravnoteže energije uključuje promjenu u mehaničkoj potencijalnoj energiji sistema usljed prisustva pukotine. Mehanička potencijalna energija sistema je data preko $U_M = U_E - W$,

U_E - energija istezanja u krutom tijelu
 W - izvršen rad

Korištenjem Inglis analize, Griffith je dokazao da se za neko kruto tijelo koje je pod jednoličnim primijenjenim naponom σ_a , mehanička potencijalna energija može pisati kao:

$$U_M = \frac{-\sigma_a^2}{E} c^3 = -\frac{\psi^2 \sigma_a^2}{E} A^{3/2}$$

ψ - bezdimenzionalni koeficijent
 E - Young-ov modul

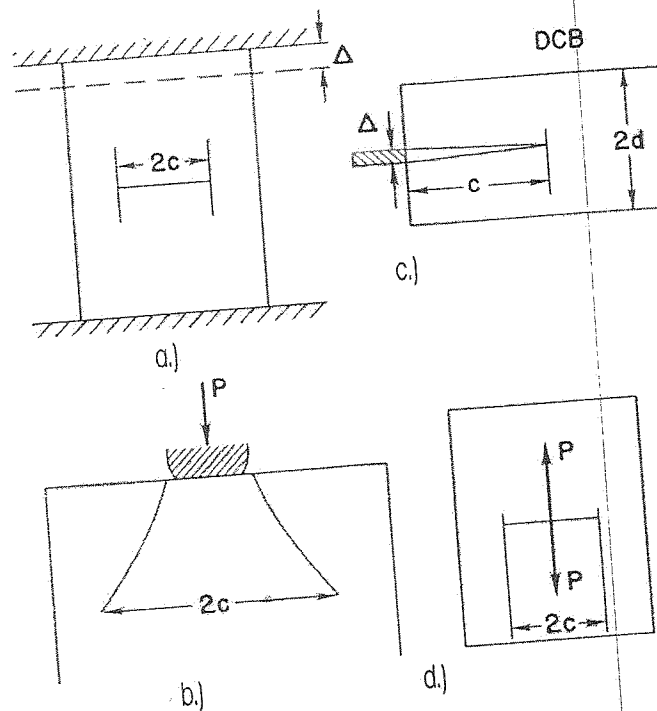


Slika 2.13. Kriva mehaničkog potencijala U_M , potencijala površine U_S i ukupnog potencijala U_T za neko napuklo kruto tijelo pod naponom, kao što je prikazano na slici 2.12.

Maksimum kod U_T predstavlja tačku nestabilne uravnoteženosti za jedno kruto tijelo koje sadrži pukotinu površine A_0 .

2.7.2.2. Stabilna ravnoteža: Roesler-ov zakon

Nisu sve geometrije loma nestabilne, neke su stabilne, neke su neutralne, a neke mijenjaju svoju stabilnost kao funkcija dužine pukotine. Najjednostavniji primjer stabilne geometrije je konična pukotina, uzrokovana lokalnim opterećenjem tupog kontakta na lomljivu površinu, koja je prikazana na slici 2.14., zajedno sa nekim drugim stabilnim geometrijama.



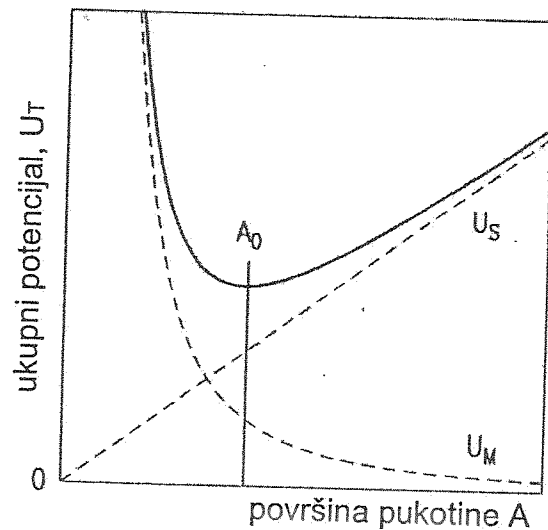
Slika 2.14. Stabilne geometrije loma: a.) pomjeranje, b.) urez ili usjek, c.) greda sa dva prepusta, d.) klinasta

Roesler (1956) je pokazao da sistemi loma mogu biti stabilni, tako što je ispitao ove pukotine, koje se ponekad nazivaju Hertzian konične pukotine po njihovom pronalazaču (Hertz, 1882). Roesler je uočio da se mehanička potencijalna energija nekog sistema loma može izraziti kao proizvod gustoće energije istezanja i volumena. U slučaju jednolikog napona gustoća energije istezanja ne ovisi o veličini pukotine.

Roesler je upotrijebio jednostavne mjerne zakone, da bi dokazao da za koničnu pukotinu pod opterećenjem P , gustoća energije istezanja ne ovisi o dužini pukotine.

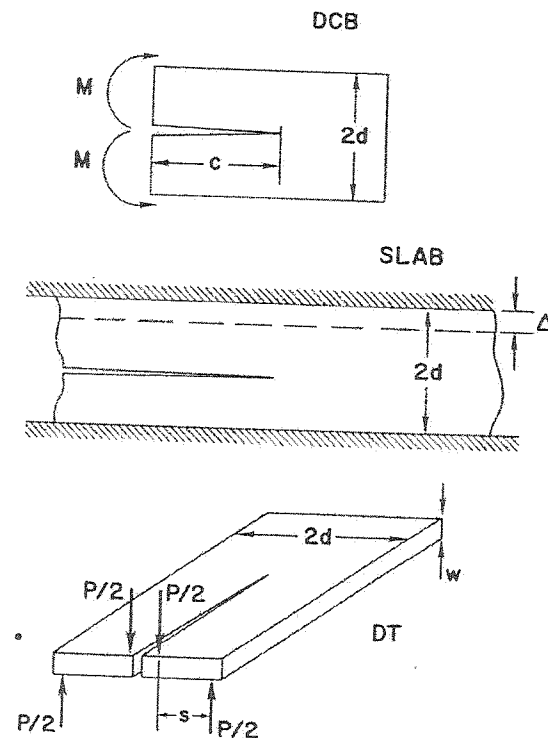
$$U_M = \frac{P^2}{c^4 E} c^3 = \frac{\chi^2 P^2}{A^{1/2}}$$

P/c^2 – karakteristični pritisak
 χ - bezdimenzionalni koeficijent



Slika 2.15. Krivulja mehaničkog potencijala U_M , površinskog potencijala U_S i ukupnog potencijala U_T za jedno napuklo kruto tijelo pod pritiskom, za primjer (4-5) b. Minimum u U_T predstavlja tačku stabilne ravnoteže za kruto tijelo koje sadrži pukotinu površine A_0 .

Neki primjeri neutralnih geometrija loma dati su na slici 2.15.



Slika 2.16. Neutralne geometrije loma: dupla torzija (DT), greda sa konstantnim momentom i beskrajna ploča

Nestabilne geometrije loma okarakterisane su jednoličnim naponom ili fiksnim opterećenjima, stabilne geometrije su okarakterisane lokaliziranim opterećenjima ili fiksnim uslovima pomjeranja, a neutralne geometrije su okarakterisane dužinama pukotina koje su velike u usporedbi sa svim dimenzijama sistema ili fiksnim uslovima momenta.

2.7.2.3. Iniciranje pukotine u polju napona koji opada

Mnogi slučajevi loma keramike utvrđuju se preko polja nejednoličnog napona, napukline se iniciraju, potom stabiliziraju u poljima napona koji opada. Specifični primjeri uključuju polja napona oko uklopa koji se šire i raspadaju kao (r^{-3}) (Swain, 1981), polja napona oko tačkastih kontakata na površinama (r^{-2}) (Lawn i Swain, 1975), polja napona u površinama sa zamjenjenim ionima ili

usađenim ionom (r^{-1}) (Tandon i Green, 1990), i polja napona u površinama koja su termalno potresena ($1-r^2$) (Lawn i Marshall, 1977).

Utvrđivanje ponašanja pukotina pod takvim okolnostima je važno kod keramike, jer rezultirajuća dužina pukotine utvrđuje čvrstoću uzorka.

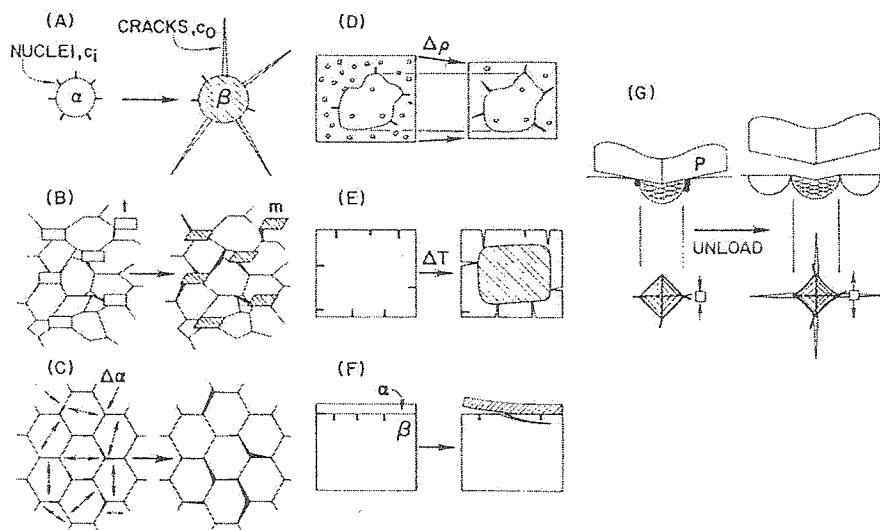
Najjednostavniji primjer polja napona koje se raspada je ono koje se predstavlja preko:

$$\sigma(r) = \sigma_b \left(1 - \frac{r}{b} \right) \quad r \leq b$$

$$= 0 \quad r \geq b$$

gdje je σ_b – vršni napon u $r=0$, a b je mjera dužine u kojoj napon doseže nulu.

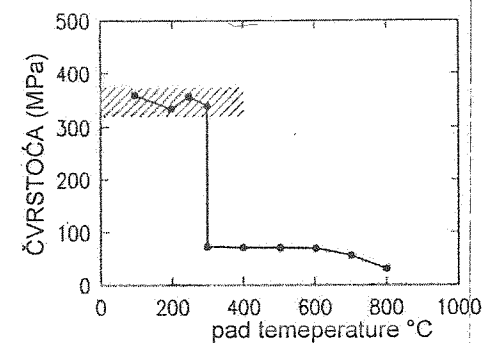
Ponašanje iniciranja



Slika 2.17. Šematski dijagrami mikrostrukturnih mehanizama sposobnih za iniciranje stabilnih pukotina u keramici. (A) Uklop koji se širi, a proizilazi iz promjene dilatacijske faze (širenja, rastezanja) ili nižeg koeficijenta termalne ekspanzije (hlađenje materijala) (B) Transformacija tetragonalne → monoklinske faze u jednom ZrO_2 materijalu (pri hlađenju ili pod pritiskom) (C) Koeficijent ili modul anizotropne termalne ekspanzije (materijala pod promjenom pritiska ili temperature). Strelice indiciraju smjerove većeg koeficijenta termalne ekspanzije ili manjeg modula (D) Sinterovanje porozne matrice oko gušćeg oklopa (E) Termalni udar (F) Termalni udar (G) Termalni udar

(F) Pogrešno združivanje u istezanju, modulu ili koeficijentu termalne ekspanzije na zajedničkoj granici između tanke opne (filma) i supstrata (podloge)
(G) Ostvarivanje ureza preko oštih čestica

Brzi padovi temperatura neke keramike dovode do rastezljivih polja koja se raspadaju na površini uzorka, kako se površina hladi, a centar se steže (slika 4 – 8E). Takvi termalni udari mogu dovesti do iniciranja stabilnih pukotina ako je pad temperature dovoljno velik (npr. u ohlađenom Al_2O_3 ili staklu) (Hasselman, 1970; Fairbanks et al, 1984). Padovi temperature manji od neke kritične vrijednosti neće dovesti do iniciranja pukotina, pošto vršni napon neće doseći vrijednost. Stoga se očekuje da čvrstoća uzoraka koji su termalno uzdrmani ostanu nepromjenjivi za padove temperatura ispod određene vrijednosti.



Slika 2.18. Čvrstoća uzoraka Al_2O_3 koji su bili pod termalnim udarcem, a koji pokazuju naglo smanjenje u čvrstoći pri kritičnom padu temperature. Šrafrano područje indicira čvrstoću uzoraka koji nisu bili pod termalnim šokom (podaci od Hasselman-a, 1970)

2.7.2.4. Mikrostrukturni utjecaji na lom

Dominantni efekt mikrostrukturnog međudjelovanja u toku propagiranja pukotine je efekt otvrdnjavanja – otpornost loma ili tvrdoća materijala se povećava iznad nivoa kojeg postavljaju interatomske veze na ravni pukotine. Mikrostrukturno međudjelovanje izaziva ovaj efekat preko ponovnog distribuiranja fluksa energije od primjenjenog opterećenja do svih drugih udubljenja osim vrha pukotine. U većini slučajeva ova ponovna distribuiranja energija su funkcija dužine pukotine, što dovodi do efekta u kojima otpornost loma ili tvrdoća raste sa dužinom pukotine, prije nego dosegne vrijednost stalne zasićenosti.

Dva glavna mikrostrukturna međudjelovanja koja dovode do otvrdnjavanja u keramici su spojno premoštavanje i fazne transformacije. Druga mikrostrukturna međudjelovanja koja se mogu desiti u toku loma u nekim materijalima uključuju odstupanje pukotine, savijanje pukotine i mikrocijepanje

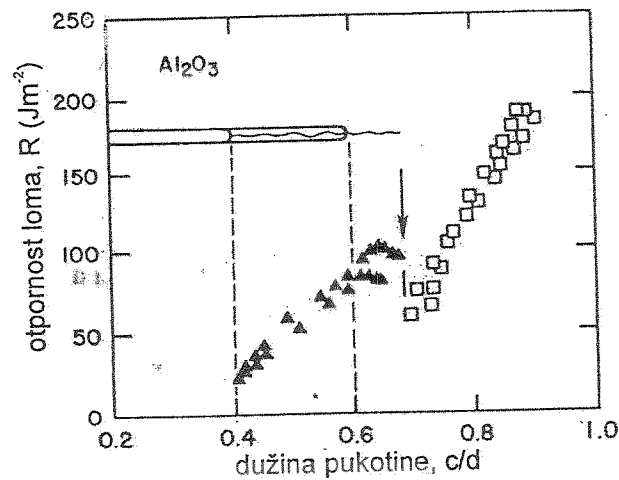
(pukotine inicirane ispred prednjeg dijela glavne pukotine). Potencijal ovih međudjelovanja kao mehanizma za otvrdnjavanja dao je Green et al. (1989) i Evans (1990).

2.7.2.5. Otvrđnjavanje preko spojnog premoštavanja

Mostovi koji lokaliziraju zrnca u polikristalnim keramikama

Mnoge polikristalne keramike su ojačane procesima spojnog premoštavanja iza vrha pukotine. Takvi mostovi obuzdavaju premještanje otvora pukotine, prema tome snižavajući pritisak u vrhu pukotine, ili apsorbiraju energiju u toku svoje vlastite deformacije. Mostovi se mogu namjerno uključiti u mikrostrukturu kao u slučaju sastava tkiva (Marchall et al. 1985) ili keramike ojačane gipkim česticama (Sigl et al. 1986), ili proizaći u toku propagiranja pukotine kao posljedica lokalne nehomogenosti.

Polikristalne keramike kao što je glinica su posebno osjetljive na procese premoštavanja koja lokaliziraju zrnca u toku propagiranja pukotine. U seriji eksperimenata Knehans i Steinbrech (1982) su propagirali pukotine u uzorcima glinice i primjetili porast kod otpornosti na lom.

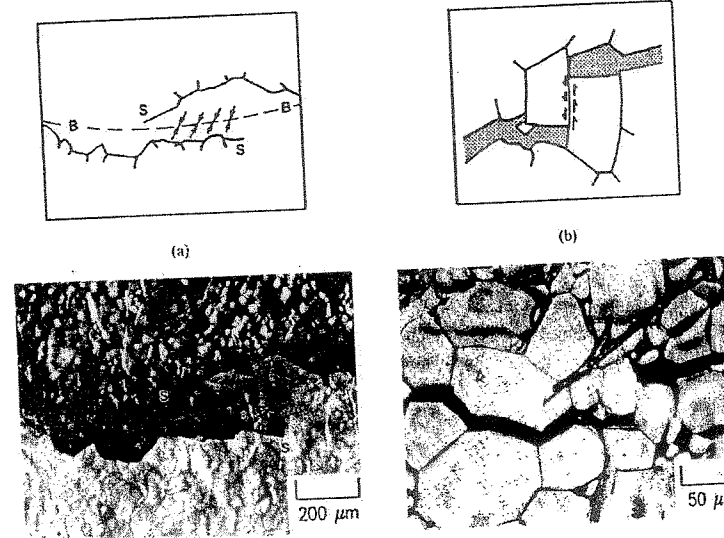


Slika 2.19. Otpornost loma kao funkcija širenja pukotine c za uzorke Al_2O_3 , koja pokazuje sposobnost ponovnog urezivanja da bi se smanjio otpornost na lom

Ponovnim urezivanjem pukotine iza vrha, i ponovnim mjerenjem karakteristika na lom, bili su u mogućnosti pokazati da se otpornost loma vratila

na vrijednost dobivenu u dužinama kraće pukotine, tako da su efekti otvrdnjavanja bili usljed procesa iza vrha pukotine. Dva glavna tipa mostova data su na slici 2.20.

Mostovi se sastoje ili od lokalno neprekinutih grupa zrnaca, slika 2.20 a, ili frikcionalno međusobno povezanih lica pukotine koja proizilaze iz propagiranja pukotina paralelnih sa poljem primjenjenog napona.

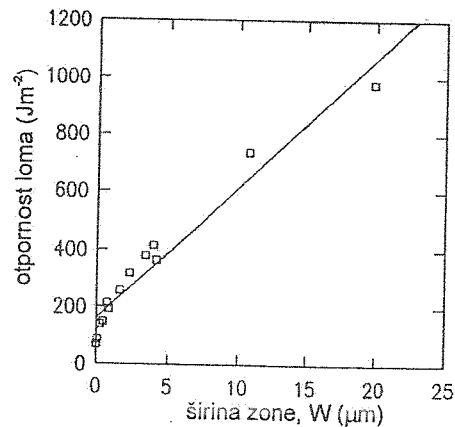


Slika 2.20. Mikrografovi spojnih mostova iza vrhova pukotine kod Al_2O_3 (Cook, 1990)
 (a) Mikrograf prekinutog površinskog traga načinjen propuštanjem svjetlosti
 S - površinski tragovi
 B - kontinuirana pukotina u masi materijala
 (b) Mikrograf frikcionalno međupovezanih zrnaca načinjen reflektiranjem svjetlosti

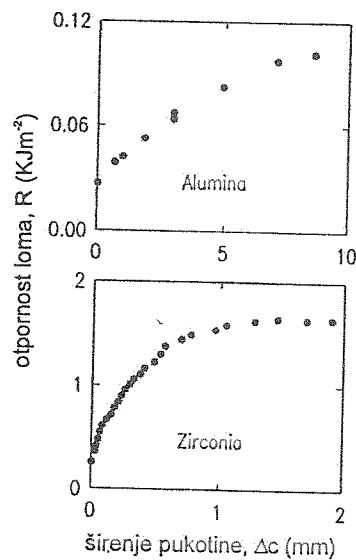
2.7.2.6. Otvrđnjavanje preko faznih transformacija

Zirconium keramika se može otvrdnuti procesima fazne transformacije ispred vrha pukotine, a značajni napon za proširenje ovog područja nakon prvobitne sugestije Garvie-a et al. (1975), koja je nešto detaljnije predstavljena na monografu Green-a et al. (1989). Ako su čestice tetragonalne faze ZrO_2 metastabilno zadržane odgovarajućom obradom materijala, pojačani pritisci u vrhu pukotine mogu pokrenuti transformaciju u stabilnu monoklinску fazu.

Otvrdnjavanje se može posmatrati sa gledišta loma intenziteta napona (McMeeking and Evans, 1982), ili pomoću omjera oslobađanja mehaničke energije (Marchall et al. 1983).



Slika 2.21. Otpornost loma nasuprot širini zone za Mg - ZrO₂ materijale predstavljajući linearni odnos

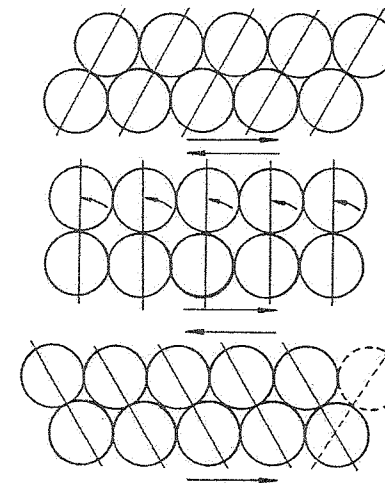


Slika 2.22. Otpornost loma nasuprot širenju za polikristalni Al₂O₃ i djelimično stabilizirani ZrO₂, predstavljajući sposobnost procesa transformacija da ojačaju otpornost loma. Podaci za Al₂O₃ su od Swain-a (1986), a za ZrO₂ od Readey-a et al. (1987)

2.8. PLASTIČNOST

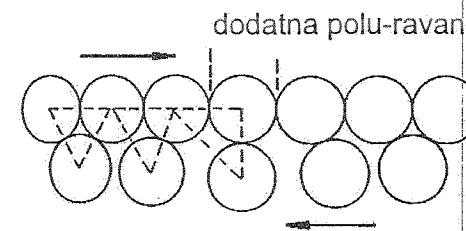
2.8.1. Sklizavanje na atomskom nivou

Kao i lom, plastičnost se postiže preko lokaliziranih defekata. Da bi ovo vidjeli razmatramo dozvoljeno istežanje za homogeno smicanje dviju atomskih ravni u jednom kristalu (slika 2.23.)



Slika 2.23. Šematski prikaz homogenog smicanja atomskih ravni

Pod djelovanjem primjenjenog napona smicanja, jedna cijela ravan atoma sklizne preko susjedne ravni. Pri niskim naponima smicanja atomi se odupiru kretanju i prolaze kroz plastičnu deformaciju. Kako se napon poveća, atomi se uspenju na one u susjednim redovima sve dok u jednoj dozvoljenoj tački ne postignu jedan nestabilan položaj gdje može doći do jednog kretanja ka naprijed ili nazad.



Slika 2.24. Šematski dijagram redova atomskih ravni koji pokazuju lokalizaciju istežanja u dislokaciji

Ako se napon poveća iznad dozvoljenog napona atomi će skliznuti preko onih u susjednim redovima. Dolazi do laganog sklizavanja, pošto se jedan red "skotrlja" preko drugog. Ako se napon odstrani, dolazi do trajne deformacije.

Slika 2.24. pokazuje kako se jedna lokalizacija – jedna dislokacija – može proizvesti. O dislokaciji se može razmatrati kao o jednoj dodatnoj polu-ravni atoma koja je umetnuta u strukturu, a naponi smicanja neophodni za pokretanje dislokacije su poprilično mali. Na krajevima atomskih ravni, daleko od jezgra dislokacije, atomi su na svojim pravilnim mjestima u rešetci i istežanja reda 60% su potrebna da se prouzrokuje sklizavanje.

U jezgri dislokacije, veze su snažno istegnute, a atomi su blizu nestabilnog položaja modela homogenog sklizavanja. Veoma mala dodatna istežanja su potrebna da se pokrene dodatna polu-ravan na lijevo. Stoga, jedan mali mikroskopski napon se može primjeniti na jedan uzorak kao cjelinu, izazivajući plastičnu deformaciju preko pokretanja dislokacija u kojima se uslovi za smicanje veza zadovoljavaju lokalno.

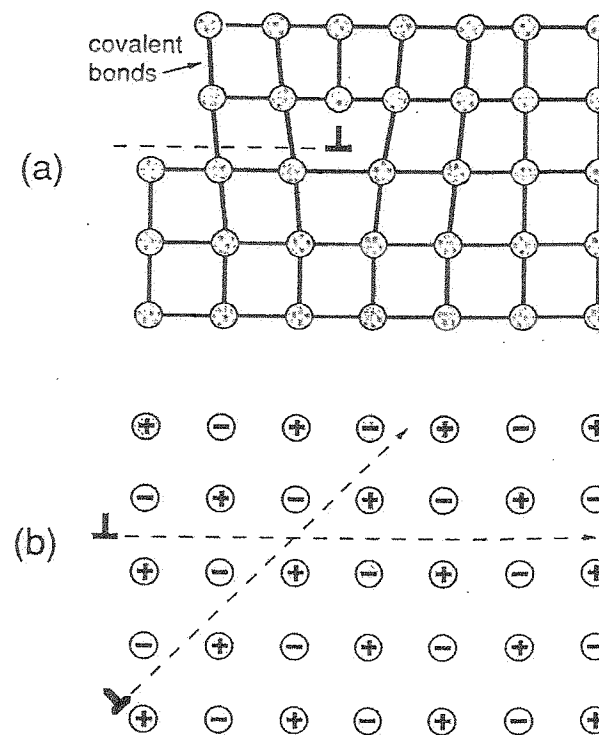
2.8.2 Kliženje dislokacije u keramici

2.8.2.1. Inherentna otpornost prema kliženju

Dominantni mehanizam plastičnosti u metalima je kliženje dislokacije jer je inherentna otpornost kristalne rešetke prema kretanju dislokacije Peierls – Nabarro-ova sila, mala. Ovo je uglavnom usljed činjenice da je metalno vezivanje ne usmjereno tako da iskrivljenja u atomskom rasporedu blizu jezgra jedne dislokacije koja se kreće ne stvara velike poraste u energiji istežanja kako se dislokacija pomjera od jednog položaja ravnoteže u rešetci do sljedećeg. Ovo isto, međutim, nije tačno za većinu keramika.

Kliženje dislokacije je teško, i kao posljedica, većina keramike puca prije nego se plastično deformiše, bar na sobnoj temperaturi. Razlozi za otpornost prema kliženju mogu se razumjeti uglavnom u terminima vezivanja i kompleksnosti u keramičkim kristalnim strukturama. Atomsko vezivanje većine keramika je kovalentno, ionsko, ili smjesa ovih pomenutih. Na slici 2.25. – a, kliženje dislokacije u kovalentnim materijalima je svojstveno (inherentno) teško jer zahtijeva razbijanje i savijanje snažno usmjerenih veza. Kao posljedica, plastičnost pri kliženju u keramici kao što je dijamant, SiC, Si₃N₄ je uočena samo na krajnjoj temperaturi i naponu. U ionskim materijalima, formiranje elektrostatičkih nedostataka proizvodi otpornost prema kliženju. Sklizavanje duž horizontalne ravni jednostrane ionske strukture na slici 2.25. – b, unosi nešto poput obilježenih iona u registar, tako da je atmoski raspored blizu jezgra dislokacije u napola skliznutoj konfiguraciji u stvari raspored visoke energije.

Sklizavanje je moguće samo u onim sistemima sklizavanja za koje je elektrostatičko pravljenje grešaka minimizirano, poput ravni od 45° na slici 2.25. – b.



Slika 2.25. Šematske ilustracije sklizavanja u (a) kovalentnim i (b) ionskim materijalima (po Ashby-ju i Jones-u, 1986)

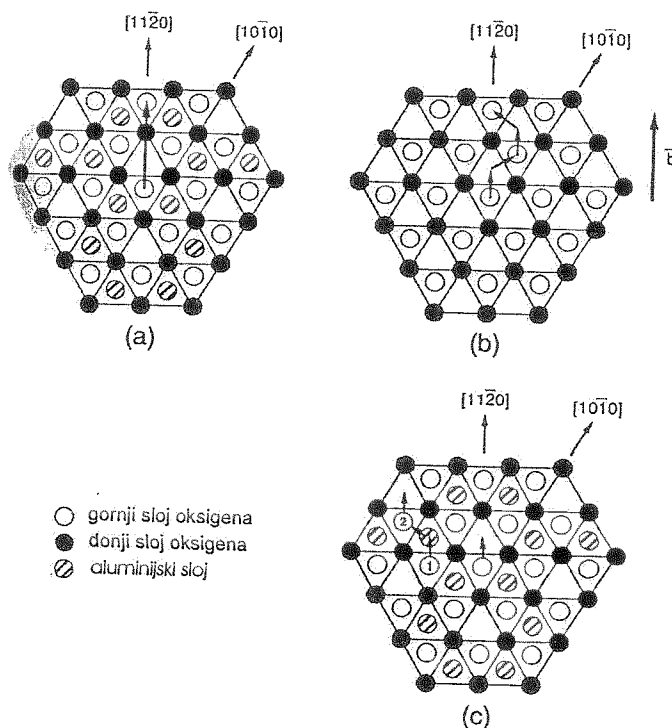
Kliženje dislokacije u keramici može također da bude teško zbog kompleksnosti u strukturi kristala. Materijal kod kojeg se smatra da struktura kristala ima veoma važnu ulogu je α -Al₂O₃ (safir) u kom se sklizavanje dešava samo pri temperaturi iznad 900°C.

Slika 2.26. – a. pokazuje strukturu α -Al₂O₃. Sastoji se od ravni oksigen aniona u heksagonalnom rasporedu složenih u sekvencu slaganja A-B-A-B..., sa aluminijum kationima koji zauzimaju dvije trećine oktaedričnih razmaka.

U datoj ravni kationa, aluminijски anioni formiraju jedan uređen raspored, ali relativni položaj rasporeda se mijenja u konsektivne aluminijске slojeve kako bi se formirale tri ravni kationa. Heksagonalna jedinična ćelija koja se koristi u opisivanju strukture je poprilično visoka, a sastoji se od tri ravni aniona i tri ravni kationa. Kao i u strukturama koje su veoma gusto smještene,

sklizavanje se najlakše dešava na gusto poredanoj ravni – u ovom slučaju baznoj ravni, a pravac sklizavanja je pravac najmanjeg širenja jedinice u strukturi. Pri nemarnom ispitivanju, moglo bi se očekivati da sklizavanja $[10\bar{1}0]$ npr. sklizavanje u smjeru najgušćeg slaganja u ravni aniona (slika 2.26. – a).

Međutim pošto ravni kationa nisu tako gusto poredane kao ravni aniona, najmanje ponavljanje jedinice u strukturi je u stvari mnogo veće i primjećeni smjer sklizavanja je zarotiran za 30° od $[10\bar{1}0]$. Priroda ove geometrije sklizavanja navela je Kronberg-a da se jedna dislokacija ivice u $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ strukturi treba rastaviti u četiri četvrtine djelimičnih dislokacija.



Slika 2.26. (a) Struktura glinice paralelna sa baznom ravni koja pokazuje dva sloja oksigena i sloj aluminija između.
(b) Koraci sklizavanja koji odgovaraju dislokaciji jedne dislokacije u 4 četvrtine parcijalne dislokacije.
(c) Kretanje aniona i kationa u prvom koraku sklizavanja

Koraci sklizavanja parcijalnih dislokacija su prikazani na slici 2.26. – b. Slika 2.26. – c, kretanje aniona i kationa u toku prvog koraka parcijalnog

sklizavanja koje pokazuje da se dvije vrste kreću u različitim smjerovima i stoga zahtijevaju koordinatno kretanje (Kronberg, 1957).

Kliženje dislokacije je teško u većini keramika, ali se ipak uočava, na visokim temperaturama mnoga pomenuta ograničenja slabe, te se ograničena količina kliženja dislokacije dešava skoro kod svih keramika. U nekoj keramici kliženje je moguće čak i na sobnoj temperaturi. To se odnosi na ionske materijale sa strukturom hridne soli, poput alkali halidni soli.

2.8.3. Plastičnost pri visokoj temperaturi

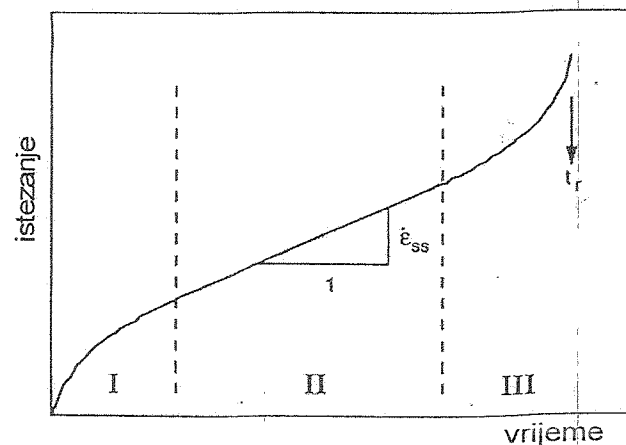
Do sada plastičnost je razmatrana uglavnom u terminima kliženja dislokacije, glavnog mehanizma u onim keramikama koje odražavaju plastični tok na niskim temperaturama i temperaturama ambijenta.

Na visokim temperaturama, kliženje je također važno, ali plastičnost se može desiti preko drugih termalno aktiviranih mehanizama koji su prespori da bi imali kakve posljedice na sobnu temperaturu.

Oni uključuju difuziju, uspinjanje dislokacije i sklizavanje granice zrna. U ovom dijelu, mehanizmi pomoću kojih se stvara plastičnost pri velikoj temperaturi se razmatraju u terminima puzanja visoke temperature.

2.8.4. Testiranje puzanjem

Plastičnost pri visokoj temperaturi se često proučava korištenjem testa puzanja. U standardnom testu, rastezljivo opterećenje se primjenjuje na uzorak i izduženje jednog dijela dužine mjerila se mjeri kao funkcija vremena.



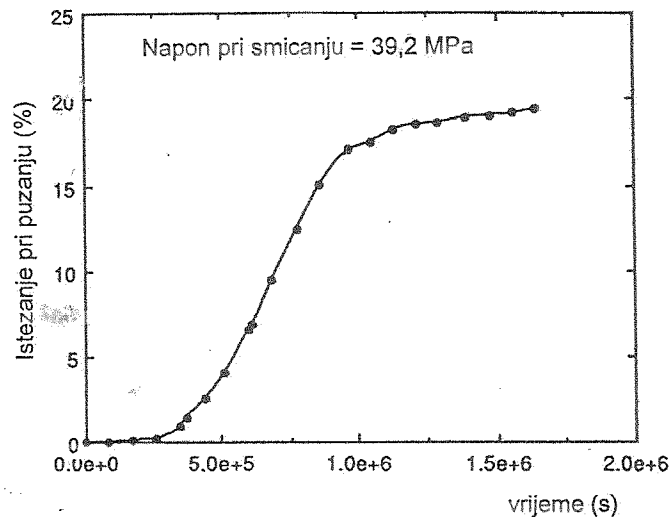
Slika 2.26. Tipična krivulja puzanja koja pokazuje: I-primarnu fazu, II-sekundarnu fazu, III-tercijarnu fazu

Idealni test je onaj u kojem opterećenje neprestano varira tako da odražava uslove konstantnog napona pošto je poprečno presječna površina uzorka smanjena. Osnovni podatak je krivulja istezanja pri puzanju kao funkcija vremena. Slika 2.26. je šematski prikaz tipične krive puzanja.

Kriva sadrži tri svojstvene faze. Prva, koja se zove osnovno ili prolazno puzanje, je obično, ali ne uvijek okarakterisana usporavajućim omjerom puzanja. Druga koja se zove sekundarno puzanje ili puzanje nepromjenjivog stanja, je onaj dio krivulje u kom je omjer puzanja efektivno konstantan. Treća faza, tercijalno puzanje, je ono u toku kojeg se omjer puzanja ubrzava prije pucanja uzorka.

Sa stanovišta mikrostrukture, tercijarno puzanje se često povezuje sa akumulacijom oštećenja kao što je stvaranje jezgra i rast unutrašnjih udubljenja i pukotina. Dva parametra koja se najčešće koriste da bi se okarakterisalo ponašanje puzanja je omjer puzanja nepromjenjivog stanja, $\dot{\epsilon}_{ss}$ i vrijeme do pucanja, t_r .

Jedna značajna varijacija od običnog ponašanja ilustriranog na slici 2.26. je ona koja je data na slici 2.27., gdje su predstavljeni podaci puzanja za jednostruki kristal safira koji je dostigao temperaturu 1000°C (Wachtman i Maxwell, 1954).



Slika 2.27. Krivulja puzanja za jednostruki kristal safira koja odražava sigmoidalno ponašanje

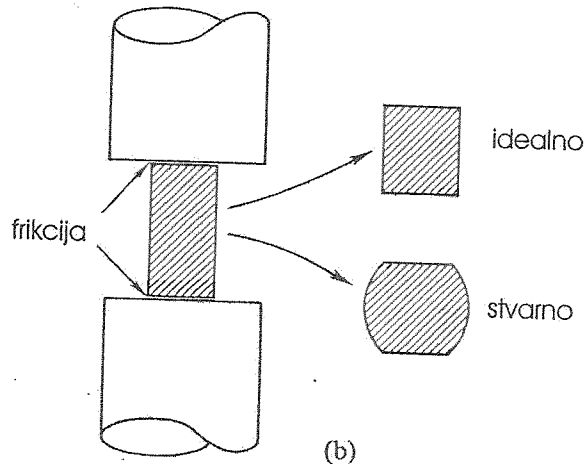
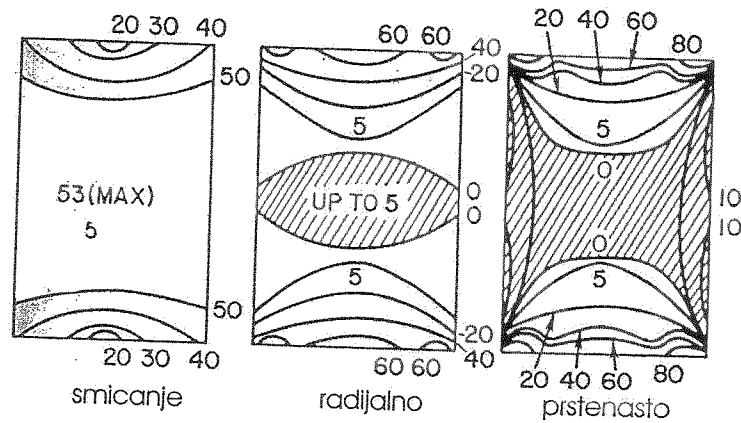
Krivulja oblika slova S ili "sigmoidno" ponašanje je uočena u mnogim keramičkim jednokristalima koji sadrže niske početne gustoće dislokacija. Ubrzavanje kod omjera puzanja u početku krivulje je usljed brze multiplikacije dislokacije.

Jednostrani test napona koji je gore opisan je standardni test puzanja u metalima. Međutim, u keramici, veoma mala testiranja napona se izvodi zbog problema povezanih sa hvatanjem i obradom uzoraka na mašini. Većina podataka o keramičkom puzanju se dobiva preko testiranja sabijanja ili savijanja.



2.9. SABIJANJE

Problem kod testiranja sabijanja (slika 2.28.) uzrokovan je trenjem između kompresionih klipova i uzorka koji treba da primi oblik cilindra, dok se deformiše.



Slika 2.28. (a) Šematski prikaz stvaranja oblika cilindra u toku deformacije pri sabijanju usljed trenja između uzorka i klipova
(b) Rezultati analiza konačnog elementa za napone koji su se razvili u toku deformacije pri sabijanju oko jedne ose kod cilindričnog uzorka MgO

Trenje se nikad ne može u potpunosti izbjeći, a kad je trenje veliko, stanje pritiska u uzorku može odstupiti od jednostavnog sabijanja jedne ose. Da bi ovo ilustrirali posmatrajmo napone koji su se razvili u toku sabijanja deformacije cilindričnih uzoraka MgO-a, onako kako je to analizirao Birch et. al., (1976). Konture napona na smicanje, radijalne i prstenaste napone u uzorku sa kruto stegnutim krajevima (npr. veoma visoko trenje) su date na slici 2.28.-b.

Uzorak je deformisan do jednog maksimalnog osovinskog napona na sabijanje od 96 MPa, a brojevi do kontura predstavljaju veličine različitih komponenti napona u jedinicama MPa.

Vrijedno je primjetiti tri karakteristike. Prva, stanje napona je poprilično kompleksno i ne može se aproksimirati kao sabijanje oko jedne ose. Druga, plastična deformacija mora biti nehomogena pošto naponi istezanja značajno variraju kroz uzorak. Na primjer, uveliko smanjeni naponi istezanja blizu krajeva uzorka rezultiraju stvaranjem "mrtvih zona" u kojima se praktično ne ostvaruje nikakva deformacija. Treća, radijalni i prstenasti naponi blizu centra uzorka su u stvari rastezljivi.

Ovo često dovodi do stvaranja pukotina koje su paralelne osi sabijanja, a predstavljaju jedan od dominantnih modela neuspjeha. Ako se ne učine napori u cilju reduciranja trenja u krajevima podaci za sabijanje mogu imati ograničenu vrijednost.

2.10. Savijanje

Problem na koji se nailazi pri testiranju savijanja je povezan sa tim koliko se značajni parametri puzanja mogu izvući iz osnovnih rezultata testa. Pozivajući se na test savijanja od 4 tačke koji je dat na slici 5 - 8a, podaci testa savijanja se obično sastoje od upisa premještaja tačke opterećenja, Y_L , kao funkcije vremena t , nakon primjene opterećenja, P .

Na slici 2.29., vidimo da uzdužni naponi savijanja σ variraju sa udaljenošću od neutralne ose na načine koji ovise od parametra, n , eksponenta napona za puzanje. Eksponent napona je samo jedan od materijalnih parametara koji se može ustanoviti.

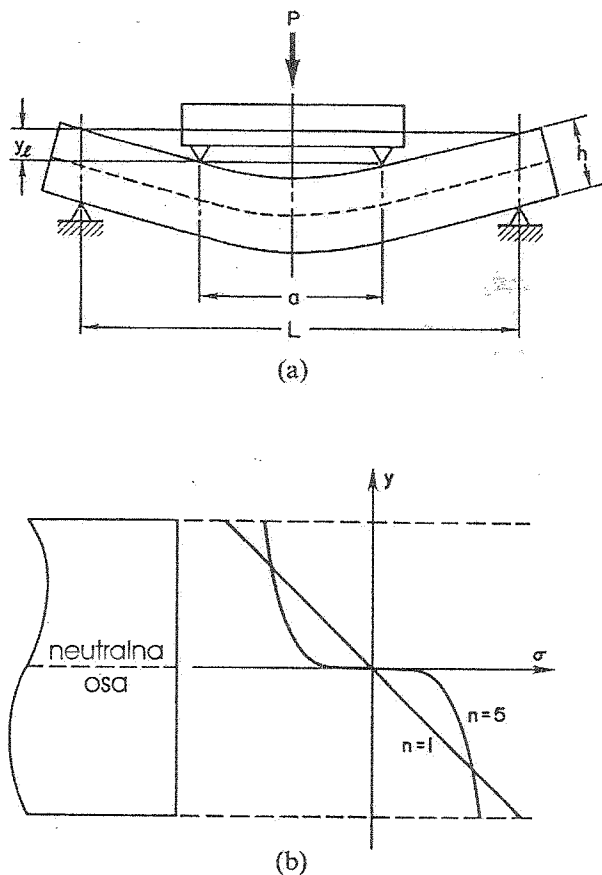
Metod analize podataka kog je razvio Hollenberg et. al., (1971) se bazira na dvije osnovne pretpostavke:

- ovisnost o naponu i vremenu pri istezanju, ϵ , može se razdvojiti u skladu sa

$$\epsilon(\sigma, t) = J(t)\sigma^n$$

$J(t)$ - prilagođenost puzanja

→ neutralna osa uzorka se ne mijenja u toku deformacije.



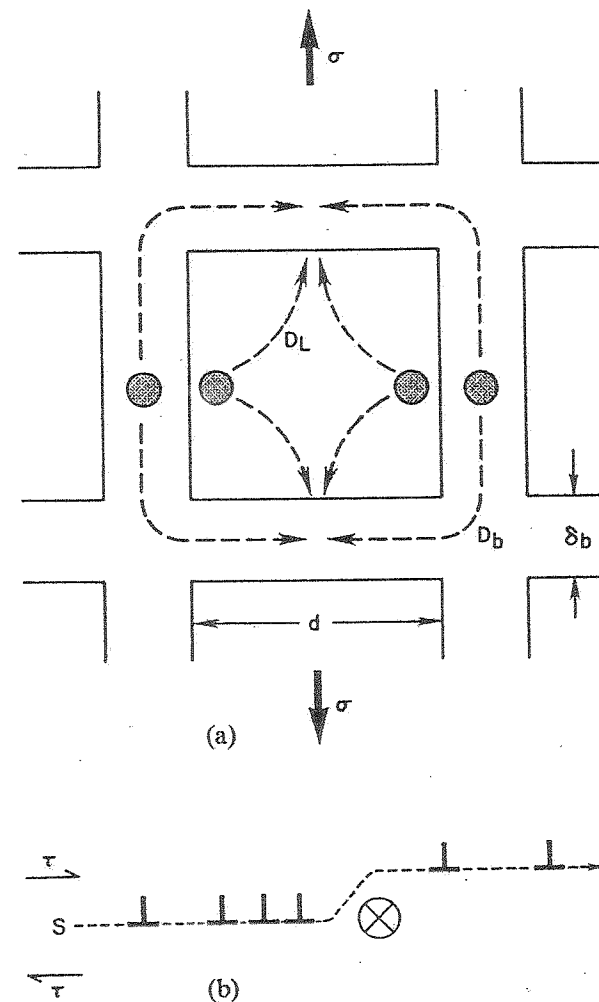
Slika 2.29. (a) Geometrija testa savijanja od 4 tačke
(b) Varijacija kod uzdužnih napona sa udaljenošću od neutralne ose

Problem kod ove analize je da puzanje u keramici često nije simetrično. Razvijene su brojne alternativne šeme da bi se izvukli značajni parametri puzanja iz testova savijanja u materijalima za koje je poznato da postoje razlike u puzanju napona na sabijanja (Talty i Dirks, 1978; Cohrt et. al., 1984; Chuang, 1986).

Iako je neki progres napravljen, svaki od metoda ima svoja vlastita ograničenja koja su povezana sa osnovnim pretpostavkama koje čine mogućom neku analizu, i svaki zahtijeva opširnu analizu. Iz ovih razloga, još ni jedan nije u širokoj upotrebi.

5.3.2. Mehanizmi puzanja

Najuobičajeniji mehanizmi puzanja i deformacije pri visokoj temperaturi u keramici su šematski predstavljani na slici 2.30.

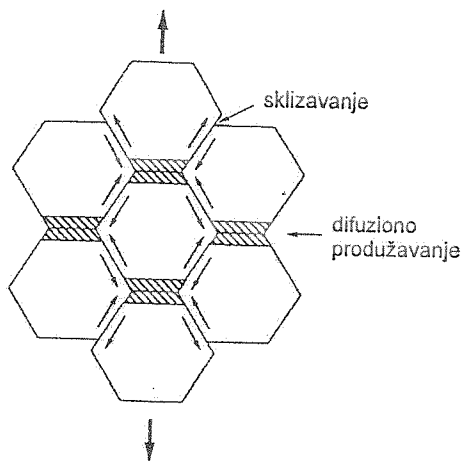


Slika 2.30. Jednostavni mehanizmi puzanja – (a) difuzioni, (b) kliženje i uspinjanje dislokacije

Slika 2.30. ilustruje difuzione mehanizme u kojima se istežanje stvara preko difuzionog toka atoma kroz ili oko zrnca nekog polikristalnog materijala. Mehanizam kod koga difuziona staza ide kroz zrnca poznat je kao

Nabarro – Herring-ovo puzanje. Kad dođe do difuzije preko granice zrnaca mehanizam se zove Coble-ovo puzanje.

Koji od ova dva mehanizma dominira ovisi od relativnog omjera granice zrnaca i difuzije rešetke, a oni se često eksperimentalno razlikuju pomoću razlike



u ovisnosti o veličini zrna (d^2 za Nabarro – Herring, d^3 za Coble).

Važno je primjetiti da je difuziono puzanje inherentno spojeno sa procesom sklizavanja granice zrna. Ovo možemo vidjeti razmatranjem jednostavnog reda heksagonalnih zrnaca prikazanih na slici 2.31.

Slika 2.31. Red heksagonalnih zrnaca koji se deformišu preko difuznog puzanja i sklizavanja granica zrnaca

Pošto se zrnca izdužuju u rastezljivom smjeru preko difuzionog toka atoma prema poprečno iscrtanim površinama, susjedna zrnca moraju sklizavati jedan preko drugog kao što je prikazano strelicama na slici. U tom smislu, moglo bi se reći da sklizavanje prihvata mehanizam za difuziono puzanje.

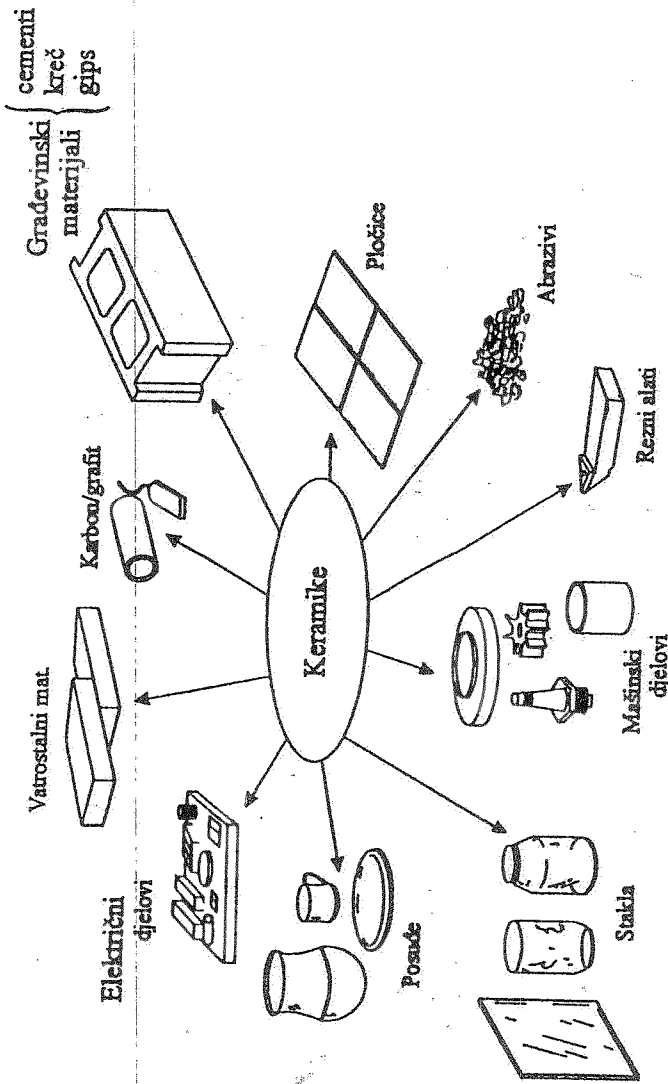
Također je moguće gledati na proces iz druge perspektive tj. da se istezanje pri puzanju stvara sklizavanjem granica zrnaca, a sklizavanje je prihvaćeno od strane difuzije.

Puzanje se također može stvoriti preko uspinjanja dislokacije i kliženjem. Mehanizam ovoga tipa predložio je Weertman (1955) koji je prikazan na slici 2.30.-b. Model se zasniva na kliženju i uspinjanju dislokacija ivice koje se nalaze u jednom izvoru, S. Kako kližu, dislokacije nailaze na prepreke kao što su pričvršćene dislokacije, koje se savladavaju uspinjanjem na različite ravni skliznuća.

TEHNIČKA KERAMIKA U PRAKSI

19-10. 2007. W

DIJELOVI	ZASTO KERAMIKA?	MATERIJAL
Materijali za obradu: Alat za rezanje Brusno kolo Mlaznica za pjeskaranje	Otpornost na habanje Tvrdoća	Aluminijum oksid Silicijum nitrid Silicijum karbid Bor karbid
Dijelovi motora: Toplotna izolacija u dijelu motora Sjedište ventila Turbinski rotor Gasna turbina Nosač katalizatora Svjećice λ-sonda	Temperaturna postojanost Korozivna otpornost Sposobnost toplotne Provodljivosti Niska specifična masa Spec. elekt. svojstva	Aluminijum oksid Aluminijum titanad Silicijum karbid Silicijum nitrid Zirkon oksid
Tehnologija: Dijelovi za kemijske aparature Klizni prsten Dijelovi armature Obloge mašine za papir Vođica konca Izvlakač žice	Koroziona postojanost Otpornost na habanje	Aluminijum oksid Silicijum oksid Grafit Titan dioksid Zirkon oksid Silicijum karbid
Visokotemperaturna tehnika: Gorionik Dizna za zavarivanje Izmjenjivač toplote Zaštitna cijev Lonci Grejni elementi	Temperaturna postojanost Koroziona postojanost Sposobnost toplotne provodljivosti	Silicijum nitrid Silicijum karbid Aluminijum oksid Ugljeni materijali Bor nitrid Molibden disilicid



Slika 2.32. Primjena Keramike

3. KOMPOZITNI MATERIJALI

Uvod

Kompozitni materijali podrazumijevaju čvrstu vezu dva ili više sastavnih elemenata, koji su sjedinjeni u makroskopskoj veličini, bez razaranja, u nerazdvojivu vezu, u cilju dobivanja boljih mehaničkih i drugih karakteristika, nego što su to posjedovali sastavni elementi kompozitnih materijala prije njihovog sjedinjavanja (armirano staklo, šofer-šajba, beton i sl.).

Ovi materijali su najstariji složeni konstruktivni materijali, jer su se čak i u dalekoj prošlosti koristili. Stari Egipćani su pravili cigle za gradnju kuća koje su proizvodili na način da su miješali glinu i slamu od žitarica pa to stavljali u kalupe i oblikovali te sušili i tako dobivali cigle koje su koristili. Vidimo da su se ovi materijali koristili prije mnogo godina kao primitivni kompozitni materijali. Današnja primjena ovih materijala je na jednom dosta višem nivou, a posebno u zadnje vrijeme kada se primjena ovih materijala naglo povećava.

Poznato da će se dva ili više materijala ponašati različito i često mnogo efikasnije nego svaki materijal posebno, te ovaj jednostavan koncept nudi koristan način razmišljanja o razvoju i primjenama materijala. Tek primjenom jedinstvenog i multidisciplinarnog pristupa materijalima možemo shvatiti pun značaj i ogroman potencijal kompozitnih materijala u svim granama tehničkih nauka.