

ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH OPRAVLJENEGA RAZISKOVALNEGA DELA NA PROJEKTU V OKVIRU CILJNEGA RAZISKOVALNEGA PROGRAMA (CRP) »KONKURENČNOST SLOVENIJE 2006 – 2013«

I. Predstavitev osnovnih podatkov raziskovalnega projekta

1. Naziv težišča v okviru CRP:

Povezovanje ukrepov za doseganje trajnostnega razvoja



REPUBLIKA SLOVENIJA
NOSILEC JAVNEGA POOBLASTILA
JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE, LJUBLJANA

3

2. Šifra projekta:

V2-0375

Prejeto: 22-12-2008	Sig. z:
	Pril:
Šifra zadeve: 63113-4.10 1006	Vrednost:
	ko

3. Naslov projekta:

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

3. Naslov projekta

3.1. Naslov projekta v slovenskem jeziku:

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

3.2. Naslov projekta v angleškem jeziku:

Use of methods and technics for assessment of ageing and safety assurance of nuclear and emissive objects

4. Ključne besede projekta

4.1. Ključne besede projekta v slovenskem jeziku:

Staranje kovin, utrujanje materiala, procesi staranja, obraba materiala, degradacija materiala, metode napovedovanja življenjske dobe, negotovost napovedovanja, neporušitvene preiskave

4.2. Ključne besede projekta v angleškem jeziku:

Ageing of materials, fatigue of material, ageing processes, wear of material, material degradation, methods of life cycle assessment, uncertainty of assessment, nondestructive methods

5. Naziv nosilne raziskovalne organizacije:

Inštitut za metalne konstrukcije

5.1. Seznam sodelujočih raziskovalnih organizacij (RO):

Institut Jozef Stefan, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Elektroinštitut Milan Vidmar

6. Sofinancer/sofinancerji:

Uprava RS za jedrsko varnost

7. Šifra ter ime in priimek vodje projekta:

3628

Borut Bundara

Datum: 22.12.2008



Podpis vodje projekta:

dr. Borut Bundara

Podpis in žig izvajalca:

dr. Borut Bundara, direktor

II. Vsebinska struktura zaključnega poročila o rezultatih raziskovalnega projekta v okviru CRP

1. Cilji projekta:

1.1. Ali so bili cilji projekta doseženi?

- a) v celoti
 b) delno
 c) ne

Če b) in c), je potrebna utemeljitev.

1.2. Ali so se cilji projekta med raziskavo spremenili?

- a) da
 b) ne

Če so se, je potrebna utemeljitev:

2. Vsebinsko poročilo o realizaciji predloženega programa dela¹:

Raziskovalni projekt CRP št. V2-0375 "Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov" je osredotočen na procese staranja, ki vplivajo na življenjsko dobo vitalnih komponent in konstrukcijskih elementov nuklearnih elektrarn (NE). Pojav staranja je postal še posebej pomemben, ko je podaljšanje življenjske dobe NE postala bolj sprejemljiva možnost tudi v javnosti.

V splošnem je staranje zapletena kombinacija procesov, ki jih je potrebno obravnavati večdisciplinarno, kar je bil tudi namen raziskovalnega projekta. Za obvladovanje zapletenih sistemov NE ter za zagotovitev neprekinjenega in varnega obratovanja na visoki zahtevnostni stopnji je potrebno obsežno sodelovanje raziskovalcev in inženirjev z različnih znanstvenih področij ter z različno izobrazbo.

Slovenske raziskovalne skupine niso naklonjene sodelovanju, tudi če si niso konkurenčne, in redko sodelujejo, četudi bi jim sodelovanje koristilo, če delujejo na komplementarnih področjih. Pomembnejši cilj projekta, če ne celo najpomembnejši cilj, je bil izboljšati sodelovanje med raziskovalnimi skupinami, ki delujejo na komplementarnih področjih. Projekt CRP št. V2-0375 je rezultat sodelovanja štirih raziskovalnih skupin, ki pripadajo naslednjim štirim raziskovalnim inštitutom:

- Inštitut za metalne konstrukcije,
- Institut "Jožef Stefan",
- Inštitut za kovinske materiale in tehnologije,
- Elektroinštitut Milan Vidmar.

Predstavniki raziskovalnih skupin so pred začetkom projekta opredelili področja oziroma vsebine obravnave, ki vse sodijo v širše področje, ki ga določa naslov projekta. V okviru svojega dela pa so skupine delale samostojno in neodvisno druga od druge ter so izbrana področja obravnavale po lastni presoji. V povezavi z ločenim delom skupin velja kot prednost izpostaviti to, da je tak način dela omogočil skupinam in sodelavcem znotraj skupin, da izkažejo svoj pogled na obravnavano področje ter iz celovite problematike izpostavijo in obravnavajo pojave, ki se jim zdijo pomembnejši.

Rezultat neodvisnega dela projektnih skupin so zaključena poročila po posameznih, vnaprej dogovorjenih temah. Kljub različnim naslovnim temam je širše oziroma naslovno področje projekta skupno, zato je razumljivo, da so projektne skupine v okviru svoje obravnave lahko posegle tudi na področje drugih skupin in da so se lahko skupine v svojih ločenih obravnavah prekrivale pri obravnavi nekaterih pojavov. Opisani način dela je torej dopuščal možnost, da dve ali več skupin obravnava isti pojav in da na tak način pride do podvajanja obravnave. Še več, opisan način je dopuščal tudi možnost razhajanja pri sicer podvojenem obravnavanju nekega pojava v različnih poglavjih istega končnega poročila projekta.

Po vsebinah je raziskovalni projekt sestavljen iz naslednjih poglavij (delovnih sklopov):

- Korozijski in drugi procesi degradacije v jedrskih elektrarnah;
- Opis neporušitvenih metod ugotavljanja napak, njihovih značilnosti in omejitev;
- Večnivojski mehanski modeli materialov v jedrski tehniki – stanje razvoja in uporabnost;
- Opredelitev komponent NEK in njihova karakterizacija;

¹ Potrebno je napisati vsebinsko raziskovalno poročilo, kjer mora biti na kratko predstavljen program dela z raziskovalno hipotezo in metodološko-teoretičen opis raziskovanja pri njenem preverjanju ali zavračanju vključno s pridobljenimi rezultati projekta.

- Izbrane vsebine s stališča uporabe v inženirski praksi NE.

V času načrtovanja projekta je bilo prvotno predvidenih sedem delovnih sklopov, vendar se je v prvem letu dela na projektu izkazalo, da precejšnjega dela vsebine ni primerno obravnavati ločeno, saj gre za izrazito multidisciplinarne in hkrati tudi soodvisne pojave. V obsežno obdelanih sklopih D1, D2 in D3 je bila tako obravnavana že pretežna vsebina prvotno predvidenih sklopov D4, D5 in D7. Da se vsebine ne bi podvajale, je bila prvotno načrtovana struktura projekta preoblikovana v skupaj pet sklopov, pri čemer je vsebina sklopov D1, D2 in D2 ostala vsebinsko enaka, kot so bila oddana delna poročila, sklop D6 se je preštevilčil v D4, prvotno predvideni sklopi D4, D5 in D7 pa so bili združeni v enovit sklop D5, v katerem so obravnavane izbrane vsebine, ki niso bile obravnavane v ostalih sklopih ali pa se je avtorjem zdelo primerno, da se nekateri pojavi dodatno obravnavajo.

Rezultat sodelovanja na skupnem projektu je skupno poročilo v obliki monografije, ki po vsebini obsega več kot 400 strani besedila, skupaj s slikami, tabelami in referenčnimi literaturnimi viri. Skupno poročilo je vsekakor dober informativni vir za seznanitev s kompleksnostjo obravnavanega področja ter tudi izhodišče za načrtovanje nadaljnjih raziskav.

3. Izkoriščanje dobljenih rezultatov:

3.1. Kakšen je potencialni pomen² rezultatov vašega raziskovalnega projekta za:

- a) odkritje novih znanstvenih spoznanj;
- b) izpopolnitev oziroma razširitev metodološkega instrumentarija;
- c) razvoj svojega temeljnega raziskovanja;
- d) razvoj drugih temeljnih znanosti;
- e) razvoj novih tehnologij in drugih razvojnih raziskav.

3.2. Označite s katerimi družbeno-ekonomskimi cilji (po metodologiji OECD-ja) sovpadajo rezultati vašega raziskovalnega projekta:

- a) razvoj kmetijstva, gozdarstva in ribolova - Vključuje RR, ki je v osnovi namenjen razvoju in podpori teh dejavnosti;
- b) pospeševanje industrijskega razvoja - vključuje RR, ki v osnovi podpira razvoj industrije, vključno s proizvodnjo, gradbeništvom, prodajo na debelo in drobno, restavracijami in hoteli, bančništvom, zavarovalnicami in drugimi gospodarskimi dejavnostmi;
- c) proizvodnja in racionalna izraba energije - vključuje RR-dejavnosti, ki so v funkciji dobave, proizvodnje, hranjenja in distribucije vseh oblik energije. V to skupino je treba vključiti tudi RR vodnih virov in nuklearne energije;
- d) razvoj infrastrukture - Ta skupina vključuje dve podskupini:
 - transport in telekomunikacije - Vključen je RR, ki je usmerjen v izboljšavo in povečanje varnosti prometnih sistemov, vključno z varnostjo v prometu;
 - prostorsko planiranje mest in podeželja - Vključen je RR, ki se nanaša na skupno načrtovanje mest in podeželja, boljše pogoje bivanja in izboljšave v okolju;
- e) nadzor in skrb za okolje - Vključuje RR, ki je usmerjen v ohranjanje fizičnega okolja. Zajema onesnaževanje zraka, voda, zemlje in spodnjih slojev, onesnaženje zaradi hrupa, odlaganja trdnih odpadkov in sevanja. Razdeljen je v dve skupini:
- f) zdravstveno varstvo (z izjemo onesnaževanja) - Vključuje RR - programe, ki so usmerjeni v varstvo in izboljšanje človekovega zdravja;
- g) družbeni razvoj in storitve - Vključuje RR, ki se nanaša na družbene in kulturne probleme;
- h) splošni napredek znanja - Ta skupina zajema RR, ki prispeva k splošnemu napredku znanja in ga ne moremo pripisati določenim ciljem;
- i) obramba - Vključuje RR, ki se v osnovi izvaja v vojaške namene, ne glede na njegovo vsebino, ali na možnost posredne civilne uporabe. Vključuje tudi varstvo (obrambo) pred naravnimi nesrečami.

² Označite lahko več odgovorov.

3.3. Kateri so **neposredni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

b) Obravnavane vsebine (procesi staranja materialov, ocena stanja objektov in komponent ter ocena preostale življenjske dobe objektov) so zanimive za načrtovanje novih NE, kot tudi drugih energetskih in industrijskih objektov, kot tudi za oceno stanja ter napoved poteka degradacijskih procesov ter oceno preostale življenjske dobe obstoječih energetskih in industrijskih objektov.

c) Rezultati so pomembni za varno in zanesljivo obratovanje NE, uporabni pa so tudi za druge energetske objekte.

e) V primeru NE pomeni varno in obvladovano obratovanje tudi varnost za okolje. Poleg NE so v manjšem obsegu obravnavani tudi vplivi v povezavi s shranjevanjem radioaktivnih odpadkov.

h) Cilj projekta je bil tudi akumulacija in širitev znanja na spremljajočih področjih, ki niso povezana zgolj z NE. Ta spremljajoča področja so metode ugotavljanja stanja in preskušanja ter metode modeliranja procesov degradacije.

3.4. Kakšni so lahko **dolgoročni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

b) Sodelovanje in prenos spoznanj v pomenu podpore investitorju pri načrtovanju predvidene izgradnje II. bloka NEK.

b+c) Podpora upravljalcem velikih energetskih objektov pri načrtovanju vzdrževalnih del na podlagi ocene stanja kritičnih komponent ter napovedi preostale uporabne dobe.

h) Izboljšanje sodelovanja med slovenskimi raziskovalnimi skupinami, ki delujejo na obravnavanih področjih, kar daje možnost za celovitejšo podporo uporabnikom in tudi izboljšuje možnost za sodelovanje na mednarodnih projektih.

3.5. Kje obstaja verjetnost, da bodo vaša znanstvena spoznanja deležna zaznavnega odziva?

- a) v domačih znanstvenih krogih;
- b) v mednarodnih znanstvenih krogih;
- c) pri domačih uporabnikih;
- d) pri mednarodnih uporabnikih.

3.6. Kdo (poleg sofinancerjev) že izraža interes po vaših spoznanjih oziroma rezultatih?

NEK, industrijski partnerji projekta NULIFE, Materials performance centre University of Manchestr, CEA, TEŠ, TET, Metalna Nova, TE Obrenovac

3.7. Število diplomantov, magistrov in doktorjev, ki so zaključili študij z vključenostjo v raziskovalni projekt?

0

4. Sodelovanje z tujimi partnerji:

4.1. Navedite število in obliko formalnega raziskovalnega sodelovanja s tujimi raziskovalnimi inštitucijami.

IMK: Leonardo da Vinci (en projekt)
IJS: skupaj 7 projektov v 5., 6. in 7. okvirnem programu Evropske komisije (EURATOM)
+ dva bilateralna mednarodna projekta
IMT: AMBIO - 6. Okvirni program

4.2. Kakšni so rezultati tovrstnega sodelovanja?

Izmenjava raziskovalnih rezultatov in izkušenj, skupne objave, priprava novih skupnih raziskovalnih projektov, posredovanje znanja.

5. Bibliografski rezultati³ :

Za vodjo projekta in ostale raziskovalce v projektni skupini priložite bibliografske izpise za obdobje zadnjih treh let iz COBISS-a) oz. za medicinske vede iz Inštituta za biomedicinsko informatiko. Na bibliografskih izpisih označite tista dela, ki so nastala v okviru pričujočega projekta.

6. Druge reference⁴ vodje projekta in ostalih raziskovalcev, ki izhajajo iz raziskovalnega projekta:

V neposredni zvezi s projektom velja izpostaviti dva sestanka:

a) Sestanek dne 18.1.2007 z vodstvom NEK - na sestanku je bila predstavljena načrtovana vsebina projekta ter pričakovani cilji.

b) Na sestanek sodelujočih projektnih partnerjev, ki je bil dne 6.9.2007, so bili vabljeni predstavniki sofinancerjev projekta. Sestanka sta se udeležila predstavnika sofinancerja URSJV - dr. Andrej Stritar in g. Sebastjan Šavli. Na sestanku je bilo predstavljeno do takrat opravljeno delo partnerjev IJS in IMT.

³ Bibliografijo raziskovalcev si lahko natisnete sami iz spletne strani: <http://www.izum.si/>

⁴ Navedite tudi druge raziskovalne rezultate iz obdobja financiranja vašega projekta, ki niso zajeti v bibliografske izpise, zlasti pa tiste, ki se nanašajo na prenos znanja in tehnologije. Navedite tudi podatke o vseh javnih in drugih predstavitev projekta in njegovih rezultatov vključno s predstavitvami, ki so bile organizirane izključno za naročnika/naročnike projekta.

CRP št. V2-0375

**Uporaba metod in tehnik za oceno staranja
in zagotovitev varnega obratovanja
jedrskih in sevalnih objektov**

P – 27109

Ljubljana, december 2008

CRP št. V2-0375

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

P – 27109

Naročnika:

- Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
- Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost

Pogodbena osnova:

- Osnovna pogodba sklenjena med financerjema in nosilcem projekta IMK (pogodba št. 1000-06-280375, z dne 20.10.2006)
- Pogodba med partnerji na projektu: IMK, IJS, IMT in EiMV (pogodba št. 35/T-2006, z dne 21.12.2006)

Partnerji na projektu:

- Inštitut za metalne konstrukcije
- Institut Jožef Stefan
- Inštitut za materiale in tehnologije
- Elektroinštitut Milan Vidmar

Odgovorni za projekt:

dr. Borut Bundara, vodja projekta
prof. dr. Leon Cizelj
doc. dr. Jelena Vojvodič Tuma
mag. Bogo Pirš

Zahvala

Avtorji se za finančno podporo projekta CRP št. V2-0375 zahvaljujejo:

- Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (**ARRS**),
- Upravi Republike Slovenije za jedrsko varnost (**URSJV**).

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge that research project CRP no. V2-0375 was financially supported by:

- Slovenian Research Agency (**SRA - ARRS**),
- Slovenian Nuclear Safety Administration (**SNSA - URSJV**).

Povzetek

Med energetske objekti so nuklearne elektrarne (NE) najbolj zahtevni objekti glede obsega in kompleksnosti znanja, ki je potrebno za projektiranje, izgradnjo, vzpostavitev, varno delovanje ter ustrezno vzdrževanje. Za varno obratovanje NE je ključnega pomena, da so na voljo zanesljivi postopki in metode za pregled napeljav ter ugotovitev napak in poškodb, ki bi lahko vplivale na varno in zanesljivo obratovanje. V povezavi z zanesljivostjo obratovanja je zelo pomembno, da so na voljo tudi učinkovite in zanesljive preskusne metode za ugotovitev stanja komponent in napeljav, kot je pomembno tudi, da je na voljo učinkovita metodologija, ki omogoča natančno oceno stopnje degradacije materiala ter zanesljivo napoved preostale dobe varnega obratovanja konstrukcij in komponent.

Raziskovani projekt "Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov" je osredotočen na procese staranja, ki vplivajo na življenjsko dobo vitalnih komponent in konstrukcijskih elementov NE. Pojav staranja je postal še posebej pomemben, ko je podaljšanje življenjske dobe NE postala bolj sprejemljiva možnost tudi v javnosti. V splošnem je staranje zapletena kombinacija procesov, ki jih je potrebno obravnavati večdisciplinarno, kar je bil tudi namen raziskovalnega projekta.

Po vsebinah je raziskovalni projekt sestavljen iz naslednjih poglavij:

- Korozija in drugi procesi degradacije v jedrskih elektrarnah;
- Opis neporušitvenih metod ugotavljanja napak, njihovih značilnosti in omejitev;
- Večnivojski mehanski modeli materialov v jedrski tehniki – stanje razvoja in uporabnost;
- Opredelitev komponent NEK in njihova karakterizacija;
- Izbrane vsebine s stališča uporabe v inženirski praksi NE.

Za obvladovanje zapletenih sistemov NE ter za zagotovitev neprekinjenega in varnega obratovanja na visoki zahtevnostni stopnji je potrebno obsežno sodelovanje raziskovalcev in inženirjev z različnih znanstvenih področij ter z različno izobrazbo. Žal pa slovenske raziskovalne skupine niso naklonjene sodelovanju in nerade sodelujejo, tudi če si niso konkurenčne, prav tako pa redko sodelujejo, četudi gre za komplementarna področja.

Pomembnejši cilj projekta, če ne celo najpomembnejši cilj, je bil izboljšati sodelovanje med raziskovalnimi skupinami, ki delujejo na komplementarnih področjih. Projekt je tako rezultat sodelovanja štirih raziskovalnih skupin, ki pripadajo naslednjim štirim raziskovalnim inštitutom:

- Inštitut za metalne konstrukcije (www.imk.si).
- Inštitut "Jožef Stefan" (www.ijs.si),
- Inštitut za kovinske materiale in tehnologije (www.imt.si),
- Elektroinštitut Milan Vidmar (www.eimv.si).

Abstract

Nuclear Power Plants (NPP) are so far the most demanding electric power plants concerning the extent and complexity of knowledge that is needed for design, construction, installation, safe operation and proper maintenance. For safe operation of the NPP it is important to have reliable inspection procedures and methods to detect the relevant defects in the components. It is also important to have effective techniques and efficient methodology that enable precise estimation of the material degradation and reliable prediction of the remaining period of the safe service of structures and components.

The research project "Methods and Techniques for Assessment of Ageing and Safety of Nuclear Objects" is focused on ageing processes that have impact on the life cycle and safety of vital components and structure elements in NPP. Ageing phenomena started to be more important issue when the extension of the life time of the NPP became an acceptable option. In general, ageing is a complex combination of processes that should be studied multidisciplinary, what was the aim of the research project.

The research project is structured in to the following topics:

- Corrosion and other degradation processes in NPP;
- Defects detection methods, there characteristics and limitations;
- Multiscale mechanical models in nuclear engineering - state-of-the-art and applicability;
- Determination and classification of the key components in NEK;
- Selected topics related with applications in engineering practice of NPP.

Complexity of the NPP and continuous operation at high level of safety demands extensive cooperation of researchers and engineers with different scientific and educational background. Unfortunately, it is characteristic for the Slovenian research practice that research groups do not tend to cooperate even when their research activities are not competitive at all, and even when their research interest and activities would rather be considered as complementary.

One of the most important goals of the project, if not the dominant one, was also to improve the cooperation between the research groups that work on complementary topics. The project is result of cooperation between four research groups affiliated to the following four institutes:

- Institute of Metal Constructions (www.imk.si).
- Institute "Josef Stefan" (www.ijs.si),
- Institute of Metals and Technology (www.imt.si),
- Milan Vidmar Electric Power Research Institute (www.eimv.si).

Predgovor

Na projektu CRP št. V2-0375 so sodelovale štiri raziskovalne skupine s štirih raziskovalnih ustanov – partneric na projektu. Predstavniki raziskovalnih skupin so pred začetkom projekta opredelile področja oziroma vsebine, ki jih bodo obravnavale. Vse dogovorjene vsebine sodijo v širše področje, ki ga določa naslov projekta. V okviru svojega dela pa so skupine delale samostojno in neodvisno druga od druge ter so izbrana področja obravnavale po lastni presoji.

Opisan način dela ima nekatere slabosti, a tudi prednosti. Pomebna slabost je, da rezultat ločenega dela skupin na skupnem projektu ni končni izdelek, ki bi bil usklajen med skupinami. Rezultat takega dela torej ni končno poročilo, ki bi vsebovalo nekakšen prečiščen in usklajen pogled večje skupine znastvenikov, raziskovalcev in strokovnjakov na vsebine, ki so obravnavane v projektu. Konsistentno usklajeno poročilo bi bilo izjemno koristno branje za nekoga, ki bi žele dobiti splošen in uravnotežen pogled na obravnavano področje. Resnici na voljo velja izpostaviti, da si je težko predstavljati, da bi tako široka skupina lahko prišla do omembe vrednega poenotenja, še posebej ne znotraj časovne in finančne omejitve projekta.

V povezavi z ločenim delom skupin pa velja kot prednost izpostaviti to, da je tak način dela omogočil skupinam in sodelavcem znotraj skupin, da izkažejo svoj pogled na obravnavano področje ter iz celovite problematike izpostavijo in obravnavajo pojave, ki se jim zdijo pomembnejši. Iz izdelka skupin in končnega poročila je tako mogoče razbrati, da je obravnavano področje zelo kompleksno in multidisciplinarno, in da ga zato ne morejo obvladovati posamezniki, čeprav imajo znanje z več področij, temveč ga lahko obvladajo le večje skupine, ki jih sestavljajo člani s splošnim znanjem z obravnavanega področja ter hkrati s specialističnim znanjem z enega ali več specialnih področij.

Rezultat neodvisnega dela projektnih skupin so zaključena poročila po posameznih, vnaprej dogovorjenih temah. Kljub različnim naslovnim temam je širše oziroma naslovno področje projekta skupno, zato je razumljivo, da so projektne skupine v okviru svoje obravnave lahko posegle tudi na področje drugih skupin in da so se lahko skupine v svojih ločenih obravnavah prekrivale pri obravnavi nekaterih pojavov. Opisan način dela je torej dopuščal možnost, da dve ali več skupin obravnava isti pojav in da na tak način pride do podvajanja obravnave. Še več, opisan način je dopuščal tudi možnost razhajanja pri sicer podvojenem obravnavanju nekega pojava v različnih poglavjih istega končnega poročila projekta.

Ob možnosti, da se nekatere teme ali pojavi obravnavajo dvakrat, je morda potrebno še bolj izpostaviti možnost, da se kateri od sicer pomebnih pojavov sploh ne omeni. V povezavi s slednjim je potrebno takoj dodati, da v resnici praktično ni bilo mogoče niti približno zapisati vsega, kar se zdi avtorjem še pomembno obravnavati. Bralec naj zato sprejme z razumevanjem dejstvo, da je v skupnem poročilu napisanega precej, da pa to še zdaleč ni vse. Za morebitno nadaljnje branje je v tem delu vsekakor navedenih veliko virov, preko katerih lahko bralec enostavno dostopi do svetovne zakladnice znanja na obravnavanem področju in tudi širše.

V zaključku tega predgovora se v svojem imenu in v imenu vseh partnerjev na projektu zahvaljujem financerjema za finančno podporo. V svojem osebnem imenu pa želim, kljub svoji veliki zaskrbljenosti ob odobritvi projekta, izraziti občudovanje za smelo odločitev financerjev, da finančno podpreta združen projekt in tako vzpodbudita sodelovanje med raziskovalnimi skupinami.

Ljubljana, 17.12.2008

Vodja projekta:

dr. Borut Bundara

KAZALO po sklopih

I.	Korozija in drugi procesi degradacije v jedrskih elektrarnah	D1
II.	Opis neporušitvenih metod ugotavljanja napak, njihovih značilnosti in omejitev	D2
III.	Večnivojski mehanski modeli materialov v jedrski tehniki – stanje razvoja in uporabnost	D3
IV.	Opredelitev komponent NEK in njihova karakterizacija	D4
V.	Izbrane vsebine s stališča uporabe v inženirski praksi NE.....	D5



CRP št. V2-0375

(P – 27109)

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

Delovni sklop D5

Izbrane vsebine s stališča uporabe v inženirski praksi NE

Vodja projekta:

dr. Borut Bundara

Sodelavci na projektu:

**dr. Robert Cvelbar, mag. Tea Bilić Zabric, Simon Božič, Gregor
Gruden, Janez Jereb, Andrej Zajec, Janko Vodišek, Andrej Weiss**

Ljubljana, december 2008

KAZALO

1.	UVOD.....	3
2.	METODE ZA NAPOVEDOVANJE RAZVOJA NAPAK IN UPORABNE DOBE KOMPONENT.....	3
2.1	METODE ZA NAPOVEDOVANJE RAZVOJA LEZENJA	3
2.2	KOROZIJA.....	7
2.3	METODE ZA NAPOVEDOVANJE MEHANSKE UTRUJENOSTI.....	11
2.4	METODE ZA NAPOVEDOVANJE NAPETOSTNEGA KOROZIJSKEGA POKANJA	17
3.	VPLIV NEGOTOVOSTI NA NATANČNOST NAPOVEDI UPORABNE DOBE..	20
3.1	UVOD	20
3.2	DETERMINISTIČNA OCENA UTRUJENOSTI MATERIALA	21
3.3	VERJETNOSTNA OCENA UTRUJENOSTI MATERIALA	21
3.4	ZAKLJUČEK	22
4.	IZDELAVA SMERNIC ZA IZBIRO IN UPORABO NEPORUŠITVENIH TEHNIK PRI APLIKACIJAH NA JEDRSKIH OBJEKTIH.....	23
4.1	KOMPONENTE, KI SO PREDMET PREGLEDV IN TESTIRANJ	23
4.2	KARAKTERIZACIJA NAPAK	23
4.3	ZAKLJUČEK	32
5.	LITERATURA.....	32

1. UVOD

Na projektu CRP št. V2-0375 so sodelovale štiri raziskovalne skupine s štirih raziskovalnih ustanov – partneric na projektu. Predstavniki raziskovalnih skupin so pred začetkom projekta opredelile področja oziroma vsebine, ki jih bodo obravnavale. Vse dogovorjene vsebine sodijo v širše področje, ki ga določa naslov projekta. V okviru svojega dela pa so skupine delale samostojno in neodvisno druga od druge ter so izbrana področja obravnavale po lastni presoji.

Opisan način dela ima nekatere slabosti, a tudi prednosti. Pomebna slabost je, da rezultat ločenega dela skupin na skupnem projektu ni končni izdelek, ki bi bil usklajen med skupinami. Rezultat takega dela torej ni končno poročilo, ki bi vsebovalo nekakšen prečiščen in usklajen pogled večje skupine znastvenikov, raziskovalcev in strokovnjakov na vsebine, ki so obravnavane v projektu. Konsistentno usklajeno poročilo bi bilo izjemno koristno branje za nekoga, ki bi žele dobiti splošen in uravnotežen pogled na obravnavano področje. (opomba nosilca projekta: Resnici na voljo velja izpostaviti, da si je težko predstavljati, da bi tako široka skupina lahko prišla do omembe vrednega poenotenja, še posebej ne znotraj časovne in finančne omejitve projekta).

V povezavi z ločenim delom skupin pa velja kot prednost izpostaviti to, da je tak način dela omogočil skupinam in sodelavcem znotraj skupin, da izkažejo svoj pogled na obravnavano področje ter iz celovite problematike izpostavijo in obravnavajo pojave, ki se jim zdijo pomembnejši. Iz izdelka skupin in končnega poročila je tako mogoče razbrati, da je obravnavano področje zelo kompleksno in multidisciplinarno, in da ga zato ne morejo obvladovati posamezniki, čeprav imajo znanje z več področij, temveč ga lahko obvladajo le večje skupine, ki jih sestavljajo člani s splošnim znanjem z obravnavanega področja ter hkrati s specialističnim znanjem z enega ali več specialnih področij.

Rezultat neodvisnega dela projektnih skupin so zaključena poročila po posameznih v naprej dogovorjenih temah. Kljub različnim naslovnim temam je širše oziroma naslovno področje projekta skupno, zato je razumljivo, da so projektne skupine v okviru svoje obravnave lahko posegle tudi na področje drugih skupin in da so se lahko skupine v svojih ločenih obravnavah prekrivale pri obravnavi nekaterih pojavov. Opisan način dela je torej dopuščal možnost, da dve ali več skupin obravnava isti pojav in da na tak način pride do podvajanja obravnave. Še več. opisan način je dopuščal tudi možnost razhajanja pri sicer podvojenem obravnavanju nekega pojava v različnih poglavjih istega končnega poročila projekta.

Ob možnosti, da se nekatere teme ali pojavi obravnavajo dvakrat, pa je potrebno še bolj izpostaviti možnost, da se kateri od sicer pomebnih pojavov sploh ne omeni. Pričujoče poglavje je nastalo prav na osnovi zelo ambiciozne želje, da se v njem omenijo vsebine, ki niso omenjene v drugih poglavjih. In tu je potrebno takoj dodati, da v resnici praktično ni bilo mogoče niti približno zapisati vsega, kar se zdi avtorjem še pomembno obravnavati.

2. METODE ZA NAPOVEDOVANJE RAZVOJA NAPAK IN UPORABNE DOBE KOMPONENT

2.1 METODE ZA NAPOVEDOVANJE RAZVOJA LEZENJA

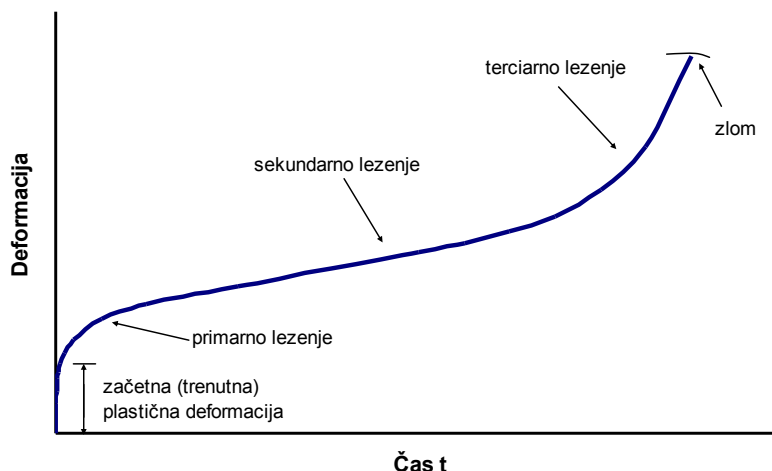
2.1.1 Uvod

Lezenje je mehanizem deformacije, kjer je velikost deformacije odvisna od trajanja obremenitve. Tehnično pomembno postane lezenje šele pri višjih temperaturah, približno nad 40% temperature tališča (T_t) in ob mehanski napetosti v materialu, ki je nižja od napetosti tečenja. Material obremenjen s konstantno obremenitvijo se zaradi toplotno aktiviranih procesov, ki potekajo v njem, s časoma deformira (trajna deformacija). Pri preizkusu lezenja dobimo krivuljo lezenja, na kateri je izražena odvisnost deformacije preizkušanca od časa preizkusa.

Deformacija poteka v treh stopnjah:

1. primarno lezenje - hitrost deformacije s časom pojema
2. sekundarno lezenje - hitrost deformacije se s časom ne spreminja (je konstantna)
3. terciarno lezenje - hitrost deformacije s časom narašča in končno privede do loma preizkušanca.

Faze lezenja



Slika 1: Faze običajne krivulje lezenja

Mehanska trdnost kovin se zniža z dvigom temperature in materialne lastnosti postanejo bolj časovno odvisne. V preteklosti so obratovalne temperature v napravah kot je parni krog elektrarne, kemične procesne enote in naftne rafinerije redko presegle 500 °C, a je razvoj plinskih turbin po letu 1940 te temperature dvignil vse do 1000 °C. Razvoj visokotemperaturnih zlitin z izboljšano visoko temperaturno trdnostjo in odpornostjo na oksidacijo, dohaja nove zahteve.

Visko-elastični materiali, kot so na primer polimeri, izkazujejo časovno odvisno deformacijo pri konstantni obremenitvi že pri sobni temperaturi. V primeru velike večine kovin velja, da je časovna odvisnost deformacije zaznavna šele pri precej višjih temperaturah od sobne. Pri zelo visokih temperaturah pa postane lezenje tudi pri kovinah vse bolj pomemben mehanizem, ki ga je potrebno upoštevati. Kovine, ki so obremenjene s konstantnim bremenom in hkrati izpostavljene visokim temperaturam, se deformirajo po mehanizmu lezenja.

Lezenje je v osnovi pojav, za katerega je značilno, da deformacija narašča kljub sicer konstantni obremenitvi materiala. V izvornem oziroma osnovnem modelu lezenja so konstantni vsi ostali parametri (npr. temperatura), ki bi lahko vplivali na mehanske lastnosti materiala. Odziv materiala na konstantno obremenitve in v pogojih povišane temperature se v laboratorijih preskuša na poenostavljenih obremenitvenih slučajih.

V inženirski praksi pa so materiali praviloma izpostavljeni bolj kompleksnim obremenitvam, kot jih je sicer mogoče izvesti v laboratoriju. V praksi so materiali izpostavljeni spremenljivim pogojem obratovanja, znotraj katerih se lahko pogosto spreminja velikost in tudi oblika mehanske obremenitve, poleg tega pa se spreminja še temperaturni režim. V povezavi z razkorakom med laboratorijskimi pogoji in dejanskimi pogoji v praksi, se je potrebno zavedati, da je na osnovi laboratorijskih rezultatov izjemno težko sklepati o odzivu materiala na dejanske obratovalne pogoje. Posledično so tudi napovedi procesov v materialu nezanesljive sorazmerno z odstopanjem dejanskih pogojev od idealnih – laboratorijskih pogojev.

Pri kovinah je proces lezenja povezan z mehansko obremenitvijo v pogojih povišane temperature. Termina visoke in nizke temperature sta relativna glede na temperature taljenja kovine. Lezenje postane inženirsko izjemno pomembno pri konstantni temperaturi višji od polovice temperature taljenja kovine (absolutna temperaturna skala v K). Zgolj kot primer so v Tabeli 1 predstavljene vrednosti za elementa svinec in volfram.

Tabela 1: Mejna temperatura lezenja za svinec in volfram

Element	Temperatura taljenja		0.5*Temperatura taljenja	
	K	°C	K	°C
Pb	600	327	300	27
V	3680	3407	1840	1567

Za kovine z nizko temperaturo taljenja, kot je na primer svinec, postane lezenje pomembno že pri sobni temperaturi, približno 27 °C. To že lahko povzroči, da se npr. svinčene drenažne cevi upognejo med podporama. Kovine z zelo visoko temperaturo taljenja, kot je npr. volfram, lezejo šele pri temperaturah nad 1500 °C. Žarilna nitka svetilke ima temperaturo nad 2000 °C in leze zgolj zaradi obremenitve z lastno težo, kar ji odmerja življenjsko dobo približno 1000 h.

V inženirski praksi so sicer na voljo zlitine, ki so primerne za visoke temperature, vendar pa imajo te zlitine tudi pomanjkljivosti, kot so na primer naslednje:

- nižja trdnost;
- višja mobilnost atomov in dislokacij, plezanje dislokacij in njihova difuzija;
- višja ravnotežna koncentracija praznin;
- novi deformacijski mehanizmi, kot novi drsni sistemi ali drsenje roba zrn;
- rekristalizacija in rast zrn;
- oksidacija in penetracija med zrn.

2.1.2 Razvoj zlitin z visoko odpornostjo na lezenje

Na podlagi razvoja na področju materialov je v zadnjih desetletjih doseženo pomembno izboljšanje odpornosti martenzitnih jekel na lezenje. V primeru martenzitnih jekel, ki se uporabljajo za fosilne parne elektrarne (vsebnost kroma 9 do 12 %), je odpornost na zlom zaradi lezenja podvojena. Tako pomembno izboljšanje lastnosti materialov je omogočilo razvoj naprednih fosilnih parnih elektrarn z višjim izkoristkom. Izboljšani materiali so omogočili dvig obratovalnih parametrov pare z ravni od podkritičnih 180 bar /530-540 °C do ultra superkritičnih vrednosti 300 bar in 600 °C, kar ima za posledico povečanje izkoristka s prejšnjih 30 – 35 % na 42 - 47 %. Tako povečanje izkoristka ima med drugim tudi pomembne pozitiven vpliv na okolje, saj pomeni redukcijo specifične emisije CO₂ za približno 30 %.

Za uvedbo novega materiala z dobro odpornostjo na lezenje, je potrebno celo desetletje testiranja, preden se lahko uporabi za izdelavo neke ključne komponente, kot je na primer tlačna posoda. Vzporedno s testiranjem se izvajajo detajlne študije stabilnosti mikrostrukture zlitine z dvema ciljema:

- a) da se zagotovi dolgotrajna stabilnost nove zlitine vse do 300,000 ur, kar je pričakovana maksimalna življenjska doba novih elektrarn,
- b) da se pride do smernic za razvoj še boljših jekel, ki bi omogočala še višje parametre pare, torej še višji izkoristek in še nižje specifične emisije CO₂.

2.1.3 Visoko temperaturni mehanski testi

Da bi lahko ocenili visokotemperaturne lastnosti, so potrebni različni preskusi, ki morajo biti ustrezati časovni skali obratovalnih zahtev. To vključuje naslednje:

i. Visoko temperaturni natezni preskus

Podoben je testu pri sobni temperaturi in se konča v nekaj minutah ter podaja krivuljo napetosti odvisno od raztezka pri specifični temperaturi. Daje uporabne podatke za uporabo materiala za kratek čas, npr. za dele rakete.

ii. Preskus lezenja

Izmeri se spremembo dimenzij s časom pri konstantni visoki temperaturi in konstantni obremenitvi. Primeren za daljšo življenjsko dobo, ki je omejena z raztežkom, kot je to na primer pri turbinskih lopaticah. Testni vzorci so podobni nateznem preizkušancu, vendar imajo na koncih navoje, da ne pride do zdrsa iz čeljusti preskuševalne naprave.

iii. Napetostni raztržni test

Meri se čas do trganja pri določeni napetosti in temperaturi. Uporaben za primere, ko so raztezki in posledične deformacije dopustni do neke mere, vendar pa mora biti zagotovljena varnost proti zlomu, kar velja na primer pri velikih ohišjih talilnih peči.

V Tabeli 2 so povzete bistvene razlike med preskusom lezenja in raztržnim testom

Tabela 2: Primerjava (dolgotrajnega) preskusa lezenja in porušnega preskusa lezenja (*creep rupture test*)

Parametri preskusa	Preskus lezenja	Porušni preskus lezenja
obremenitev	konstantna sila (relativno nizka obremenitev)	konstantna sila (višja obremenitev)
merjeni parametri	raztezek, čas	raztezek, čas
temperatura	konstantna	konstantna
hitrost	relativno nizka hitrost lezenja	višja hitrost lezenja
trajanje	Dolgotrajno: 2 000 do 10 000 ur. ne vedno do zloma	običajno manj kot 1 000 ur do zloma.
natančnost	raztezek merjen natančno, da se določi hitrost lezenja raztezki običajno manj kot 0.5 %	enostavnejša merilna naprava meri se čas in raztezek do pretrga raztezek običajno do 50 %.
rezultat	krivulja: deformacija - čas	čas do porušitve

2.1.4 Krivulja lezenja in napoved življenjske dobe

Čisto lezenje

Lezenje kovin je definirano kot časovno odvisna plastična (trajna) deformacija pri konstantni napetosti ali obremenitvi in konstantni temperaturi. Oblika tipične krivulje lezenja v obliki diagrama deformacija - čas je prikazana na sliki 1. Naklon krivulje je hitrost lezenja $d\varepsilon/dt$.

Na krivulji se jasno ločijo tri faze procesa lezenja. Primarna faza v kateri močno raste odpornost proti lezenju. Sekundarna faza je območje konstantnega lezenja. Terciarna faza je območje pospešenega lezenja, zaradi akumulirane deformacije, ki se konča s porušitvijo (s pretrgom oziroma z zlomom) preskušanca. Za potrebe projektiranja je najpomembnejše minimalno sekundarno lezenje, saj je tedaj mogoče zanesljiveje napovedati čas do zloma in na tak način določiti življenjsko dobo s primerno varnostjo.

V inženirski praksi se je potrebno izogniti preveliki deformaciji ali celo porušitvi komponent ter zagotoviti primerno varnost. Za zanesljivo napoved je zato ključno, da so na voljo zanesljivi podatki o odzivu materiala na obremenitvene pogoje, ki so, čeprav dobljeni v laboratorijskih pogojih, primerljivi z dejanskimi obremenitvenimi pogoji, ki jim bo obravnavani material izpostavljen, ko bo v obliki konstrukcijskega elementa vgrajen v objekt. V resnici laboratorijski pogoji preskušanja praviloma zelo odstopajo od dejanskih obratovalnih, vendar se je kljub temu potrebno zanesti na rezultate preskusov in jih upoštevati s potrebno previdnostjo. Za karakterizacijo materiala na lezenje sta v inženirski praksi uporabna naslednja podatka:

- (i) Napetost, ki povzroči lezenje pri hitrosti 0.0001 % na uro (1 % v 10.000 urah) – zahteva je tipična za lopatice plinskih turbin.
- (ii) Napetost, ki povzroči lezenje pri hitrosti 0.00001 % na uro (1 % v 100.000 urah ali pribl. 11.5 let) – zahteva je tipična za lopatice parnih turbin.

Obstaja več izkustvenih modelov za krivulje lezenja. Andrade (1914) je predpostavil superpozicijo tranzientnega člena viskoznega lezenja

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \beta t^{1/3} \right) \exp(kt) \quad (1)$$

kjer je t čas in β , k , ε_0 so konstante.

Wyatt (1953) je uporabil podatke polikristalnega bakra in izdelal naslednjo izkustveno formulo

$$\varepsilon = a \log t + bt^n + ct \quad (2)$$

kjer so a , b , c konstante in $n \cong \frac{1}{3}$.

Sekundarno lezenje, ki je praktično linearna funkcija časa, je močno odvisno od temperature in napetosti. Minimalno hitrost sekundarnega lezenja opišemo z osnovno Arrhenius-ovo enačbo v obliki

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \exp\left(\frac{Q_o - \nu \cdot \sigma}{R \cdot T}\right) \quad (3)$$

kjer sta A in ν konstanti, σ je napetost, Q_o je aktivacijska energija za lezenje v Joule-ih na mol, R je plinska konstanta in T je absolutna temperatura.

Rast razpoke lezenja

V pogojih časovno konstantne porazdelitve napetosti in ob prisotnosti poškodbe zaradi lezenja, lahko rast razpoke lezenja opišemo z naslednjo enačbo

$$\dot{a} = D \cdot C^\phi \quad (4)$$

kjer sta D in ϕ materialni konstanti. Ti konstanti se običajno pridobita s preskušanjem kompaktnih nateznih preizkušancev v skladu s priporočili ASTM E 1457-00 [8]. Po tem postopku je C ocenjen eksperimentalno iz meritev lezenja. Za komponente, kot so cevi, mora biti C določen s pomočjo metode končnih elementov ali referenčno napetostno metodo. Po referenčni napetostni metodi sledi v skladu z [9]

$$C_{ref} = \sigma_{ref} \cdot \dot{\varepsilon}_{ref} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_{ref}}\right)^2 \quad (5)$$

kjer je $\dot{\varepsilon}_{ref}$ hitrost lezenja pri neki σ_{ref} za komponento in K je faktor intenzitete napetosti, ki ustreza dejanski obremenitvi. Hitrost lezenja $\dot{\varepsilon}$ pri napetosti σ lahko opišemo v obliki Nortonovega zakona lezenja [10]

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \sigma^n \quad (6)$$

kjer sta A in n materialni konstanti pri konstantni temperaturi. Enačba (5) se lahko napiše kot

$$C_{ref} = A \cdot \sigma_{ref}^{n-1} \cdot K^2 \quad (7)$$

To enačbo lahko uporabimo, če imamo podatke materialnih lastnosti testa kompaktnega nateznega preizkušanca.

2.1.5 Zaključek

Lezenje je degradacijski mehanizem, ki postane pomemben šele pri zelo visokih temperaturah (približno 40 % temperature taljenja). Trenutno stanje tehnologije nuklearnih elektrarn je v temperaturnem območju, ki omogoča izključitev lezenja kot degradacijskega mehanizma, ki potrebuje specifičen nadzor.

2.2 KOROZIJA

2.2.1 Uvod

Moderne industrijske družbe utrpijo velike stroške na račun korozije kovin, v obsegu več % BDP in običajno precej presejajo gospodarsko rast. Velja pavšalna ocena, da je mogoče zagotovo četrtno vseh škodnih primerov korozije enostavno preprečiti. Korozija dviga obratovalne stroške, znižuje pa varnost obratovanja, učinkovitost, razpoložljivost in kvaliteto proizvoda. Ekonomske, socialne ali ekološke posledice večjih korozijskih odpovedi so lahko pogubne, zato mora obstajati ustrezna relacija med potencialno škodo in nivojem nadzora ter preprečevanja korozije.

Korozija je rezultat kemijske interakcije kovine z njenim neposrednim okoljem in je lahko enakomerna ali lokalno omejena. Fizikalni in kemijski pogoji okolja vplivajo na tip korozije, njeno hitrost, naravo korozijskih produktov in na to, kako so spremenjene lastnosti kovine.

Korozijske poškodbe so različnih oblik, odvisno od narave pogojev okolja, v katerem potekajo korozijski procesi, sestave materiala in morebitne prisotnosti mehanskih napetosti. Celotni spekter korozijskih procesov lahko razdelimo v naslednje kategorije:

- splošna korozija,
- lokalna korozija – jamičasta (pitting), korozijske reže (crevice) in korozija med zrnji kovinske strukture (intergranular corrosion),
- z okoljskimi pogoji vzpodbujeno pokanje kovinskih materialov (napetostno korozijsko pokanje, vodikova krhkost),
- galvanska korozija,
- erozijska korozija (flow accelerated corrosion)
- atmosferska korozija
- z mikrobi povzročena korozija.

Korozija je naraven proces, ki ga je mogoče nadzorovati in preprečevati na več načinov. Zavedanje pomena korozije je pomembno že v fazi projektiranja, kajti rezultat korozije je lahko sprememba geometrije neke strukture ali komponente, ki lahko vodi v izgubo funkcionalnosti ali celo v zlom. Splošna korozija vodi v zmanjšanje prereza in dvig notranjih napetosti, pitting korozija lahko napreduje do prerjavanja in korozijske razpoke lahko vodijo v zlom. Rjavjenje navadnega jekla je najpogostejša oblika korozije in največ prispeva k stroškom, ki jih ima človeštvo s korozijo.

Nadaljnji razvoj tehnologije materialov in metod za spremljanje in nadzor korozije predstavlja pomemben prispevek k zmanjšanju stroškov korozije. Dober nadzor korozije zahteva sodelovanje celotne projektne skupine inženirjev na interdisciplinarnem nivoju. Posebno pozornost je potrebno nameniti načrtovanju zbiranja, poročanja in arhiviranja vseh vrst informacij o koroziji v obdobju obratovanja.

Projektiranje večjih komponent in sistemov je multidisciplinarna aktivnost. Vse projektne skupine združujejo informacije o materialih, zvarih, barvah in nadzoru korozije na nivoju projekta. To omogoča kvalitetne odločitve o materialih in nadzoru korozije že v zgodnji fazi projektiranja in gradnje ter zagotavlja ustrezno dokumentiranje tako materialov kot tudi zahtev za nadzor korozije.

Nadzor korozije naj bo neprekinjen skozi celotno življenjsko dobo. Ustrezno obravnavanje korozije v času projektiranja, v času izbire materialov, v času obdelave materialov, med transportom, med skladiščenjem, med zagonom, med obratovanjem, med pregledovanjem, med vzdrževanjem in med zaustavitvijo je pot do znižanja stroškov korozije in znižanje tveganja za okvaro zaradi korozije. Posloedično to pomeni dvig varnosti in podaljšanje uporabne življenjske dobe.

2.2.2 Elektro-kemija korozije

Kemijske reakcije

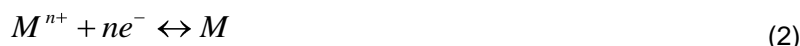
Površine kovin, z izjemo zlata, so na zraku prevlečene z oksidnim filmom. Kadar je tak material potopljen v vodno raztopino, se začne oksidni film raztapljati. Kadar je raztopina kislja, se lahko oksidni film popolnoma raztopi in prikaže se nezaščiten kovinska površina, ki tako postane spet aktivna na kemijske dražljaje iz okolja. V nevtralni raztopini je topljivost kovinskega oksida mnogo manj intenzivna kot v kislem in je tako tudi manjši obseg razpada zaščitnega oksidnega sloja. Kljub temu je lahko lokalno in v omejenem obsegu izpostavljena kovinska površina brez oksidnega filma najprej na določeni diskontinuiteti kovinske površine, kot je to v primeru prisotnosti vključkov ali tudi na mejah zrn, kjer je oksidni film tanjši in ga raztopina lažje raztopi. Kadar skoraj nevtralna raztopina zadržuje anione, je raztapljanje oksidnega filma preprečeno in oksidni film se ustali ter tvori trajen oksidni film, ki učinkovito ščiti kovino pred korozijo.

Oksidacija kovine in redukcija oksidanta potekata v nasprotni smeri. Število elektronov, ki jih odda kovina, je enako številu elektronov, ki jih sprejme oksidant. Oksidacija kovine in redukcija oksidanta se lahko odvijata na istem ali na različnih mestih na površini kovine. Elektroni, ki nastajajo pri anodni oksidaciji na enem mestu, lahko reagirajo z oksidantom na drugem mestu. Premik elektronov z enega na drugo mesto je zaradi dobre električne prevodnosti kovin le neznatno oviran. Znatna pa je lahko električna upornost zaradi ustreznega premikanja ionov v raztopini, saj je specifična upornost elektrolitov reda velikosti $1 \Omega\text{m}$ oziroma 106 krat večja od specifične upornosti kovin. Mesta odvijanja oksidacije kovine in redukcije oksidanta se lahko menjavajo po površini kovine ali pa so zaradi različnih vzrokov lokalizirana.

Kadar je kovina brez oksidnega filma izpostavljena raztopini, potem pozitivno nabiti delci kovinskih ionov prehajajo iz kovine v raztopino, za seboj pa preostali kovini prepustijo valenčne elektrone



Torej M je atom v kovini, večji del tega atoma v obliki kovinskega pozitivno nabitega iona M^{n+} prestopi iz strukture kovine v raztopino, tako nastane višek elektronov ne^- v kovini, ki jo naredi negativno nabito. Akumulacija negativnega naboja v kovini zaradi preostalih elektronov vodi v porast razlike potenciala med kovino in raztopino. Ta razlika potenciala se imenuje tudi potencial elektrode ali enostavneje kar potencial kovine. Ta sprememba potenciala želi ustaviti raztapljanje kovinskih ionov. In ne samo to, ima celo to moč, da se začne obratni proces, s katerim se raztopljeni kovinski ioni vračajo v strukturo kovine, kjer dobijo vrnjene elektrone in postanejo spet atomi, to je povratna reakcija reakciji (1). Nadaljnjo raztapljanje in ponovno vgrajevanje kovinskih ionov naposled doseže neko točko, v kateri je hitrost raztapljanja ionov enaka vgrajevanju ionov nazaj v strukturo kovine in temu rečemo, da je dosežen stabilen potencial. Takemu potencialu pravimo povračljiv potencial E_y in njegova vrednost je odvisna od koncentracije raztopljenih kovinskih ionov in standardni povračljivi potencial E^o za enoto aktivnosti raztopljenih kovinskih ionov, $a_{M^{n+}}$,



$$E_{r,M^{n+}/M} = E_{M^{n+}/M}^o + \frac{RT}{nF} \ln a_{M^{n+}} \quad (3)$$

kjer je R plinska konstanta, T absolutna temperatura, F Faraday in n število elektronov prenesenih na ion. Kadar potencial doseže povračljivi potencial, se kovina več ne raztaplja. Neto količina raztopljene kovine med tem procesom je običajno majhna.

Potencial kovine v raztopini ne doseže vedno povračljivega potenciala in ostane bolj pozitivno nabita, ker so lahko elektroni izločeni iz kovine z drugimi reakcijami. V kisli raztopini lahko elektroni reagirajo z vodikovimi ioni, ki se absorbirajo na površino kovine iz raztopine in tako nastanejo molekule vodika.



Pojav reakcije (4) omogoča nadaljnje prehajanje kovinskih ionov v raztopino, kar vodi v korozijo kovine. Reakcija (4) je prav tako povračljiva in ima povračljiv potencial podan z naslednjim izrazom analognim (3)

$$E_{r,H^+/H_2} = E_{H^+/H_2}^o - \frac{RT}{F} \ln \frac{p_{H_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H^+}} \quad (5)$$

kjer je p_{H_2} parcialni tlak vodika. Če poraste parcialni tlak vodika, potem je mogoče doseči tudi povračljiv potencial reakcije (4). Ustavijo se nadaljnje reakcije vodikovih ionov in tako se ustavi tudi neto raztapljanje kovinskih ionov. Običajno vodik uhaja iz sistema in potencial ostaja bolj negativen kot povračljiv potencial in korozija se nadaljuje.

V nevtralnih raztopinah je koncentracija vodikovih ionov prenizka, da bi omogočala nadaljevanje reakcije (4) v pomembnem obsegu, vendar elektroni iz kovine lahko reagirajo s kisikovimi molekulami, absorbiranimi na površini kovine iz zraka raztopljenega v raztopini in tvorijo hidroksilne ione.



Potencial kovine postane spet bolj negativen od povračljivega potenciala za reakcijo (6)

$$E_{r,O_2/OH^-} = E_{O_2/OH^-}^o - \frac{RT}{4F} \ln \frac{a_{OH^-}^4}{p_{O_2}} \quad (7)$$

Tako se korozija lahko nadaljuje s součinkovanjem reakcij (1) in (6).

Elektroda, na kateri pride do oksidacije, se imenuje anoda. Proces oksidacije predstavlja izgubo elektronov na račun zunanjih reagentov, kot to kaže enačba (1). Površina korodirane kovine, kjer se pojavi raztapljanje kovine, je anoda in raztapljanje kovine je anodna reakcija korozije. Elektroda, na kateri poteka redukcija, se imenuje katoda. Redukcija pomeni sprejem elektronov, kot je to v reakcijah (4) in (6). Redukcija vodikovih (4) ionov in kisika (6) sta katodni reakciji korozije in površina kovine, kjer se to dogaja, je katoda.

Električni potencial in polarizacija

Korozijske reakcije pomenijo določen pretok elektronov in ionov med kovino in raztopino in to je dejansko električni tok. Intenziteta teh reakcij je odvisna od potencialne razlike med kovino in raztopino in temu pravimo POTENCIAL kovine. Ko postaja potencial kovine bolj pozitiven, se dvigne število anodnih reakcij in število katodnih upade. Obratno se zgodi, če postane potencial kovine bolj negativen. Intenzivnost korozijskih procesov lahko ocenimo na podlagi razmerja med potencialom kovine in tokom elektronov (ekvivalentno številu korozijskih reakcij).

Tabela 3: Informativni podatki o potencialih posameznih izbranih kovin

Kovina	Standardni potencial za Mn ⁺ /M	Standardni potencial za MxOy/M pri pH=6	Korozijski potencial v zraku in 0.5 M NaCl raztopini pH ~6
	V (SHE)	V (SHE)	V (SHE)
Magnezij (Mg)	-2.37	-1.27	-1.40
Aluminij (Al)	-1.63	-1.84	-0.57
Titan (Ti)	-1.66	-1.62	+0.18
Cink (Zn)	-0.76	-0.77	-0.78
Krom (Cr)	-0.74	-0.93	-0.11
Železo (Fe)	-0.44	-0.45	-0.44
Baker (Cu)	+0.34	+0.12	+0.06

SHE – standard hydrogen electrode

Neporušne metode za odkrivanje korozije

Neporušne metode so primerne za odkrivanje nekaterih lokalnih oblik korozijskih napak. Korozijske lokalne napake, ki so na seznamu neporušnih metod, so vodikova krhkost, napetostno korozijsko pokanje in intergranularna korozija.

Vodikova krhkost

Vodikova krhkost se pojavlja v procesu obdelave materiala in v času obratovanja. Napada železne materiale. Napake so male, površinske in brez posebne orientacije. Najpogosteje se pojavljajo v najbolj visokotemperaturno obdelanem materialu ali v materialu, ki je izpostavljen prostemu vodik.

Metoda preiskave z magnetnimi delci – indikacije se pojavijo kot vzorec razpok. Razpoke vodikove krhkosti so naključno usmerjene in so lahko poravnane z magnetnim poljem. Test z magnetnimi delci se izvaja pred in po platiranju.

Metoda s tekočim penetrantom –običajno se ne uporablja za odkrivanje vodikove krhkosti. Napake so majhne dimenzije in jih je na površini težko odkriti.

Metoda z ultra zvokom –običajno se ne uporablja za odkrivanje vodikove krhkosti.

Metoda z vrtničnimi tokovi – se ne priporoča za odkrivanje vodikove krhkosti.

Radiografska metoda – ni dovolj občutljiva za odkrivanje vodikove krhkosti.

Napetostno korozijsko pokanje

Napake napetostno korozijskega pokanja se pojavljajo v fazi obratovanja. Razpoke so od plitkih do globokih. Pogoji za nastanek NKP so natezna napetost, korozijsko okolje in material, ki je nagnjen napetostnem korozijskem pokanju. Največkrat se pojavlja tam, kjer so napetosti največje. Za NKP so bistvene tudi zaostale napetosti v materialu.

Metoda s tekočim penetrantom – se običajno uporablja za odkrivanje NKP.

Metoda z vrtničnimi tokovi – uporabna v primeru, da je omogočen dostop z opremo.

Ultrazvočna metoda – se običajno ne uporablja za odkrivanje NKP. Napake so pravokotne na površino, zato je primernejša površinska metoda.

Metoda z magnetnimi delci – največja prepreka uporabe te metode je pogosta neferomagnetnost materiala.

Radiografska metoda – se običajno ne uporablja za NKP.

Intergranularna korozija

Napake intergranularna korozija se pojavljajo v fazi obratovanja in na neželeznih materialih. Pojavljajo se kot skupina mikro razpok brez nekega vzorca. Napake so površinske ali podpovršinske. Pogoja za nastanek intergranularne korozije sta:

- (1) struktura materiala, ki omogoča intergranularno korozijo;
- (2) neprimeren postopek popuščanja notranjih zaostalih napetosti (neprimerna toplotna obdelava).

V primeru prisotnosti korozivne atmosfere nastane intergranularna korozija.

Metoda s tekočim penetrantom – običajno se uporablja za odkrivanje intergranularne korozije.

Radiografska metoda – intergranularno korozijo v napredovani fazi se lahko odkrije z radiografsko metodo.

Metoda z vrtinčnimi tokovi (Eddy Current) – primerna metoda za odkrivanje intergranularne korozije. Cevi so zelo primerne za to metodo neporušnega testiranja.

Ultrazvočna metoda – običajno ni v uporabi, a je s to metodo mogoče tudi odkriti intergranularno korozijo.

Metoda z magnetnimi delci – se ne priporoča za odkrivanje intergranularne korozije. Tip napake in material omejujeta uporabnost magnetnih delcev.

2.2.3 Zaključek

Korozija je pomemben mehanizem, ki v primeru nuklearne elektrarne predstavlja tudi določeno grožnjo varnosti. Zavedati se je potrebno, da korozije ni mogoče popolnoma preprečiti, jo je pa mogoče omejiti in nadzorovati. Posebno pomembno je pravočasno odkrivanje korozijskih procesov, za kar so na voljo neporušne metode. Prepoznavanje simptomov in mehanizmov korozije je zagotovo pomemben korak na poti do primerne rešitve. Znanih je pet osnovnih metod nadzora korozije:

- ⇒ sprememba na bolj primeren material,
- ⇒ sprememba okolja z uporabo korozijske zaščite (inhibitorja),
- ⇒ uporaba zaščitne kovinske ali organske prevleke,
- ⇒ projektne spremembe sistema ali komponente,
- ⇒ uporaba neporušitvenih metod za odkrivanje korozije.

2.3 METODE ZA NAPOVEDOVANJE MEHANSKE UTRUJENOSTI

2.3.1 Uvod

Sekcija III, Podsekcija NB standarda ASME Boiler and Pressure Vessel Code vsebuje napotke za projektiranje komponent razreda 1 nuklearnih elektrarn. V standardu je tudi poudarjeno, da vpliv okolja na utrujenostno (Fatigue) odpornost materiala ni bil upoštevan. Odtod izhaja, da (danes obratujoče) nuklearne elektrarne, ki so projektirane v skladu z ASME, na tem segmentu niso analizirane.

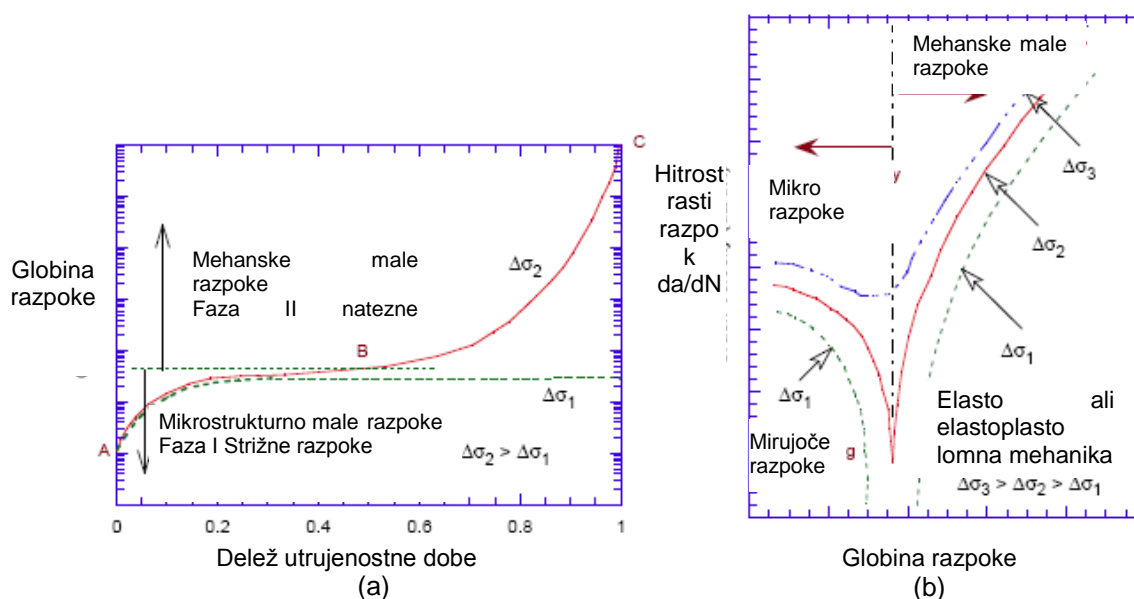
Projektne utrujenostne krivulje (Sekcija III) so osnovane pretežno na utrujenostnih testih z nadzorom pomika in na majhnih poliranih preizkušancih na sobni temperaturi in v zraku, ki se nato zniža s faktorjem 2 na napetost ali z 20 na število ciklov, po načelu konzervativnosti. Vendar to še ne pomeni varnostne rezerve, ampak je to zgolj metoda pretvorbe eksperimentalnih podatkov v oceno življenjske dobe komponente v realnosti. Torej v tem okviru ni upoštevan vpliv okolja na utrujenostno odpornost komponent.

Zadnji utrujenostni podatki deformacija – število ciklov do porušitve ($\epsilon - N$) iz ZDA in Japonske kažejo na to, da ima lahko okolje lahkovodnih reaktorjev pomemben vpliv na utrujenostno odpornost materiala. Življenjska doba dobljena na podlagi preskusov v simuliranem okolju lahkovodnih reaktorjev je lahko mnogo krajša kot dobljena iz testov v zraku.

2.3.2 Utrujenostna življenjska doba

Oblikovanje površinske razpoke in njena rast do inženirsko pomembne velikosti (3 mm globoko) predstavlja utrujenostno dobo materiala, ki jo upodablja utrujenostna krivulja S-N. Po dogovoru se utrujenostna krivulja deli v dve obdobji: (a) nastanek razpoke – izraža število ciklov potrebnih za nastanek mikrorazpoke na površini (Faza I), in (b) nadaljna rast razpoke izražena s številom ciklov do inženirsko pomembne velikosti (Faza II).

Med cikličnim obremenjevanjem gladkega testnega preizkušanca, se površinske razpoke $10\mu\text{m}$ ali večje oblikujejo zgodaj v življenjski dobi ($< 10\%$ življenjske dobe) na nepravilnostih, obstoječih ali nastalih z drsenjem ravnin kristalne rešetke (dislokacij), mej zrn, delcev drugih faz. Utrujenostna življenjska doba predstavlja razvoj razpoke od 10 do $3000\mu\text{m}$.



Slika 2: Shematski prikaz (a) rasti kratke razpoke na gladkem preizkušancu v odvisnosti od obdobja v življenjski dobi in (b) hitrost rasti razpoke v odvisnosti od globine razpoke

Na sliki 2 je podan shematski prikaz začetne utrujenostne dobe in dobe nadaljnje rasti razpoke. Začetna faza predstavlja rast mikrostrukturno male razpoke, značilnost katere je upočasnjena rast in strižna napetost kot gonilna sila (območje AB). Območje nadaljnje rasti predstavlja rast malih mehanskih razpok, za katere je značilna pospešena rast, gnana z nateznimi napetostmi (območje BC na Slika 2). Lomna površina je pravokotna na največjo glavno napetost.

2.3.3 Ocena življenjske dobe

Varnost obratovanja komponent je močno odvisna od možnosti natančne napovedi življenjske dobe komponente v okviru nekaterih specifičnih pogojev okolja in obremenitev. Razvitih je bilo veliko modelov za oceno utrujenostne življenjske dobe avstenitnih nerjavnih jekel v razmerah lahkovodnih reaktorjev (LWR) in vsi ti modeli so osnovani na praktično isti bazi podatkov. Čeprav so formulacije in mejne vrednosti ključnih parametrov, ki vplivajo na življenjsko dobo, različne, pa potem razlike v oceni življenjske dobe niso velike. Tako, da se za oceno lahko uporabi enega od naslednjih modelov.

Kritični parametri, ki vplivajo na utrujenost materiala so:

- Amplituda deformacije: potreben minimalen prag, ki zagotavlja pomembno znižanje utrujenostne življenjske dobe nerjavnih jekel. Prag ni odvisen od tipa materiala; zvar ali osnovni material in temperature v mejah od 250 do 325°C.
- Obremenitveni cikel – okolje vpliva na utrujenostno življenjsko dobo predvsem med nateznim delom cikla in pri deformaciji večji od vrednosti praga. Okoljski pogoji; hitrost deformacije,

temperatura in nivo raztopljenega kisika med natezno obremenitvijo vplivajo na skrajšanje utrujenostne življenjske dobe.

- Raztopljen kisik v vodi – utrujenostna življenjska doba avstenitnih nerjavnih jekel se pomembno skrajša, če je malo raztopljenega kisika v vodi (<0.01 ppm); skrajšanje je večje pri nizkih hitrostih deformacije in visokih temperaturah. Če je več raztopljenega kisika v vodi, potem je vpliv na življenjsko dobo manjši. Zmernejši okoljski vpliv je opažen pri tipu 304 SS, manj kot faktor 2 na življenjsko dobo, a le ob izpolnjenih pogojih, da je vzdrževana električna prevodnost vode pri $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ in elektrokemični potencial materiala >150 mV. Sestava ali toplotna obdelava jekla lahko pomembno vpliva na učinek raztopljenega kisika v vodi.
- Hitrost deformacije – utrujenostna življenjska doba se zniža z znižanjem hitrosti deformacije. V vodi tlačno vodnega reaktorja (PWR) z malo raztopljenega kisika se utrujenostna življenjska doba zniža logaritemsko z znižanjem hitrosti deformacije pod 0.4 %/s; vpliv okolja na življenjsko dobo pride v nasičenje pri 0.0004 %/s.
- Temperatura – voda temperature nad 150°C zniža utrujenostno življenjsko dobo, če je vsebnost raztopljenega kisika nizka in hitrost deformacije nižja od mejne 0.4 %/s. V mejah od 150 do 325°C logaritem utrujenostne življenjske dobe pada linearno s temperaturo.
- Vpliv hitrosti pretoka vode na utrujenostno življenjsko dobo avstenitnih nerjavnih jekel ni raziskan. Za ogljikova jekla velja pri pogojih tipičnih za vrelo vodne reaktorje, da je vpliv na utrujenostno življenjsko dobo približno za faktor 2 manjši pri večjih hitrostih (7 m/s) kot pri nižjih (0.3 m/s).

2.3.4 ANL statistični model

Statistični model ANL (Argonne National Laboratory) je osnovan na obstoječi bazi podatkov ε - N utrujenostnih testov za oceno utrujenostne življenjske dobe vlečenega in litega avstenitnega nerjavnega jekla v okolju lakovodnih reaktorjev. Model predpostavlja, da je utrujenostna življenjska doba na zraku neodvisna od temperature in hitrosti deformacije. Posebni modeli so bili razviti za Tip 304 ali 316 SS in tip 316NG SS. V zraku do temperature 400 °C utrujenostne razmere za Tip 304 in 316 SS najbolje opiše enačba

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = 6.703 - 2.030 \cdot \ln(\varepsilon_a - 0.126) \quad (1)$$

in za Tip 316NG z enačbo

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = 7.433 - 1.782 \cdot \ln(\varepsilon_a - 0.126) \quad (2)$$

V okolju lakovodnih reaktorjev je odpornost na utrujenost avstenitnih nerjavnih jekel odvisna od hitrosti deformacije, količine raztopljenega kisika in temperature. Vpliv raztopljenega kisika v vodi na utrujenostno življenjsko dobo avstenitnih nerjavnih jekel še ni znanstveno raziskan. V okolju lakovodnih reaktorjev utrujenostne podatke za tip 304 in 316 nerjavnih jekel najbolje opiše naslednja enačba

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = 5.675 - 2.030 \cdot \ln \left(\varepsilon_a - 0.126 \right) \cdot T' \cdot \dot{\varepsilon}' \cdot O' \quad (3)$$

in za tip 316 NG

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = 7.122 - 1.671 \cdot \ln \left(\varepsilon_a - 0.126 \right) \cdot T' \cdot \dot{\varepsilon}' \cdot O' \quad (4)$$

kjer so transformirane veličine za temperatura, hitrost deformacije in raztopljen kisik:

$$\begin{aligned} T' &= 0 & (T < 150^\circ \text{C}), \\ T' &= (T - 150)/175 & (150 \leq T < 325^\circ \text{C}), \\ T' &= 1 & (T \geq 325^\circ \text{C}), \\ \dot{\varepsilon}' &= 0 & (\dot{\varepsilon} \geq 0.4\% / \text{s}), \\ \dot{\varepsilon}' &= \ln(\dot{\varepsilon}/0.4) & (0.0004\% / \text{s} \leq \dot{\varepsilon} \leq 0.4\% / \text{s}), \\ \dot{\varepsilon}' &= \ln(0.0004/0.4) & (\dot{\varepsilon} < 0.0004\% / \text{s}), \\ O' &= 2.81 & (\text{za vse koncentracije raztopljenega kisika}). \end{aligned}$$

Ta model se priporoča za napoved življenjske dobe $\leq 10^6$ ciklov. Enačbi (3) in (4) se uporabljata tudi za lita avstenitna nerjavna jekla, kot so CF-3, CF-8 in CF-8M (material cevovodov hladilnih zank NEK). Toplotna obdelava jekla lahko spremeni pomen raztopljenega kisika in tako posredno vpliva na utrujenostno življenjsko dobo.

2.3.5 Japonska MITI navodila

Navodila za ocenitev skrajšanja življenjske dobe v pogojih lahkovodnih reaktorjev, ki jih je predlagalo Japonsko ministrstvo za mednarodno trgovino in industrijo (MITI - Ministry for International Trade and Industry) temeljijo na popravku s faktorjem F_{en} , ki predstavlja razmerje med življenjsko dobo materiala v zraku pri sobni temperaturi in materiala v vodi pri obratovalni temperaturi. Za avstenitno nerjavno jeklo je F_{en} odvisen od hitrosti deformacije $d\varepsilon/dt$ (%/s), temperature $T(^{\circ}C)$ in amplitude deformacije ε_a (%).

$$\ln F_{en} = (C - \varepsilon^*) \cdot T^* \quad (5)$$

kjer so konstanta C in transformirane veličine za hitrost deformacije, temperaturo:

$C = 1.182$	WR
$C = 3.910$	WR
$\varepsilon^* = \ln \varepsilon$	$\varepsilon \geq 0.0004 \% / s$
$\varepsilon^* = \ln 0.0004$	$\varepsilon < 0.0004 \% / s$
$T^* = 0.000813 \cdot T$	WR
$T^* = 0.000782 \cdot T$	$\text{WR}, T \leq 325^{\circ}C$
$T^* = 0.254$	$\text{WR}, T \geq 325^{\circ}C$
$F_{en} = 1$	$\varepsilon_a \leq 0.11\%$

Utrujenostna doba v vodi se izračuna z delitvijo utrujenostne dobe v zraku, pri temperaturi okolice s faktorjem F_{en} . Utrujenostna doba N v zraku je izražena z amplitudo deformacije

$$\ln N = 6.871 - 2.118 \cdot \ln \varepsilon_a - 0.110 \quad \varepsilon_a \leq 0.11\%$$

2.3.6 Model Bettis Laboratorija

Bettisov model temelji na obstoječih utrujenostnih podatkih $\varepsilon-N$. V tem modelu se uporablja t.i. Smith-Watson-Topper (SWT) ekvivalentna deformacija za napoved utrujenostne dobe avstenitnih nerjavnih jekel v okolju lahkovodnih reaktorjev. Model kaže, da je utrujenostna doba tipa 304 SS v vodi odvisna od temperature, hitrosti deformacije, amplitude deformacije in nivoja v vodi raztopljenega kisika. Če je kisika malo, se lahko utrujenostna doba skrajša, tudi za faktor 13 v primeru visokih temperatur in nizkih hitrostih deformacije. Bettisov model predikcije utrujenostne dobe N v pogojih lahkovodnih reaktorjev ima naslednjo obliko

$$N = A \cdot \varepsilon_{SWT}^{-b} \cdot \left[1 + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m} \right)^c \right] \cdot e^{-kZ^m} \quad (6)$$

kjer so A , b , P , k , ε_o in m in SWT parameter ε_{SWT} je podan kot

$$\varepsilon_{SWT} = \varepsilon_a^c \cdot \left(\frac{\sigma_{max}}{E} \right)^{1-c} \quad (7)$$

kjer pa je maksimalna napetost σ_{max} vsota amplitude ciklične napetosti in srednje napetosti ($\sigma_a + \sigma_m$), E je elastični modul, c je konstanta določena iz utrujenostnih testov v zraku.

Vpliv temperature $T(K)$ in hitrosti deformacije $\dot{\varepsilon}$ je zajet v model preko Zener-Hollomon-ovega parametra Z , ki ga določa naslednji izraz (8)

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (8)$$

kjer je R plinska konstanta in Q aktivacijska energija. Konstante modela so določene iz obstoječih utrujenostnih podatkov v vodi. Vrednosti so naslednje:

$$\begin{aligned} A &= 1.185 \times 10^{-2} && \text{(vlečeno nerjavno jeklo (ne velja za 316NG in PWR))} \\ b &= -2.097 \\ \varepsilon_o &= 9.068 \times 10^{-4} \text{ mm/mm} \\ P &= 0.109 && \text{(vlečeno nerjavno jeklo in zvari)} \\ c &= 0.7 \\ k &= 149.0 && \text{(v PWR vodi)} \\ k &= 383.7 && \text{(v BWR vodi)} \\ Q &= 147.15 \text{ kJ/mol} \\ R &= 8.314 \text{ J/mol/K} \\ m &= -0.2233 \end{aligned}$$

Amplituda izmenične napetosti σ_a , ki ji ustreza amplituda deformacije ε_a dobljena iz krivulje ciklične napetosti in deformacije v zraku z naslednjo enačbo (9)

$$\sigma_a = (175 - 0.342T + 7.10 \times 10^{-4}T^2) + (24010 - 4.54 \times 10^{-2}T^2 + 156\sigma_m)\varepsilon_a \quad (9)$$

kjer je T temperatura ($^{\circ}\text{C}$) in σ_m je srednja napetost (MPa). Ta krivulja izmenične napetosti-deformacije je veljavna za napetosti nad mejo proporcionalnosti. Pod mejo proporcionalnosti je amplituda napetosti produkt modula elastičnosti in amplitude deformacije. Utrujenostno krivuljo ε - N pri nični srednji napetosti dobimo tako, da namesto σ_m vstavimo nič v enačbah (7) in (9).

2.3.7 Vključitev vpliva okoljskih pogojev v utrujenostne analize

Vpliv hladila lahkovodnih reaktorjev se lahko vključi v ASME Sekcijo III utrujenostna analiza tako, da se razvijejo nove projektne utrujenostne krivulje ali pa se zgolj uporabi korekcijski faktor na utrujenostno življenjsko dobo F_{en} . Oboje rezultira v spremembi ASME utrujenostnega faktorja (Usage factor) zaradi vpliva hladila. Obe metodi pomenita sprejemljiv pristop upoštevanja vpliva hladila na utrujenostno življenjsko dobo.

2.3.8 Utrujenostne projektne krivulje

Utrujenostne projektne krivulje, ki upoštevajo vpliv okolja, lahko razvijemo iz krivulj "napetost - življenjska doba", ki so narejene na podlagi eksperimentalnih podatkov v okolju lahkovodnih reaktorjev po enakem postopku, ki je bil uporabljen za obstoječe ASME utrujenostne projektne krivulje. Krivuljo "napetost - življenjska doba" dobimo iz krivulje ε - N , kajti napetost je produkt deformacije in elastičnega modula. Veljavni ASME standard in utrujenostne projektne krivulje ne vsebujejo korekcije srednje napetosti pod 10^6 ciklov, kajti po veljavnem standardu je utrujenostna trdnost pri 10^6 ciklov višja kot meja plastičnosti jekla. Za specifično okolje se krivulja korigira za srednjo napetost s spremenjeno Goodman-ovo zvezo podano kot

$$S'_a = S_a \left(\frac{\sigma_u - \sigma_y}{\sigma_u - S_a} \right) \quad \text{za} \quad S_a < \sigma_y \quad (10)$$

in

$$S'_a = S_a \quad \text{za} \quad S_a \geq \sigma_y \quad (11)$$

kjer je S'_a prilagojena vrednost amplitude napetosti, σ_y in σ_u sta meja plastičnosti in maksimalna trdnost materiala. Enačbi (10) in (11) predpostavljata maksimalno možno srednjo napetost in dajeta večinoma konzervativen popravek. Projektno utrujenostno krivuljo potem dobimo z znižanjem krivulje za faktor 2 na napetosti ali za faktor 20 na cikle, in bolj konzervativna vrednost se upošteva, s čimer se zajame negotovosti povezane z materialom in načinom obremenjevanja.

2.3.9 Faktor popravka utrujenostne življenjske dobe

Vpliv reaktorskega hladila na utrujenostno življenjsko dobo se lahko zajame tudi s korekcijskim faktorjem F_{en} , ki je določen kot razmerje med utrujenostno življenjsko dobo v zraku pri sobni temperaturi in v vodi pri obratovalni temperaturi. Vrednosti F_{en} se lahko dobijo iz statističnega modela, saj velja

$$\ln(F_{en}) = \ln(N_{RTair}) - \ln(N_{water}) \quad (12)$$

Korekcijski faktor utrujenostne življenjske dobe za avstenitno nerjavno jeklo je na osnovi ANL modela podan kot

$$F_{en} = \exp(1.028 - T' \cdot \dot{\epsilon}' \cdot O') \quad (13)$$

kjer so T' , $\dot{\epsilon}'$, O' podani v točki 2.3.4, korekcijski faktor na osnovi MITI navodil pa je podan v točki 2.3.5.

2.3.10 Uporaba NDT metod in njihove omejitve

Utrujenostne razpoke se običajno razvijejo na mestih ali v bližini koncentracij napetosti. Mesta koncentracij napetosti so raznovrstne diskontinuitete kot npr. izvrtine. Ta mesta so običajno projektirana tako, da vzdržijo predvidene obremenitve, vendar pa napake v projektu ali izdelavi, kot npr. luknje z ostrimi robovi, običajno povzročijo koncentracijo napetosti, ki je lahko mnogo višja od pričakovane.

Utrujenostna napaka je izrazito progresivna, saj starta kot mikrorazpoka in se zaradi ponavljajočih se napetosti širi, dokler na koncu ne pride do zloma.

Komponenta z utrujenostno razpoko predstavlja nevarnost za zlom, zato je odkrivanje razpok med inšpekcijo izjemno pomembno. Odkrijemo pa lahko le utrujenostne razpoke, ki presežejo določeno velikost. Utrujenostno razpoko običajno identificiramo po smeri napredovanja glede na delujočo napetost.

Pri izbiri neporušne metode za oceno specifične napake (indikacije) je potrebno upoštevati dejstvo, da uporaba več različnih neporušnih metod daje popolnejšo informacijo o določeni indikaciji.

Izbira metode mora temeljiti na:

- Tipu in izvoru napake,
- Materialu in njegovi specifikaciji,
- Dostopnosti preiskovanega mesta,
- Zahtevani natančnosti,
- Razpoložljivi preskusni opremi,
- Strošku metode.

Strmi razvoj na področju novih neporušnih metod prispeva pomemben delež k dvigu varnosti in zanesljivosti komponent nuklearnih tehnologij. Pogosto uporabljene neporušne metode so:

- ⇒ Metoda s tekočim penetrantom,
- ⇒ Metoda z vrtinčnimi tokovi,
- ⇒ Ultrazvočna metoda,
- ⇒ Metoda z magnetnimi delci,
- ⇒ Radiografska metoda.

2.3.11 Zaključek

Sekcija III ASME standarda vsebuje zahteve za konstruiranje komponent nuklearne elektrarne razreda 1. Podaja projektne zahteve, ki zagotavljajo, da bo komponenta vzdržala ciklične obremenitve, ki so posledica dinamičnih mehanskih in termičnih obremenitev, ko gre sistem iz enega obremenitvenega stanja v drugega. Obremenitvena stanja so določena v obliki treh glavnih napetosti (po NB-3200) in vsebujejo notranji tlak, moment, povprečno temperaturo in gradient temperature (NB-3600). Maksimalno območje intenzitete napetosti in amplituda izmenične intenzitete napetosti S_a se izračuna za vsako obremenitveno stanje. Vrednost S_a se uporabi za izračun dovoljenega števila ciklov iz projektnih utrujenostnih krivulj. Razmerje med dejanskim številom ciklov in dovoljenim je faktor utrujenostne obrabe (usage factor). Skupen faktor utrujenostne obrabe (CUF – cumulative usage factor) je vsota posameznih faktorjev. Ob uporabi posodobljenih projektnih krivulj se tako vključi vpliv hladila na utrujenostno življenjsko dobo, ki je bil izpuščen v času projektiranja.

Alternativni pristop k utrujenostni oceni okolja lahkovodnih reaktorjev je predlagan s strani japonskega TENPES (Thermal and Nuclear Power Engineering Society of Japan). Vpliv okolja lahkovodnih reaktorjev na utrujenostno življenjsko dobo je podan s korekcijskim faktorjem F_{en} , ki je določen kot razmerje med zrakom pri sobni temperaturi in hladilom pri temperaturi obratovanja. Vpliv okolja je vgrajen v ASME utrujenostne analize tako, da je utrujenostni faktor izrabe pomnožen s korekcijskim faktorjem F_e in to za vsak obremenitveni par.

2.4 METODE ZA NAPOVEDOVANJE NAPETOSTNEGA KOROZIJSKEGA POKANJA

2.4.1 Uvod

Napetostno korozijsko pokanje NKP (Stress Corrosion Cracks - SCC) se pojavi, kadar so izpolnjeni naslednji pogoji:

- stalna statična natezna napetost,
- korozivno okolje,
- material, ki je dojemljiv za napetostno korozijsko pokanje.

Običajno se pojavlja NPK v tlačnih posodah, v cevovodih, v bolj obremenjenih komponentah in v sistemih, v katerih prihaja do odstopanja od normalnih pogojev (obratovalnih ali okoljskih).

Napetostno korozijsko pokanje se pojavi prej in je bolj intenzivno v primeru višjih efektivnih natezних napetosti. Efektivna napetost je seštevek notranje zaostale napetosti in napetosti kot posledica zunanjih sil. Razpoke lahko rastejo s hitrostjo od 0.3 do 10 mm/h, odvisno od kombinacije zlitine in okolja. Razpoka lahko v primernih pogojih doseže kritično velikost, ki pomeni prehod iz relativno počasne SCC rasti v hitro rast. Na koncu, zaradi slabitve prereza porastejo napetosti preko meje plastičnosti in trdnosti, kar privede do hitrega zloma.

Ta prehod se zgodi, ko intenziteta napetosti, ki je funkcija geometrije vključno z velikostjo razpoke, doseže lomno trdnost materiala

$$K_C^2 = \sigma^2(c + r_y)$$

kjer je K_C lomna trdnost ali žilavost materiala, σ je napetost, c je dolžina razpoke in r_y je dolžina plastične cone povezane z razpoko. Na podlagi gornje enačbe pridemo do kritične dolžine razpoke, c_{kr} odvisne od intenzitete napetosti K_{SCC}

$$c_{kr} = X \left(\frac{K_{SCC}}{\sigma_y} \right)^2$$

kjer je X faktor odvisen od geometrije in σ_y napetost tečenja (meja plastičnosti).

Ali se bo NKP razvilo do kritične dimenzije za hiter mehanski zlom, je odvisno med drugim od vira napetosti, ki je povzročila rast razpoke. Če je to zaostala napetost po varjenju ali nastala zaradi neskladnosti lukenj pri vijajčnih spojih, potem rast razpoke pomeni istočasno razbremenitev in se lahko rast razpoke zaustavi, če intenziteta napetosti v korenu razpoke pade pod K_{SCC} , preden se doseže lomna trdnost K_C . Drugače pa je, če vir napetosti, ki poganja počasno rast NKP, prihaja iz obratovalnih pogojev, običajno tedaj ne pride do razbremenitve napetosti in s tem so vzpostavljeni pogoji za propagacijo razpoke do porušitve. V praksi so obratovalne napetosti pogosto pod minimalno napetostjo potrebno za rast NKP in je večina primerov zlomov posledica napak pri vgradnji in dodatno vnesenih napetostih vse do nivoja meje plastičnosti.

Izjema so tlačne posode, kot so kemični reaktor, visokotlačni cevovodi za zrak in uparjalniki, kjer se je število primerov zlomov, kot posledica NKP povišalo. In to se dogaja v zadnjih dveh desetletjih, ko je močno porasla učinkovitost inženirskega projektiranja. Vendar pa uvedba višjih obratovalnih tlakov, navkljub materialom z višjo mejo plastičnosti ter izločitvi enakomerne splošne korozije, očitno ne preprečuje možnosti nastanka omejenih oblik korozije NKP.

Natančna sestava zlitine, mikro-struktura in toplotna obdelava lahko bistveno vplivajo na stanje NKP. Obstaja nekaj splošnih zakonitosti, ki določajo vpliv trdnosti materiala na občutljivost za NKP. Pri vodikovi krhkosti višja trdnost običajno poveča dojemljivost, kajti materiali z višjo trdnostjo imajo ponavadi nižji K_{IC} in zato se hitro zlomijo pri manjši razpoki NKP. Proces, ki temelji na plastični deformaciji v korenu razpoke enostavneje napredujejo v manj trdnih materialih.

Čeprav so mehanizem in vzroki za NKP v cevovodih in tlačnih posodah predmet sodobnih raziskav, je sama oblika in pojavnost NKP dobro poznana. Iz vidika inšpekcije so karakteristike naslednje:

- razpoke se pojavljajo v kolonijah in so različnih globin in dolžin,
- znotraj kolonije so najštevilčnejše plitke razpoke,
- razpoke rastejo z zraščanjem začetnih plitkih in kratkih razpok znotraj kolonije,
- značilna je negladka površina še posebno za tip razpok IGSCC,
- tipično je razpoka odprta proti zunanji površini cevi ali posode,
- v primeru testnih vzorcev, razpoka NKP raste pod kotom, ki je manjši od 45° od površine cevi v steno cevi.

Razpoke NKP je težko posneti in izmeriti s katerokoli ND tehniko, zaradi zahtevne strukture in čudne narave fenomena napetostnega korozijskega pokanja. Razpoke NKP se skoraj vedno pojavljajo v skupinah ali kolonijah. Znotraj skupin ali kolonij so za meritve z ND orodji primerne le največje razpoke, ki se nahajajo med ostalimi manjšimi. Ultrazvočne tehnike, ki temeljijo na odboju, morajo zaznati tudi neznamenit odboj teh zapletenih nepravilnih razpok. V primeru uporabe konvencionalnih piezoelektričnih pretvornikov se lahko problem reši z dvigom frekvence pretvornika in dvig resolucije pretvornika z višjo hitrostjo zajemanja podatkov. Žal višje frekvence pomenijo tudi močnejše popačeno zaznavanje nepravilnosti v steni, kar vodi do napačne indikacije (false call). Večje število napačnih indikacij lahko uniči praktično uporabnost tega orodja. Drugi omejitveni moment za piezoelektrični pretvornik je oster kot, ki ga razpoka oklepa z zunanjo površino cevi in obvezno mokro spajanje glav senzorja s površino cevi. Usmerjeno valovanje (Guided wave) je primerna metoda za odkrivanje NKP, ker je NKP splošna degradacija materiala in usmerjeno valovanje je mehansko elastično valovanje, katerega prehajanje skozi material je odvisno od dimenzij in lastnosti materiala. Prisotnost razpok v materialu preoblikuje valovanje, kar aparat lahko zazna.

2.4.2 Nadzor napetostnega korozijskega pokanja

Napetostno korozijsko pokanje (NPK) se pojavi v primeru, ko so izpolnjeni naslednji trije pogoji:

- ⇒ Material mora biti dovzeten za napetostno korozijsko pokanje.
- ⇒ Okolje mora podpirati korozijsko pokanje.
- ⇒ Napetost (natezna) ali faktor intenzitete napetosti mora biti dovolj velik.

Primeri znanih parov material/okolje so:

- medenina - amoniak,
- nerjavno jeklo - kloridi,
- visoko-trdnostna jekla - vodik.

Na podlagi zgornjih pogojev za nastanek napetostnega korozijskega pokanja so nastali preventivni postopki, ki lahko obvarujejo komponente pred napetostnim korozijskim pokanjem in podaljšajo življenjsko dobo. Nadzor NKP se začne v fazi projektiranja, kjer je odločilna izbira materiala, omejitev napetosti in nastavitve omejitev, ki bodo zagotovile ustrezno okolje. Projektant potem izbere kriterije, s katerimi zagotovi potrebno zanesljivost pri minimalni ceni. Tako se zagotovo zahteva izjemno visoka zanesljivost pri projektiranju jeklene zadrževalne tlačne posode (containment pressure vessel) jedrskega reaktorja in mnogo manj za komponente nižjega varnostnega razreda.

NKP lahko uspešno nadzorujemo, če upoštevamo vpliv projektiranja in obdelav materiala med izgradnjo. V primeru izbire materiala, ki ni dovzeten za NKP v obratovalnem okolju in je komponenta v vseh fazah pravilno obdelana, je to lahko zagotovilo, da morda ne bo težav s NKP. Okolja z vodo pri visokih temperaturah so zelo agresivna in tudi sodobna znanost še ni dala algoritma za izbiro materiala, ki bi bil zanesljivo odporen na NKP.

Pogoj za nastanek NKP je nivo napetosti, zato gre preprečevanje zagotovo v smeri vzdrževanja napetosti pod pragom NKP. To ni vedno mogoče za delovno napetost, je pa možno v primeru, kjer je napetost, ki povzroča pokanje, zaostala napetost vnesena med varjenjem ali obdelavo komponente. Zaostale napetosti lahko močno znižamo s popuščanjem, ki je široko v uporabi za ogljikova jekla. Nasprotno je v primeru austenitnih nerjavnih jekel popuščanje zaostalih napetosti redko uspešno, zaradi zelo nizkega praga napetosti kloridnega NKP in potrebne visoke temperature popuščanja.

Za večje konstrukcije, ko je nemogoče napetostno popuščanje celotne konstrukcije, je v praksi omejeno popuščanje okrog zvarov in drugih kritičnih delov. To opravilo zahteva strokoven pristop, da se ne vnese

novih zaostalih napetosti. Napetost se lahko popusti tudi mehansko. Primer je hidrostatski test preko meje tečenja, ki izravna napetosti in tako zniža maksimume zaostalih napetosti.

Najboljši način nadzora NKP preko okolja je odstranitev komponente, ki je kritična oziroma generira pojav NKP. To pa je mogoče le, če imamo dejansko možnost odstraniti to komponento. V primeru, ko je odgovorna komponenta za NKP nujna komponenta okolja, se okolju doda inhibitor, s katerim spremenimo potencial elektrode kovine, ali izoliramo kovino od okolja s prevleko (Angl. coating). Korozijski inhibitor zniža hitrost korozijskega procesa in je lahko uspešen pri nadzoru NKP, čeprav so zahteve običajno precej drugačne od zaščite pred splošno korozijo. Velja celo, da kemikalije, ki ustavijo splošno korozijo, vzpostavijo potrebne pogoje za NKP (hidroksidi, karbonati in nitrati za ogljikovo jeklo). Tudi če je inhibitor uspešen pri zaustavitvi NKP, je potrebna za to precej višja koncentracija kot za splošno korozijo.

Kovinske prevleke izolirajo kovino od okolja in lahko zaščitijo kovine pred NKP. Obstaja možnost, da kovinska prevleka prepušča zaradi napake pri nanosu ali zaradi poškodbe med obratovanjem. Iz teh razlogov je za ogljikova jekla najprimernejši cink. Normalni korozijski potencial cinka je relativno nizek in četudi pride do izpostavljenosti ogljikovega jekla okolju, je jeklo zaščiteno še katodno.

Barve in polimerne prevleke zaščitijo kovino predvsem z veliko električno upornostjo, ki ustavi prehod toka z anode na katodo. Barve so uspešne pri zaščiti pred NKP, kadar vsebujejo inhibitor, ki zavira NKP.

2.4.3 Uporaba NDT metod in njihove omejitve

Test s tekočim penetrantom

- ⇒ Tekoči penetranti se običajno uporabljajo za detekcijo napetostnega korozijskega pokanja.
- ⇒ Pri pripravi površine in nanašanju penetranta ter pri zaključnem čiščenju je potrebna izjemna pazljivost, da ne pride do kontaminacije sosednjih površin.
- ⇒ Po kemičnem čiščenju mora pred uporabo tekočih penetrantov poteči določen čas, da lahko čistilo izhlapi, ker lahko sicer čistilo resno vpliva na rezultat.
- ⇒ V obratovanju imajo elementi lahko vlago v razpokah, kar povzroči napačne rezultate testa.
- ⇒ Penetranti locirajo površinske razpoke in skozistenske razpoke, lahko pa tudi odkrijejo puščanje. Penetrant se nanese na eni strani, na drugi strani se nanese razvijalec. Če gre penetrant skozi steno, potem na drugi strani pride v kontakt z razvijalcem in indikacija je jasno vidna. Metoda je posebno uspešna za testiranje rezervoarjev, drugih posod, toplotnih izmenjevalcev itd.

Proces nanašanja penetrantov je razdeljen v več korakov:

- površino preizkušanca se očisti,
- nanese se raztopina, da raztopi kontaminante,
- razpoke so sedaj odprte za penetrant, kar je predpogoj za učinkovitost metode,
- nanos penetranta,
- odstranitev penetranta,
- nanos razvijalca,
- penetrant izstopa iz razpok in indikacija se razvije.

Test z vrtničnimi tokovi (Eddy Current testing Method)

Metoda je uporabna tako za feromagnetne kot tudi za neferomagnetne materiale. Še posebej uporabna za pregled uparjalnika. NKP je najpomembnejši degradacijski mehanizem uparjalnika. Na podlagi rezultatov pregleda z metodo vrtničnih tokov se sprejme odločitev o čepljenju U cevi, ki so toliko degradirane, da bi utegnile povzročiti puščanje primarnega hladila na sekundarno stran. Test z vrtničnimi tokovi lahko odkrije napetostno korozijsko pokanje tam, kjer konfiguracija omogoča ustrezno namestitvev naprave.

Ultrazvok (Ultrasonic Testing Method)

Doslej ni bil v rabi za odkrivanje napetostno korozijskega pokanja. V praksi so se že pojavile ultra zvočne naprave visoke ločljivosti, ki so sposobne zaznavati tudi NKP. Neodvisno od NKP, metoda omogoča tudi določitev integritete protikorozijske prevleke (coating), kar je še posebej pomembno za življenjsko dobo komponente. Občutljivost zaznavanja razpok s to metodo je odlična, saj je mogoče zaznati razpoke globine 10 % debeline stene in dolžine 1.5 cm.

Metoda z magnetnimi delci (Magnetic particle Testing Method)

Normalno ni v rabi za odkrivanje napetostno korozijskega pokanja. Konfiguracija preizkušanca in pogosto ne-feromagnetnost so razlog neuporabnosti metode magnetnih delcev.

Radiografska metoda (Radiographic Testing Method)

Običajno ni v rabi za odkrivanje napetostno korozijskega pokanja. S primerno radiografsko tehniko pa je mogoče odkriti tudi napetostno korozijsko pokanje.

2.4.4 Zaključek

Pregled literature kaže, da še ni enotno priznane razlage za proces napetostno korozijskega pokanja (NPK). Zaradi tega in kompleksnosti NPK pa je tudi zahtevno določiti dobo trajanja konstrukcij, izpostavljenih NPK. Korozijske jamice (luknjice) so lahko začetek NKP. Luknjica ima dejansko funkcijo razpoke in se lahko obravnava po mehaniki loma.

Realne komponente vsebujejo napake in projektne detajle, kot so zareze, ostri prehodi v prerezu, zvari, korozijske jamice in podobno, ki povzročajo koncentracijo napetosti. Tako je pogosto lokalno presežena napetost praga pojava NKP, čeprav je nominalna napetost precej pod pragom. Skoraj vse komponente so bodisi toplotno obdelane ali nenatančno vgrajene, kar pomeni dodatne zaostale napetosti, ki so neznane in so lahko blizu napetosti tečenja.

Zaradi zaostalih napetosti je nabor kritičnih lokacij za pojav NKP precej povečan. Pri obravnavi NKP je pomembna dodatna oteževalna okoliščina to, da gre za multidisciplinaren problem (kemija, metalurgija, mehanika), kar terja sodelovanje ekspertov z različnih področij.

3. VPLIV NEGOTOVOSTI NA NATANČNOST NAPOVEDI UPORABNE DOBE

3.1 UVOD

Številne komponente nuklearne elektrarne so izpostavljene termičnim in mehanskim ciklom. Analiza teh komponent z ozirom na število ciklov je pomembna za varnost, učinkovitost in zanesljivost elektrarne. Običajna projektna metoda napovedi življenjske dobe je bila zasnovana v ASME standardu v 60-tih letih 20 stoletja. ASME projektne krivulje podane v Appendix I sekcije III, temeljijo na utrujenostnih testih s kontrolo deformacije na malih, poliranih preizkušancih, pri sobni temperaturi in na zraku. Krivulja (ε - N), ki se najbolje prilega eksperimentom, je dobljena s pomočjo metode najmanjših kvadratov odstopanja eksperimentalnih vrednosti. Izražena v obliki Langer-jeve enačbe [2]

$$\varepsilon_a = A_1 \cdot N^{-n_1} + A_2 \quad (1)$$

kjer je ε_a amplituda deformacije, N je utrujenostna življenjska doba in A_1 , A_2 in n_1 so koeficienti modela. To enačbo se lahko zapiše v obliki amplitude napetosti S_a namesto amplitude deformacije. Amplituda napetosti je produkt ε_a in elastičnega modula E . ASME standard podaja srednjo krivuljo za različna jekla

$$S_a = \frac{E}{4\sqrt{N}} \cdot \ln\left(\frac{100}{100 - A}\right) + B \quad (2)$$

kjer sta A in B konstanti na račun zožitve prereza med nateznim preizkusom in spodnja mejna napetost materiala pri 10^7 ciklov. V zadnjih treh desetletjih je utrujenostna življenjska doba definirana kot število ciklov do padca natezne napetosti za 25 % od svoje maksimalne vrednosti. Za tipični preizkušanec to pomeni število ciklov potrebnih za rast razpoke 3 mm globoko v preizkušanec. Utrujenostna življenjska doba materiala je opisana s tremi parametri in sicer deformacijo ali napetostjo, številni ciklov in globino razpoke. Torej dejanska krivulja utrujenostne življenjske dobe pomeni potrebno število ciklov, da se pri določeni amplitudi napetosti razpoka razširi v preizkušanec v globino 3 mm.

Projektna vrednost napetosti je dobljena ob upoštevanju faktorja 2 na napetost ali faktorja 20 na število ciklov, pri čemer prevlada tisti od obeh faktorjev, ki je bolj konzervativen v vsaki točki. Ta faktorja pokrivata vpliv okoljskih pogojev, vpliv dimenzij in rastroso materialnih lastnosti.

Rezervo faktorja 20 na življenjsko dobo so poskušali razstaviti na več načinov:

- Raztros eksperimentalnih podatkov in dejstvo, da je enak test izveden pod identičnimi eksperimentalnimi pogoji na mnogih identičnih preizkušancih, ki so rezultirali različno življenjsko dobo N , je običajno vezan na faktor 2 do 2.4.
- Faktor velikosti, ki predstavlja razliko življenjske dobe komponente od življenjske dobe preizkušanca, je zajet s faktorjem 1.4 do 2.5.
- Faktor zaradi gladkosti površine je 2 do 3.
- Faktor na račun okoljskih pogojev (raztopljen kisik v vodi, temperature, itd) je postavljen na 3.
- Faktor na napetost je 2 in sicer 1.2 raztros podatkov in 1.66 na druge efekte.

Razumljivo je, da taka opisana delitev ni povsem objektivna. Zadnji utrujenostni podatki dobljeni iz ZDA in Japonske kažejo, da hladilo lahkovodnih reaktorjev lahko ima pomemben vpliv na odpornost materiala na utrujanje. Utrujenostna življenjska doba (ogljikovega jekla, nizkolegiranega in avstenitnega nerjavnega jekla) preizkušancev v hladilu lahkovodnih reaktorjev je lahko mnogo krajša kot pri sobni temperaturi na zraku. Okoljski vpliv pa je pomemben le v primeru, ko je kritičen parameter pri kritični vrednosti (temperatura, hitrost deformacije, raztopljen kisik, amplituda deformacije). Okoljski vpliv je manj pomemben, če je parameter pod mejno vrednostjo praga.

Utrujenostno življenjsko dobo jeklenih konstrukcij lahko napovemo na več načinov. Običajna metoda v fazi projektiranja je uporaba projektne krivulje S-N, iz katere na podlagi amplitude spremenljive napetosti dobimo število dovoljenih ciklov. Obstoječe konstrukcije lahko obravnavamo drugače, na primer, da z neporušnimi metodami odkrijemo največje razpoke in preostalo utrujenostno življenjsko dobo izračunamo z uporabo lomne mehanike. V primeru, da primerne razpoke ne odkrijemo, lahko konzervativno predpostavimo razpoko v konstrukciji. V teh primerih je pomembno uporabiti primeren model rasti razpoke, enostaven Paris-ov zakon ali dvo-stopenjsko rast razpoke. Novejše analize konstrukcij temeljijo na zanesljivosti in preostala življenjska doba je izražena z verjetnostjo loma (10^{-4} , 10^{-5}) ali obratno z oceno verjetnega loma v določenem času (1, 10, 30 ali 60 let obratovanja).

3.2 DETERMINISTIČNA OCENA UTRUJENOSTI MATERIALA

Analiza komponent konstrukcije na utrujanje zahteva sledeče vhodne podatke:

- ⇒ Opis obremenitve komponente – lahko je termična obremenitev (npr. sprememba temperature notranje stene cevi s časom), mehanska obremenitev (sprememba upogibnega momenta in osnih sil s časom) ali kombinacija obeh.
- ⇒ Mehanski model – omogoča izračun spremembe napetosti s časom v vsaki točki komponente predpisane geometrije, materialnih lastnosti in obremenitev. Uporabimo lahko analitičen ali numeričen (n.pr. Metoda končnih elementov) model. Ekvivalentne napetosti so nato dobljene z uporabo npr. Tresca kriterija (ASME III, NB).
- ⇒ Izolacija in štetje ciklov - iz časovnice (time history) ekvivalentne napetosti v vsaki točki komponente. V uporabi je metoda Rainflow [6]. Zaporedje amplitud napetosti S_i $i=1, \dots, N$ je določeno v časovnem intervalu $[0, T]$. Vsaka amplituda napetosti ustreza polovici razlike med maksimumom in minimumom napetosti iz Rainflow metode.
- ⇒ Izbira projektne krivulje – projektna krivulja je dobljena na podlagi eksperimentalnih podatkov preizkušancev $N(S)$ in iz varnostnih faktorjev (20 na število ciklov ali 2 na napetost, upošteva se bolj konzervativen).
- ⇒ Izračun faktorja utrujenostne obrabe (Angl. Usage factor) – uporabi se t.i. Miner-jevo pravilo za določitev utrujenostne poškodbe. Predpostavlja, da je elementarna poškodba u enega cikla amplitude napetosti S določena z $u_i = 1/N(S_i)$, kjer je $N(S)$ projektna krivulja. To pa pomeni, da je skupna utrujenostna izraba materiala U :

$$U = \sum_{i=1}^N u_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N(S_i)} \quad (3)$$

Ta faktor obrabe pa mora ostati manjši kot 1, kar pomeni, da je komponenta varno projektirana. V primeru, da je faktor obrabe višji kot 1, se lahko pojavijo razpoke na komponenti.

3.3 VERJETNOSTNA OCENA UTRUJENOSTI MATERIALA

Verjetnostna analiza utrujenosti materiala tesno sledi klasičnemu determinističnemu pristopu. Verjetnostni pristop prepoznava različne nedoločenosti, ki jih uvede v verjetnostno definicijo utrujenostne življenjske

dobe komponente, ki je tako naključnega karakterja. Izpeljana je verjetnostna funkcija $T(\omega)$, iz katere se dobi srednjo vrednost in standardno odstopanje.

V analizo so vključene naslednje nezanesljivosti:

- ⇒ Nezanesljivost (raztros) testnih podatkov preizkušancev: Utrujenostna življenjska doba preizkušanca določenega materiala precej naključnega značaja in je odvisna od nivoja napetosti $N(S, \omega)$, kjer ω označuje naključni karakter utrujenostne življenjske dobe pri amplitudi napetosti S .
- ⇒ Nezanesljivost varnostne rezerve povezane z vplivom dimenzij, gladkostjo površine in vplivom okoljskih pogojev. Nezanesljivost oziroma varnostna rezerva za gladkost površine je npr. 1.8 do 2.2 in je podana kot deterministična vrednost.
- ⇒ Nezanesljivost mehanskega modela: geometrijski parametri (npr. notranji in zunanji premer cevi), materialne lastnosti (modul elastičnosti, Poissonov količnik, koeficient temperaturne dilatacije, itd.) se modelirajo kot naključne spremenljivke z določeno verjetnostno funkcijo.
- ⇒ Nezanesljivost upoštevanja obremenitve: v primeru termičnega utrujanja, temperaturo tekočine na notranji steni cevi se opišejo kot slučajne.

Cilj verjetnostnega pristopa pri oceni utrujenostne življenjske dobe komponent nuklearne elektrarne je vključiti vse vrste nedoločenosti, torej tiste, ki izvirajo iz rezultatov preskusov utrujenostne življenjske dobe preizkušancev, projektnih varnostnih faktorjev, mehanskega modela in obremenitev. Ref. [10] obravnava prvi sklop, to je nedoločenost na nivoju testov preizkušancev. Rezultati napovedujejo nadaljnjo širjenje verjetnostnega pristopa na preostale nezanesljivosti, ki vplivajo na računsko utrujenostno življenjsko dobo komponent.

3.4 ZAKLJUČEK

Razpoložljivi podatki v literaturi [9] kažejo, da negotovost vplivnih parametrov jemlje del konzervativne rezerve standardnih projektnih analiz (ASME). Največ konzervativnosti se vzpostavi v okviru veljavnega standardnega postopka (napetostna analiza, štetje ciklov). Vendar pa ASME dovoljuje tudi alternativen pristop, kot je npr. analiza z metodo končnih elementov in monitoring utrujenosti, kar lahko bistveno zniža konzervativizem v postopkih utrujenostnih analiz.

Utrujenostna življenjska doba dejanskih komponent se razlikuje od življenjske dobe preizkušanca pri podobnem obremenitvenem režimu. Faktorja 2 na napetosti in 20 na število ciklov, ki sta uporabljena v okviru ASME standarda, pa bi naj pokrila vpliv veličin, ki vplivajo na življenjsko dobo, vendar niso bile eksperimentalno raziskane in upoštevane v obstoječih projektnih krivuljah.

Čeprav naj bi ti faktorji predstavljali konzervativno rezervo, temu ni več tako, saj v to rezervo postavljamo vplivne parametre, za katere je znano, da imajo vpliv na utrujenostno življenjsko dobo. Kritični pregled varnostnih rezerv projektnih krivulj je podan v ref. [9], kjer pravi, da je vpliv velikosti komponente, gladkosti dejanske površine in negotovosti zaradi nehomogenosti materialov in raztrosa podatkov, ravno pravšnji za zapolnitev rezerv, a potem ne ostane več potrebne konzervativne rezerve, ki pokrije vpliv okolja lahkovodnih reaktorjev na utrujenostno življenjsko dobo.

Najpomembnejša rezerva mora biti kvaliteta obratovanja, ki izhaja iz kvalitete kadrov. Tudi varnost je človeški faktor, od zasnove, projektiranja, obratovanja do razgradnje.

4. IZDELAVA SMERNIC ZA IZBIRO IN UPORABO NEPORUŠITVENIH TEHNIK PRI APLIKACIJAH NA JEDRSKIH OBJEKTIH

4.1 KOMPONENTE, KI SO PREDMET PREGLEDOV IN TESTIRANJ

Komponente, ki so predmet pregleda v jedrskih elektrarnah, so posode, zadrževalni hram, cevovodi, črpalke, ventili, notranji deli reaktorske posode in rezervoarji ter njihove podpore. Kriteriji sprejemljivosti so različni za različno opremo v jedrskih elektrarnah. Objekte in komponente, ki so predmet pregleda, lahko razdelimo na več kategorij:

- zvari na posodi (reaktorska posoda in druge posode),
- zvarjene šobe na posodah,
- zvari na cevovodih,
- čelni zvari na materialih debelejših od 50 mm,
- čelni zvari na materialih tanjših od 50 mm,
- zvari na črpalkah in ventilih,
- ohišja črpalk in telesa ventilov,
- notranjost in notranji deli reaktorske posode,
- zvari na ohišju kontrolnih palic,
- tlačna meja,
- cevi uparjalnikov.

Uporaba posameznih neporušnih metod v jedrskih elektrarnah je opisana v sklopu D2.

- ⇒ Vizualna preiskava se uporablja za odkrivanje nepravilnosti in napak (razpoke, mehanska obraba, korozija, erozija/korozija) na površinah komponent; odkrivanje netesnosti komponent, ki obratujejo pod tlakom; za določanje splošnega stanja mehanskih in konstrukcijskih komponent ter njihovih podpornih elementov s kontrolo zračnosti komponent, prisotnosti deformacij, manjkajočih delov, tujkov na površini in obrabe.
- ⇒ Površinska preiskava se uporablja za odkrivanje nepravilnosti in napak na površinah komponent. Izvaja se s tekočimi penetranti, magnetnimi delci ali kot »eddy current« metoda.
- ⇒ Volumetrična preiskava se uporablja za odkrivanje nepravilnosti in napak v volumnu materiala. Izvaja se lahko z notranje ali zunanje površine komponente in to kot ultrazvočna ali radiografska preiskava.

4.2 KARAKTERIZACIJA NAPAK

Napake materialov delimo glede na njihov izvor v tri osnovne skupine:

- ⇒ Inherentne ali lastne napake materiala,
- ⇒ Procesne napake,
- ⇒ Servisne ali obratovalne napake.

Inherentne ali lastne napake izhajajo iz faze nastanka strukture materiala (strjevanja tekoče kovine). Z izbiro materialov in detajlnim pregledom jih je mogoče do neke mere izločiti.

Procesne napake nastanejo med procesom obdelave materiala, kot npr. med vlečenjem, valjanjem, varjenjem, toplotno obdelavo, idr. V primeru večjih objektov teh napak ni mogoče v celoti izločiti.

Servisne ali obratovalne napake nastajajo med obratovanjem zaradi obremenitev (mehanskih – utrujenost materiala, površinska obraba; kemijskih - korozija in mešanih – napetostno korozijsko pokanje). Varnost pred temi napakami mora biti zagotovljena že v fazi projektiranja, zaradi velikih negotovosti pa mora biti vzpostavljen še nadzor in sicer na dveh nivojih, prvi nivo, ki zagotavlja, da so obremenitve komponente v skladu s projektno specifikacijo in drugi nivo nadzora, ki dopušča možnost, da lahko vplivi, ki niso upoštevani v projektni specifikaciji, ogrozijo integriteto komponente.

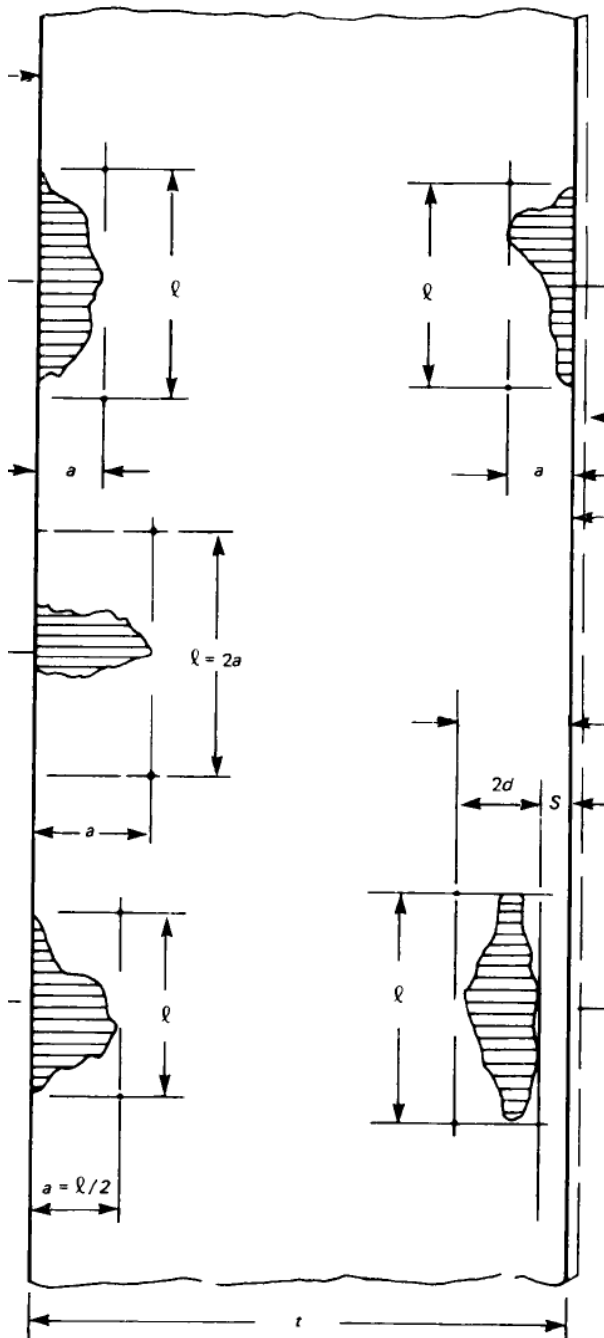
Za posamezne vrste napak so predstavljeni kriteriji sprejemljivosti, glede na mejno vrednost kontrolnega parametra ali kazalca. Iz primerjave mejne vrednosti z dejansko vrednostjo tega kazalca kot je izmerjena, izračunana ali ocenjena za določeno aplikacijo, je mogoče ovrednotiti uporabno stanje komponente in oceniti njeno življenjsko dobo in, če je potrebno, ustrezno ukrepati za njeno podaljšanje.

Napake, ki se odkrivajo z različnimi oblikami neporušitvenih metod, morajo imeti določeno velikost, da se lahko opišejo in določijo dimenzijsko. Velikost napak se določa z velikostjo pravokotnika ali kvadrata, ki popolnoma obsega napako.

- Dolžina pravokotnika ali ena stranica kvadrata mora biti vzporedna z notranjo površino tlačne meje komponente.
- Širina pravokotnika ali ena stranica kvadrata mora biti navpična na notranjo površino tlačne meje komponente in se označuje z a za površinsko napako in z $2a$ za notranjo oziroma podpovršinsko napako.
- Razmerje med dolžino in širino napake se definira z a/l in ne sme biti večje od 0.5.

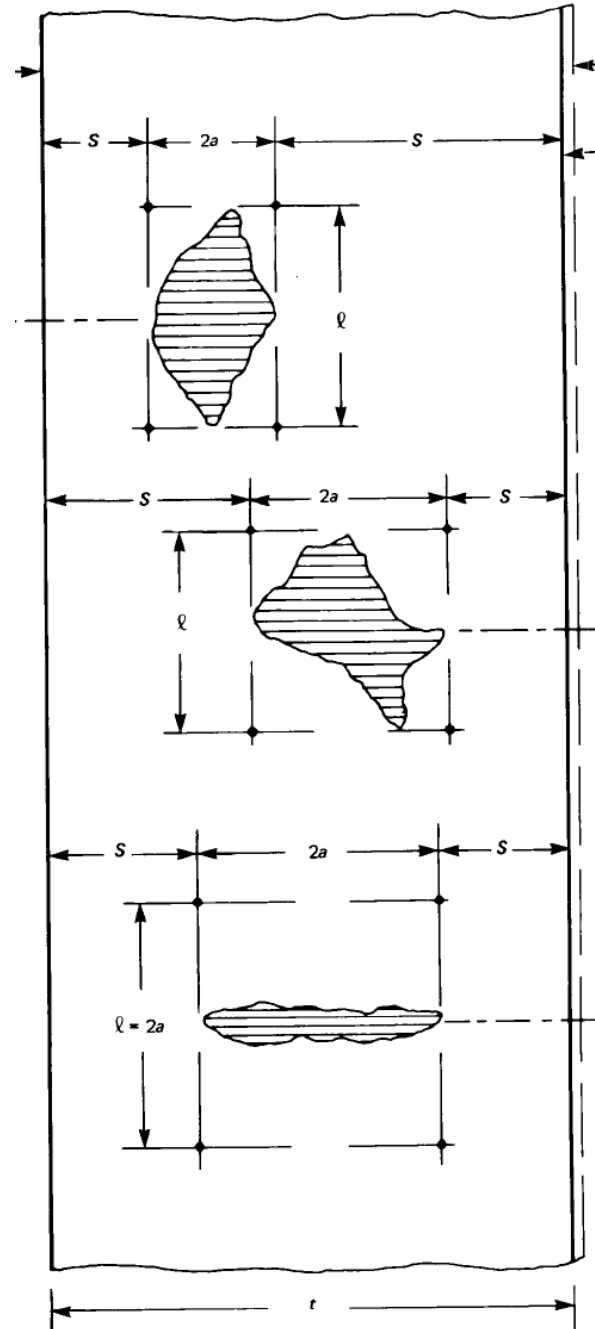
Glede na orientacijo napak razlikujemo ploskovne napake (*opomba: v inženerski praksi se je uveljavil izraz ploskovne napake, čeprav bi bil natančnejši izraz ravninske*), neploskovne (*opomba: v pomen u neravninske*), laminarne napake ter nerazvrščene napake. Napake se pojavljajo kot posamezne ali kot več ločenih napak na isti površini ali istem prerezu.

- ⇒ Ploskovne napake, za katere je značilno, da so orientirane v samo eno ploskev in da je ta ploskev paralelna s površino. Ploskovne napake se delijo na:
 - površinske ploskovne napake, ki so shematsko prikazane na sliki 3 (IWA-3310-1);
 - notranje oziroma podpovršinske ploskovne napake, ki so shematsko prikazane na sliki 4 (IWA-3320-1);
 - večkratne ploskovne napake, ki so shematsko prikazane na sliki 5 (IWA-3330-1);
 - paralelne ploskovne napake, ki so shematsko prikazane na sliki 8 (IWA-3350-1).
- ⇒ Neploskovne napake, za katere je značilno, da površine napak niso orientirane v eno ploskev, prikazane na sliki 7 (IWA-3340-1)
- ⇒ Laminarne napake, za katere je značilno, da je ploskev napake paralelna s površino komponente, kot je shematsko prikazano na sliki 9 (IWA-3360-1).
- ⇒ Nerazvrščene napake, za katere je značilno, da jih ni mogoče uvrstiti v nobeno od prej navedenih kategorij. Shematsko so te napake prikazane na sliki 6 (IWA-3380-1).



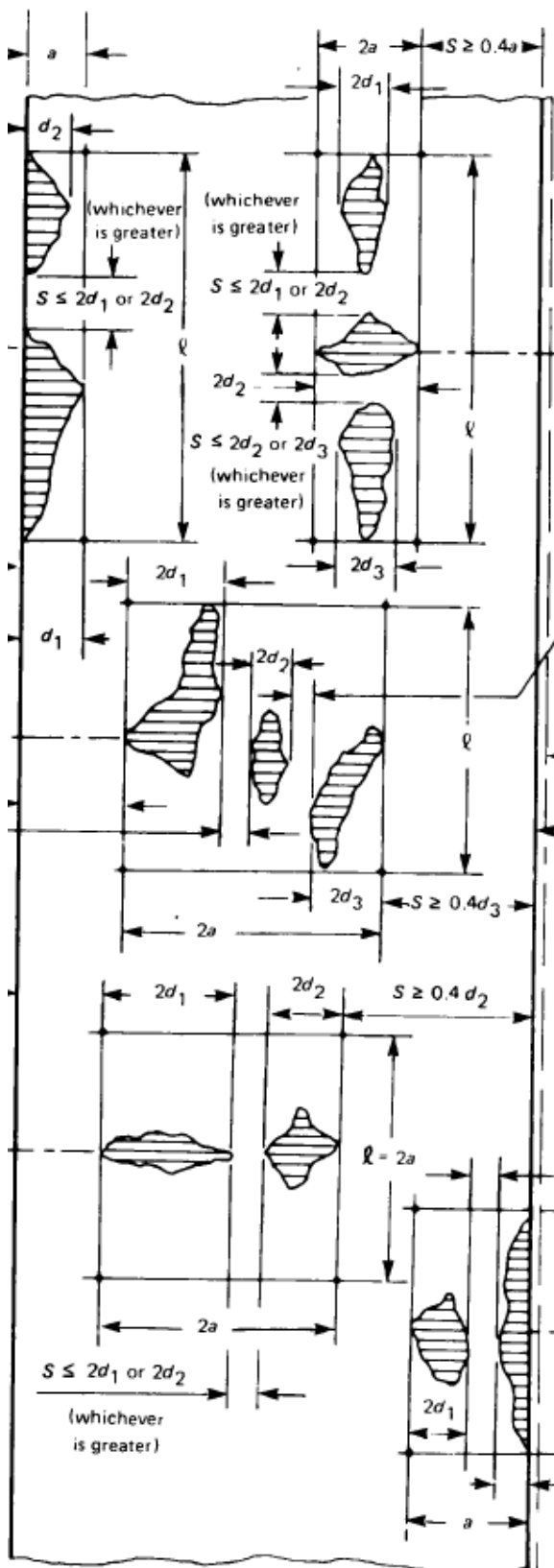
Slika 3: Površinske ploskovne napake v ravnini pravokotno na tlačno vplivano površino (IWA-3310-1)

Shematski prikaz oblike napak in opredelitev karakterističnih dimenzij a in l

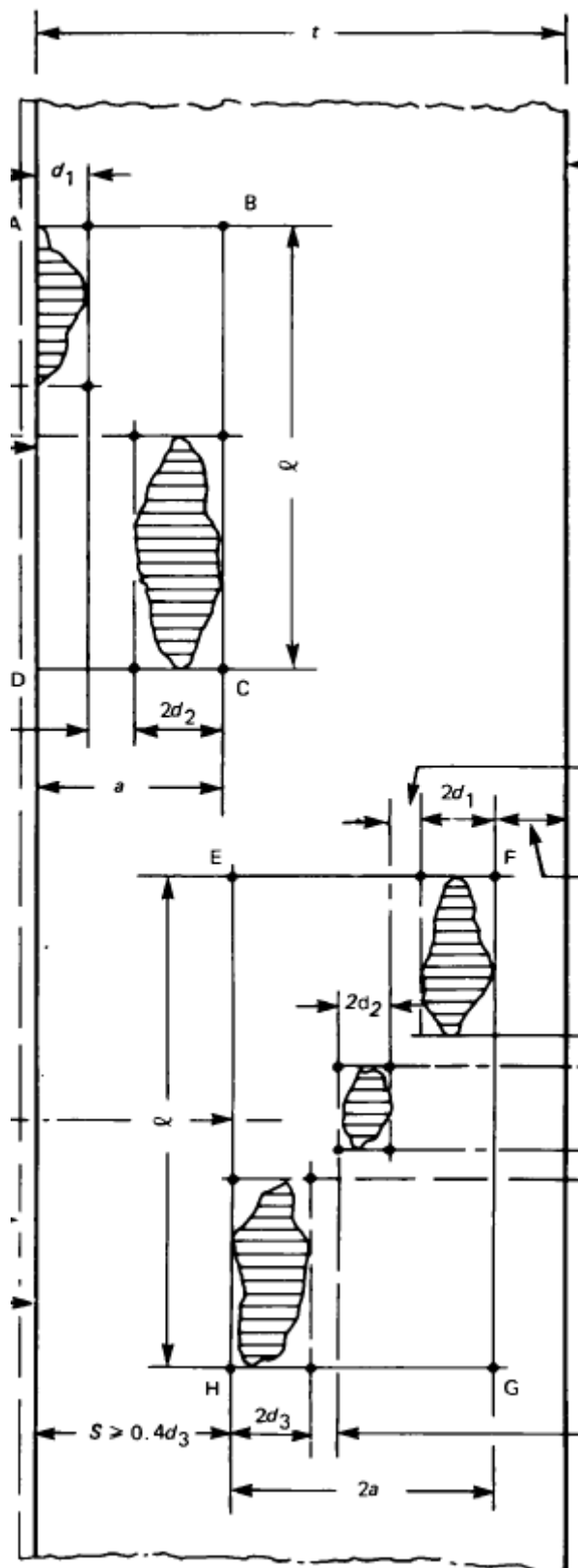


Slika 4: Notranje - podpovršinske ploskovne napake v ravnini pravokotno na tlačno vplivano površino (IWA-3320-1)

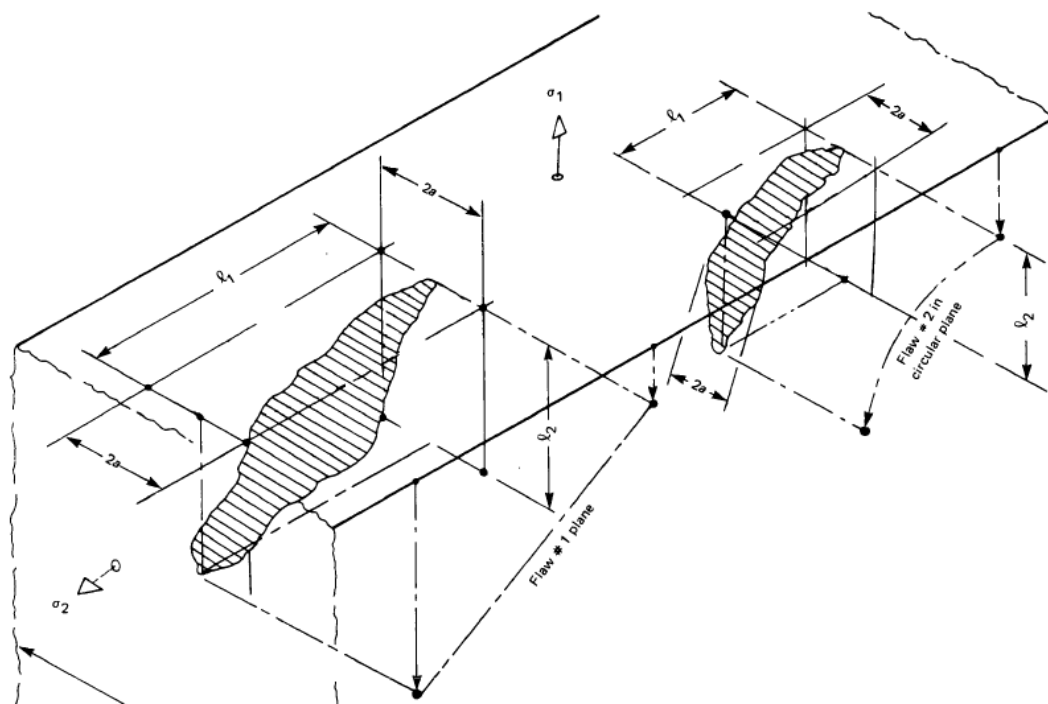
Shematski prikaz oblike napak in opredelitev karakterističnih dimenzij $2a$ in l za $S \geq 0.4 a$



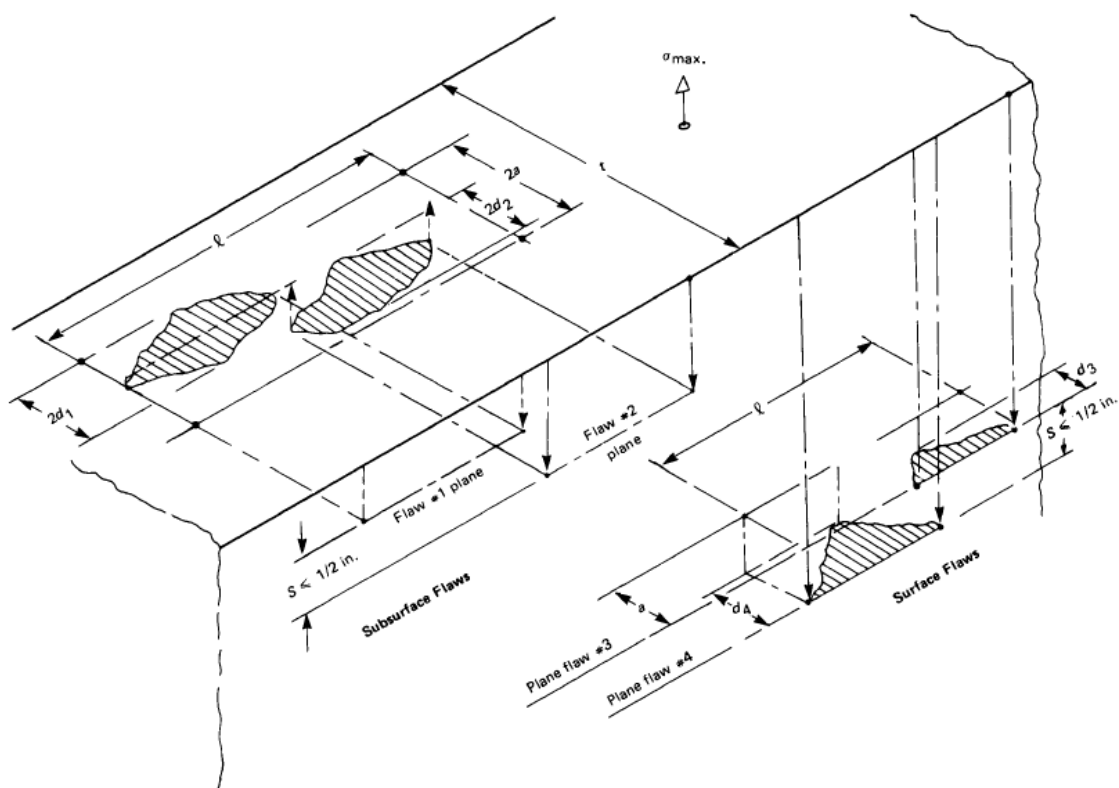
Slika 5: Večkratne ploskovne napake v ravnini pravokotno na tlačno vplivano površino (IWA-3330-1)



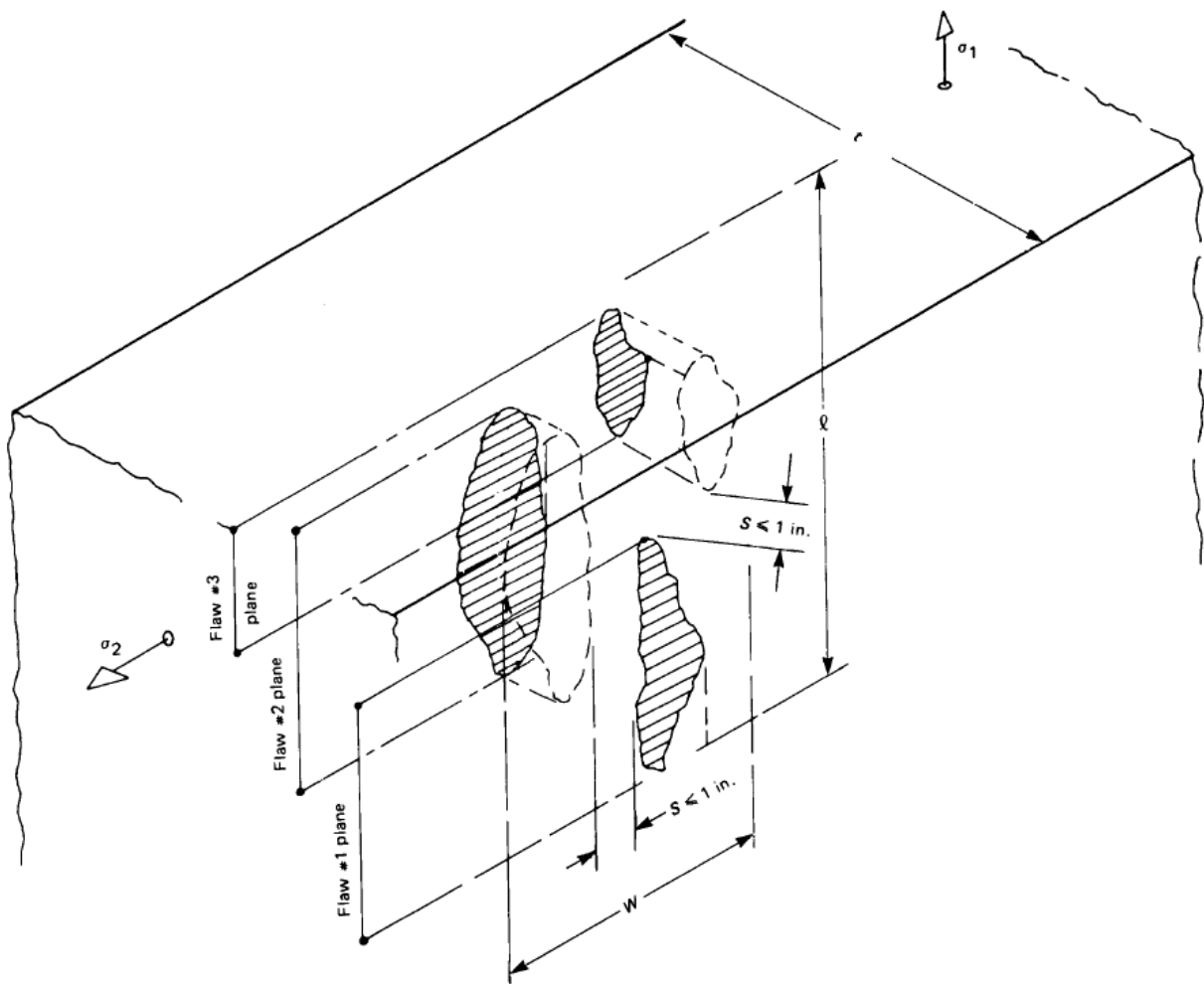
Slika 6: Večkratne nerazrščene napake v ravnini pravokotno na tlačno vplivano površino (IWA-3380-1)



Slika 7: Neploskovne notranje napake (napake pod površino) (IWA-3340-1).



Slika 8: Paralelne ploskovne napake (IWA-3350-1)



Slika 9: Laminarne napake (IWA-3360-1).

Vse napake, ne glede na to, ali se odkrijejo s površinsko preiskavo (npr.: tekoči penetranti, magnetni delci) ali z volumetrično preiskavo (npr.: radiografija), se morajo najprej upoštevati in obravnavati kot linearne napake, dokler se na podlagi dodatnih preiskav ne določijo kot površinske ploskovne, podpovršinske ploskovne ali laminarne. Dodatne preiskave so lahko dodatna radiografija, ultrazvočna preiskava ali kakšna druga površinska metoda.

Vse opažene ali izračunane napake z neporušnimi metodami se primerjajo s standardi, ki so podani v ASME, Section XI, IWB-3000, IWC-3000, IWD-3000, IWE-3000. Napake, ki ne presegajo dovoljenih vrednosti, ki so podane v IWB-3500, IWC-3500, IWD-3500, IWE-3500, ASME, Section XI, so sprejemljive.

Podroben pregled uporabe posamezne preiskave za komponente v jedrskih elektrarnah je podan v ASME Section XI, v tabelah IWB-2500, IWC-2500, IWD-2500, IWE-2500, IWF-2500, IWL-2500.

V tabelah, ki sledijo, so podane okvirne dovoljene velikosti napak iz ASME standarda za različne komponente, vrste napak in metode preiskav. Te vrednosti so rezultat dolgoletnih teoretičnih in praktičnih izkušenj na področju neporušnih metod.

V tem besedilu so tabele in vrednosti v tabelah zapisane v povzeti obliki in niso predvidene za morebitno uporabo v praksi. Za morebitno uporabo v praksi se mora bralec opreti na izvirne tabele, ki so opremljene tudi z vsemi pojasnili glede omejitev pri uporabi.

Tabela 1: Dovoljene ploskovne napake (vir: Table IWB-3510-1)

Dovoljene ploskovne napake ugotovljene z volumetričnimi preiskavami za različne debelina stene – t [mm]						
	$t \leq 64$ mm		$102 \text{ mm} \leq t \leq 305$ mm		$406 \text{ mm} \leq t$	
Razmerje a/l	Lega napake (P – površinska; N – notranja oz. pod površino)					
	P	N	P	N	P	N
	a/t [%]					
0,00	3,1	3,4 Y	1,9	2,0 Y	1,4	1,5 Y
0,05	3,3	3,8 Y	2,0	2,2 Y	1,5	1,7 Y
0,10	3,6	4,3 Y	2,2	2,5 Y	1,7	1,9 Y
0,15	4,1	4,9 Y	2,5	2,9 Y	1,9	2,1 Y
0,20	4,7	5,7 Y	2,8	3,3 Y	2,1	2,5 Y
0,25	5,5	6,6 Y	3,3	3,8 Y	2,5	2,8 Y
0,30	6,4	7,8 Y	3,8	4,4 Y	2,9	3,3 Y
0,35	7,4	9,0 Y	4,4	5,1 Y	3,3	3,8 Y
0,40	8,3	10,5 Y	5,0	5,8 Y	3,8	4,3 Y
0,45	8,5	12,3 Y	5,1	6,7 Y	3,9	4,9 Y
0,50	8,7	14,3 Y	5,2	7,6 Y	4,0	5,6 Y

$Y = [(S/t)/(a/t)]$ oziroma (S/a) ;

S - se izmeri, kot je prikazano na Sliki 4.

Tabela 2: Dovoljene ploskovne napake ugotovljene z volumetričnimi preiskavami v času obratovanja - Inservice inspection (vir: Table IWB-3514-1)

Razmerje a/l	Nominalna debelina stene - t [mm]									
	8		25,4		50,8		76,2		102	
	Lega napake (P – površinska; N – notranja oz. pod površino)									
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
	a/t [%]									
0,00	11,1	13,8 Y	10,0	12,6 Y	8,5	10,8 Y	7,0	8,7 Y	5,5	6,9 Y
0,05	11,8	14,4 Y	10,8	13,0 Y	9,3	11,2 Y	7,5	9,1 Y	6,0	7,2 Y
0,10	13,0	15,6 Y	11,8	14,2 Y	10,2	12,1 Y	8,2	9,9 Y	6,4	7,8 Y
0,15	14,4	17,2 Y	13,2	14,8 Y	11,2	13,5 Y	9,1	10,9 Y	7,2	8,7 Y
0,20	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	12,6	15,1 Y	10,3	12,3 Y	8,1	9,7 Y
0,25	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	11,7	13,9 Y	9,1	10,9 Y
0,30	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	13,2	15,7 Y	10,3	12,3 Y
0,35	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	13,2	17,7 Y	10,3	13,9 Y
0,40	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	13,2	17,7 Y	10,3	15,6 Y
0,45	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	13,2	17,7 Y	10,3	17,4 Y
0,50	14,4	17,2 Y	14,8	14,8 Y	14,2	17,1 Y	13,2	17,7 Y	10,3	17,4 Y

$Y = [(S/t)/(a/t)]$ oziroma (S/a) ;

S - se izmeri, kot je prikazano na Sliki 4.

Tabela 3: Dovoljene velikosti laminarnih napak za komponente (vir: Table IWB-3510-2)

Debelina komponente	Laminarna površina
t [mm]	A [cm ²]
64	48,4
102	77,4
152	116,1
204	154,8
254	193,6
304	232,3
356	271,0
406 ≤	335,5

$A = 0.75 \times$ površina kvadrata ali pravokotnika, ki obsega napake, ki se prekrivajo ali so znotraj razdalje 25,4 mm, pogledati sliko 9.

Tabela 4: Dovoljene velikosti laminarnih napak za cevi (vir: Table IWB-3514-3)

Debelina stene cevi	Laminarna površina
t [mm]	A [cm ²]
≤ 16	48,4
89	48,4
152	77,4

$A = 0.75 \times$ površina kvadrata ali pravokotnika, ki obsega napake, ki se prekrivajo ali so znotraj razdalje 25,4 mm, pogledati sliko 9.

Tabela 5: Dovoljene linearne napake (vir: Table IWB-3510-3)

Nominalna debelina prereza	Površinska napaka	Notranja napaka
t [mm]	l/t [%]	l/t [%]
≤ 64	17,4	28,6
102 – 305	10,4	15,2
406 ≤	8,0	11,2

Kriteriji v tabeli 5 so primerni za linearne napake, ki so ugotovljene s površinsko preiskavo (tekoči penetranti, magnetni delci) ali z radiografsko metodo, ko ni določena globina napake a .

Tabela 6: Dovoljene linearne napake ugotovljene z različnimi metodami v času obratovanja (Inservice inspection; vir: Table IWB-3514-4)

Metoda preiskave (vrsta metode) dolžina napake	Nominalna debelina stene					
	t [mm]					
	< 8	8	25,4	50,8	76,2	102≤
Površinska metoda preiskave (PT ali MT) (penetranti, magnetni delci) Dolžina napake, l [mm]	4,8	4,8	7,9	15,8	22,2	22,2
Volumetrična metoda preiskave (radiografija) Dolžina površinske napake, l [mm]		4,8	7,9	15,8	22,2	22,2
Dolžina podpovršinske napake, l [mm]		6,35	9,5	19,0	30,5	35,6

Tabela 7: Dovoljene ploskovne napake (vir: Table IWB-3515-1)

Razmerje a/ℓ	Premer D - nominalna velikost [mm]	
	$50,8 \leq D < 101,6$	$101,6 \leq D$
	Notranja - podpovršinska napaka a [mm]	
0,00	1,91	2,54
0,10	1,91	2,54
0,20	2,54	3,81
0,30	2,54	3,81
0,40	3,81	5,08
0,50	4,57	6,35

a in ℓ – shematsko prikazano na slikah 3 in 4

Skupna globina dovoljene podpovršinske napake je enaka dvojni vrednosti, ki je podana v tabeli (glej sliko 4).

Tabela 8: Dovoljene ploskovne napake ugotovljene z različnimi metodami (vir: Table IWB-3518-1)

Debelina stene: $t \geq 50,8$ mm					
Volumetrična preiskava (ultrazvok)			Nominalna debelina stene	Volumetrična metoda (radiografija)	
Razmerje a/ℓ	P a/t [%]	N a/t [%]		t [mm]	+ površinska
			Dolžina napake ℓ [mm]		
				P- površinska	N - notranja
0,00	3,9	4,9 Y	50,8	7,62	20,32
0,05	4,2	5,2 Y			
0,10	4,6	5,5 Y	76,2	11,43	22,86
0,15	5,2	6,3 Y			
0,20	5,8	7,0 Y	101,6	15,24	30,48
0,25	6,6	7,9 Y			
0,30	7,5	8,8 Y	127	19,05	38,1
0,35	7,5	10,0 Y			
0,40	7,5	11,2 Y	$152,4 \leq$	22,86	45,72
0,45	7,5	12,6 Y			
0,50	7,5	14,1 Y			

$Y = [(S/t)/(a/t)]$ ali (S/a) , S se izmeri, kot je prikazano na Sliki 4.

Če je $S < 0,4 d$, se napaka klasificira kot površinska napaka.

Če je $Y > 1$, se upošteva, da je $Y = 1$, skupna globina dovoljene podpovršinske napake je enaka dvojni vrednosti iz tabele (razvidno na sliki 4).

Tabela 9: Dovoljene ploskovne napake ugotovljene z različnimi metodami (vir: Table IWB-3518-2)

Debelina stene: $t \geq 50,8$ mm						
Volumetrična preiskava (ultrazvok)				Volumetrična metoda (radiografija)		
Nominalna debelina stene, t [mm]	P		N		+ površinska	
	a [mm]	ℓ [mm]	a [mm]	ℓ [mm]	Dolžina napake ℓ [mm]	
					P- površinska	N - notranja
50,8	5,6	33,53	5,6 Y	33,53	7,62	25,4
76,2	7,62	45,72	7,62 Y	45,72	11,43	25,4

$a/t = (12.7 - 0.9 t)/100$, kjer je $t_{\max} = 76,2$ mm

$l/t = (76.2 - 5.4 t)/100$, kjer je $t_{\max} = 76,2$ mm

$Y = [(S/t)/(a/t)]$ ali (S/a) , S se izmeri, kot je prikazano na Sliki 4.

Če je $S < 0.4 d$, se napaka klasificira kot površinska napaka.

Če je $Y > 1$, se upošteva, da je $Y = 1$, skupna globina dovoljene podpovršinske napake pa je enaka dvojni vrednosti iz tabele (glej sliko 4).

4.3 ZAKLJUČEK

Pričujoče poglavje je nastalo na osnovi ambiciozne želje, da se v njem omenijo vsebine, ki niso omenjene v drugih poglavjih. In tu je potrebno takoj dodati, da v resnici praktično ni bilo mogoče niti približno zapisati vsega, kar se zdi avtorjem še pomembno obravnavati. Če ni bilo praktične možnosti, da se zapiše vse, kar je avtorjem znano in se jim zdi vredno obravnave, pa velja bralca opozoriti na dejstvo, da ni bilo in tudi ni niti teoretične možnosti, da bi avtorji zapisali tisto, česar ne vedo. Bralec naj zato sprejme z razumevanjem iskreno sporočilo avtorjev, da je v skupnem poročilu napisanega precej, da pa to še zdaleč ni vse.

Za morebitno nadaljnje branje je v tem delu vsekakor navedenih veliko virov, preko katerih lahko bralec enostavno dostopi do svetovne zakladnice znanja, ne-le na obravnavanem področju, temveč tudi širše.

5. LITERATURA

- [1] Commissariat à l'Energie Atomique. A16: Guide for Defect Assessment and Leak Before Break Analysis, 4th ed. Saclay: CEA, 2002.
- [2] Ainsworth, R. A. Editor R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Nuclear Electric procedure R5 Issue2, 1999.
- [3] British Standard. BS 7910: Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, BSI, 1999.
- [4] Landes, J. D. and Begley, J. A. A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth, ASTM STP 590, pp: 128-148, 1976.
- [5] Nikbin, K. M., Webster, G. A. and Turner, C. E. Relevance of Non-Linear Fracture Mechanics to Creep Cracking, Cracks and Fracture, ASTM STP 601, Pittsburgh, pp: 47-62, 1976.
- [6] Wasmer, K., Nikbin, K. M. and Webster, G. A. A Sensitivity Study of Creep Crack Growth in Pipes; PVP Vol 438, New and Emerging Computational Methods: Applications to Fracture, Damage and Reliability, pp: 17-24, ASME, New York, 2002.
- [7] Tan, M., Celard, N. J. C., Nikbin, K. M. and Webster, G. A., Comparison of Creep Crack Initiation and Growth in Four Steels tested in HIDA, Int Jnl of Pressure Vessels and Piping, 2001; 78(11-12): 737 – 747.
- [8] ASTM. "ASTM E 1457-00: Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Rates in Metals", Annual Book of ASTM Standards, Vol 3, no. 1, pp: 936-950, 2001.
- [9] Ainsworth, R.A. Some Observations on Creep Crack Growth, Int Jnl of Fracture 1982; 20: 147-159.
- [10] Norton, F.H. The Creep of Steel at High Temperatures, Edited by McGraw and Hill, London, 1929.
- [11] Nikbin, K. M. Transition Effects in Creep-Brittle Materials, Mechanics of Creep Brittle Materials II', Eds A. C. F. Cocks, A.R.S. Ponter, Elsevier applied Science, pp: 14-24, 1991.
- [12] Raju, I. S. and Newman, J. C. Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, Jnl of Pressure Vessel Technology 1982; 104: 293-298.
- [13] British Energy Generation Ltd. "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", British Energy Generation Ltd 1996. UK, Report R6, version 1.4, Appendix M7-6, pp: M7-3-5.
- [14] Connors, D. C. A Compendium of Limit Loads, British Energy Generation Ltd 1996, UK, Report M/TE/GEN/REP/0054/98.
- [15] British Energy Generation Ltd. R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, British Energy Generation Ltd 2001. UK, Report R6, revision 4, Appendix IV.1.12.4, pp: IV.1.35.
- [16] Miller, A.G. Review of Limit Loads of Structures Containing Defects. Int Jnl of Pressure Vessels and Piping 1988; 32(2): 197-327.
- [17] Sattari-Far, I. Finite Element Analysis of Limit Loads for Surface Cracks in Plate, Int Jnl of Pressure Vessels and Piping 1994; 57(2): 237-243.

- [18] Le Mat Hamata, N. and Shibli, I. A. Creep Crack Growth of Seam-Welded P22 and P91 Pipes with Artificial Defects. Part I: Experimental Study and Post-Test Metallography, Int Jnl of Pressure Vessels and Piping 2001; 78 (11-12): 819-826.
- [19] Gampe, U. and Seliger, P. Creep Crack Growth Testing of P91 and P22 Pipes Bends, Int Jnl of Pressure Vessels and Piping 2001; 78 (11-12): 859-864.
- [20] VdTÜV-Werstoffblatt 511/2. Warmfester Stahl X10CrMoVNb 9-1, Ausgabe (09.1995).
- [21] "A Code of Practice for Internal Pressure Testing of Tubular Components at Elevated Temperatures", High Temperature Mechanical Testing Committee, October 1989.
- [22] Le Mat Hamata, N. and Shibli, I. A. Creep Crack Growth of Seam-Welded P22 and P91 Pipes with Artificial Defects. Part II: Data Analysis. Int Jnl of Pressure Vessels and Piping 2001; 78(11-12): 827-835.
- [23] Webster, G. A. and Ainsworth, R.A. High Temperature Components Life Assessment, Chapman & Hall, London, 1994.
- [24] NUREG/CR-6717: Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation in Piping and Pressure Vessel Steels, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001
- [25] NUREG/CR-6878: Effect of Material Heat Treatment on Fatigue Crack Initiation in Austenitic Stainless Steels in LWR Environments, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001
- [26] NUREG/CR-6815: Review of the Margins for ASME Code Fatigue Design Curve – EFFECTs of Surface Roughness and Material Variability , U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001
- [27] NUREG/CR-6934: Fatigue Crack Flaw Tolerance in Nuclear Power Plant Piping – A Basis for Improvements to ASME Code Section XI, Appendix L
- [28] NUREG/CR-5704: Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Austenitic Stainless Steels, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001
- [29] NUREG/CR-6909: Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001
- [30] O.K. Chopra: Mechanism of Fatigue Crack Initiation in Austenitic Stainless Steels in LWR Environments, Energy Technology Division, Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439 USA
- [31] Y. S. Garud, T. L. Gerber: Intergranular Stress Corrosion Cracking of Ni-Cr- Fe Alloy 600 Tubes In PWR Primary Water - Review and Assesment for Model Development, 1983, EPRI-NP-3057
- [32] Voltage-Based Repair Criteria for Westinghouse Steam Generator Tubes affected by Outside Diameter Stress Corrosion Cracking, 1995, NRC Generic Letter 95-05
- [33] Fabjan, L. Cizelj, B. Mavko: Staranje uparjalnikov jedrskih elektrarn, Strojniški vestnik, 38 (1992) 10-12, 249-262
- [34] R. S. Sharpe: Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. III., Academic Press, 1977, 430-479
- [35] ASME B & PVC: Section V, Nondestructive Examination, 1986
- [36] Data Analysis of Non-Ferromagnetic Tubing Eddy Current Inspection Results, Level II A, ZETEC, Issaquah
- [37] ASNT, Handbook of Nondestructive Testing, vol. 7 second edition, American Society of Nondestructive Testing, 1989
- [38] Ginzel, R.K. and Ginzel, E.A., Report on a Technique to Determine Stress Corrosion Crack Depth Using Angulate Longitudinal Ultrasound and Displayed by B-Scan Plots. C.S.N.D.T. Journal Sept/Oct 1987
- [39] Ginzel, R.K., Same Side Sizing of Stress Corrosion Cracking - manual procedure, CEPA Stress Corrosion Cracking (Canadian Energy Pipeline Association) Recommended Practices, 05/97
- [40] Krautkramer, J. and Krautkramer, H., Ultrasonic Testing of Materials, 4th, fully revised Edition, Springer Verlag, 1990
- [41] Ultrasonic Defect Sizing - Japanese Tip Echo Handbook. Second Version, Edited by: K. Harumi, Y. Ogura, M. Uchida Translated by: D.C. Moles, N. Miura Published by: Tip Echo Working Group of 210 and 202 Sub-committee of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 1989
- [42] Ginzel, R.K. & Kanters, W.A., Same Side Sizing of Defects Using the Near Side Detection and Sizing (NSDS) Ultrasonic Transducers, Eclipse Scientific Products Inc., Williamsford, Ontario, Canada
- [43] T. Beuker, R. Alers, B. Brown, G. Alers, SCC Detection Improvement Using High Resolution EMAT Technology ROSEN Technology and Research Center, Lingen – Germany
- [44] L.A. Riley, B. Nassersharif, G. Garcia, J. Schaub, An Automated Testing and Classification System For Identifying Defect in Nuclear Steam Generator Tubes Using a Learning Vector Quantization Neural Architecture, New Mexico State University

- [45] M. Leban, V. Doleček, A. Legat, V. Kuhar, Primerjava sočasnih meritev elektrokemijskega šuma in mehanskih parametrov med procesi napetostnega korozijskega pokanja, *Material Tehnology* 34(1-2)037(2000)
- [46] E Richey, D Morton, M Schurman SCC Initiation Testing of Nickel-Based Alloys Using In-Situ Monitored Uniaxial Tensile Specimens, 12th International Conference on the Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, August 14-18, Salt Lake City, Utah.
- [47] Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design and Analysis in Sections III and VIII, Division 2, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1969.
- [48] B. F. Langer, "Design of Pressure Vessels for Low-Cycle Fatigue," *ASME J. Basic Eng.* 84, 389–402 (1962).
- [49] Rosinski, S., Evaluation of fatigue data including reactor water environmental effects – Materials Reliability Project (MRP-54), EPRI report no. 1003079, December 2001.
- [50] Re-evaluation of Fatigue Analysis Criteria, FRAMATOME report n°EE/S 98.317 (Final report to CEC-DG XI contract B4-3070/95/000876/MAR/C2), 1998.
- [51] Shen, C.L., Wirsching, P.H., Cashman, G.T., Design curve to characterize fatigue strength, *J. Eng. Mat. Tech., Trans. ASME*, 118, pp.535-514, 1996.
- [52] Socie, D. and Dowing, S., Simple Rainflow counting algorithms, *Int. J. of Fatigue*, pp. 31-40, 1982.
- [53] AFNOR, Produits sidérurgiques, "essais mécaniques, partie 2 : fatigue, mécanique de la rupture", tome 9, norme A 03-405, 1992.
- [54] Keisler, J.M., Chopra, O.K., Shack, W.J., Statistical models for estimating fatigue strain-life behavior of pressure boundary materials in light water reactor environments, *Nucl. Eng. Design*, 167, pp. 129-154, 1996.
- [55] B.Sudret, Z.Guédé, P.Hornet, J.M.Stéphan, M.Lemaire: Probabilistic assessment of fatigue life including statistical uncertainties in the S-N curve, Electricité de France – R&D Division – Site des Renardières – 77818 Moret-sur-Loing Cedex, FRANCE, Institut Français de Mécanique Avancée – LaRAMA, Campus des Cézeaux, BP265, F-63175 Aubière, FRANCE



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

CRP št. V2-0375

Delovni sklop D4

Opredelitev komponent v NEK in njihova karakterizacija

Ljubljana, oktober 2008



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov

CRP št. V2-0375

Delovni sklop D6

Opredelitev komponent v NEK in njihova karakterizacija

Direktor:

Prof. dr. Maks Babuder, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, oktober 2008



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

Naročnik: **Inštitut za metalne konstrukcije**
Mencingerjeva 7, 1000 Ljubljana
1000 Ljubljana

Št. pogodbe: Pogodba št. 35/T-2006

Št. projekta: CRP V2-0375, Delovni sklop D4

Naslov: **Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov**
Opredelitev komponent v NEK in njihova karakterizacija (D4)

Izvajalec: Elektroinštitut Milan Vidmar
Inštitut za elektrogospodarstvo in elektroindustrijo,
Ljubljana, Hajdrihova 2

Odgovorni nosilec: mag. Bogo PIRŠ, univ. dipl. inž. el.

Poročilo izdelali: mag. Bogo PIRŠ, univ. dipl. inž. el.
Dr. Boris Žitnik, univ. dipl. inž. el.
Igor Zabric, univ. dipl. inž. el.

Seznam prejemnikov: Inštitut za metalne konstrukcije 1x
Elektroinštitut Milan Vidmar – arhiv 1x
QA-arhiv 1x

Obseg:

Datum izdelave: Oktober, 2008

Kazalo

1.0 Uvod	2
2.0 Podaljšanje življenjske dobe - PŽD	3
2.1 Spremljanje in ocena stanja SSK ki so predmet analize za PŽD	3
2.1.1 SSK ki so predmet analize za PŽD (Scoping)	3
2.1.2. Spremljanju staranja podvrženi SSK (Screening)	8
2.2 Potrebna izboljšanja varnosti zaradi zadovoljevanja zahtev pristojnega upravnega organa	14
3.0. Vzpostavljeni programi in procesi za obvladovanje staranja v NEK	16
3.1 Programi v NE Krško pomembnih za varnost direktno povezani z AMP	16
3.2 Programi vezani na spremljanje vpliva staranja in njihovo zmanjševanje	17
3.3 Programi vezani na specifične NRC varnostne zahteve in so referencirane v §54.4 (3)	18
3.4 Skupine postopkov	19
4.0 Pogoji za izvedbo PŽD	19
5.0 Zaključek	20
6.0 Literatura	20

1.0 Uvod

Podaljšanje življenjske dobe NEK je tesno povezana s problematiko staranja in upoštevanjem dejanskih pojavov staranja, njihovega obvladovanja v celotni življenjski dobi. Za razumevanje obsega analiz za oceno staranja v tem projektu je pomemben pojem sestavnih komponent elektrarne, ki se v ameriški praksi označujejo kot SSC, oziroma tehnološki sistemi (systems-S), gradbene in jeklene konstrukcije (structures-S) in posamezni elementi (components-C) in so v tem projektu označene s kratico SSK (sistemi strukture in komponente). Obseg analiz sestavnih komponent SSK določa NRC 10 CFR Part 54: "Requirements for renewal of operating licenses for nuclear power plants" in je detajlno razdelana v industrijski smernici NEI 95-10 "Industry Guideline for implementing the requirements of 10 CFR Part 54.

V okviru sklopa D6 je narejena opredelitev komponent v NEK ter njihova kategorizacija in klasifikacija po NRC 10 CFR 54 za strojne, električne in gradbene SSK. V obseg analize so vključene naslednje SSK:

- (1) Varnostni (SR) SSK, ki morajo ostati v funkciji med in po projektno predvidenih dogodkih (design-basis events).
- (2) Ne-varnostni (NSR) SSK, katerih odpoved lahko prepreči izpolnitev funkcij opisanih v (1).
- (3) Vsi SSK katerih funkcija je v skladu s specifičnimi NRC predpisi.

2.0 Podaljšanje življenjske dobe - PŽD

2.1 Spremljanje in ocena stanja SSK ki so predmet analize za PŽD

Kot pomemben predpogoj za PŽD elektrarne se uporablja Program spremljanja staranja (AMP). Ta Program je najbolj definiran v uvodu omenjenih ameriških regulatornih dokumentov NRC.

2.1.1 SSK ki so predmet analize za PŽD (Scoping)

Obseg analize (scope) sestavnih komponent (SSK) je definiran v § 54.4 dokumentu.

Analiza lahko temelji na tehnoloških sistemih, kar je primernejše za strojne sisteme, na objektih kar se uporablja v gradbeništvu ali na elementih, kar je primernejše za elektro in I&C opremo.

V obseg analize po § 54.4 spadajo naslednji SSK:

(1) Varnostni (SR) SSK, ki morajo ostati v funkciji med in po projektno predvidenih dogodkih (design-basis events) definiranih v 10 CFR 50.49 (b)(1), da zagotovijo naslednje funkcije:

- Celovitost tlačne meje reaktorskega hladila
- Sposobnost zaustavitve reaktorja in njegovo vzdrževanje v stanju varne zaustavitve
- Sposobnost preprečevanja ali ublažitve posledic nezdod, ki lahko potencialno ogrožajo okolico

(2) Ne-varnostni (NSR) SSK, katerih odpoved lahko prepreči izpolnitev funkcij opisanih v predhodnem odstavku (1).

(3) Vsi SSK katerih funkcija je v skladu z naslednjimi specifičnimi NRC predpisi:

- 10 CFR 50.48 Protipožarna zaščita (FP - fire protection)
- 10 CFR 50.49 Kvalifikacija vpliva na okolico (EQ - environmental qualification)
- 10 CFR 50.61 Tlačno-toplotni udar (PTS - pressurized thermal shock)
- 10 CFR 50.62 Pričakovani prehodni pojavi brez zaustavitve (ATWS - anticipated transients without scram)
- 10 CFR 50.63 Izguba zunanjšega napajanja (SBO - station black-out)

Analiza inventarja celotne elektrarne se opravi na podlagi informacij zbranih iz dokumentacije in razgovora z odgovornimi strokovnjaki. Seznam projektne in tehnične dokumentacije, ki se uporablja za definiranje obsega analize se sestoji iz naslednjih dokumentov:

- verificirane baze podatkov in sezname opreme (v NE Krško MECL)
- dokumenti programa kakovosti (QA liste)
- revidirana varnostna poročila (USAR)
- projektne specifikacije in izračuni (design basis documents)
- tehnične specifikacije

- dispozicijski in gradbeni načrti (general arrangement/civil drawings)
- procesno - tehnološke sheme (P&I D)
- električne sheme (on-line, schematic)
- navodila za uporabo (manuals, handbooks)
- standardi (ASME, IAEA)
- postopki za delo (OP)

Razen tega se priporoča tudi uporabo za elektrarno specifičnih analiz in programov, kot so:

- program za kvalifikacijo vpliva opreme na okolico (EQ)
- programi vzdrževanja (Maintenance Rule)
- programi za spremljanje degradacije opreme (korozija, ISI, utrujenost materiala, PTS)
- verjetnostna analiza tveganja (PRA)
- program protipožarne zaščite

2.1.1.1 Varnostni (SR) SSK

V § 54.4 a(1) so definirane funkcije SSK ki se kot SR nahajajo v obsegu analize za AMP.

Splošno so nuklearni varnostni kriteriji definirani s standardom ANSI N18.2 in se lahko v detajlih razlikujejo pri posameznih elektrarnah. V primeru, da so klasificirani kot SR in niso namenjeni za funkcije definirane v §54.4a(1), potem se mora izvesti analiza njihove funkcije v skladu s §54.4a(2) ali a(3).

Glavna referenca za identifikacijo varnostnih SSK v NE Krško je Updated Safety Analysis Report (USAR).

Rezultati SR/SSK ki so v obsegu analize se nahajajo v Prilogah C, F in H dokumentov NEK Ageing Management Program Scoping Project, Final Report.

Strojni SR sistemi

Analizirano je skupno 84 strojnih sistemov.

Na podlagi SR kvalifikacije po §54.4 a(1) je prišlo v obseg AMP 33 strojnih sistemov: AF, BD, BR, CA, CC, CI, CP, CS, CX, CY, CZ, DD, DG, DO, FC, FD, FP, FW, GH, HC, IA, IC, MS, RC, RH, RM, SF, SI, SS, SW, SX, WP in WS.

Prav tako je kot SR prišlo v obseg AMP 17 prezračevalnih (HVAC) sistemov: VA 161, 171, 181, 231, 241, 251, 431, 511, 521, 531, 541, 561, 571, 581, 701, 721 in 751.

Električni SR sistemi

Analizirano je skupno 28 elektro/I&C sistemov.

Na podlagi SR kvalifikacije po §54.4 a(1) je prišlo v obseg AMP 17 elektro sistemov: AM, AS, CB, CP, DC, EE, EI, EP, ES, HT, IN, LS, NI, RM, RP, SG in XI.

Gradbene SR konstrukcije

V SR gradbene konstrukcije se prištevajo objekti, ki so projektirani skladno s seizmičnimi zahtevami (Cat.I, RG 1.29). Sem se prištevajo tudi nosilne konstrukcije zunanega dela (yard), kot so temelji zbiralnikov in kabelskih kanalov kot tudi obešala, opore in odbojniki cevovodov in opreme.

Analizirano je skupno 63 gradbenih objektov in skupin konstrukcij.

Na podlagi SR kvalifikacije po §54.4 a(1) je prišlo v obseg AMP 13 zgradb:

AB, CCB, CB, DB, DGB, ESW, ESP, FHB, IB, RB, RD, SC in SRSF.

Kot ostale SR konstrukcije so prišli v obseg AMP 3 temelji zbiralnikov (CY, DO in WS) in 6 skupin nosilcev: temelji opreme, obešala in opore cevovodov, penetracije zadrževalnega hrama, notranje konstrukcije in kabelski kanali.

2.1.1.2 Ne-varnostni (NSR) SSK

V § 54.4 a(2) so definirane funkcije SSK, ki se kot NSR nahajajo v obsegu analize za AMP. Po tej definiciji so to SSK, katerih nedelovanje lahko onemogoči varnostno funkcijo SR SSK, definirano v predhodni točki.

Primer za to je NSR sistem zraka za instrumentacijo, ki služi za odpiranje varnostnih ventilov zadrževalnega hrama, ali NSR cevni sistem, katerega puščanje lahko povzroči izgubo varnostne funkcije SR sistema.

Za uporabo tega kriterija so potrebne različne informacije o praktičnih izkušnjah in predpostavke o medsebojni odvisnosti delovanja NSR in SR komponent, kot so lom cevovoda (HELB), poplave, projektili, padec težkih bremen in potresni učinki.

Rezultati NSR/SSK ki so v obsegu analize se nahajajo v Prilogah C, F in H dokumenta NEK Ageing Management Program Scoping Project, Final Report.

Strojni NSR sistemi

Na podlagi NSR kvalifikacije po §54.4 a(2) je prišlo v obseg AMP 5 strojnih sistemov: IA, VA 111, VA 121, VA 131 in WP.

Električni NSR sistemi

Na podlagi NSR kvalifikacije po §54.4 a(2) sta prišla v obseg AMP 2 električna sistema: CH in XR.

Gradbene NSR konstrukcije

Na podlagi NSR kvalifikacije po §54.4 a(2) je prišel v obseg AMP objekt zaščitnega nasipa na Savi in 2 skupini nosilnih konstrukcij: temelji in podpore strojev in cevni nosilci.

2.1.1.3 SSK za katere se uporabljajo specifične zahteve upravnih organov

V § 54.4 a(3) so definirane funkcije SSK katere so predpisane s specifičnimi predpisi NRC in se zato nahajajo v obsegu analize za AMP. Po tej definiciji so to SSK, katerih nedelovanje pod posebnimi pogoji lahko onemogoči varnostno funkcijo SR SSK.

Izvor informacij za ta del analize obsega so izkušnje NE Krško vsebovane v specifičnih programih, kot so:

- ADP-1.0500 Fire Protection Plan; Fire Hazard Analysis - zahteve za zaščito pred požarom (FP)
- ED-12 EQ Program; EQ-TR01/01 + CN02/01 EQ Zone - zahteve za kvalifikacijo vpliva opreme na okolje (EQ)
- TR-06/96 LTOP; SSR-NE Krško-12 - zahteve za tlačno-toplotni udar (PTS)
- WENX 94/44 - zahteve za predvidene tranziente brez zaustavitve (ATWS)
- WENX 91-04 R.1 - zahteve za izgubo zunanjšega napajanja (SBO)

Strojni sistemi po specifičnih zahtevah

Na podlagi specifičnih zahtev iz §54.4 a(3) so prišli v obseg AMR naslednji sistemi:

- 23 po zahtevah FP:
AF,CC,CP,CS,CY,CZ,DG,DO,FP,FW MS,RC,RH,SW,VA
251,511, 531, 541, 581, 701, 721, 751
- 49 po zahtevah EQ:
AF,BD,CC,CI,CS,CX,CZ,DD,FC,FD,FP,FW,GH,HC,IC,MS,M
W,
RC,RH,RM,SI,SS,SX, WP,
VA:101,111,121,131,141,151,161,171,181,201,231,241,251
,331,431,511,521,531,541,561,
571, 581, 701,721,751
- 1 po zahtevi PTS: RC
- 2 po zahtevi ATWS: AF, MS
- 8 po zahtevi SBO: AF, CP, CS, CY, FW, IA, MS, RC

Elektro sistemi po specifičnih zahtevah

Na podlagi specifičnih zahtev iz §54.4 a(3) so prišli v obseg AMR naslednji sistemi:

- 6 po zahtevah FP: AS, CB, DC, EE, EP in ES
- 8 po zahtevah EQ: CP, DC, EE, NI, RM, RP, SG in XI
- 3 po zahtevi ATWS: AM, DC i ES
- 6 po zahtevi SBO: AS, CB, CP, DC, ES in RP

Gradbene konstrukcije po specifičnih zahtevah

Na podlagi specifičnih zahtev iz §54.4 a(3) so prišle v obseg AMR naslednje konstrukcije:

- po zahtevah FP: 3 zgradbe (AB, CB, ESP), 2 temelja zbiralnikov (CY, FP), temelji opreme in nosilci cevovodov

- po zahtevah EQ: temelj WS zbiralnika
- po zahtevah SBO: zgradba IB in temelj CY zbiralnika

2.1.1.4 Funkcije SSK ki so v obsegu analize

Pri definiranju SSK ki se morajo analizirati po §54.4 je pomemben podatek funkcija posameznih SSK.

Po §54.4 (b) zahtevano funkcijo (intended function) se smatra proces, stanje ali dejavnost, ki jo je treba opraviti ali podpreti, da bi se SSK vključile v obseg analize po §54.4 (a)(1)-(3). V primeru redundantnih komponent, se mora redundantna funkcija ohraniti tudi v času PŽD elektrarne.

Na nivoju sistemov so navedene tiste funkcije, ki so bile relevantne za njihovo vključevanje v obseg analize po LR.

V naslednjem koraku spremljanja staranja, definiranim kot Celotna ocena stanja elektrarne (Integrated Plant Assessment), se opravi analiza inventarja elektrarne na nivoju komponent. Pri tem imajo lahko komponente več funkcij, vendar se specificirajo samo tiste funkcije ki so relevantne za vključitev posameznih komponent v obseg §54.4.

Informacije o specifičnih funkcijah SSK se lahko prevzame iz programa vzdrževanja (Maintenance Rule) ali iz drugih virov, kot so USAR in navodila za upravljanje in rokovanje z opremo.

2.1.1.5 Rezultati opravljene analize

V okviru NEK AMP Scoping Project je opravljena detajlna analiza obsega po §54.4 in dokumentirana v skladu z zahtevami definiranimi v §54.37(a). Analiza je opravljena na nivoju sistemov in objektov, ob priložitvi odgovarjajočih virov informacij in funkcij.

Obdelano je 84 strojnih sistemov, od teh je 60 vključenih v program spremljanja staranja (AMP).

Od elektro-instrumentacijskih sistemov je obdelano 28, od teh je 19 vključenih v AMP. Od gradbenih konstrukcij je obdelano 63, od teh je 23 vključenih v AMP.

2.1.1.6 Metodologija ocene stanja

Celotna ocena stanja elektrarne (Integrated plant assessment - IPA) predstavlja ključni del postopka podaljšanja DO (LR). To je naslednji korak po določitvi obsega (scoping) in se imenuje tudi izbor (screening). Medtem ko se scoping ukvarja več s sistemi in objekti, je screening bolj usmerjen na komponente in konstrukcije in njihove zahtevane funkcije. V §54.21 (a)(1), je posebej določeno, da se v okviru celotne ocene stanja elektrarne definirajo tiste komponente in konstrukcije, ki svojo funkcijo opravljajo na *pasiven* način, tj. brez gibljivih delov in brez spremembe lastnosti ali konfiguracije. Ocena stanja predpisuje metodologijo za določanje teh «pasivnih, dolgotrajnih» komponent in konstrukcij in način dokazovanja, da se bo ustrezno spremljal vpliv staranja na njihove zahtevane funkcije. Sposobnost izvršitve teh funkcij se ne sme zmanjšati v celotnem obdobju podaljšanega obratovanja elektrarne.

2.1.2. Spremljanju staranja podvrženi SSK (Screening)

Identifikacija spremljanju staranja podvrženih SSK temelji na §54.21, ki se glasi:

(1) Za tiste SSK, za katere je z analizo obsega (scoping) ugotovljeno, da izpolnjujejo pogoje po §54.4, je potrebno identificirati konstrukcije in komponente, ki so podvržene spremljanju staranja (AMR) in da:

(i) Izpolnjujejo funkcijo v skladu s §54.4, brez gibljivih delov in brez spremembe konfiguracije ali lastnosti.

Primeri za to so: reaktorska posoda, tlačna meja hladilnega sistema reaktorja, uparjalniki, tlačnik, cevovodi, ohišja črpalk in ventilov, plašč sredice, nosilci komponent, tlačne bariere, toplotni izmenjevalniki, prezračevalni kanali, zadrževalni hram (betonski in jekleni del), elektro in cevne penetracije, vrata zadrževalnega hrama, konstrukcije seizmične kategorije, električni kabli in spoji, kabelske police in omare z električno opremo.

V to ne sodijo npr. gibljivi deli črpalk in ventilov (razen ohišja), motorji, dizel generatorji, kompresorji, blažilci pomika, pogoni regulacijskih palic, ventilacijske lopute, pretvorniki in merilniki tlaka, merilniki nivoja, električna stikala, ventilatorji, tranzistorji, električni akumulatorji, el. ločilniki, releji, stikala, pretvorniki, razdelilne plošče, polnilci, izvori električnega napajanja.

(ii) Niso v obsegu zamenjave, ki temelji na ocenjenem trajanju (qualified life) ali predpisanem časovnem obdobju.

Izbor primerne metode za identifikacijo je odvisen od razpoložljivosti baze podatkov SSK in informacijskega sistema elektrarne. Baze podatkov, ki obstajajo v NE Krško (MECL) omogočajo detajlno obdelavo do nivoja posameznih komponent.

2.1.2.1 Ugotavljanje mej evaluacije

Če je obseg analize opravljen na nivoju sistemov in objektov, kot je opisano v poglavju 2.1.1, je potrebno za nadaljnjo identifikacijo konstrukcij in komponent, na katerih je potrebno spremljati staranje, določiti meje znotraj teh sestavljenih sistemov, ki so pomembne za njihovo funkcijo v skladu s §54.4. Gre za to, da ne mora biti cel sistem ali objekt pomemben za varnostne funkcije predpisane po §54.4, ampak samo nekateri njegovi deli. Ti deli se morajo jasno zamenjati in označiti na primernih shematskih prikazih, ki se priložijo k zahtevi za LR.

Na nivoju analize komponent je prav tako potrebno postaviti jasne meje med posameznimi komponentami. Strukture so po svojem karakterju pasivne in dolgotrajne, vendar pa so lahko posamezni deli izločeni iz spremljanja staranja, če nimajo varnostne funkcije. Znotraj zgradb so posamezni prostori lahko zajeti v spremljanje staranja, če vsebujejo komponent z varnostno funkcijo po §54.4., drugi prostori pa ne.

2.1.2.2 SSK podvrženi spremljanju staranja in njihove funkcije

S spremljanjem staranja (AMR) je potrebno zajeti vse tiste konstrukcije in komponente ki so pasivne glede na delovanje (tj. nimajo gibljivih delov in ne menjajo konfiguracije ali lastnosti), so dolgotrajne (long-lived) in izvajajo ali pomagajo izvajati v §54.4 definirano varnostno funkcijo.

Komponente, ki zagotavljajo:

- tlačno mejo, za zadosten pretok in odgovarjajoči tlak reaktorskega hladilnega sistema (PB)
- filtracijo (FI)
- dušenje pretoka (TH)
- statično podporo SR komponentam (SR, RI)
- električne spoje za prenos napetosti, toka ali signalov (EC, EI, DA)
- prenos toplote (HT)
- prezračevanje (VE)

Konstrukcije, ki zagotavljajo:

- protipožarno zaščito med posameznimi prostori (FP)
- fizično zaščito SR komponentam (SL)
- statično in/ali funkcionalno podporo SR opremi ali NSR opremi iz §54.4 (2) (MS, SN)
- zaščito pred poplavljanjem (FL)
- varstvo okolice v primeru nezgode (EP)
- radiološki ščit (SH)
- zaščito pred projektili (MI)
- ščit pred lomom visokotlačnih cevovodov (HE)
- seizmično zaščito cevovodov (WR)
- izpust plinov (DI, HR)
- vir hladilne vode za zaustavljanje elektrarne (CS)
- odvod toplote ob izgubi zunanjega napajanja ali projektnih nezgodah (HS)

Pri definiranju komponent, ki svojo funkcijo izvršijo brez gibljivih delov, ni potrebno upoštevati funkcije njihovih posameznih delov. Tako npr. pri črpalkah in ventilih obstajajo gibljivi deli, ki po tem ne bi spadali v AMR. Vendar so zaradi njihove pasivne funkcije ohranjanja tlačne bariere (pressure-retaining boundary) te komponente vseeno podvržene spremljanju staranja.

Drugi pogoj za uvrstitev konstrukcije ali komponente v spremljanje staranja je, da niso zajete v plan periodičnih zamenjav glede na predvideno življenjsko dobo. Zamenjava je lahko planirana na podlagi priporočil dobavitelja ali spremljanja stanja.

Koristno za analizo je grupiranje konstrukcij ali komponent glede na podobnost, material, ali pogoje okolja. Na podlagi tega so izdelana priporočila za tipsko razvrščanje v program spremljanja staranja. Konstrukcije se lahko kategorizira glede na tip npr. betonske, jeklene, zaščitni zidovi, temelji itd. Lahko se jih opazuje tudi razstavljene na dele npr. zidovi, pod, vrata, preboji itd. ker ni nujno, da imajo vsi deli funkcije po §54.4.

Podporne konstrukcije, kot so obešala in seizmični odbojniki cevovodov, kabelski nosilci in police itd. se opazujejo ločeno od zgradb v katerih so. Odvisno od varnostne funkcije, se v AMR lahko vključi tudi samo dele cevovoda.

Porabni deli po svoji naravi niso dolgotrajni, vendar jih je vseeno potrebno analizirati kot dele posameznih komponent in njihove varnostne funkcije.

2.1.2.3 Rezultati Screeninga v NEK

Po opravljeni analizi (scope) SSK kateri izpolnjujejo kriterije po §54.4, se opravi tudi detaljna analiza (screening) konstrukcij in komponent teh sistemov, ki izpolnjujejo kriterije iz §54.21 za uvrščanje v obseg dolgoročnega spremljanja staranja (AMR).

Rezultati so naštetih v tabelah dokumenta SSEE/02/211R – NEK Ageing Management Program Scoping Project. Tabele so grupirane po področjih, tj. kot strojne, elektro in gradbene komponente. Za vsako komponento je naštet sistem kateremu pripada, tip komponente, opis komponente in njena varnostna funkcija. Dodane so tudi informacije o materialu, mediju in pogojih okolice, da bi se olajšalo kasnejše grupiranje po podobnosti izbranih komponent pri definiranju programa spremljanja staranja za podobne komponente.

Rezultatov ne moremo smatrati za končne, ker so podvrženi dodatnim analizam in obdelavam ter spremembam zaradi modifikacij in varnostnih kriterijev.

Strojne komponente

Ocenjeno je 9251 strojnih komponent in od tega izdvojeno 6385 za spremljanje staranja (AMR).

Ocena je narejena na podlagi baze podatkov NE Krško MECL in je zato omejena na komponente, ki so v njej identificirane. To pomeni da ne vsebuje npr. cevovodov, notranjih delov reaktorja ipd. in so te komponente dodane kot generične.

Električne komponente

Ocenjeno je 13524 elektro in I&C komponent in od tega izdvojeno 882 za spremljanje staranja.

Ta ocena je prav tako narejena na podlagi podatkov MECL-a in omejena na to bazo.

Z vnosom dodatnih podatkov o materialu in pogojih okolja je omogočeno kasnejše grupiranje za obdelavo programa AMR.

Gradbene komponente

Gradbene konstrukcije in njihovi elementi niso obdelani v MECL-u in ta del ocene je narejen direktno na podlagi funkcij posameznih konstrukcijskih elementov v skladu s kriteriji iz §54.21.

Na ta način je izdvojeno 673 gradbenih in konstrukcijskih generičnih komponent z dodanimi ustreznimi atributi, kot so material, proces in okolje, pomembnimi za kasnejše grupiranje.

2.1.2.4 Uporabljene metode spremljanja staranja

Spremljanje vpliva staranja za SSK, izbrane v procesu scopinga in screeninga, se lahko izvede s pomočjo treh metod.

Prva metoda so detaljne specifične analize delovanja izbranih SSK in vpliva staranja na njihove varnostne funkcije. To se izvede s programi, ki so lahko razdeljeni na preventivne, korektivne, opazovanje stanja in spremljanje delovanja. Primer za prvo skupino je protikorozivna zaščita, za drugo kemijska obdelava za preprečevanje notranje korozije cevovodov, za tretjo vizualna kontrola stanja objekta ali NDT spremljanje cevovodov in komponent ter za četrto spremljanje opreme za prenos toplote preko toplotnih bilanc. S pomočjo teh in podobnih programov se spremlja in preprečuje degradacija funkcij zaradi vpliva staranja. Pri tem je potrebno upoštevati

specifičnosti materiala, delovno okolje in obremenitve, ki delujejo na SSK. Za preglednost spremljanja je potrebno formirati dokumentacijo v obliki seznamov za preverjanje in njihovo redno izpolnjevanje za opazovane kritične SSK.

Druga metoda temelji na rezultatih prejšnjih pregledov na podobnih SSK v drugih elektrarnah. Za to obstaja organizirano mednarodno zbiranje in izmenjava podatkov med elektrarnami istih proizvajalcev, ob nadzoru in odobritvi regulatornih organov, kot je NRC za ZDA.

Tretja metoda temelji na obstoječih programih za spremljanje stanja pasivnih funkcij pomembnih za varnost v PŽD. Včasih je degradacija pasivnih funkcij manj očitna in se spremlja indirektno preko delovanja aktivnih komponent.

Poleg teh metod je možno uvesti popolnoma nove programe za spremljanje staranja. To vključuje metode periodičnega jemanja reprezentativnih vzorcev, njihovo preizkušanje in analiza rezultatov. Nove metode se izvajajo tudi z občasnimi detajlnimi inšpekcijami (PSR), s katerimi se spremlja stanje varnosti elektrarne. Na podlagi rezultatov novih programov se predpisuje kriterije sprejemljivosti, kot tudi korektivne akcije nujne, za ohranitev varnostnih funkcij.

Celotna ocena stanja (IPA) mora biti detajlno dokumentirana, ker služi kot podlaga in dokazni material za pridobitev odobritve za PŽD. Ločeno morata biti dokumentirana definiranje obsega (scoping & screening) in detajlni programi za spremljanje staranja (AMP).

Primeri mehanizmov degradacije zaradi staranja, ki se običajno spremlja in ocenjuje:

- degradacija izolacije kablov zaradi toplotne krhkosti,
- degradacija elastomernih delov solenoidnih ventilov,
- degradacija visokonapetostne epoksidne izolacije statorja motorjev primarnih črpalk,
- pokanje tlačnih cevi iz cirkaloja zaradi vodnih mehurčkov,
- stanjšanja sten CS črpalk in ventilov zaradi enofazne erozije-korozije,
- poškodbe cevni držal zaradi vibracij,
- zmanjšanje kapacitete izmenjevalnikov toplote zaradi oblog in produktov erozije in korozije,
- prepuščanje protipovratnih ventilov zaradi obrabe, vibracij in napetostne korozije (SCC),
- poškodbe cevi uparjalnikov zaradi IGSCC, jamičaste korozije, trenja, stiskanja (denting) in usedlin,
- razpoke napajalne linije tlačnika od utrujenosti zaradi toplotne slojevitosti (stratification),
- korozija zaradi visokotlačnega vbrzganja borove kisline v RC,
- stanjšanje vodil reaktorske instrumentacije (thimble tube) zaradi vibracij in obrabe,
- degradacija ohišij motornih ventilov zaradi kavitacijske erozije.

2.1.2.5 Analiza staranja omejenega trajanja (TLAA)

V ameriški praksi podaljšanja dovoljenja (LR) je vpeljan pojem «analiza staranja omejenega trajanja» (Time Limited Aging Analysis - TLAA). Definiran je v § 54.3 na

naslednji način:

TLAA so izračuni in analize nujne za opazovani SSK, ki zajemajo naslednjih 6 kriterijev:

- nanaša se na SSK definirane po § 54.4(a);
- upoštevajo se učinki staranja (degradacija materiala in karakteristik);
- vključen je pojem določene življenjske dobe elektrarne (npr. 40 let);
- definirane so z varnostnimi analizami v začetnem dovoljenju za obratovanje;
- vključujejo izvršitev varnostnih funkcij SSK, definiranih v §54.4(b);
- vključeni so pogoji iz obstoječega dovoljenja za obratovanje (CLB).

V §54.21 (c)(1) je določeno, da je potrebno sestaviti seznam TLAA kot je definirano v §54.3 in da te analize morajo veljati do kraja predlaganega podaljšanega obratovanja elektrarne (PŽD). S tem se zagotavlja, da se bo v obdobju celotnega podaljšanja ustrezno spremljalo in vzdrževalo varnostne funkcije, pomembne za varno obratovanje elektrarne.

Ocena izbranih specifičnih primerov TLAA se lahko izvede na enega od naslednjih načinov:

- Verifikacija, da je TLAA veljavna za PŽD. S to metodo se že obstoječe analize, veljavne za normalno življenjsko dobo, ocenijo kot veljavne tudi za podaljšano obratovanje. To se doseže z analizo vhodnih pogojev in predpostavk in dokazom, da je v njih vsebovan pojem vpliva staranja v podaljšani dobi. Prav tako je pomembno, da varnostna funkcija ni zmanjšana tudi v podaljšani dobi.
- Ocenitev (justification), da se TLAA lahko projicira do konca podaljšane življenjske dobe. S to metodo se revidira TLAA z novo oceno konzervativnih pogojev in predpostavk, uporabljenih v prvotnih analizah. Možna je tudi uporaba novejših računskih metod in programov ob upoštevanju natančnejših predpostavk in izkustvenih rezultatov.
- -Verifikacija, da je TLAA zagotovljena s spremljanjem učinkov staranja s pomočjo metod AMP.

Tipični objekti za potencialne TLAA analize so:

- komponente reaktorskega hladilnega sistema (RCS)
- pomembne komponente pomožnih sistemov (ECCS, MS)
- komponente podvržene staranju zaradi pogojev okolice (EQ)
- pomembne zgradbe (RB) in strukture (CV, penetracije)
- rešetke za izrabljeno gorivo (SFR)

Reaktorski hladilni sistem vsebuje naslednje komponente: reaktorska posoda z notranjimi deli, tlačnik, cevovodi z ventili, črpalke in uparjalniki.

Reaktorska posoda je najkompleksnejši del opreme elektrarne in njenem staranju se od nekdanj posveča največja pozornost. Posebno so v centru pozornosti priključki (nozzle), reaktorska glava s penetracijami in deli notranje konstrukcije (internals). Staranje teh delov vpliva na degradacijo z naslednjimi procesi: intergranularna napetostna korozija (IGSCC), utrujenost materiala zaradi lezenja in toplotnega staranja (PTS), korozija, erozija in napetostna korozija ter krhkost zaradi prisotnosti radiacije (IASCC). Notranji deli reaktorja so podvrženi lezenju in poškodbam toplotnega ščita in njegovih veznih vijakov. V obsegu potencialnih analiz so tudi nosilni deli posode podvrženi krhkosti

zaradi radiacije. Za spremljanje teh procesov in njihovih posledic je razvit cel niz analitičnih in merilnih metod, kot tudi korektivnih akcij za podaljšanje trajanja.

Tlačnik je podvržen procesu toplotnega lezenja, posebno v področju penetracij.

Na cevovodih in ventilih reaktorskega hladilnega sistema se spremlja več procesov staranja kot so lezenje in krhkost zaradi toplotnega staranja. Na njih se opravi več specifičnih analiz procesov kot so vpliv puščanja pred lomom (LBB), termalnih šokov in podobno.

Pri črpalki reaktorskega hladila so karakteristični procesi staranje ohišja (lezenje, toplotna krhkost) in vztrajnika.

Na uparjalnikih se spremlja vpliv lezenja in staranja plašča.

Od nereaktorskih komponent s karakterističnimi procesi staranja, se lahko omenijo varnostni cevovodi za pogonsko paro pomožne turbinske črpalke in za minimalni pretok (miniflow) črpalk varnostnih sistemov (ECCS).

Karakteristične komponente, podvržene staranju zaradi vpliva okolja so deli elektroopreme, to so npr. kabli znotraj reaktorske zgradbe. Pri njih je kritična izolacija, ker zaradi specifičnih pogojev okolice (temperatura, vlaga, radiacija) zgublja svoje lastnosti. Ob stalnem spremljanju degradacije je omogočena pravočasna zamenjava teh kablov, ki so bistveni za merjenja in regulacijo varnostnih funkcij.

Zadrževalni hram (betonska reaktorska zgradba in jeklena notranja oplata) je prav tako podvržen specifičnim degradacijam, kot so degradacija betona (razpoke, kemični razpad), degradacija betonskega železa in jeklenega plašča (korozija, lezenje) in degradacija prehodov (vrata, penetracije) zaradi lezenja. Za vse te pojave so razvite analitične in eksperimentalne metode spremljanja in korektivne akcije.

Od komponent izven reaktorskega dela so zanimive rešetke za izrabljeno gorivo. Ker je njihova varnostna funkcija pomembna zaradi sposobnosti absorpcije nevtronov, je potrebno analizirati morebitne spremembe teh lastnosti. NE Krško se je odločila za kompaktne rešetke z absorberji iz boriranega nerjavečega jekla, ki so pokazale najboljšo stabilnost pri staranju. V primeru PŽD bi bilo treba povečati preostalo kapaciteto bazena za gorivo z reščkami iz enakega materiala.

TLAA se pripravlja istočasno z ostalimi dokumenti, ki so potrebni za zahtevo za PŽD (LRA). V kolikor za posamezne komponente ni mogoče kompletirati TLAA dokumentacije do vložitve zahteve, je potrebno to prikazati kot izjemo.

V tem primeru je treba opisati razpoložljive metode, kriterije sprejemljivosti in korektivne ukrepe, ki bodo zagotovili vzdrževanje varnostne funkcije za celotno PŽD.

V sklopu TLAA je potrebno pripraviti tudi analizo izjem TLAA, specifičnih za elektrarno, ki temeljijo na 10 CFR 50.12. S to analizo je potrebno potrditi veljavnost teh izjem tudi v podaljšanem obratovanju elektrarne.

2.1.2.6 Rezultati preliminarnih analiz opravljenih na opremi NEK

V okviru prvega periodičnega varnostnega pregleda (PSR) v NEK je opravljena tudi prva faza programa spremljanja staranja (AMP). V končnih dokumentih projekta SSEE/02/204R - NEK Ageing Management Program Scoping Project, Final Report in SSEE/02/211R – NEK Ageing Management Program Scoping Project je definiran obseg SSK, ki jih je potrebno spremljati v skladu z ameriško prakso skozi AMP. Prav tako je z vrsto razgovorov s strokovnjaki NEK in detajlno analizo organizacije, postopkov in dokumentacije ocenjena kakovost infrastrukture potrebne za podporo izvedbe AMP.

Preliminarni zaključki o tem so naslednji:

- Organizacija, informacijski sistem, praksa in postopki zagotavljajo potrebno infrastrukturo in vire informacij potrebnih za izvajanje skupnega AMP.
- Obstoječi programi NEK namenjeni spremljanju staranja pomembnih SSK so usklajeni z mednarodnimi predpisi in standardi in uporabljajo sodobne metode in tehnike. Z vidika staranja komponent in pregleda prakse, programov in obratovalnih izkušenj je možno varno obratovanje elektrarne v naslednjih desetih letih.

V naslednji fazi izvedbe AMP je potrebno izbrane SSK iz prve faze analizirati s stališča potencialnih učinkov staranja in oceniti programe za njihovo spremljanje (AMR).

2.2 Potrebna izboljšanja varnosti zaradi zadovoljevanja zahtev pristojnega upravnega organa

Tipičen problem reaktorjev starejše generacije je usklajevanje postrojenja z varnostnimi zahtevami ki so nastale v obdobju po projektu elektrarne, ob stalno prisotnem procesu povečevanja varnostnih zahtev za projektiranje in obratovanje NE. Ta, sicer normalen proces, pripelje do potrebe stalnega ocenjevanja usklajenosti elektrarne z novimi zahtevami. V nekaterih državah je ta proces usklajevanja s spremembami zahtev upravnih organov stalen (kot na primer v ZDA in Nemčiji), medtem ko se drugje usklajenost preverja periodično v relativno dolgih razmakih (do 10 let - npr. V Franciji, Belgiji, Nizozemski).

Običajno je mogoče v elektrarni uporabiti nekatere od dodatnih varnostnih ukrepov in jih tako uskladiti z novimi zahtevami, vendar starejša kot je elektrarna večja je verjetnost, da bo to dvigovanje varnosti zahtevalo znatne investicije.

Možno je, da v določenem trenutku postane neekonomično nadaljevati z obratovanjem in mora elektrarna sprejeti ukrepe predčasnega zapiranja zaradi ekonomskih razlogov.

En primer ukrepov za dvigovanje varnosti, ki je zahteval številne modifikacije in je uporabljen v številnih elektrarnah po svetu, vključno z NE Krško, so ukrepi ki jih je NRC v ZDA predpisala po nesreči v elektrarni «Otok treh milj» (Three-Mile Island). Še bolj drastični primer so bili ukrepi, ki so še v teku na velikem številu elektrarn ti. «Ruskega projekta» po nesreči elektrarne v Černobilu, posebno še zaradi večje izmenjave izkušenj med bivšim «Vzhodom» in «Zahodom», ki je nastopila s političnimi spremembami v državah bivše SSSR in Varšavskega pakta.

Potrebno je omeniti, da tudi brez (na srečo) velikih nuklearnih nesreč obstaja stalen razvoj in napredek varnostnih zahtev upravnih organov. To stališče se ohranja kot pomembno v projektni in tudi PŽD NE.

Med ostalim je potrebno za PŽD analizirati stroške usklajevanja s sedanjimi varnostnimi zahtevami (če obstaja neuskklajenost) in predvideti morebitne nove varnostne zahteva, ki bi lahko bile predpisane s strani upravnih organov. Ta naloga je zelo težka, ker ne obstajajo izkustveni podatki iz elektrarn na podlagi katerih bi se ti stroški prevzeli, ampak je pogosto primer da so znani stroški modifikacij, ki so zajemale tudi usklajevanje z novimi varnostnimi zahtevami in imele namen izboljšanja učinkovitosti elektrarne, ali bile preprosto rutinske zamenjave postroja.

Da bi dobili predstavo o običajnih posegih na področju izboljšanja varnosti v nadaljevanju navajamo generični seznam kritičnih delov, za katere je treba proučiti potrebo po usklajevanju z obstoječimi in pričakovanimi regulatornimi zahtevami.

Kriteriji ki so uporabljeni za uvrstitev delov na seznam so:

- poznati obstoječe mehanizme degradacije
- vpliv raznih dejavnosti vzdrževanja na razpoložljivost elektrarne
- visoki stroški zamenjave
- zamenjava se smatra nemogoča
- funkcija opreme pri ohranjanju integritete zaščitnih barier v povezavi z varnostjo
- dolgi dobavni rok

Za NE PWR tipa, kakršna je tudi NE Krško so to naslednji sistemi SSK:

- reaktorska posoda,
- instrumentacija v sredici,
- spoji bimetalov,
- deli komponent iz Inconel-a,
- uparjalniki,
- veliki izmenjevalniki toplote v varnostnem razredu,
- cevovodi in opore v varnostnemu razredu,
- gradbene strukture nuklearnega otoka,
- turbina,
- el. generator,
- računalniki (vključno z I&C komponentami),
- zadrževalni hram,
- spoj reaktorskega bazena,
- upravljanje s kontrolnimi palicami,
- el. kabli,
- cevovodi sekundarnega dela,
- tlačnik,
- črpalke reaktorskega hladila,
- črpalke v varnostnem razredu,
- kondenzator,
- bazen za izrabljeno gorivo,
- velike posode,
- servisna odprtina zadrževalnega hrama,
- grelniki napajalne vode,
- odvajalnik vlage / predgrelnik,
- črpalke hladilne vode,

- napajalne črpalke,
- ventili,
- dizel agregati,

Kot se iz seznama vidi, niso tipične kritične SSK samo tiste ki vplivajo na varnost, ampak tudi tiste ki so vključene v PLIM.

3.0. Vzpostavljeni programi in procesi za obvladovanje staranja v NEK

Spremljanje stanja opreme je organizirano v NE Krško v več organizacijskih enotah z vrsto programov in postopkov (procedur). Pomembna skupina dokumentov za AMP so tehnični dokumenti arhivirani v informacijskem sistemu za upravljanje z dokumentacijo (NE Krško DCM).

- Projektni opisi sistemov (System design descriptions-SDD)
- Specifikacije opreme (Equipment specifications-ES)
- Splošni ameriški inženirski predpisi (Standard criteria and function-SCF; Engineering design guidelines-EDG; ASME predpisi in ANSI standardi; Instruction manuals ipd.)

3.1 Programi v NE Krško pomembnih za varnost direktno povezani z AMP

- Protipotresna varnost (Anti-falldown) je program identificiranja vseh potresno ogroženih SSK v elektrarni in njihovega saniranja. Izvede se s pregledom (walkdown) na podlagi IPEEE (neodvisnega vrednotenja elektrarne glede na zunanje vplive), poročanjem s Poročili IPE (neodvisno vrednotenje elektrarne) in korektivnimi akcijami z modifikacijami. S tem se direktno vpliva na SKK identificirane v §54.4 (2) tj. NNS kateri potencialno ogrožajo varnostne funkcije.
- Lom visoko-energetskih cevovodov (High energy line break-HELB) je program dejavnosti za identificiranje nevarnosti poškodb vitalnih komponent zaradi zloma visoko in srednje energetskih cevovodov ($p > 275$ psig; $T > 200$ oF). Elektrarna je originalno projektirana za preprečevanje takšnih dogodkov s pomočjo fizične zaščite in ločevanja vitalnih komponent. Prav tako so HE cevovodi zavarovani z odbojniki (whip restraint) za primer zloma, ki se prav tako smatrajo varnostne komponente in so podvržene kontroli tj. ISI. Razen učinka fizične poškodbe se upošteva tudi možnost poplavljanja po izlitju medija (flooding). SKK iz tega programa so zajete s programom spremljanja staranja, kakor tudi programom časovno omejene analize staranja (TLAA), ker do loma prihaja v glavnem zaradi trajne utrujenosti (fatigue) materiala cevovoda.
- Varna zaustavitev elektrarne (Safe shutdown) je termin s katerim se zajamejo vsi pogoji za zaustavitev reaktorja (hot-shutdown=Mode 4). SSK pomembni za to operacijo imajo najvišjo prioriteto za varno obratovanje elektrarne in so predpisani v Sec 7.4, 7.5 in 7.6 USAR in po definiciji odgovarjajo §54.4 (1). Za vzdrževanje elektrarne v stanju hladne zaustavitve je relevanten postopek ADP-1.3.030 «Plant safety during shutdown», vendar ta mode elektrarne ni zajet v obsegu AMP.
- Verjetnostne varnostne analize (PSA) so študije ki predstavljajo nadgradnjo varnostnega analiziranja in niso nujne za samo spremljanje učinkov staranja. V njih se v poročilih neodvisnega vrednotenja elektrarne (IPE) simulirajo

potencialna tveganja od raznih notranjih in zunanjih vplivov, kot so nezgode, požar, poplava, potres ipd.

3.2 Programi vezani na spremljanje vpliva staranja in njihovo zmanjševanje

- Kemijski program je zelo pomemben za dolgoročno trajanje komponent in cevovodov. V kontroli in korekciji kemijske sestave medija se uporabljajo specialistični postopki skupine COP, CCP, CSP, CAP, SCP, ki so napisani po navodilih EPRI in so v skladu z WANO kemijskimi pokazatelji. Tako so npr. po zamenjavi uparjalnikov zamenjane vse bakrene zlitine v sekundarnem krogu, kar je bistveno izboljšalo čistočo vode v njih. Periodično se spremlja stanje in debelina sten kritičnih mest na cevovodih in posodah s pomočjo NDE metod in se z uporabo modernih programov (EPRI Checkworks) preračunavajo pričakovane hitrosti degradacije materiala in preostala življenjska doba. Kemijski program je usklajen z zahtevami za program AMP, vendar se bo moral razširiti za namen spremljanja učinkov staranja.
- Gradbeni program tj. nadzor stanja zgradb in konstrukcij pomembnih za varnost je pomemben, ker gre za pasivne komponente ki so po definiciji § 54.21 v obsegu AMP. V NE Krško se te dejavnosti izvajajo z letnimi pregledi betonskih konstrukcij in petletnim nadzorom jeklenih konstrukcij. Ker te komponente niso v bazi podatkov, jo bo potrebno razširiti zaradi evidence nadzora za AMP.
- Dvigala in nosilne konstrukcije se nadzirajo z dejavnostmi strojnega vzdrževanja na podlagi ASME predpisov Sec. XI /IWE in OM Code (za testiranje cevnih odbojnikov). Dvigala se kontrolirajo skladno s programom preventivnega vzdrževanja kranov ADP-1.4.160 in postopkom GMM-4.014. Kot večina pasivnih komponent bodo tudi nosilci in konstrukcije dvigal vključene v AMP in dodatno dopolnjene glede na zahteve AMR.
- Program erozije in korozije (E/C) temelji na NRC Bull. 87-01 in NUREG-1344 in spremlja vse degradacijske pojave na sekundarnih sistemih. V NE Krško ga vodi Sistem kvalitete (SKV) na podlagi dokumenta QD-4 Erosion Corrosion Program in QCP 9.445 Erosion Corrosion Procedures. Periodično se spremlja stanje in debelina sten kritičnih mest na cevovodih in posodah pod tlakom s pomočjo NDE metod in z uporabo modernih programov (EPRI Checkworks) se izračunavajo pričakovane hitrosti degradacije materiala in preostala življenjska doba. S stališča AMP so posebno kritični deli vkopanih cevovodov in instalacij, katerih stanje ni mogoče dolgoročno spremljati zaradi nedostopnosti.
- Nadzor utrujenosti materiala (fatigue) je zelo pomemben pri uporabi AMP in TLAA, ker daje informacije o številu in tipu prehodnih napreznj (transient) katerim je bila komponenta podvržena med obratovanjem. Utrujenost materiala, oziroma degradacija trdnosti, nastopi pri določenem številu napetostnih ciklusov v kombinaciji z ostalim npr. toplotne obremenitve. Kriteriji za ciklična napreznja so podani v USAR in TS 4.7, ter v NRC GL 88-01 in 88-11. Rezultati se spremljajo v Skupini za neodvisno oceno varnosti NE Krško.
- Medobratovalni pregledi (ISI) so ena od ključnih dejavnosti za varno obratovanje elektrarne. Temeljijo na ameriških predpisih 10 CFR 50.55a in ASME Sec. XI, ki jo vodi ISI skupina (TO.VZISI) v skladu z dokumentom TD2E - NE Krško ISI program. V okviru desetletnih nadzornih ciklusov z NDE metodami se preizkušajo kritični deli cevovodov in komponente varnostne opreme v ASME Cl.1, Cl.2 in Cl.3. Do danes rezultati ISI niso pokazali pomembnih indikacij, kar potrjuje da je stanje komponent iz obsega AMP zelo dobro. Periodična testiranja vzorcev materiala reaktorske posode, ki se opravljajo v specializiranih tujih

podjetjih niso pokazala nobenih negativnih indikacij, kot tudi preverjanja stanja penetracij v reaktorsko glavo.

3.3 Programi vezani na specifične NRC varnostne zahteve in so referencirane v §54.4 (3)

- Protipožarna zaščita (FP) temelji na 10 CFR 50.48 in App.R, ki se organizira in nadzira v sklopu Proizvodnje. V njenem obsegu so tudi periodične kontrole protipožarne (FP) opreme, kot tudi nadzor nad pasivnimi komponentami, kot so protipožarne bariere (OSP-3.4.590).
- Kvalifikacija vpliva na okolje (EQ) temelji na 10 CFR 50.49, NUREG-0588 in programu ED-12, NE Krško Na podlagi kvalifikacije vpliva na okolico je identificirano okrog 900 komponent, na katerih se spremlja parametre okolice ki vplivajo na njihovo trajanje. Ta program je posebno pomemben za elektro in prezračevalno varnostno opremo in je direktno uporaben za izvajanje TLAA.
- Tlačno-toplotni udar (PTS) temelji na 10 CFR 50.61 in je prvenstveno usmerjen na trajnost reaktorske posode skozi spremljanje vzorcev materiala reaktorja in z uvajanjem analitičnih metod (LTOP) za kontrolo toplotnih udarov (šokov). Na podlagi teh rezultatov se izvede korektivne akcije. Elementi tega programa (RPV) predstavljajo pomemben element v naslednjih fazah AMP in TLAA.
- Pričakovani prehodni pojavi brez zaustavitve (ATWS) temeljijo na zahtevah 10 CFR 50.62. Gre za analizo posledic nezgode ob izgubi obremenitve (LOL), izgubi napajalne vode (LONF) in izgubi zunanjega napajanja (LOOP), ki so podani v dokumentih WENX 94/44 in SSR-NEK-7.7. Komponente pomembne za te funkcije so vključene v obseg analize in AMP, če so v skladu z §54.21.
- Izguba zunanjega napajanja (SBO) temelji na 10 CFR 50.63 in zajema ukrepe za zadovoljevanje štiriurne popolne izolacije elektrarne od zunanjega napajanja ob varni zaustavitvi. Iz teh zahtev so izšle nekatere nujne modifikacije, kot je zamenjava akumulatorskih baterij, nekaterih ventilov itd. Generirani so dokumenti WENX 91-04 R.1 in ECA-0.0 R.10 ki dajo dovolj informacij za obseg AMP.

Informacijski sistem MIS, ki ga je NE Krško sama razvila vsebuje podsistem MECL (Master Equipment Component List), ki je osnovna baza podatkov SSK. Baza podatkov je relacijska (Oracle), ki se stalno ažurira in dopolnjuje in se ocenjuje da je 95% zanesljiva. Pri njeni uporabi za potrebe prve faze AMP (scoping, screening) je ugotovljeno, da jo bo potrebno pri nadaljnji uporabi dopolniti z ostalimi pasivnimi SSK (objekti in konstrukcije, cevovodi, kabli, varovalke).

Dokumentacija se arhivira na dva načina: kot aktivna s kontroliranimi dokumenti podvrženimi spremembam (DCM) in kot pasivna z dokumenti proizvajalca, poročili o testiranju ipd. (QRM). Vse dejavnosti v NE Krško so detajlno definirane z odgovarjajočim številom Programov. Njihova priprava, realizacija, nadzor in dokumentiranje je predpisana z velikim številom postopkov (procedur), ki skladno ameriški praksi in principih zagotavljanja in kontrole kakovosti (QA/QC) gredo skozi večstopenjske preglede in odobritve. Po potrebi se revidirajo. Skupine postopkov so v nadaljevanju.

3.4 Skupine postopkov

- Splošni administrativni (ADP) – ukvarjajo se z organizacijo in posli, ki so skupni za več organizacijskih enot
- Inženiring (ESP) – ukvarja se z dejavnostim inženiringa (dokumentacije, modifikacija)
- Splošni obratovalni (GOP,SOP) – opisujejo posamezne dejavnosti in tehnične sisteme
- Nenormalni obratovalni (ARP,EOP,AOP) – predstavljajo navodila operaterjem v raznih alarmnih stanjih
- Nadzorni (OSP) – opisujejo razna preverjanja stanja opreme in sistemov (surveillance)
- Požarni (FPP, FRP) – dejavnosti iz področja protipožarne zaščite
- Zamenjava goriva (ROP) – opisujejo opremo in dejavnosti pri zamenjavi goriva
- Strojno vzdrževanje (GMM) – tehnična navodila s področja strojnega vzdrževanja
- Preventivno stroj. vzdrževanje (PMM) – postopki preventivnega str. vzdrževanja komponent
- Preizkušanja za stroj. vzdrževanje (SMM) – testiranja za vzdrževanje strojne opreme
- Gradbeno vzdrževanje (GMC) – dejavnosti iz obsega gradbene skupine
- Elektro vzdrževanje (GME) – tehnična navodila s področja elektrovzdrževanja
- Preventivno elektrovzdrževanje (PME) – postopki preventivnega elektrovzdrževanja
- Preizkušanja za elektrovzdrževanje (SME) – testiranja za vzdrževanje elektro opreme
- Instrumentacijsko vzdrževanje (GMI) – tehnična navodila instrumentacijskega vzdrževanja
- Kalibracije in preizkušanja (PMI) – kalibracije in preizkušanja instrumentacije
- Preizkušanja za instrumentacijo (SMI) – testiranja instrumentacije
- Medobratovalni preizkusi (ISI) – NDE metode
- Nuklearno gorivo (REP, RES, NFH, RFI) – spremljanje in preizkušanje goriva
- Kemijski (COP, CCP, CSP, CAP, SCP) – kemijski procesi, analize, izračuni
- Radiološki (PRZ, SRZ) – dejavnosti in preverjanja radiološke zaščite
- Kvaliteta (QAP, QCP) – organizacija, postopki in kontrola kvalitete
- Strokovno usposabljanje (TSD, TRG) – programi in navodila za šolanje
- Simulator (SIM) – uporaba in preverjanje delovanja simulatorja
- Izredni dogodki (EIP) – dejavnosti ob izrednih dogodkih (NUID)

Vsi naštetni programi in postopki imajo namen varnega in organiziranega obratovanja elektrarne in s tem so v pozitivni vlogi PŽD.

4.0 Pogoji za izvedbo PŽD

Kot omejevalni faktor za realizacijo PŽD se smatrajo zgradbe in oprema, ki so po eni strani vitalne za obratovanje elektrarne, po drugi strani pa jih je neracionalno popraviti ali zamenjati. Pri tem je relevanten odnos stroška in dobička (cost/benefit) takega postopka. Tehnično skoraj ni omejitev za zamenjavo tudi najzahtevnejših komponent, vendar s stroškovnega vidika, daljše zaustavitve ki bi zaradi tega nastale, je to lahko neekonomično.

Vsekakor je potrebno opraviti analizo in seznam opreme, ki v tehničnem smislu lahko omeji življenjsko dobo elektrarne. Opremo je treba vključiti v program spremljanja staranja in periodično ocenjevati njeno preostalo življenjsko dobo. Potrebno je spremljati obratovalne izkušnje drugih elektrarn in napredek v znanju povezanem z mehanizmi degradacije ki se pojavljajo.

5.0 Zaključek

Strukture in komponente NEK so časovno podvržene fizičnem staranju, ki pripelje do sprememb v karakteristikah in strukturi komponente. Hitrost in obseg teh sprememb se lahko znatno spreminja od primera do primera. Časovno odvisne degradacije lahko v precejšnji meri vplivajo na varnost, zanesljivost, učinkovitost in ekonomičnost obratovanja opreme. Posledice staranja, ki niso na primeren način sanirane lahko privedejo do povečanja števila nenormalnih dogodkov, ogrožanja varnosti, zmanjšanja razpoložljivosti ali predčasnega zapiranja oziroma prenehanja obratovanja.

V primeru NEK trenutno ne obstajajo neke ugotovitve, ki bi kazale na omejevanje življenjske dobe neke komponente, katera bi omejila življenjsko dobo celotne elektrarne. Vsekakor pa je potrebno periodično analizirati dele / komponente elektrarne, ki so potencialno omejevalni za njeno življenjsko dobo in skladno z ugotovitvami analiz sprejemati odgovarjajoče ukrepe. V dodatku je generična tabela možnih učinkov staranje in programi obvladovanja staranja za PWR reaktorje.

6.0 Literatura

- [1] 10 CFR Part 54: »Requirements for renewal of operating licenses for Nuclear plants«, NRC, 1995
- [2] 10 CFR Part 50: »Domestic licensing of production and utilization facilities«, NRC <http://www.nrc.gov/>
- [3] 10 CFR Part 51: »Environmental protection regulations for domestic licensing and related regulatory functions «, NRC
- [4] NEI 95-10 , rev. 4 – “Industry Guideline for implementing the requirements of 10 CFR Part 54 - License Renewal Rule”, NEI, 2001,
- [5] EPRI Destinations 2004 - Nuclear Power: 41.001 Material Degradation/Aging, <http://www.epri.com/>
- [6] SSEE/02/204R - NEK Ageing Management Program Scoping Project, Final Report (PSR-NEK-3.2), Westinghouse Electric Europe SA, 2003
- [7] NEK Updated Safety Analysis Report (USAR),
- [8] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, <http://www.asme.org/bpvc/>
- [9] IEEE Nuclear Engineering Standards, <http://standards.ieee.org/>
- [10] IAEA-TRS No.338 - «Methodology for the Management and Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety», IAEA, 1992
- [11] IAEA-SRS No.15 - «Implementation and Review of a Nuclear Power Plant Ageing Management Programme», IAEA, 1999

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
1	Konstrukcije	Klasa I Zgradbe	luščenje, razpokanost, krušenje, izguba vezave, raztezanje, deformacije, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala, izguba trdnosti, izguba modula elastičnosti, izguba žilavosti, povečanje poroznosti in prepustnosti, poškodbe zaradi utrujenosti, povečanje napetosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
2		Primarne strukture zadrževalnega hrama	luščenje, razpokanost, krušenje, izguba vezave, raztezanje, deformacije, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala, izguba trdnosti, izguba modula elastičnosti, izguba žilavosti, povečanje poroznosti in prepustnosti, poškodbe zaradi utrujenosti, povečanje napetosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, ASME Sekcija XI ISI/IST
3		Vhodne konstrukcije	odnašanje materiala, razpokanost, krušenje, povečanje poroznosti in prepustnosti, distorzija, povečanje napetosti	Preventivno vzdrževanje
4		Vhodni kanali	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
5		Ostale Zgradbe, ki ne spadajo v Klaso I in so v obsegu Dovoljena za obratovanje	luščenje, razpokanost, krušenje, izguba vezave, raztezanje, deformacije, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala, izguba trdnosti, izguba modula elastičnosti, izguba žilavosti, povečanje poroznosti in prepustnosti, poškodbe zaradi utrujenosti, povečanje napetosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
6	Konstrukcije	Temelji in podporne konstrukcije opreme	luščenje, razpokanost, krušenje, izguba vezave, raztezanje, deformacije, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala, izguba trdnosti, izguba modula elastičnosti, izguba žilavosti, povečanje poroznosti in prepustnosti, poškodbe zaradi utrujenosti, povečanje napetosti	Nadzorno testiranje
7		Gibljive povezave med konstrukcijami (mehovi)	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje
8		Odprtine za osebje in vnos opreme	povečanje špranj, poškodbe zaradi utrujenosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
9		Penetracijska tesnila	razpokanost, izguba lastnosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
10		Stisljivi spoji in tesnila	razpokanost, izguba lastnosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
11		Obloga bazena za gorivo in zbiralnika	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
12		Betonski robniki	luščenje, razpokanost, krušenje, raztezanje/deformacija, odnašanje materiala, izguba trdnosti, izguba modula elastičnosti, povečanje poroznosti in prepustnosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
13		Izpušne odprtine in ventilacijski kanali	odnašanje materiala, razpokanost, krušenje, povečanje poroznosti in prepustnosti, distorzija, povečanje napetosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
14	Konstrukcije	Požarne pregrade	luščenje, razpokanost, krušenje, raztezanje/deformacija, odnašanje materiala, povečanje poroznosti in prepustnosti	Nadzorno testiranje
15		Okvirji za omejevanje opletanja cevi pri lomu in zaščitni betonski bloki	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje
16		Električni in instrumentacijski penetracijski elementi	razpokanost, izguba žilavosti	Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
17		Instrumentacijske rešetke, okvirji, paneli, in ograje	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje
18		Električni paneli, rešetke, kabineti in ostale ograje	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje
19		Kabelski podstavki	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje
20		Nosilne cevi	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
21	Konstrukcije	Cevna vodila	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje
22		Notranji deli reaktorske posode	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Monitoring (pojava in napredovanja razpok zaradi) napetostne korozije
23		ASME Klasa I Obešala in podpore	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, ASME Sekcija XI ISI/IST
24		Obešala in podpore izven ASME Klase I	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
25	Komponente tlačne meje primarnega kroga	Cevovodi ASME Klase I	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, izguba žilavosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije, ASME Sekcija XI ISI/IST, Analize, ki jih predpisuje ASME

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
26	Komponente tlačne meje primarnega kroga	Reaktorska posoda	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Analize, ki jih predpisuje ASME, 10CFR50 Appendix G&H, Monitoring (pojava in napredovanja razpok zaradi) napetostne korozije
27		Reaktorske črpalke	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, izguba žilavosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije, ASME Sekcija XI ISI/IST, Analize, ki jih predpisuje ASME
28		Mehanizmi za pogon regulacijskih palic	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala, izguba žilavosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije, ASME Sekcija XI ISI/IST, Analize, ki jih predpisuje ASME

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
29	Komponente tlačne meje primarnega kroga	Uparjalniki	poškodbe zaradi utrujenosti, povečanje poroznosti in prepustnosti, odnašanje materiala, izguba žilavosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Monitoring (pojava in napredovanja razpok zaradi) napetostne korozije
30		Tlačniki	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje material, izguba žilavosti	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Monitoring (pojava in napredovanja razpok zaradi) napetostne korozije
31	Cevovodi izven Klase A	Podzemni cevovodi	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
32		Cevovodi demineralizirane vode (nizkih temperatur)	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
33	Cevovodi izven Klase A	Cevovodi (visokih temperatur) z enofaznim tokom	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
34		Cevovodi z večfaznim tokom	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
35		Cevovodi oskrbne vode	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
36		Plinski cevovodi nizkih temperatur	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje
37		Cevi iz nerjavečega jekla	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje
38		Instrumentacijske cevi	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
39	Cevovodi izven Klase A	Ekspanzijski priključki		Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Obratovalne izkušnje
40		Ventilacijski kanal z enostavnejšo opremo (žaluzije, lopute)	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje
41		Pršilne šobe	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov,
42		Ostala oprema	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje
43	Črpalke	ECCS črpalke	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST
44		Črpalke oskrbne vode in protipožarne črpalke	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Obratovalne izkušnje
45		Črpalke mazalnega olja in črpalke zaprtega hladilnega sistema	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
46	Črpalke	Kondenzatne črpalke	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
47		Črpalke za boriranje	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
48		Črpalke bistvene oskrbne vode	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
49		Potopne črpalke	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
50	Toplotni izmenjevalniki	Kondenzator	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST
51		Hladilne enote v prostorih	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
52	Toplotni izmenjevalniki	Toplotni izmenjevalniki primarne vode	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, ASME Sekcija XI ISI/IST
53		Toplotni izmenjevalniki priprave vode	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
54		Toplotni izmenjevalniki zaprtega hladilnega sistema	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
55		Toplotni izmenjevalniki mazalnih olj	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
56		Toplotni izmenjevalniki surove vode	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
57		Toplotni izmenjevalniki zadrževalnega hrama	odnašanje materiala, pojav in napredovanje razpok	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
58	Različne procesne komponente	Gibljivi konektorji	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
59		Sita	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Obratovalne izkušnje
60		Razbremenilne plošče	poškodbe zaradi utrujenosti, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje
61		Parne lopute	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje
62		Zaslonke za omejevanje pretoka	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov
63	Instrumentacija	Elementi za meritev prevodnosti	izguba prevodnosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
64		Elementi za meritev pretoka	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
65	Instrumentacija	Elementi za meritev temperature	izguba prevodnosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
66		Elementi za meritev radiacije	izguba prevodnosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
67		Termočleni, RTD	izguba prevodnosti, izguba izolacijskih lastnosti	Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
68	Električne komponente	Konektorji	izguba provodnosti	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
69		Močnostni, kontrolni, in instrumentacijski kabli	izguba provodnosti, izguba izolacijskih lastnosti	Nadzorno testiranje, Kvalifikacija glede na pogoje okolja
70	Ventili	Hidravlično upravljani ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Nadzor Erozijske Korozije
71		Ventili aktivirani z eksplozijo	poškodbe zaradi utrujenosti, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
72		Ročni ventili	pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
73		Majhni ventili	pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
74	Ventili	Motorno upravljani ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
75		Zračno upravljani ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
76		Glavni parni izolacijski ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Analize, ki jih predpisuje ASME

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
77		Majhni razbremenilni ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje,
78	Ventili	Protipovratni ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, ASME Sekcija XI ISI/IST, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Nadzor Erozijske Korozije
79		Varnostni ventili	poškodbe zaradi utrujenosti, pojav in napredovanje razpok, odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Analize, ki jih predpisuje ASME
80	Rezervoarji	Rezervoarji stisnjenega zraka	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Obratovalne izkušnje
81		Akumulatorji	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
82		Rezervoarji borove kisline	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Obratovalne izkušnje
83		Nadzemni oljni rezervoarji	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Obratovalne izkušnje

Predmet	Kategorija	Oznaka komponent skupin	Možni učinki staranja	Možni programi obvladovanja staranja
84	Rezervoarji	Podzemni oljni rezervoarji	odnašanje materiala	Preventivno vzdrževanje, Nadzorno testiranje, Nadzor korozije zaradi mikrobioloških vplivov, Obratovalne izkušnje
85		Rezervoarji demineralizirane vode	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje, Obratovalne izkušnje
86		Rezervoarji, ki so istočasno nevtronski ščiti	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanje
87	Razno	Cevni razvodi	odnašanje materiala	Nadzorno testiranje, Preventivno vzdrževanj

IJS Delovno Poročilo

IJS Report

IJS-DP-9832

Izdaja 0, januar 2008

Revision 0, January 2008

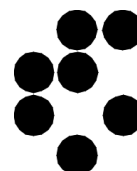
**Večnivojski mehanski modeli materialov v jedrski tehniki
Stanje razvoja in uporabnost**

**Multiscale Mechanical Material Models in Nuclear Engineering
State-of-the-Art and Applicability**

L. Cizelj, I. Simonovski, B. Zafošnik, L. Fabjan, Z. Petrič

Ljubljana, januar 2008

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija





Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Naročnik: Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost
Ordered by: Železna c. 16, Ljubljana

Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Tivolska c. 30, Ljubljana

Izvajalec: Institut "Jožef Stefan"
Prepared by: 1000 Ljubljana
Jamova 39
Slovenija

Pogodba štev.: št. 1000-06-280375 (projekt štev. V2-0375 v okviru CRP
Contract Number: "Konkurenčnost Slovenije 2006-2013)
Med IMK, IJS; IMT in EIMV:
Štev. 35/T-2006

Nosilec naloge: Prof. dr. Leon Cizelj, univ. dipl. inž. str.
Responsible Person:

Naslov poročila: Večnivojski mehanski modeli materialov v jedrski tehniki
Report Title: Stanje razvoja in uporabnost

Multiscale mechanical material models in nuclear engineering
State-of-the-Art and applicability

Avtorji poročila: Prof. dr. Leon Cizelj, univ.dipl.inž.str.
Authors: Dr. Igor Simonovski, univ.dipl.inž.str.
Dr. Boštjan Zafošnik, univ.dipl.inž.str.
Mag. Ljubo Fabjan, univ.dipl.inž.str.
Zoran Petrič, univ.dipl.fiz.

Štev. delovnega poročila: IJS-DP-9832
Report Number:

Konto: V2-0375-C
Account Number:

Kopije: ➤ Naročnik (3)
Distribution: ➤ Knjižnica/Library (1x)
➤ Nosilec naloge/Responsible Person (1x)
➤ Avtorji/Authors (4x)
➤ Arhiv OR4/Archive (1x + original)

Ljubljana, januar 2008



POVZETEK

Večnivojski modeli, ki v zadnjih letih v svetovnem merilu zaradi velikega raziskovalnega zanosa hitro dobivajo tudi industrijsko uporabnost in veljavo, lahko pomembno prispevajo k razumevanju in napovedovanju nastanka in zgodnjega razvoja poškodb v kovinskih materialih, značilnih za varnostno pomembne komponente in konstrukcije v jedrskih elektrarnah.

V poročilu opišemo najpomembnejše lastnosti in gradnike večnivojskih modelov. Pri tem se omejimo predvsem na modele, ki prispevajo k razumevanju in napovedovanju nastanka in zgodnjega razvoja poškodb v kovinskih materialih, značilnih za varnostno pomembne komponente in konstrukcije v jedrskih elektrarnah. Podrobno predstavimo primer večnivojskega modela, ki smo ga v zadnjih letih razvili v Odseku za reaktorsko tehniko Instituta "Jožef Stefan". Pokažemo in ocenimo tudi uporabnost današnjih večnivojskih modelov za napovedovanje stopnje poškodovanosti v primerih iz prakse.

Večnivojski modeli so trenutno v razvojni fazi. Z današnjega stališča torej pomenijo velik potencial za ocenjevanje varne življenjske dobe za varnost pomembnih komponent jedrskih elektrarn. Ta potencial potrjuje tudi razmeroma veliko zanimanje industrije, ki je že dokumentirano tudi v literaturi.

Neposredno industrijsko rabo bodo večnivojski modeli po naši oceni dosegli že v času 5-10 let. Prve aplikacije bodo najverjetneje na področjih, kjer so eksperimentalni podatki ali predragi ali pa gre za takšne delovne razmere (4. generacija in fuzijski reaktorji), za katere bo materiale potrebno razviti namensko. Pri že delujočih reaktorjih pa med prednostna področja uporabe zagotovo sodita povečevanje krhkosti zaradi nevtronskega sevanja in toplotno utrujanje. Zato sodimo, da je slovensko sodelovanje pri mednarodnih razvojnih prizadevanjih v prihodnjih letih smiselno okrepiti.

Pričujoče poročilo dokumentira prispevek Instituta »Jožef Stefan« po pogodbi števil. 35/T-2006 o ureditvi medsebojnih pravic in obveznosti pri izvajanju skupnega projekta št. V2-0375 z naslovom "Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov" v okviru projekta Ciljnega raziskovalnega programa – CRP "Konkurenčnost Slovenije 2006-2013".



ABSTRACT

In the recent years, the multi-scale models are attracting large research interest and gaining industrial usability and acceptance worldwide. They can significantly contribute to the understanding and prediction of the initiation and early development of damage in metallic materials, characteristic for the safety related components and constructions in nuclear power-plants.

In the report we describe the main features and components of the multi-scale models that contribute to understanding and forecasting of the initiation and early development of damage in metallic materials, characteristic for the safety related components and constructions in nuclear power-plants. The multi-scale model, which has been developed by the Department of Reactor engineering of the "Jožef Stefan" Institute, is presented in some detail. We also show and evaluate the usability of current multi-scale damage prediction models in practical cases.

Multiscale models are currently in an intensive development phase. They could be seen as an important potential for the future safe lifetime assessment of the safety related components in the nuclear power plants. This potential is supported by a relatively high industrial interest already documented in the literature.

The industrial applications of the multiscale methods are expected within 5-10 years. The first applications will most probably be in areas where the acquisition of experimental data is too costly or where the working conditions require dedicated development of materials (generation 4, fusion). Priorities for the generation 2 reactors include radiation embrittlement and thermal fatigue. It is therefore judged that it is sensible to expand Slovene participation in the international multiscale initiatives in the near future.

Present report documents the contribution of the "Jozef Stefan" Institute according to the contract num. 35/T-2006 concerning regulation of mutual rights and obligations at the execution of the common project num. V2-0375 titled "Application of Methods and Techniques to Assess Ageing and Support Safe Operation of Nuclear Installations and Radiation Facilities" in the scope of the Target Research Programme "CRP – Slovenian Competitiveness 2006-2013"



KAZALO

POVZETEK	II
ABSTRACT	III
KAZALO	IV
SEZNAM SLIK	VI
SEZNAM TABEL	VII
1 UVOD	1
1.1 Namen poročila	1
1.2 Organizacija poročila	1
2 OSNOVE VEČNIVOJSKIH MODELOV	2
2.1 Uvod	2
2.2 Najpomembnejši gradniki večnivojskih modelov	3
2.2.1 Kvantna mehanika (ab initio)	3
2.2.2 Dinamika molekul	4
2.2.3 Monte Carlo, dinamika dislokacij in stohastična mehanika	4
2.2.4 Mehanika kontinuuma	5
2.3 Prenos informacij med nivoji	6
3 VEČNIVOJSKI MODEL IJS	7
3.1 Osnovne predpostavke	7
3.2 Voronojevi mozaiki	8
3.3 Anizotropna elastičnost	8
3.4 Kristalna plastičnost	10
3.5 Homogenizacija	12
3.6 Reprezentativni volumski element	13
3.7 Korelacijske dolžine	14
3.7.1 Avtokorelacijska in kovariančna funkcija	14
3.7.2 Korelacijska dolžina	16
3.7.3 Algoritem izračuna	16
3.8 Kratke razpoke	18
3.9 Razvoj v bližnji prihodnosti	20



4	IZBRANI PRIMERI UPORABE V JEDRSKI TEHNIKI	23
4.1	Reprezentativni volumski element (Evropski projekt LISSAC)	24
4.1.1	RVE v elastičnem področju	25
4.1.2	RVE v plastičnem področju	26
4.2	Mezoscopska polja napetosti in specifičnih deformacij	29
4.3	Korelacijske dolžine (Evropski projekt LISSAC)	32
4.4	Ciklično obremenjevanje (Evropski projekt THERFAT)	35
4.4.1	Odziv monokristala	35
4.4.2	Odziv polikristala	36
4.4.3	Hrapavost površine	39
4.5	Kratke medkristalne razpoke	40
4.5.1	Osnovne predpostavke	40
4.5.2	Rezultati	42
4.6	Kratke transkristalne razpoke	45
4.7	Ocena uporabnosti v praksi	50
5	ZAKLJUČKI	51
6	VIRI	52
6.1	Ključni tuji viri	52
6.2	Ključni viri IJS	52
6.3	Ostali pomembnejši tuji viri	53
6.4	Ostali pomembnejši viri IJS	54



SEZNAM SLIK

Slika 1	Shema velikostnih (dolžinskih) in časovnih nivojev [1]	3
Slika 2	Rezultati simulacije z dinamiko molekul [6]. Črne črte kažejo premike atomov zaradi obsevanja. Rdeče puščice nakazujejo premike od praznine, modre k praznini.	4
Slika 3	Simulacija dislokacije, ki potuje skozi feritno jeklo [6]. Rdeče so obarvane dislokacije, zeleno pa disperzoidi	5
Slika 4	Simulacija razvoja strukture dislokacij z večanjem obremenitve (specifična deformacija med 0.05 in 0.3%) [1]	5
Slika 5	Shema medsebojnih povezav med različnimi nivoji in pripadajočimi modeli [1]	6
Slika 6	Velikostni nivoji v lomni mehaniki [2]	7
Slika 7	Model polikristalnega skupka z mrežo končnih elementov, orientacijami kristalnih rešetk in makroskopskimi obremenitvami in robnimi pogoji	8
Slika 8	Prostorsko (levo, BCC) in ploskovno (desno, FCC) centrirani kubični rešetki	9
Slika 9	Primeri drsnih sistemov v ploskovno centrirani kubični rešetki	11
Slika 10	Primer avtokorelacijske funkcije naključnega procesa	15
Slika 11	Določitev korelacijske dolžine	16
Slika 12	Dolžina (2R) in smer α vektorja g	18
Slika 13	Drsne ravnine ploskovno centrirane kubične strukture ter razpoka pri $\alpha=0^\circ$	19
Slika 14	a) Koti med drsnimi ravninami in ravnino razpoke pri $\alpha=0^\circ$ in b) definicija NOR in POR	19
Slika 15	Model razpoke s kristalnimi zrni, mrežo končnih elementov in makroskopskimi robnimi pogoji	20
Slika 16	Ploskovni problem, modeliran z eno plastjo prostorskih končnih elementov	21
Slika 17	Ploskovni problem, modeliran z več plastmi prostorskih končnih elementov	21
Slika 18	Primer modeliranja dinamičnega napredovanja medkristalnih razpok	22
Slika 19	Primer Voronojevega mozaika z vrisanimi smermi kristalne rešetke, mrežo končnih elementov in robnimi pogoji	24
Slika 20	Raztros makroskopskih primerjalnih specifičnih deformacij in napetosti v elastičnem območju ($p_1 = 200$ MPa in $p_2 = 100$ MPa)	25
Slika 21	Konvergenca komponent makroskopske togostne matrike C_{11}^* (levo) in C_{12}^* (desno) v odvisnosti od števila zrn v polikristalnem skupku pri $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0,055\%$	26
Slika 22	Raztros makroskopskih primerjalnih specifičnih deformacij in napetosti v plastičnem območju ($p_1 = 1430$ MPa in $p_2 = 715$ MPa)	27
Slika 23	Konvergenca komponent makroskopske togostne matrike C_{11}^{*p} (levo) in C_{12}^{*p} (desno) v odvisnosti od števila zrn v polikristalnem skupku $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 5,0\%$	27
Slika 24	Polje primerjalne mezoskopske napetosti ($p_1 = 420$ MPa in $p_2 = 210$ MPa)	29
Slika 25	Polje primerjalne mezoskopske specifične deformacije ($p_1 = 420$ MPa in $p_2 = 210$ MPa)	29
Slika 26	Polje primerjalne mezoskopske napetosti ($p_1 = 1176$ MPa in $p_2 = 588$ MPa)	30
Slika 27	Polje primerjalne mezoskopske specifične deformacije ($p_1 = 1176$ MPa in $p_2 = 588$ MPa)	30
Slika 28	Razvoj drsnih pasov v mezoskopskem materialnem modelu	32
Slika 29	Vpliv zrnate strukture materiala na Misesovo napetost	33
Slika 30	Ekvivalentna deformacija ϵ_{eq} ; $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0.035$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 492.12$ MPa. Pasovi zdrsa so lepo vidni kot povišane vrednosti deformacije	33
Slika 31	Korelacijska dolžina pri: $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0.035$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 492.12$ MPa	34
Slika 32	Odziv monokristala na monotono obremenitev	35
Slika 33	Odziv monokristala na nekaj ciklov izmenične obremenitve	36
Slika 34	Odziv polikristala (212 zrn) na nekaj ciklov izmenične obremenitve	37
Slika 35	Lokalizacija specifičnih deformacij po nekaj ciklih (sistem naključnih orientacij šte. 1)	38
Slika 36	Lokalizacija specifičnih deformacij po nekaj ciklih (sistem naključnih orientacij šte. 2)	38
Slika 37	Razvoj površinskih neravnin s številom obremenitvenih ciklov	39
Slika 38	Razvoj mreže medkristalnih razpok: oksidacija kristalnih mej v radialnem režnju	41
Slika 39	Razvoj mreže medkristalnih razpok: lezenje na zunanji površini cevi	42
Slika 40	Razvoj mreže medkristalnih razpok: skupni učinki oksidacije kristalnih mej in lezenja v radialnem režnju	43
Slika 41	Razvoj mreže medkristalnih razpok: oksidacija kristalnih mej, zunanja površina cevi, primerjava z ekpserimentom	44
Slika 42	Model končnih elementov, robni pogoji in zunanja obremenitev	46
Slika 43	Vpliv spremembe smeri razpoke na normalno in prečno komponento odpiranja konice razpoke	47
Slika 44	Nastanek strižnega pasu v okolici razpoke povečuje odpiranje konice razpoke. Zgoraj: razdelitev zrn glede na togost na trda, vmesna in mehka. Spodaj: ekvivalentna specifična deformacija.	48
Slika 45	Strižni pas nastane stran od razpoke, odpiranje konice razpoke je zato manjše. Zgoraj: razdelitev zrn glede na togost na trda, vmesna in mehka. Spodaj: ekvivalentna specifična deformacija.	49



SEZNAM TABEL

Tabela 1	Značilne vrednosti elastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel	10
Tabela 2	Značilne vrednosti plastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel za model Pierce et al [30] in Asaro[31]	12
Tabela 3	Značilne vrednosti plastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel za model Bassani Wu [34].....	12
Tabela 4	Velikost polikristalnih skupkov v odvisnosti od števila zrn v skupku	24
Tabela 5	Potrebna velikost polikristalnega skupka, da je dosežen željen ostanek v območju elastične deformacije	26
Tabela 6	Potrebna velikost polikristalnega skupka, da je dosežen željen ostanek v območju plastične deformacije	28



1 UVOD

1.1 Namen poročila

V poročilu podajamo pregled najbolj uveljavljenih večnivojskih modelov, ki v zadnjih letih v svetovnem merilu zaradi velikega raziskovalnega zanosa hitro dobivajo tudi industrijsko uporabnost in veljavo. Pri tem se osredotočimo predvsem na modele, ki lahko pomembno prispevajo k razumevanju in modeliranju nastanka in zgodnjega razvoja poškodb v kovinskih materialih, značilnih za varnostno pomembne komponente in konstrukcije v jedrskih elektrarnah. Pokažemo in ocenimo tudi njihovo uporabnost za napovedovanje stopnje poškodovanosti v primerih iz prakse.

Pričujoče poročilo dokumentira prispevek Instituta »Jožef Stefan« k delovnemu sklopu D3 (Stanje razvoja in uporabnost večnivojskih modelov), kot predvideno s pogodbo št. 35/T-2006 o ureditvi medsebojnih pravic in obveznosti pri izvajanju skupnega projekta št. V2-0375 z naslovom "Uporaba metod in tehnik za oceno staranja in zagotovitev varnega obratovanja jedrskih in sevalnih objektov" v okviru projekta Ciljnega raziskovalnega programa – CRP "Konkurenčnost Slovenije 2006-2013".

Pri opisih metod in rezultatov v tem poročilu smo dali prednost predvsem preglednosti informacij. Več podrobnosti lahko zahtevnejši bralec najde v izbranih preglednih člankih, ki so zbrani v prilogah. Bralca, ki bi želel opisane metode ali rezultate uporabiti, pa usmerjamo na neposredno uporabo citiranih virov.

1.2 Organizacija poročila

Posplošeni opis večnivojskih modelov, ki bi lahko pomembno prispevali k razumevanju in modeliranju nastanka in zgodnjega razvoja poškodb v kovinskih materialih, značilnih za varnostno pomembne komponente in konstrukcije v jedrskih elektrarnah, je v poglavju 2. V poglavju 3 smo podrobneje opisali večnivojski model, ki ga že nekaj let razvijamo v Odseku za reaktorsko tehniko Instituta »Jožef Stefan«. Izbrani primeri uporabe večnivojskih modelov v jedrski tehniki so zbrani v poglavju 4. Nadaljujemo z zaključki v poglavju 5 in referencami v poglavju 6.



2 OSNOVE VEČNIVOJSKIH MODELOV

V tem poglavju na kratko orišemo ključne razloge za razvoj in uporabo večnivojskih modelov (poglavje 2.1). Popišemo tudi najpomembnejše gradnike večnivojskih modelov (poglavje 2.2) in njihove lastnosti ter najpomembnejše načine prenašanja informacij med posameznimi nivoji (poglavje 2.3).

2.1 Uvod

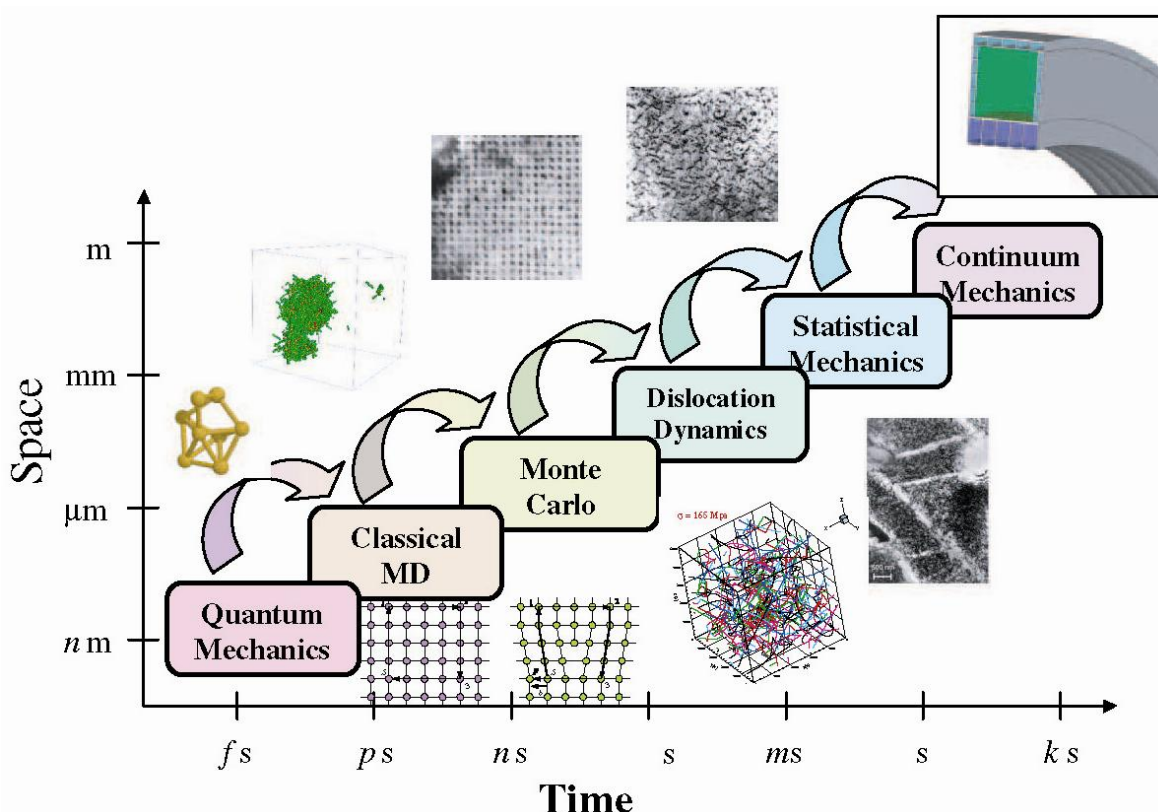
Večnivojsko naravo problemov staranja materialov v jedrski tehniki lahko zelo dobro ilustriramo na primeru povečevanja krhkosti oz. zviševanja temperature prehoda med krhkim in žilavim lomom jekla tlačne posode reaktorja zaradi obsevanja z nevtroni. Osnovni vzrok so trki nevtronov v jedra atomov v kristalni rešetki jekla. Značilni trki se zgodijo v prostornini velikostnega razreda nekaj $(10 \text{ nm})^3$ in trajajo okoli 100 fs (10^{-15} s). V naslednjih 10 ps (10^{-12} s) se nato zgodi zaporedje premikov atomov v kristalni rešetki. Za inženirske presoje, ki so za varnost elektrarne odločilne, pa so pomembne predvsem tiste posledice trkov in premikov atomov, ki jih lahko opazimo v velikostnih nivojih med μm in m ter v časovni skali 10 do 100 let [9]. Slika 1 prikazuje shemo najpomembnejših velikostnih in časovnih nivojev skupaj s pripadajočimi značilnimi simulacijskimi metodami.

V strokovni javnosti postaja jasno, da bomo lahko zaupanje v napovedi varne življenjske dobe fuzijskih in fisijskih reaktorjev povečali le tako, da bomo bolje razumeli fizikalne pojave na vseh relevantnih časovnih in velikostnih nivojih ter seveda tudi interakcije med njimi. Večnivojsko modeliranje tako postaja orodje, ki ponuja premike omejitev v današnjih eksperimentalnih postopkih, in hkrati omogoča razumevanje osnovnih procesov v materialih ter napovedovanje njihovih dolgoročnih učinkov [6].

Vidne poškodbe v materialih navadno razumemo kot makroskopske dogodke. Mednje sodijo npr. razpoke, večje trajne deformacije ali vidna korozija. Pri načrtovanju nam je dovoljeno, da zanemarimo procese, ki potekajo med atomskim in mikroskopskim nivojem, čeprav se zavedamo njihovega vpliva na makroskopske poškodbe materialov. Nižje velikostne nivoje enostavno premostimo z različnimi eksperimentalnimi podatki, za katere pa vemo, da jih lahko le izmerimo, napovemo pa pravzaprav ne. Tudi napovedovanje takšnih krivulj je velika priložnost za večnivojske modele [6].

Kompleksnost, računska intenzivnost in ne nazadnje tudi eksperimentalna podpora večnivojskih modelov zahtevajo mednarodna sodelovanja. V jedrski tehniki je mednarodna sodelovanja mogoče zaslediti tako na področju fuzije [8], kot tudi na področju fisije, pa naj gre za delujoče reaktorje 2. generacije [2] ali pa za razvojna vprašanja reaktorjev 4. generacije [6].

Izjemno pomembno pa je tudi dejstvo, da so večnivojske metod že zanimive tudi za industrijsko rabo (npr. [2], [3]).



Slika 1 Shema velikostnih (dolžinskih) in časovnih nivojev¹ [1]

2.2 Najpomembnejši gradniki večnivojskih modelov

V nadaljevanju povzemamo najpomembnejše gradnike značilne večnivojske metode, ki bi obsegala vse relevantne velikostne in časovne nivoje. Pri izbiri najpomembnejših gradnikov in njihovem opisu sledimo viru [1], ki je tudi priložen v dodatku k temu poročilu.

Značilni gradniki in njihove medsebojne povezave so lahko v posameznih konkretnih primerih večnivojskih metod tudi nekoliko drugačne. V opisu začnemo z najnižjim nivojem in se po velikostnih nivojih prebijemo do najvišjega, makroskopskega.

2.2.1 Kvantna mehanika (ab initio)

Skoraj ni več dvoma, da lahko večino nizko-energijske fizike, kemije znanosti o materialih in biologije pojasnimo s kvantno mehaniko elektronov in ionov. Prav tako v veliko primerih velja, da je makroskopske lastnosti materialov mogoče napovedati na osnovi kvantno mehanskega popisa dogodkov na atomski skali. Današnji razvoj metod za reševanje Schrödingerjeve enačbe že omogoča oceno snovnih lastnosti širokega spektra materialov, pri čemer je potrebno le še specificirati prisotne ione. Tovrstne ocene v literaturi imenujejo tudi ab initio metode [1].

¹ Space, Time – prostor, čas

Quantum Mechanics-kvantna mehanika

Classical MD (Molecular Dynamics)- klasična dinamika molekul

Dislocation Dynamics – dinamika dislokacij

Statistical Mechanics – statistična mehanika

Continuum Mechanics – mehanika zveznih medijev, mehanika trdnin



V praksi so seveda uporabljene določene poenostavitve, saj je z današnjimi računalniki skoraj nemogoče hkrati slediti 10^{23} delcev. Zato ponavadi uporabimo adiabatni princip, ki nekoliko poenostavljeno povedano predpostavi, da za rešitev problema zadošča rešitev dinamike elektronov ob hkratni zamrznjeni konfiguraciji jeder.

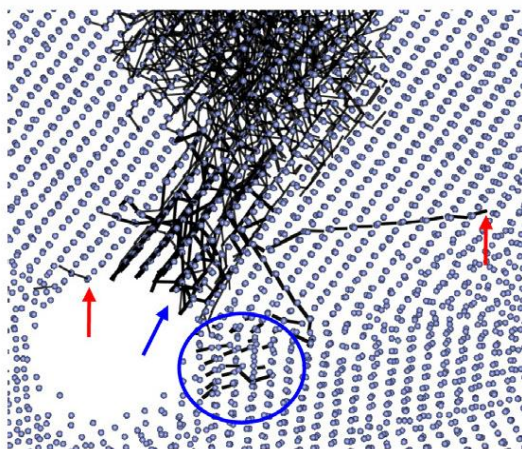
Kvantno mehaniko je potrebno uporabiti, kadar želimo predvideti različne vplive (npr. kemije) v jedrih dislokacij.

Trenutno je z ab initio metodami, ki jih lahko smatramo za rigorozne, mogoče simulirati sisteme z največ nekaj sto atomi. To zadošča za neposredno informacijo o odzivu sistema na zunanje pogoje (sile, temperature) in za generacijo baz podatkov o efektivnih medatomske potencialih, ki so nepogrešljivi pri dinamiki molekul [1].

2.2.2 Dinamika molekul

Dinamika molekul popisuje medsebojno gibanje in interakcije med atomi in molekulami (Slika 2). Pri tem upošteva medatomske in zunanje sile in seveda tudi efektivne medatomske potenciale, ki jih lahko dobimo s simulacijami na nižjem nivoju. Današnje metode omogočajo neposredno reševanje sistemov z nekaj milijoni oz. milijardami atomov, torej nekako do velikosti približno 100 nm in v časih, ki ne presegajo nekaj 10 ns. Zaradi učinkovitosti simulacije praviloma predpostavimo tudi, da so elektroni prilepljeni na jedra.

V načelu velja, da lahko ob znanih položajih in hitrostih vseh atomov v končno velikem sistemu neposredno ocenimo vse termodinamske lastnosti sistema [1].



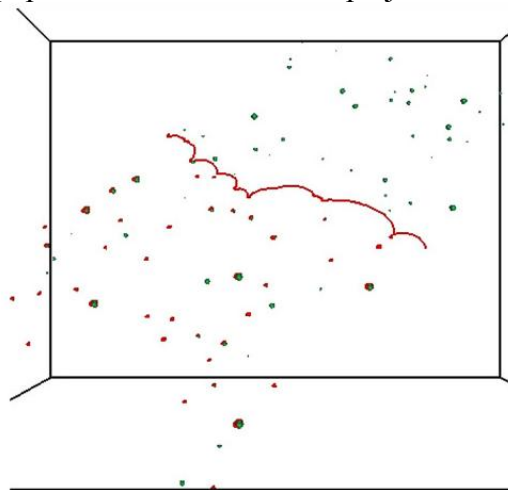
Slika 2 Rezultati simulacije z dinamiko molekul [6]. Črne črte kažejo premike atomov zaradi obsevanja. Rdeče puščice nakazujejo premike od praznine, modre k praznini.

2.2.3 Monte Carlo, dinamika dislokacij in stohastična mehanika

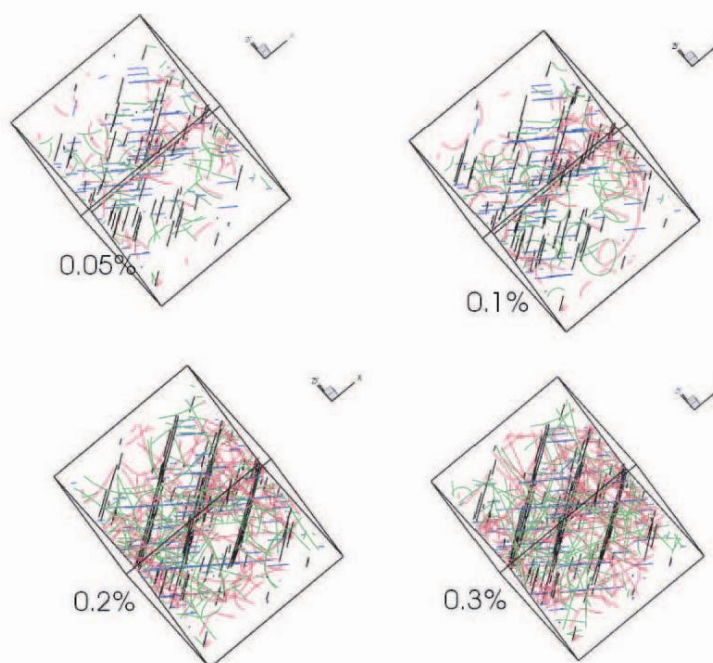
Največ težav imamo z velikostnimi nivoji, ki presegajo zmogljivosti dinamike molekul in jih ni mogoče popisati z metodami mehanike kontinuuma. V tem velikostnem nivoju (0,1 do 10 μm) imajo najpomembnejši vpliv na odzive materiala topološki defekti (Slika 3, Slika 4). Velikosti topoloških defektov segajo od velikosti atoma (npr. vrinjeni atomi, praznine) preko linijskih defektov (npr. dislokacije) vse do ploskovnih defektov (npr. mehurčki, razpoke in kristalne meje).



Tudi v tem primeru si lahko pomagamo z adiabatnim principom in s tem predpostavimo, da sta razvoj in gibanje defektov odvisna izključno od sosednjih atomov, medtem ko lahko vse oddaljene atome v približku popišemo kar kot elastično polje.



Slika 3 Simulacija dislokacije, ki potuje skozi feritno jeklo [6]. Rdeče so obarvane dislokacije, zeleno pa disperzoidi



Slika 4 Simulacija razvoja strukture dislokacij z večanjem obremenitve (specifična deformacija med 0.05 in 0.3%) [1]

Tovrstne probleme lahko rešujemo z različnimi metodami. Med najbolj uveljavljene sodijo kinetična metoda Monte Carlo, diskretna dinamika dislokacij in metode stohastične mehanike. Podroben opis teh metod presega namen tega poročila. Pregled je mogoče najti npr. v [1].

2.2.4 Mehanika kontinuuma

Mehanika kontinuuma predstavlja nepogrešljivo sodobno orodje, s katerim popisujemo nelinearne deformacije materialov. Uporabimo jo lahko tako na makroskopskem nivoju (npr. polikristal) kot tudi na mezoskopskem nivoju (npr. kristalno zrno). Deformacije telesa zaradi zunanjih sil in predpisanih premikov v splošnem določajo:



- ravnotežne enačbe,
- konstitutivne enačbe,
- robni pogoji in
- začetni pogoji

Najpogostejši način reševanja takih problemov je s pomočjo »šibke« formulacije, v kateri združimo ravnotežne enačbe in robne pogoje v t.i. princip virtualnega dela. Le-ta pa predstavlja osnovo za numerično reševanje s pomočjo n.pr. metode končnih elementov [1].

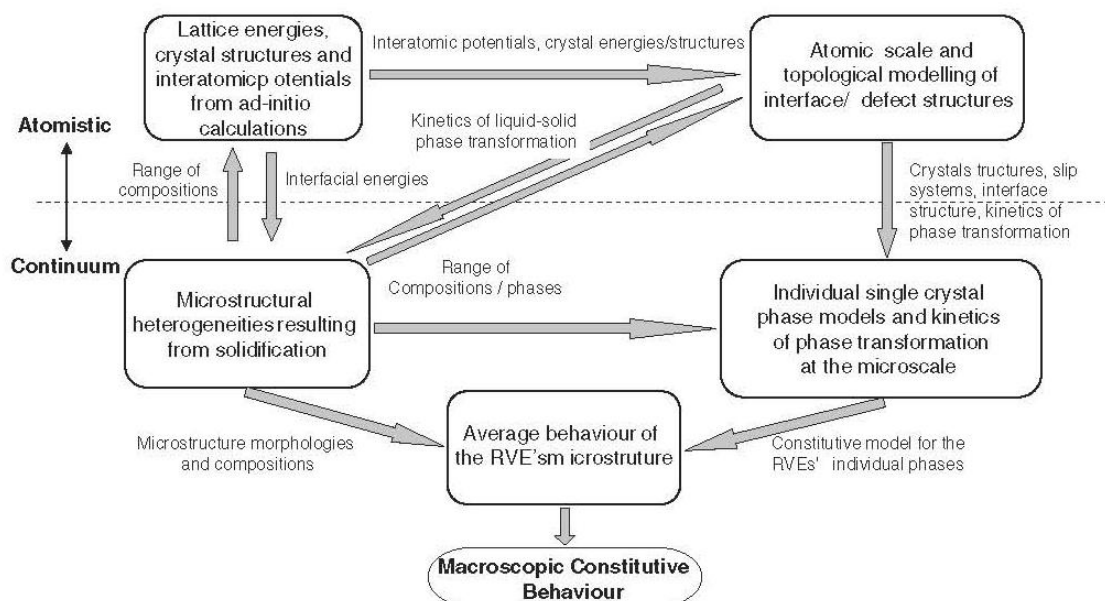
Ključno težavo predstavljajo konstitutivne enačbe in z njimi povezane snovne lastnosti. V vsakdanjem inženirskem delu si veliko pomagamo z empiričnimi modeli in izmerjenimi vrednostmi snovnih lastnosti. Oboji, tako modeli kot tudi snovne lastnosti, pa so v veliki meri povezani s konkretnimi materiali in jih brez dodatnih dragih poskusov pri še ne uporabljenih materialih praviloma ni mogoče neposredno uporabiti. Napovedovanje teh vrednosti pa je vsaj deloma mogoče šele v zadnjem času z vključevanjem procesov na nižjih nivojih.

2.3 Prenos informacij med nivoji

Naravno zaporedje, ki bi pripeljalo do povsem integriranega večnivojskega simulacijskega okolja, je sestavljeno iz naslednjih korakov [1]:

1. Napoved energij v kristalih, kristalnih struktur in medatomskega potencialov (ab initio simulacije);
2. Napoved kompleksnih mikrostrukturnih heterogenosti in morfologij, ki so posledica strjevanja, s pomočjo površinskih energij in kinetike (ab initio simulacije);
3. Identifikacija kristalnih struktur, drsnih sistemov in struktur na mejah faz ter kinetike faznih prehodov med toplotnimi in toplotnomehanskimi procesi z porabo dinamike molekul, dinamike dislokacij in topoloških modelov;
4. Opredelitev kristalografskih modelov vsake izmed faz, s katerimi določimo prevladujoče deformacijske procese, in razvoj homogenizacijskih tehnik za oceno makroskopskih snovnih lastnosti.

Slika 5 shematsko prikazuje zgornje korake in njihove medsebojne povezave.



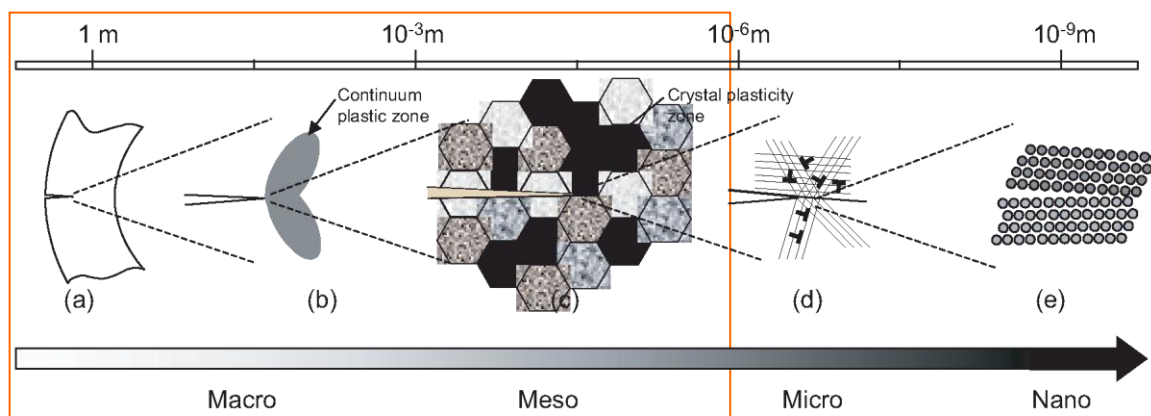
Slika 5 Shema medsebojnih povezav med različnimi nivoji in pripadajočimi modeli [1]



3 VEČNIVOJSKI MODEL IJS

Večnivojsko modeliranje z hkratnim upoštevanjem vseh relevantnih velikostnih in časovnih skal je zaenkrat mogoče razvijati le v okviru razmeroma velikih projektov, ki vključijo več deset strokovnjakov različnih disciplin. Evropska komisija je sofinancirala edini tovrstni projekt na področju jedrske tehnike PERFECT [2], ki je bil usmerjen predvsem v delujoče jedrske elektrarne in v katerem organizacije iz Slovenije niso sodelovale.

Odsek za reaktorsko tehniko Instituta "Jožef Stefan" neodvisno od projekta PERFECT in s pomočjo neposrednih povezav s posameznimi evropskimi raziskovalnimi inštitucijami (npr. Forschungszentrum in Univerza Karlsruhe, Nemčija, Joint Research Centre, Institute for Energy, Petten, Nizozemska, Univerza v Manchesteru, Velika Britanija in Inštitut za fiziko Češke akademije znanosti) že več kot deset let razvija svoj lasten večnivojski model. Najpomembnejši dolgoročni cilj modela IJS je napovedovanje življenjske dobe komponent jedrskih elektrarn. Zato je model, podobno kot projekt PERFECT, usmerjen predvsem v velikostne nivoje, ki so pomembni pri nastanku in razvoju razpok in ostalih poškodb v materialih (Slika 6).



Slika 6 Velikostni nivoji v lomni mehaniki [2]

Model IJS zajema tiste velikostne nivoje, ki so najpomembnejši za razvoj razpok v zgodnjih fazah razvoja, torej v obdobju med nastankom in možnostjo odkritja s katero izmed neporušnih metod (Slika 6 a, b in c). Po nekaterih ocenah takšno obdobje predstavlja kar 90% celotne življenjske dobe komponente. Smiselnost takšnega izbora velikostnih nivojev v modelu potrjuje tudi razmišljanje prof. Alana Needlemana: »It is over the mesoscale size range – scale of grains in polycrystalline materials - that key deformation and fracture processes in a variety of structural materials take place.« [4].

V nadaljevanju povzemamo ključne predpostavke in elemente modela. Več podrobnosti je mogoče najti v [41].

3.1 Osnovne predpostavke

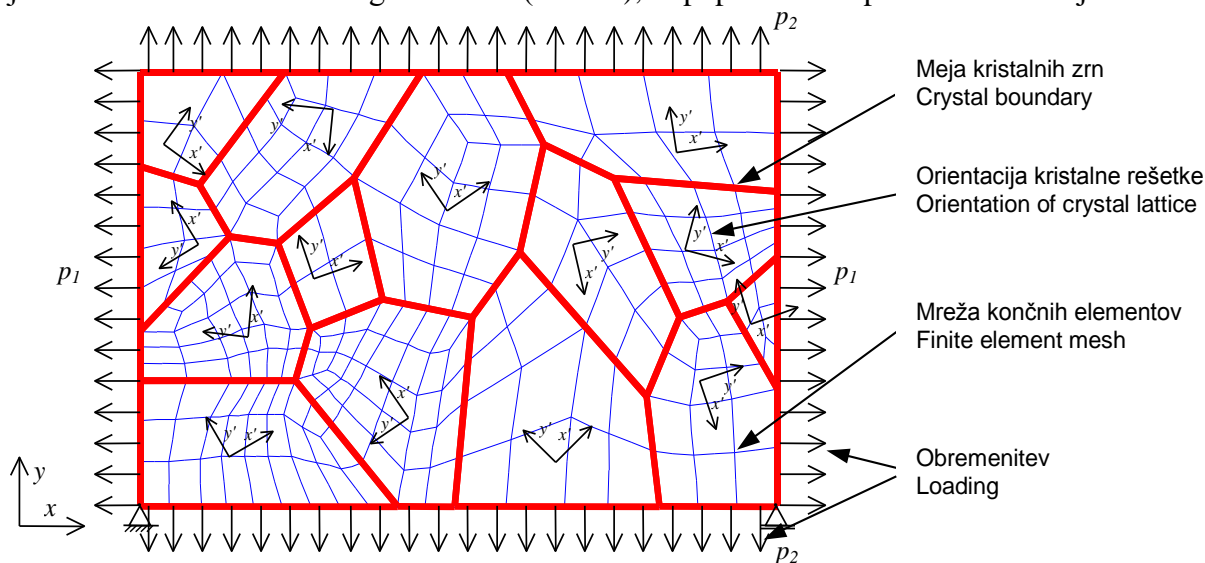
Osnovna ideja modela IJS je delitev polikristalnega skupka na niz naključno oblikovanih in naključno usmerjenih kristalnih zrn, za katere predpostavljamo, da imajo kompatibilne premike na kristalnih mejah. Pri izvedbi smo upoštevali naslednje ključne predpostavke:



- Za modeliranje naključne polikristalne strukture je uporabljen Voronojev mozaik [25].
- Za vsako kristalno zrno predpostavimo, da se obnaša kot anizotropno elastičen monokristal z naključno orientacijo kristalne rešetke.
- Model plastičnosti predpostavlja, da plastična deformacija nastane zaradi zdrsa po vnaprej določenih ravninah zdrsa kristalne rešetke. Ravnine in smeri zdrsa so določene z družino in z orientacijo kristalne rešetke, ki se od zrna do zrna razlikuje (naključna orientacija).
- Mezoskopsko vedenje polikristalnega skupka je izračunano s komercialno dosegljivim programom po metodi končnih elementov. Robni problem je definiran in rešen na makroskopskem nivoju, pri čemer sta konsistentno uporabljena dva komplementarna nabora robnih pogojev (s predpisano deformacijo in napetostjo).
- Model je zaradi izjemne računske zahtevnosti, ki konvencionalne analize s končnimi elementi presegajo za faktor 100, omejen na ploskovne probleme. Vsi gradniki modela pa omogočajo enostaven prehod na prostorske probleme v prihodnosti.

3.2 Voronojevi mozaiki

Koncept Voronojevega mozaika je šele od nedavnega obsežneje uporabljen v znanosti o materialih, še posebej za modeliranje naključnih mikrostruktur kot so na primer skupki zrn v polikristalih, vzorci medkristalnih razpok in kompozitni materiali [41], [24]. Voronojev mozaik tvori celična struktura, ki jo dobimo iz Poissonovih točk tako, da postavimo mejo med celicama pravokotno na zveznico (na polovici razdalje) med sosednjima Poissonovima točkama. Rezultat je množica konveksnih mnogokotnikov (Slika 7), ki popolnoma zapolni tako razdeljeno ravnino.



Slika 7 Model polikristalnega skupka z mrežo končnih elementov, orientacijami kristalnih rešetk in makroskopskimi obremenitvami in robnimi pogoji

Vsi v tem prispevku uporabljeni mozaiki so bili izdelani s programom VorTess [25]. Avtomatsko mreženje naključnih Voronojevih mozaikov s končnimi elementi pa poteka v skladu s postopki, ki so opisani v [10].

3.3 Anizotropna elastičnost

Predpostavljamo, da se monokristal odziva kot kontinuum, pri čemer zanj velja posplošeni Hookov zakon [30]:

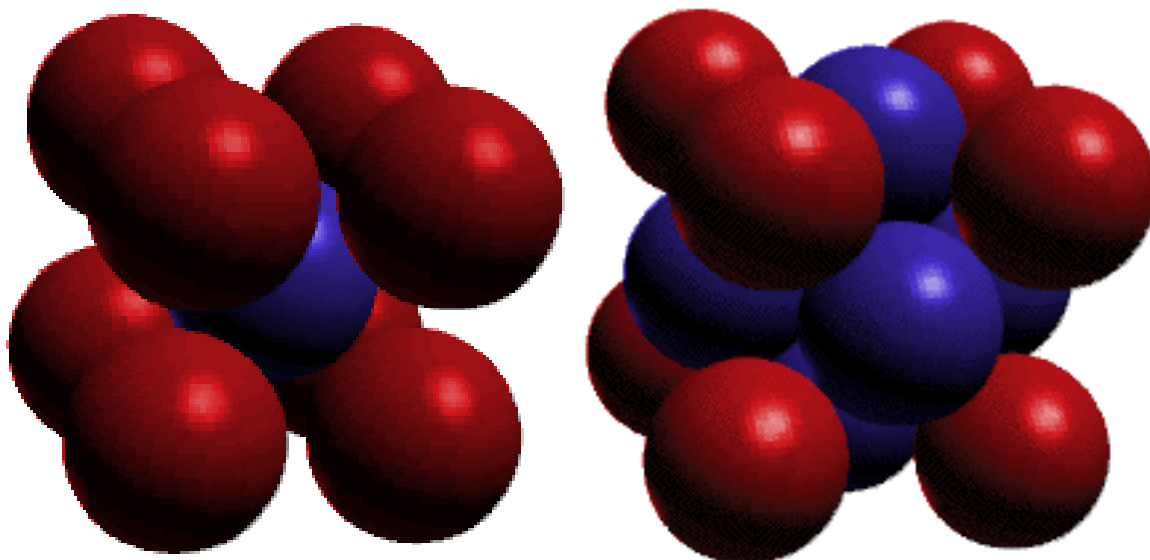


$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

kjer σ_{ij} predstavlja tenzor napetosti 2. reda, C_{ijkl} tenzor elastičnih konstant kontinuuma 4. reda, ε_{kl} tenzor specifičnih deformacij in i, j, k in l so indeksi, ki tečejo od 1 do 3. Definiran je tudi tenzor podajnosti D_{ijkl} , za katerega velja:

$$\varepsilon_{ij} = D_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (2)$$

Jekla in nikljeve zlitine predstavljajo veliko večino kovinskih materialov, ki so uporabljeni v za varnost pomembnih komponentah jedrskih elektrarn. Praviloma imajo splošna konstrukcijska jekla, ki so jih uporabili v drugi generaciji jedrskih elektrarn, prostorsko centrirano kristalno rešetko (BCC, Slika 8 levo), nerjavna jekla in nikljeve zlitine pa ploskovno centrirano kubično rešetko (FCC, Slika 8 desno).



Slika 8 Prostorsko (levo, BCC) in ploskovno (desno, FCC) centrirani kubični rešetki

Elastične lastnosti polikristalnega skupka so popolnoma določene z lastnostmi in medsebojnim delovanjem posameznih monokristalov. Tenzor C_{ijkl} ima sicer 81 komponent. Elastične lastnosti obeh različic kubične rešetke pa so zaradi večkratne simetrije popolnoma definirane že s tremi neodvisnimi komponentami tenzorja C_{ijkl} . Pri makroskopskem izotropnem obnašanju kovin pa je mogoče elastični odziv v celoti popisati že z dvema neodvisnima komponentama. tenzorja C_{ijkl} .

Elastične lastnosti, ki so značilne za jekla s prostorsko in ploskovno centrirano rešetko so pridobljene iz literature (Tabela 1). Za BCC jekla smo v skladu s predpostavko, da majhne količine legirnih elementov ne vplivajo na elastičnost monokristalov [28], privzeli kar vrednosti za α -železo s kubično prostorsko centrirano kristalno rešetko (npr.[27], [28]). Kot primer za



elastične lastnosti pa podajamo podatke (Tabela 1) za avstenitno nerjavno jeklo AISI 304 [35] in optimirane podatke za AISI 316 L [48].

Tabela 1 Značilne vrednosti elastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel

Vrsta jekla	Kristalna rešetka	c_{iiii} [GPa]	c_{iiij} [GPa]	c_{ijij} [GPa]	Referenca
Nemško jeklo za reaktorske tlačne posode DIN 22 NiMoCr 3 7	BCC Prostorsko centrirana kubična	230	135	117	[28], [29] α -železo
Nerjavno jeklo iz ZDA AISI 316L	FCC Ploskovno centrirana kubična	204,6 163,7	137,7 110,2	126,2 101,0	[35] AISI 304 [48] optimirano

3.4 Kristalna plastičnost

Z uporabo kristalne plastičnosti privzamemo, da so plastične oz. trajne deformacije posledica zdrsa kristalnih ravnin. Kot najpomembnejšo gonilno sila zdrsa predpostavimo Schmidovo napetost (strižna napetost v drsnem sistemu) [29]. Drсни sistem (Slika 9) definirata drsna ravnina (določena z normalo $m_i^{(\alpha)}$) in drsna smer ($s_i^{(\alpha)}$) znotraj kristalne rešetke. Prostorsko centrirana kubična rešetka rešetka ima tri družine drsnih ravnin ($\{110\}$, $\{112\}$ in $\{123\}$) ter eno družino drsnih smeri ($\langle 111 \rangle$), kar skupaj pomeni 48 drsnih sistemov [30]. Ploskovno centrirana kubična rešetka ima eno družino drsnih ravnin ($\{111\}$) in eno družino drsnih smeri ($\langle 110 \rangle$), kar skupaj pomeni 12 drsnih sistemov [30]. S pomočjo Schmidovih faktorjev in eksplicitno izraženih drsnih sistemov ($m_i^{(\alpha)}$, $s_i^{(\alpha)}$) lahko konstitutivne enačbe zapišemo kot:

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \cdot (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p) = C_{ijkl} \cdot \left(\dot{\epsilon}_{kl} - \sum_{\alpha} \frac{1}{2} \dot{\gamma}^{(\alpha)} (s_i^{(\alpha)} m_j^{(\alpha)} + s_j^{(\alpha)} m_i^{(\alpha)}) \right) \quad (3)$$

Drsna hitrost $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ v drsnem sistemu α je določena s pripadajočo Schmidovo napetostjo $\tau^{(\alpha)}$:

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{a}^{(\alpha)} \left(\frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right) \left(\left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right| \right)^{n-1} \quad (4)$$

pri čemer je $\dot{a}^{(\alpha)}$ referenčna stopnja strižne napetosti, n je občutljivostni parameter strižne napetosti, in $g^{(\alpha)}$ trenutno stanje utrjevanja monokristala. Enačba (4) predstavlja viskoplastični potencial, ki ga je v limiti, ko se n približuje neskončnosti, mogoče uporabiti tudi za modeliranje materialov, ki se odzivajo neodvisno od hitrosti deformacije [29].

Trenutno stanje strižnega utrjevanja $g^{(\alpha)}$ v drsnem sistemu α je določeno kot:

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \dot{\gamma}^{(\beta)} \quad (5)$$

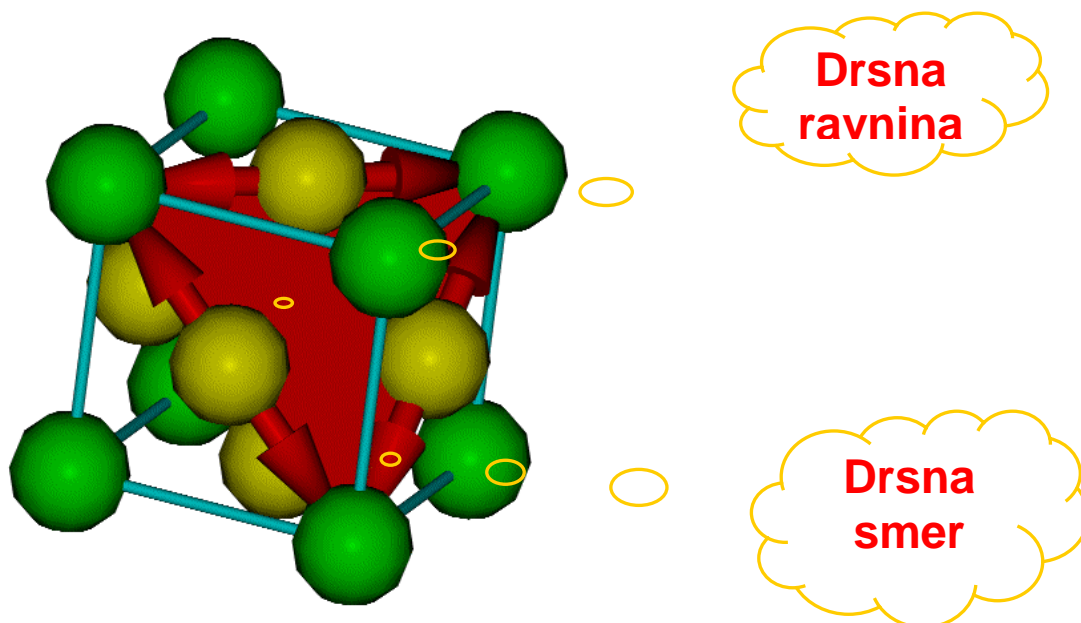


kjer $h_{\alpha\beta}$ predstavlja modul utrjevanja. Modul utrjevanja je obravnavalo več avtorjev (npr. [29], [30] in [31]), vsi pa imajo za osnovo empirične modele. V našem modelu uporabljamo dva zakona utrjevanja. Prvega so predlagali Pierce et al. [32] in Asaro [31]:

$$h_{\alpha\alpha} = h(\gamma) = h_0 \operatorname{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \text{ in } h_{\alpha\beta} = qh(\gamma) \quad (\alpha \neq \beta) \quad (6)$$

kjer h_0 je začetni modul utrjevanja, τ_0 meja tečenja, ki je enaka začetni vrednosti trdnosti materiala $g^{(\alpha)}(0)$, τ_s je mejna napetost nad katero se začnejo velike plastične deformacije, q faktor utrjevanja in γ kumulativni zdrs:

$$\gamma = \sum_{\alpha} \int_0^t |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt \quad (7)$$



Slika 9 Primeri drsnih sistemov v ploskovno centrirani kubični rešetki

Drugi zakon utrjevanja sta predlagala Bassani in Wu [34] in opisuje tristopenjsko utrjevanje kristalnega materiala. Njun izraz za samo- (indeks $\alpha\alpha$) in latentno utrjevanje ($\alpha\beta$) je odvisen od strižnih specifičnih deformacij vseh drsnih sistemov:

$$h_{\alpha\alpha} = \left\{ (h_0 - h_s) \operatorname{sech}^2 \left| \frac{(h_0 - h_s) \gamma^{(\alpha)}}{\tau_s - \tau_0} \right| + h_s \right\} G(\gamma^{(\beta)}; \beta \neq \alpha) \quad (8)$$

in

$$h_{\alpha\beta} = qh_{\alpha\alpha} \quad (\alpha \neq \beta) \quad (9)$$



kjer h_s predstavlja modul utrjevanja med lahkim zdrsom v stopnji I, funkcija G pa je povezana z latentnim utrjevanjem in je podana z:

$$G(\gamma^{(\beta)}; \beta \neq \alpha) = 1 + \sum_{\beta \neq \alpha} f_{\alpha\beta} \tanh\left(\frac{\gamma^{(\beta)}}{\gamma_0}\right) \quad (10)$$

kjer je γ_0 zdrs, pri katerem medsebojno delovanje med sistemi zdrsa doseže najvišjo jakost in $f_{\alpha\beta}$ predstavlja jakost posameznega medsebojnega delovanja.

Tabela 2 Značilne vrednosti plastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel za model Pierce et al [30] in Asaro[31]

Jeklo	n [-]	$\dot{\alpha}^{(\alpha)}$ [s^{-1}]	h_0 [MPa]	τ_s [MPa]	τ_0 [MPa]	q [-]	Vir
Jeklo BCC DIN 22 NiMoCr 3 7	50	0,001	70	15,5	155	1,0	[41] Optimirano
Nerjavno jeklo FCC	55	0,001	330	270	90	1,0	[48] Optimirano

Tabela 3 Značilne vrednosti plastičnih konstant za monokristale BCC in FCC jekel za model Bassani Wu [34]

Jeklo	n [-]	$\dot{\alpha}^{(\alpha)}$ [s^{-1}]	h_0 [MPa]	h_s [MPa]	τ_s [MPa]	τ_0 [MPa]	$q_{\alpha\alpha}$ [-]	$q_{\alpha\beta}$ [-]	γ_0 [-]	$f_{\alpha\alpha}$ [-]	$f_{\alpha\beta}$ [-]	Vir
Jeklo BCC DIN 22 NiMoCr 3 7	50	0,001	10	500	200	164	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	[41]
Nerjavno jeklo FCC	9	0,001	10	500	100	170	1,0	1,0	0,1	1,0	0,0	

Enačbe (1)-(10) so za uporabo z metodo končnih elementov podane v inkrementalni obliki [29]. Te enačbe so v splošnem zelo toge [26]. Togost sistema narašča z naraščanjem števila sistemov zdrsa. Zaradi togosti potrebuje klasična integracijska shema zelo majhne korake (in dolge računske čase) za zagotovitev stabilnosti rešitve.

3.5 Homogenizacija

Makroskopski odziv polikristalnega skupka je določen z naslednjim postopkom [30]:

- Mezoskopska tenzorja napetosti σ_{ij}^L in specifične deformacije ε_{ij}^L sta v vsaki integracijski točki rotirana iz lokalnega v globalni koordinatni sistem:

$$\sigma_{ij}^G = \sigma_{ij}^L \cdot Q_{ik} \cdot Q_{jl} \quad \varepsilon_{ij}^G = \varepsilon_{ij}^L \cdot Q_{ik} \cdot Q_{jl}, \quad (11)$$



kjer σ_{ij}^G in ε_{ij}^G predstavljata tenzorja napetosti in specifične deformacije v globalnem koordinatnem sistemu in Q_{ij} predstavlja rotacijski tenzor iz lokalnega v globalni koordinatni sistem. Trenutna usmerjenost v integracijski točki je določena z začetno usmerjenostjo kristala in z razvojem usmerjenosti zaradi velikih deformacij.

- Makroskopska tenzorja napetosti $\langle \sigma_{ij} \rangle$ in specifičnih deformacij $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ sta dobljena s povprečenjem mezoskopskih tenzorjev napetosti in specifičnih deformacij v globalnem koordinatnem sistemu prek celotne prostornine polikristalnega skupka V :

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}^G dV \quad \langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}^G dV \quad (12)$$

- Primerjalna makroskopska napetost in specifična deformacija sta izračunani iz makroskopskih tenzorjev napetosti in specifične deformacije.

3.6 Reprezentativni volumski element

V literaturi se je za najmanjši vzorec nehomogene snovi, ki je makroskopsko homogena, uveljavil termin reprezentativni volumski element (RVE). Velja, da pri vzorcu nehomogene snovi večjem od RVE, vpliv velikosti na makroskopskem nivoju ni opazen [30]. Velikost RVE polikristalnega skupka je določena s primerjavo makroskopskega tenzorja elastičnih konstant kontinuuma C_{ijkl}^* in tenzorja togostnih konstant kontinuuma D_{ijkl}^* . Pri tem so makroskopske veličine povprečene po celotnem polikristalnemu skupku. Za polikristalni skupek večji od RVE velja [33]:

$$C_{ijkl}^* \cong D_{ijkl}^{*-1} \quad (13)$$

Enačba (13) v splošnem ne velja za polikristalne skupke manjše od RVE. Obnašanje takšnih polikristalnih skupkov je odvisno od njihovih velikosti in makroskopskih robnih pogojev [30]: makroskopski tenzor elastičnih konstant kontinuuma predpostavlja robni pogoj s predpisano napetostjo, makroskopski tenzor togostnih konstant kontinuuma pa robni pogoj s predpisanim pomikom. Z upoštevanjem relacij med napetostmi in specifičnimi deformacijami (kot npr. v enačbi (1)), je enačbo (13) mogoče poenostaviti z uporabo makroskopskih napetosti ali specifičnih deformacij [19], npr.:

$$\langle \sigma_{eq_s} \rangle \cong \langle \sigma_{eq_d} \rangle \quad (14)$$

Indeksa s in d označujeta robna pogoja s predpisano napetostjo oziroma pomikom. Tako poenostavljeno merilo je, navkljub poenostavitvam, dovolj dobra ocena za predstavitev ključne tendence. Nekateri avtorji za določitev velikosti RVE uporabljajo ekstrapolacijo z upoštevanjem velikosti polikristalnega skupka [33]. Razmerje med makroskopskima tenzorjema elastičnih konstant kontinuuma in togostnih konstant kontinuuma za polikristalni skupek se lahko izrazi kot [33]:

$$C_{ijkl}^* \cdot D_{klmn}^* = I_{ijmn} + O(V/V_{RVE}) \quad (15)$$



kjer V_{RVE} predstavlja velikost RVE, V velikost polikristala manjšega od RVE in O oceno residuuma. Z upoštevanjem enačbe (14) in dejstva, da je število zrn i v polikristalnem skupku sorazmerno njegovi velikosti, je namesto enačbe (15) mogoče uporabiti:

$$\frac{\langle \sigma_{eq_s} \rangle}{\langle \sigma_{eq_d} \rangle} = 1 + O(i/i_{RVE}) \quad (16)$$

Ocenjujemo, da je RVE dosežen, ko je ocena residuuma O manjša od značilne izbrane vrednosti, na primer 1%.

3.7 Korelacijske dolžine

Korelacijska dolžina je eden izmed konceptov, ki jih v stohastični mehaniki uporabljamo za določevanje območja v naključnem polju, znotraj katerega lahko pričakujemo korelirane vrednosti opazovane naključne spremenljivke.

Večnivojski modeli so idealni za oceno korelacijskih dolžin, pa tudi drugih parametrov stohastičnih polj. Z večnivojskim modelom IJS ([13], [41]) je tako mogoče razmeroma enostavno določiti korelacijsko dolžino v poljih napetosti in specifičnih deformacij [12].

3.7.1 Avtokorelacijska in kovariančna funkcija

Za izračun korelacijske dolžine je najprej potrebno ugotoviti statistično povezanost vrednosti naključnega procesa. To naredimo z uporabo avtokorelacijske oz. kovariančne funkcije. Avtokorelacijska funkcija $R_{xx}(l_1, l_2)$ 1D naključnega procesa $x(l)$ je definirana z izrazom:

$$R_{xx}(l_1, l_2) = E[x(l_1) \cdot x(l_2)] = \iint x_1 \cdot x_2 \cdot f_{x(l_1)x(l_2)}(x_1, x_2) \cdot dx_1 \cdot dx_2 \quad (17)$$

kjer oznaka E predstavlja matematično upanje, $f_{x(l_1)x(l_2)}$ pa povezano gostoto verjetnosti [37]. Definirana je torej kot povprečna vrednost produkta vrednosti procesa pri dveh različnih parametrih l_1 in l_2 . Povprečno vrednost produkta dobimo tako, da večkrat pomerimo vrednosti procesa² in nato povprečimo po procesih. Alternativno lahko najprej določimo skupno gostoto verjetnosti $f_{x(l_1)x(l_2)}$ in jo nato integriramo po njenem definicijskem območju.

V kolikor sta vrednosti procesa pri parametrih l_1 in l_2 nekorelirani (statistično neodvisni), bo povprečna vrednost produkta teh vrednosti bistveno manjša kot v primeru, da ima npr. proces pri parametrih l_1 in l_2 vedno visoke vrednosti. V kolikor se npr. vrednost $x(l_1)$ se giblje okoli vrednosti 10 in vrednost $x(l_2)$ okoli vrednosti 12, se bo povprečna vrednost njunega produkta gibala okoli vrednosti 120. Manj sta vrednosti $x(l_1)$ in $x(l_2)$ povezani, manjša bo povprečna vrednost njunega produkta. Avtokorelacijska funkcija se uporablja za popis lastnosti procesov, ki so odvisni od enega samega parametra. Tipični primeri takega procesa so npr. meritev temperature konstrukcijskega elementa v odvisnosti od časa, napetost v konstrukcijskem elementu pri spreminjajoči se zunanji obremenitvi itd.

² Pomerjeni proces v statistični terminologiji označimo z izrazom 'vzorčna funkcija'. Več pomerjenih procesov predstavlja skupino vzorčnih funkcij.



Pogosto se namesto avtokorelacijske funkcije uporabi kovariančna funkcija. Ta je podobna avtokorelacijski funkciji s to razliko, da iščemo odstopanja od povprečne vrednosti. Kovariančna funkcija $K_{xx}(l_1, l_2)$ naključnega procesa $x(l)$ je definirana z izrazom:

$$K_{xx}(l_1, l_2) = E[(x(l_1) - E[x(l_1)]) \cdot (x(l_2) - E[x(l_2)])] \quad (18)$$

in jo lahko izrazimo z avtokorelacijsko funkcijo:

$$K_{xx}(l_1, l_2) = R_{xx}(l_1, l_2) - E[x(l_1)] \cdot E[x(l_2)] \quad (19)$$

Za stacionarne naključne procese velja, da je povezana gostota verjetnosti $f_{x(l_1)x(l_2)}$ odvisna samo od razlike $l_2 - l_1$ zato sta tudi avtokorelacijska in kovariančna funkcija odvisni samo od $l_2 - l_1$. V kolikor dodatno velja še, da je povprečna vrednost naključnega procesa enaka nič, je kovariančna funkcija enaka avtokorelacijski funkciji:

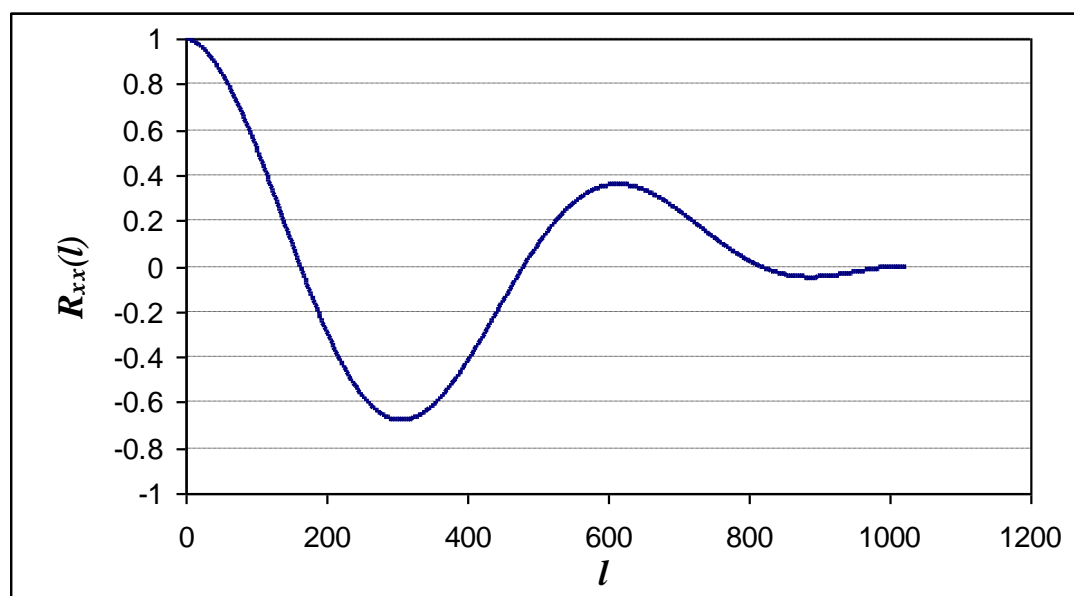
$$R_{xx}(l_1, l_2) = R_{xx}(0, l_2 - l_1) = R_{xx}(l_2 - l_1) = R_{xx}(l), \quad l = l_2 - l_1 \quad (20)$$

$$K_{xx}(l) = K_{xx}(l_2 - l_1) = R_{xx}(l) - \underbrace{E[x(0)]}_{=0} \cdot \underbrace{E[x(l_2 - l_1)]}_{=0} = R_{xx}(l)$$

Najvišja vrednost take avtokorelacijske oz. kovariačne funkcije naključnega procesa je omejena z varianco procesa σ^2 :

$$K_{xx}(l) \leq K_{xx}(0) = \sigma^2 \text{ in} \quad (21)$$

$$R_{xx}(l) \leq R_{xx}(0) = \sigma^2$$



Slika 10 Primer avtokorelacijske funkcije naključnega procesa



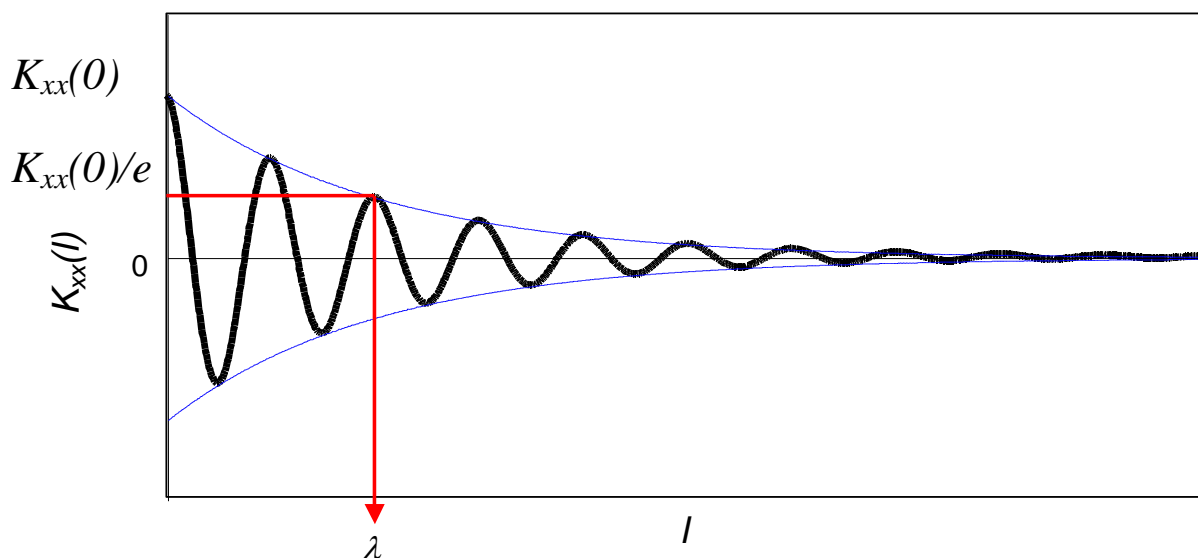
Slika 10 prikazuje primer avtokorelacijske funkcije naključnega procesa. Avtokorelacijska funkcija ima najvišjo vrednost pri $l = l_2 - l_1 = 0$. Bolj sta dva dogodka oddaljena (narašča $l = l_2 - l_1$), manjša je vrednost avtokorelacijske funkcije in manj sta dogodka povezana. Napovedovanje dogodka 2 na podlagi poznavanja dogodka 1 je torej z naraščanjem parametra $l = l_2 - l_1$ vedno bolj negotovo.

3.7.2 Korelacijska dolžina

Korelacijska dolžina dopolnjuje kovariančno funkcijo. Pove nam namreč v katerem območju so vrednosti procesa korelirane (povezane). Zunaj tega območja vrednosti procesa niso korelirane (povezane) in zato na podlagi poznavanja dogodka 1 (npr. snovne lastnosti v točki 1) zelo težko napovemo dogodek 2 (npr. snovno lastnost v točki 2). Za kovariančne funkcije oblike:

$$K_{xx}(l) = K_{xx}(0) \cdot e^{-l/\lambda} \cdot \cos(\omega \cdot l) \tag{22}$$

je korelacijska dolžina³ λ definirana z vrednostjo parametra l , pri katerem se začetna vrednost ovojnice kovariančne funkcije zmanjša za faktor e .



Slika 11 Določitev korelacijske dolžine

3.7.3 Algoritem izračuna

Predpostavimo, da imamo vektor podatkov \mathbf{g} , ki vsebuje vrednosti naključne spremenljivke, in iz katerega želimo izračunati korelacijsko dolžino. Najprej moramo izračunati avtokorelacijsko funkcijo za kar uporabimo diskretni korelacijski teorem, izraz (23). V izrazu (23) predstavlja simbol G_k diskretno Fourierjevo transformacijo vektorja \mathbf{g} , simbol $*$ pa označuje kompleksno konjugacijo. Najprej torej izračunamo diskretno Fourierjevo transformacijo vektorja \mathbf{g} da dobimo vektor G_k . Nato pomnožimo (indeks po indeks) vektor G_k z G_k^* . Na zadnje izračunamo še inverzno Fourierjevo transformacijo produkta $G_k G_k^*$ in tako dobimo avtokorelacijsko funkcijo. Korelacijsko dolžino izračunamo iz ovojnice avtokorelacijske funkcije. Ovojnico funkcije $f(t)$ definira izraz (23), kjer $H(t)$ predstavlja Hilbertovo transformacijo, izraz (23), funkcije $f(t)$.

³ V primerih, ko je naključni proces odvisen od časa, uporabljamo izraz korelacijski čas τ .



$$\text{Autocorr}(\mathbf{g}, \mathbf{g})_j \Leftrightarrow G_k G_k^*, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \text{length}(G) - 1$$

$$A(t) = \sqrt{(f(t))^2 + (H(t))^2} \quad (23)$$

$$H(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\pi \cdot (t - \tau)} \cdot f(\tau) \cdot d\tau$$

Korelacijsko dolžino izračunamo iz ekvivalentne deformacije, izraz (24), ali ekvivalentne (Mises) napetosti, izraz (24). Z metodo končnih elementov izračunamo ε_{eq} in σ_{eq} v vsaki Gaussovi integracijski točki končnih elementov.

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (24)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \right]}$$

Ekvivalentno makroskopsko napetost $\langle \sigma_{eq} \rangle$ in deformacijo $\langle \varepsilon_{eq} \rangle$ izračunamo s povprečenjem po volumnu:

$$\langle \sigma_{eq} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{eq} \, dV, \quad \langle \varepsilon_{eq} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{eq} \, dV \quad (25)$$

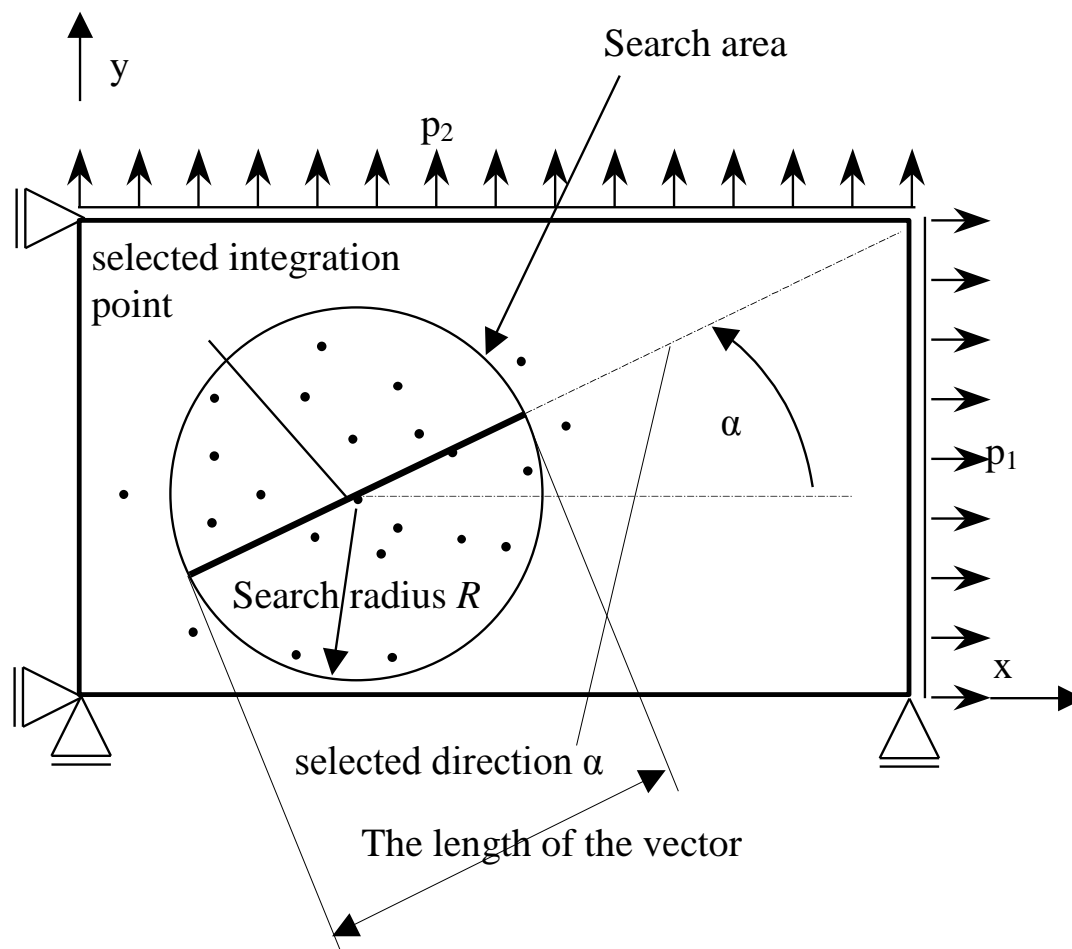
kjer σ_{eq} predstavlja ekvivalentno napetost, izraz (24), ε_{eq} pa ekvivalentno deformacijo, izraz (24). Simbol V predstavlja celoten volumen mezoskopskega modela.

Ker sta ekvivalentna deformacija in napetost 2D spremenljivke, je potrebno iz 2D polja pridobiti vektor podatkov \mathbf{g} . To naredimo na naslednji način:

1. Izberemo integracijsko točko v kateri želimo izračunati korelacijsko dolžino.
2. Izberemo smer α v kateri želimo izračunati korelacijsko dolžino.
3. Dolžino vektorja definiramo z radijem iskanja R .
4. Vrednosti deformacije oz. napetosti v ekvidistančno porazdeljenih točkah na izbrani smeri (Slika 12-debela črta) izračunamo z uporabo kvadratične 2D interpolacije [16].
5. Za izbrano smer izračunamo korelacijsko dolžino.
6. Postopek ponovimo za ostale izbrane smeri.

Končno vrednost korelacijske dolžine dobimo z izračunom povprečne vrednosti korelacijskih vrednosti izbranih smeri. V tej študiji so bile izbrane smeri od 0° do 150° v 30° korakih.

Računski primer je v poglavju 4.3.



Slika 12 Dolžina ($2R$) in smer α vektorja g

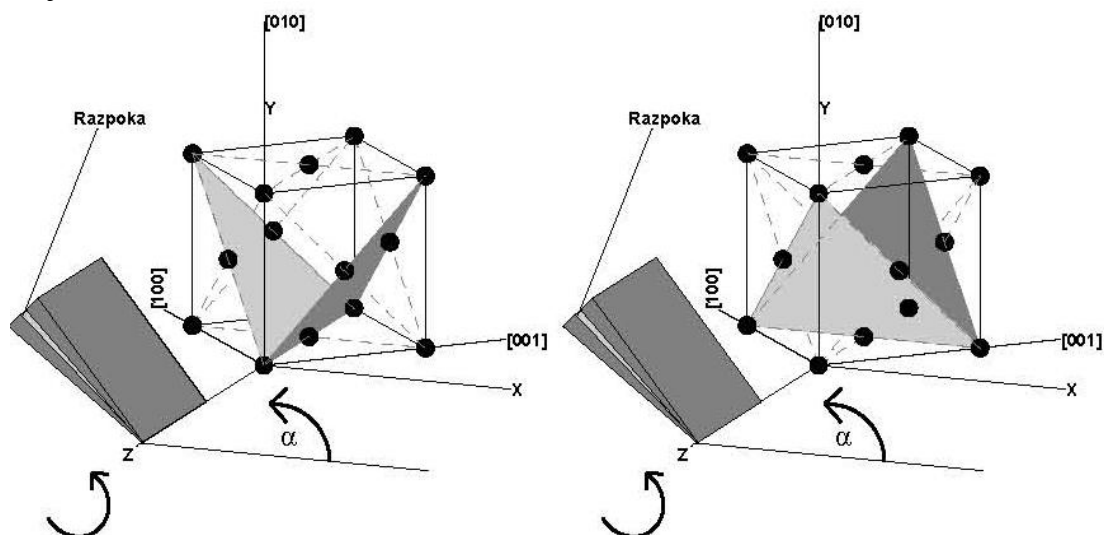
3.8 Kratke razpoke

Lastnosti mikrostrukturno kratkih razpok v velikostnem razredu kristalnega zrna se v splošnem bistveno razlikujejo od lastnosti dolgih razpok. Povprečna hitrost rasti kratke razpoke je lahko pri ekvivalentni obremenitvi bistveno večja kot pri dolgi razpoki [17]. Poleg tega mikrostrukturno kratke razpoke lahko rastejo tudi pod pragom rasti, kjer dolge razpoke ne rastejo več [18]. Lokalna hitrost rasti kratke razpoke je močno odvisna tudi od mikrostrukturnih lastnosti okolice razpoke: mej kristalnih zrn, kristalografskih smeri, vključkov, praznin, materialnih faz, ipd. ([19], [20]). Mikrostrukturno kratke razpoke pogosto nastanejo v lokaliziranih pasovih zdrs in najprej napredujejo izključno znotraj drsnih ravnin. Obremenitve konice take razpoke so v splošnem mešanega tipa (odpiranje in obe smeri striga), razpoka pa zaradi mešanih obremenitev lahko spreminja smer, še posebej pri prehodu mikrostrukturnih nezveznosti, kot n.pr. meje kristalnega zrna.

Eksperimentalni podatki kažejo, da se normalna in prečna komponenta odpiranja konice razpoke (NOR in POR) pri prehodu meje kristalnega zrna zmanjšata [21]. Pri tem meja kristalnega zrna deluje kot ovira za napredovanje zdrs preko meje same in zato lahko začasno ustavi napredovanje območja plastičnosti [22]. Kristalografske orientacije posameznih zrn imajo pri tem pomemben vpliv in lahko zaustavijo, upočasnijo oz. pospešijo napredovanje razpoke [23].

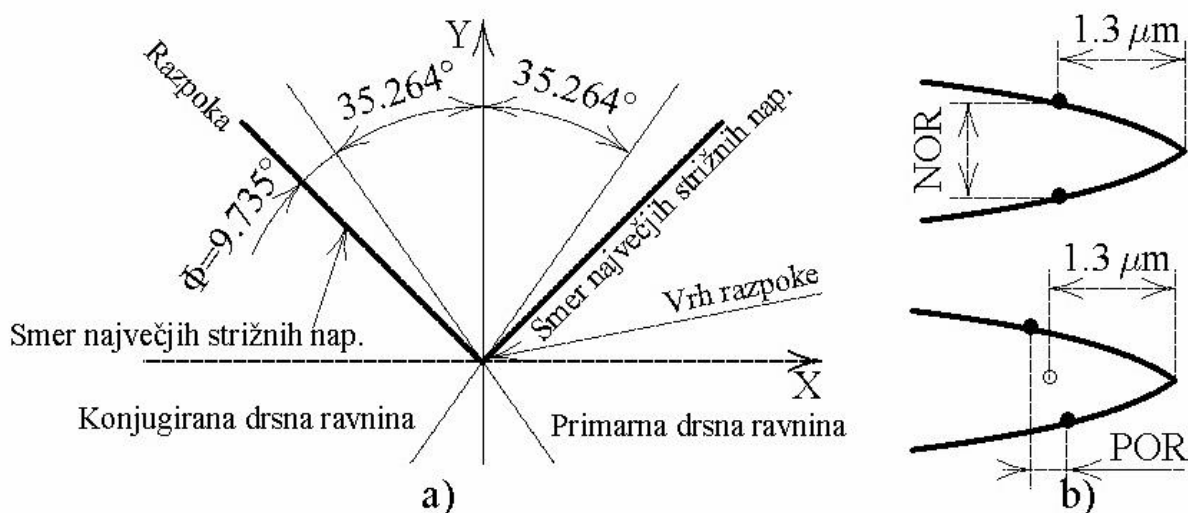


Večnivojski model IJS (Slika 15) je zelo primerno orodje za raziskovanje vpliva zrnate strukture na obnašanje kratkih razpok ([14], [15], [16]). Model IJS zaenkrat rešuje ploskovne probleme, opredelitev konstitutivnega modela pa je prostorska. V takem primeru je smiselno izbrati takšno splošno orientacijo materiala, ki omogoči ploskovne aktivnosti drsnih sistemov [40]. Slika 13 prikazuje primer takšne splošne orientacije kristalne rešetke glede na ravnino x-y, v kateri rešujemo celoten problem. Seveda za posamezna kristalna zrna še vedno predpišemo naključne orientacije kristalnih rešetk okoli osi z.

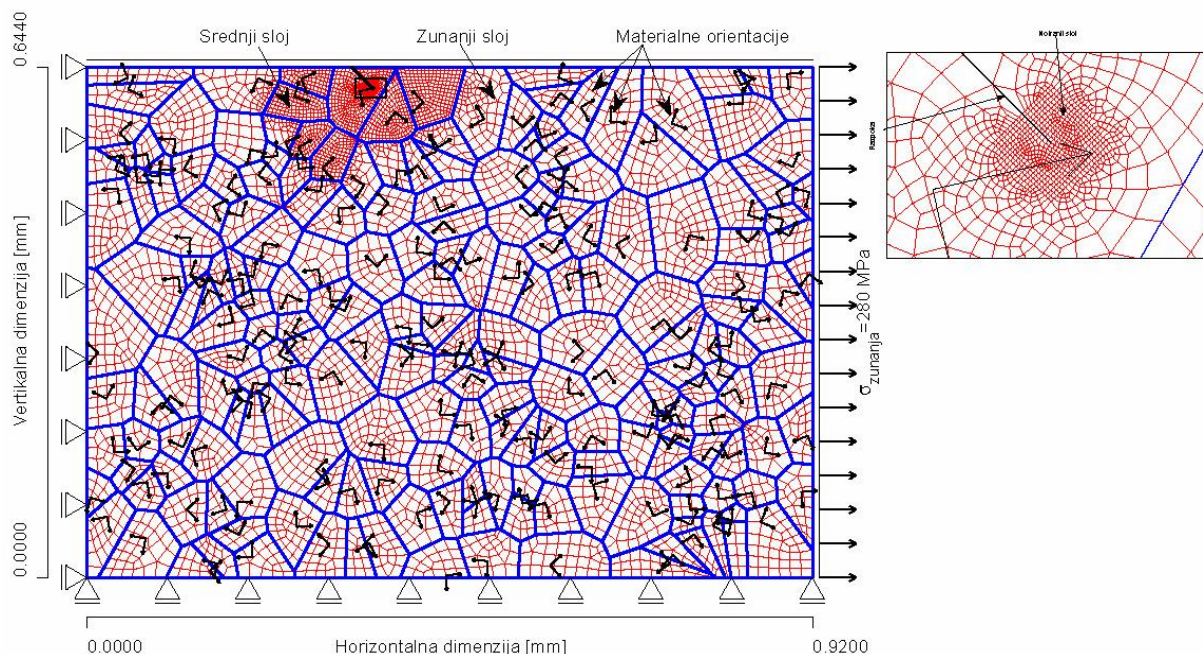


Slika 13 Drsne ravnine ploskovno centrirane kubične strukture ter razpoka pri $\alpha=0^\circ$

Slika 14 a prikazuje kote med dvema drsnima ravninama, ki sta lahko aktivni v ravnini x-y pri takšnem zasuku kristalne rešetke, kot ga prikazuje Slika 13 in ravnino, v kateri je razpoka. Dodani sta še smeri največjih strižnih napetosti (45°). Slika 14 b definira merski točki v neposredni bližini vrha razpoke, v katerih odčitamo parametra NOR (normalno odpiranje razpoke, CTOD=Crack Tip Opening Displacement) in POR (prečno odpiranje razpoke, CTSD=Crack tip Sliding Displacement).



Slika 14 a) Koti med drsnimi ravninami in ravnino razpoke pri $\alpha=0^\circ$ in
b) definicija NOR in POR

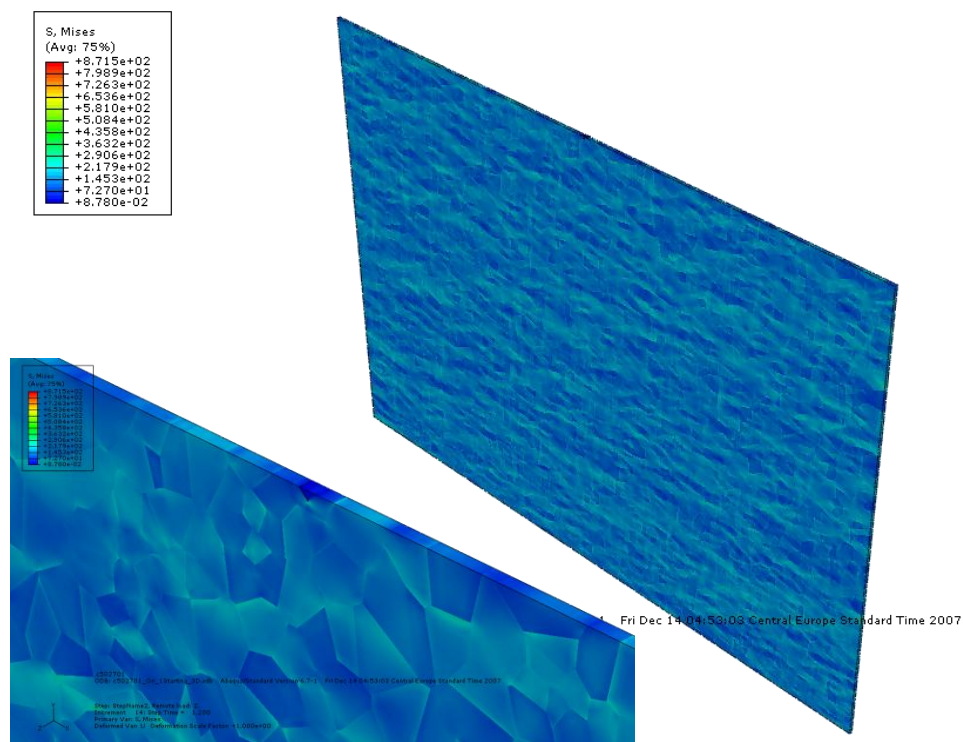


Slika 15 Model razpoke s kristalnimi zrnji, mrežo končnih elementov in makroskopskimi robnimi pogoji

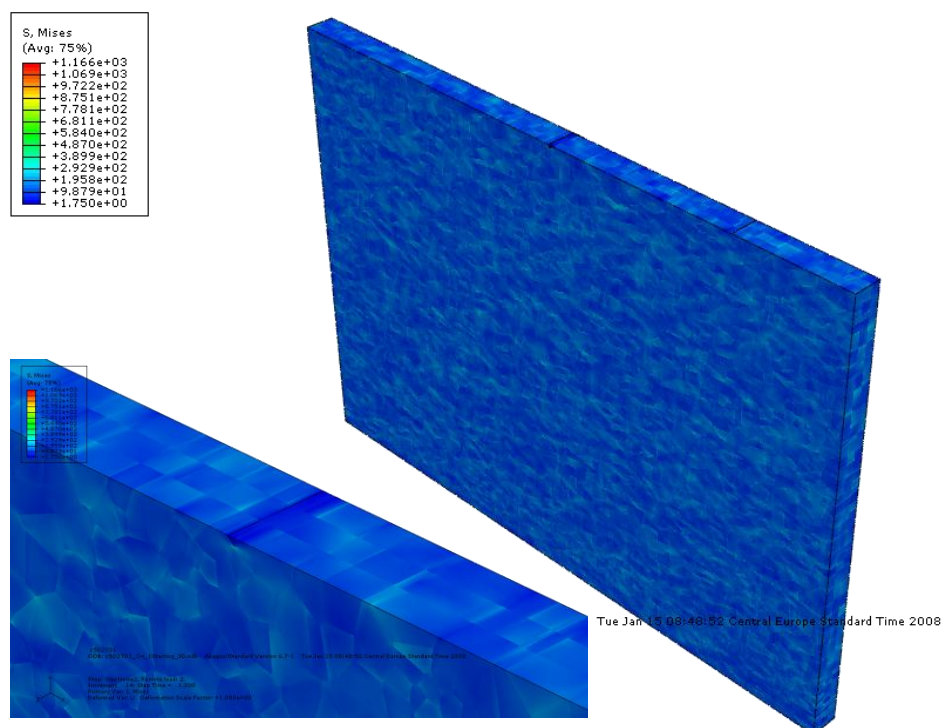
3.9 Razvoj v bližnji prihodnosti

Med najpomembnejše razvojne smeri večnivojskega modela IJS, ki jih načrtujemo v prihodnosti sodijo:

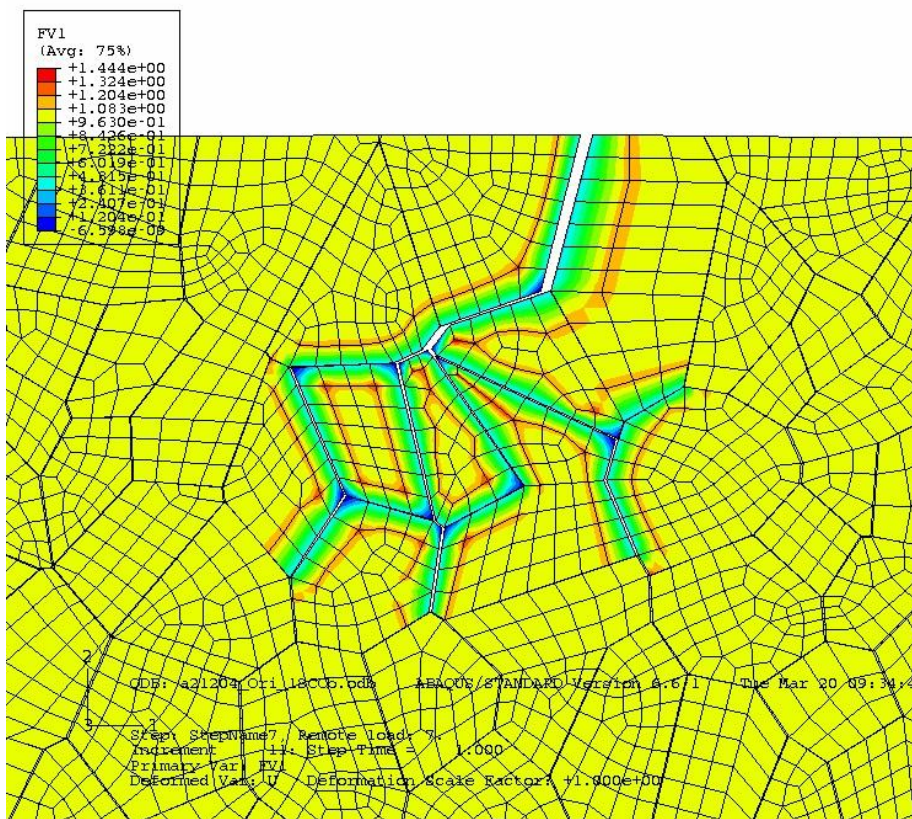
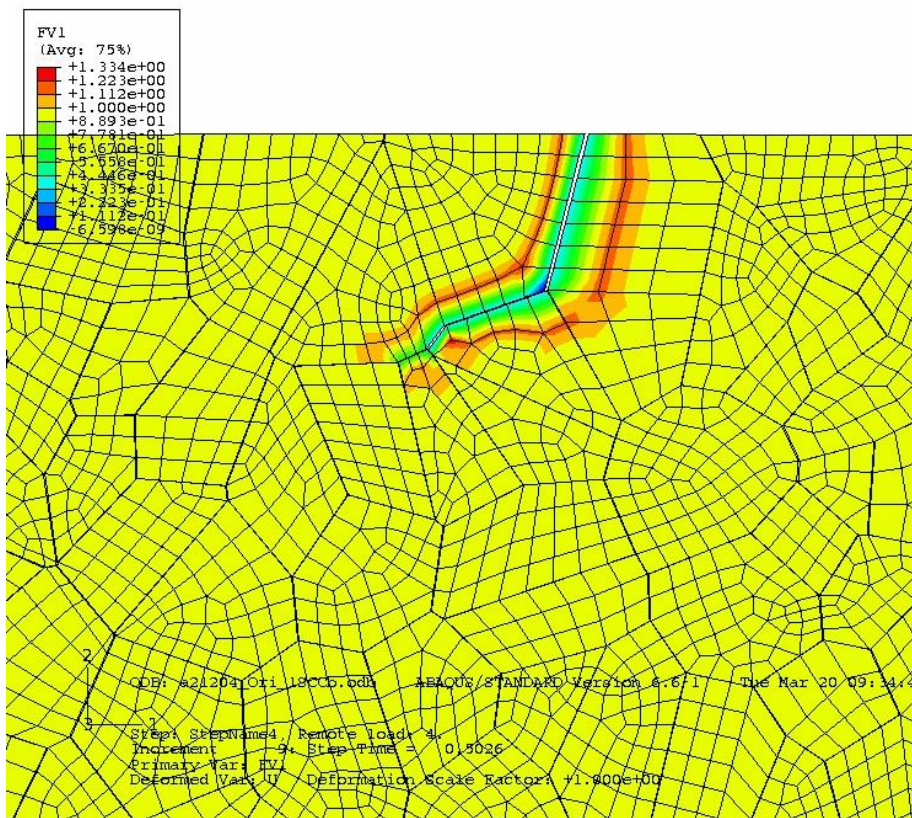
- Modeliranje v več dimenzijah:
 - Ploskovni modeli s polno 3-D orientacijo materialov. V ta namen je potrebno ploskovne probleme modelirati vsaj z eno plastjo prostorskih končnih elementov (Slika 16)
 - Prostorski modeli. Razmeroma enostavno možnost predstavlja modeliranje ploskovnega problema z več plastmi končnih elementov po debelini, pri čemer vsaki plasti pripišemo drugačno naključno orientacijo kristalne rešetke (Slika 17). Popolnoma prostorska rešitev pa je seveda modeliranje s prostorskimi Voronojevimi mozaiki, ki pa žal trenutno zahtevajo prevelike računalniške zmogljivosti.
- Razširitev modelov kristalne plastičnosti:
 - Bolj fizikalno podprti modeli utrjevanja, po možnosti vsaj s posrednim upoštevanjem dinamike dislokacij. Taka rešitev bi model razširila za še en velikostni nivo.
 - Razširitev konstitutivnega modela za ciklične obremenitve. Dobršen del tega dela je predviden v okviru projekta s CEA, ki že poteka.
- Modeliranje razpok
 - Dinamično modeliranje napredovanja medkristalnih razpok (Slika 18). Dobršen del tega dela je predviden v okviru projekta z Univerzo Manchester, ki že poteka.
- Preverjanje simulacijskih modelov z rezultati poskusov (sodelovanje z Inštitutom za fiziko Češke akademije znanosti).



Slika 16 Ploskovni problem, modeliran z eno plastjo prostorskih končnih elementov



Slika 17 Ploskovni problem, modeliran z več plastmi prostorskih končnih elementov



Slika 18 Primer modeliranja dinamičnega napredovanja medkristalnih razpok



4 IZBRANI PRIMERI UPORABE V JEDRSKI TEHNIKI

V nadaljevanju podrobneje predstavljamo primere uporabe večnivojskih metod v jedrskih tehniki. Pri tem najbolj podrobno obdelamo rezultate, ki smo jih dobili z večnivojskim modelom IJS pri delu na industrijsko podprtih projektih:

- Reprezentativni volumski element [13], poglavje 4.1, Evropski projekt LISSAC (Limit Strains for Severe Accidents, 5. okvirni program EURATOM).
- Mezoskopska polja napetosti in specifičnih deformacij [13], poglavje 4.2, Evropski projekt LISSAC (Limit Strains for Severe Accidents, 5. okvirni program EURATOM).
- Korelacijske dolžine [12], Poglavje 4.3, Evropski projekt LISSAC (Limit Strains for Severe Accidents, 5. okvirni program EURATOM, sofinanciranje MVŽŽŠ in NEK d.o.o.).
- Ciklično obremenjevanje [52], poglavje 4.4, Evropski projekt THERFAT (Thermal fatigue evaluation of piping T joints, 5. okvirni program EURATOM).
- Kratke medkristalne razpoke [11], poglavje 4.5, (Sodelovanje s Forschungszentrum Karlsruhe in Univerzo v Manchesteru).
- Kratke transkristalne razpoke [14], [15], [16], poglavje 4.6, (sodelovanje z JRC Petten in CEA).

V literaturi je najti tudi druge primere uporabe večnivojskih metod v industriji (npr. [3], [6] in [7]), ki smo jih zbrali v dodatkih k temu poročilu.



4.1 Reprezentativni volumski element (Evropski projekt LISSAC)

Reprezentativni volumski element je definiran kot minimalno število zrn v skupku, nad katerim vpliv začetne naključne usmerjenosti kristalnih zrn in makroskopskih robnih pogojev na makroskopsko vedenje postanejo zanemarljivi (glej tudi poglavje 3.6). Velikost RVE smo ocenili za dve različni obremenitvi, ki v makroskopskem smislu predstavljata tipično obnašanje materiala v območju elastične in plastične deformacije:

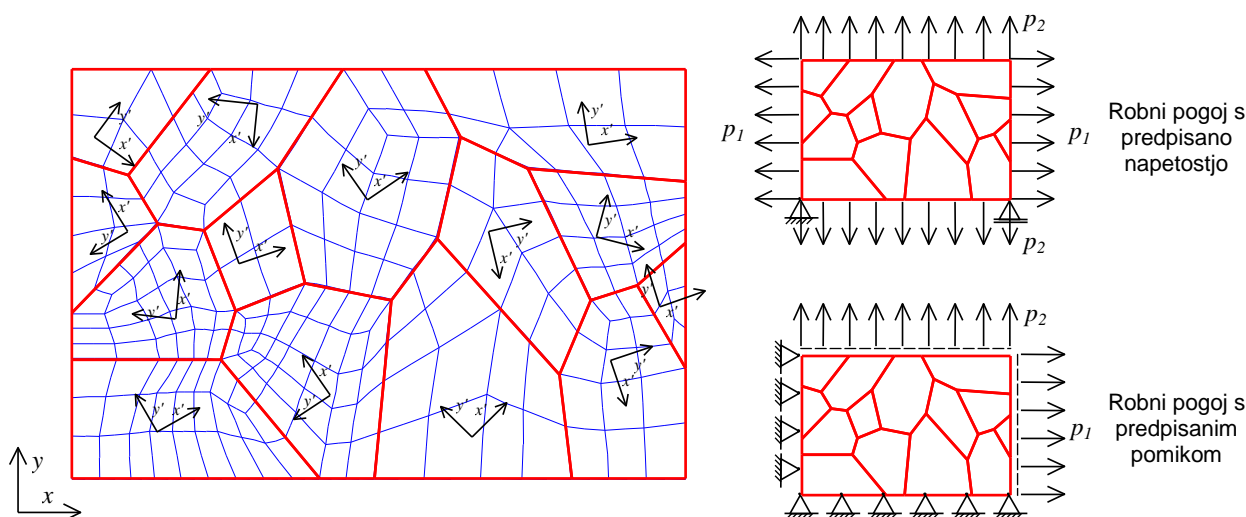
- $p_1 = 200$ MPa in $p_2 = 100$ MPa (ustreza v povprečju $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0,055\%$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 102$ MPa)
- $p_1 = 1430$ MPa in $p_2 = 715$ MPa. ($\langle \epsilon_{eq} \rangle = 5,0\%$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 641$ MPa)

Velikost RVE smo ocenili s polikristalnimi skupki z 14, 23, 53, 110 in 212 zrn (Tabela 4). Velikost povprečnega kristalnega zrna v vseh polikristalnih skupkih, ki so bili uporabljeni v analizah, je 0,023 mm, kar je v skladu z metalografskimi raziskavami izbranega materiala [36].

Tabela 4 Velikost polikristalnih skupkov v odvisnosti od števila zrn v skupku

število zrn v polikristalnem skupku	Velikost polikristalnega skupka [mm×mm]
14	0,10 × 0,07
23	0,13 × 0,09
53	0,20 × 0,14
110	0,28 × 0,20
212	0,40 × 0,28

Slika 19 prikazuje primer Voronojevega mozaika z vrisanimi usmerjenostmi kristalne rešetke, mrežo končnih elementov in robnimi pogoji.



Slika 19 Primer Voronojevega mozaika z vrisanimi smermi kristalne rešetke, mrežo končnih elementov in robnimi pogoji

V računskih primerih smo uporabili le po eno realizacijo Voronojevega mozaika za izbrano velikost polikristalnega skupka. Vsaki velikosti polikristalnega skupka pa smo pripisali po 30 različnih naključnih usmerjenosti kristalnih rešetk, vsako z na robu predpisano napetostjo in

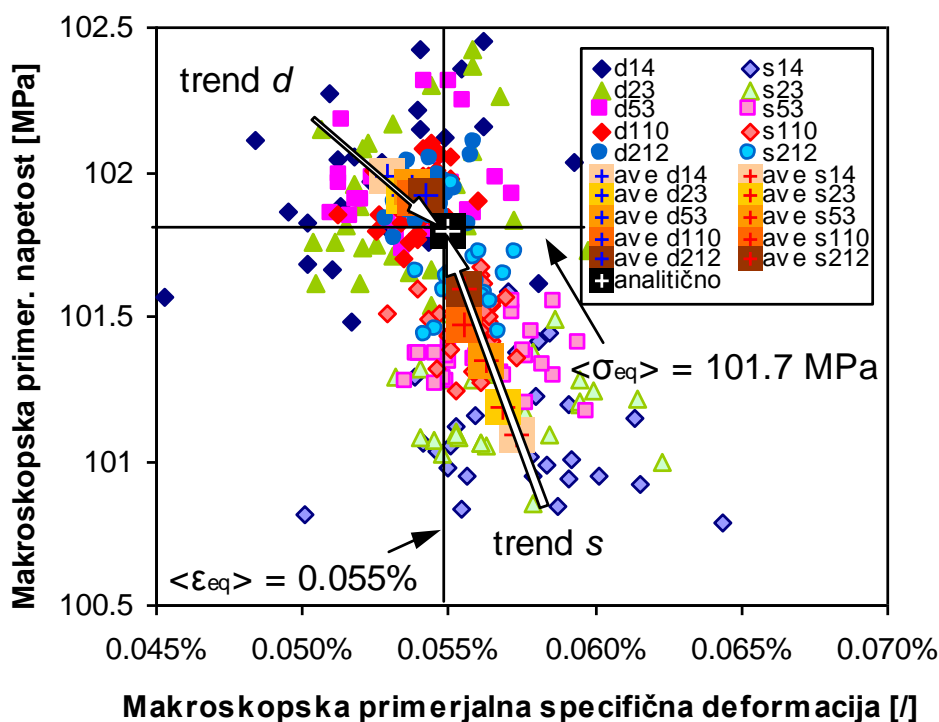


pomikom (Slika 19). To je posledica opažanj, da je variabilnost zaradi oblik kristalnih zrn relativno majhna v primerjavi z variabilnostjo zaradi usmerjenosti zrn [33].

V nadaljevanju povzemamo najpomembnejše rezultate. Več podrobnosti je mogoče najti v [41]. Rezultati predstavljajo del prispevka IJS k evropskemu projektu LISSAC [44], [45] in [47].

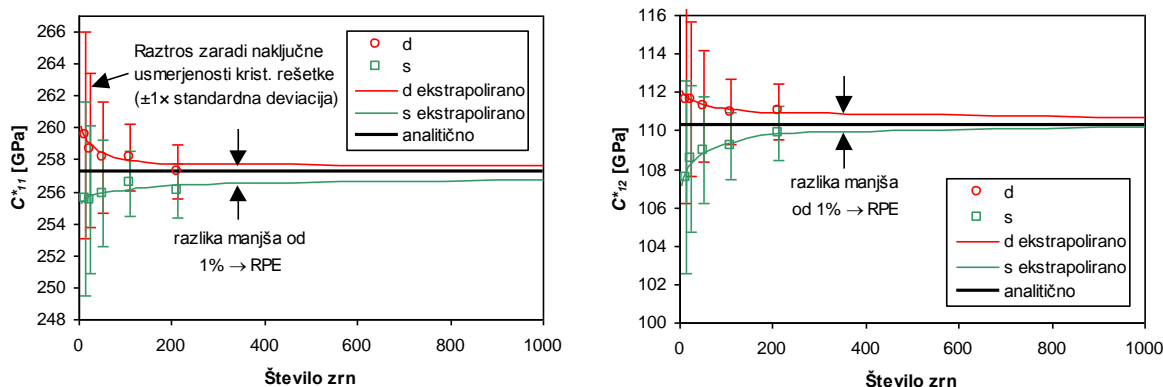
4.1.1 RVE v elastičnem področju

Slika 20 prikazuje raztros makroskopskih primerjalnih napetosti in specifičnih deformacij polikristalnih skupkov z različnim številom zrn obremenjenih z elastično obremenitvijo. Oznake *d* se nanašajo na robne pogoje s predpisanim pomikom, oznake *s* za robne pogoje s predpisano napetostjo, oznake *ave* na povprečno vrednost prek 30 različnih usmerjenosti (različne za oba robna pogoja). Sledi številka, ki označuje število zrn v polikristalnemu skupku.



Slika 20 Raztros makroskopskih primerjalnih specifičnih deformacij in napetosti v elastičnem območju ($p_1 = 200 \text{ MPa}$ in $p_2 = 100 \text{ MPa}$)

Slika 20 jasno kaže: (1) zmanjševanje raztosa in (2) jasen trend povprečnih vrednosti k analitični rešitvi s povečevanjem števila zrn v polikristalnemu skupku in sicer ne glede na uporabljene makroskopske robne pogoje. Analitična rešitev velja za izotropni in makroskopsko homogen material $E = 210 \text{ GPa}$ in $\nu = 0,30$ pri $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0,055\%$ in $\langle \sigma_{eq} \rangle = 101,8 \text{ MPa}$. Predpisani pomiki po pričakovanju dajejo bolj tog odziv skupka v primerjavi s predpisanimi napetostmi.



Slika 21 Konvergenca komponent makroskopske togostne matrike C^*_{11} (levo) in C^*_{12} (desno) v odvisnosti od števila zrn v polikristalnem skupku pri $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0,055\%$

Dve komponenti makroskopske matrike elastičnosti C^*_{11} (C_{iiii} , enačba (1)) in C^*_{12} (C_{iijj} , enačba (1)) sta bili uporabljeni za oceno velikosti RVE v elastičnem območju (makroskopska primerjalna specifična deformacija $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0,055\%$). Slika 21 prikazuje neodvisni komponenti makroskopske togostne matrike C^*_{11} (levo) in C^*_{12} (desno) ter njun raztros v odvisnosti od velikosti polikristalnega skupka. Robni pogoji s predpisanim pomikom oziroma napetostjo so označeni z *d* oziroma *s*. Ekstrapolacijo smo izvedli s polinomom tretje stopnje [33].

Zniževanje raztrosa zaradi naraščanja velikosti polikristalnega skupka je jasno vidno (Slika 21). Opazna je tudi izrazita težnja k analitični rešitvi. Velikost RVE (pri ostanku 1%) ocenimo na 372 zrn, kar ustreza polikristalnemu skupku velikosti 0,53 mm × 0,38 mm.

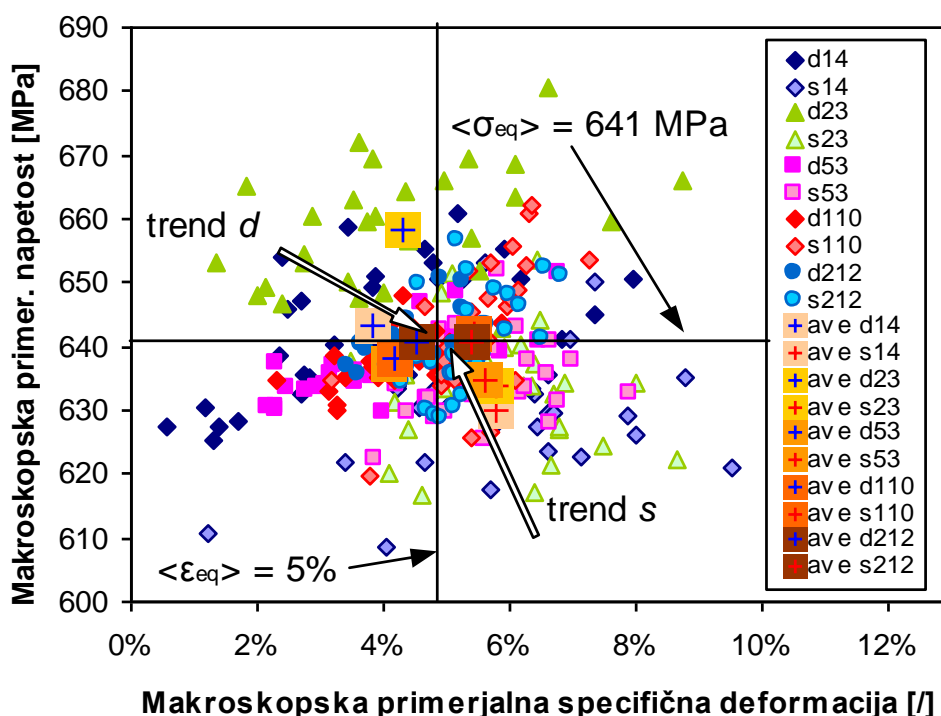
Tabela 5 prikazuje ocenjene velikosti polikristalnih skupkov pri različnih ostankih.

Tabela 5 Potrebna velikost polikristalnega skupka, da je dosežen željen ostanek v območju elastične deformacije

Ostanek (razlika v odzvu materiala)	Število zrn v polikristalnem skupku	Velikost polikristalnega skupka [mm×mm]
1% (predpostavljen RVE)	372	0,52×0,37
2%	84	0,25×0,18
5%	16	0,11×0,08
10%	3	0,05×0,03

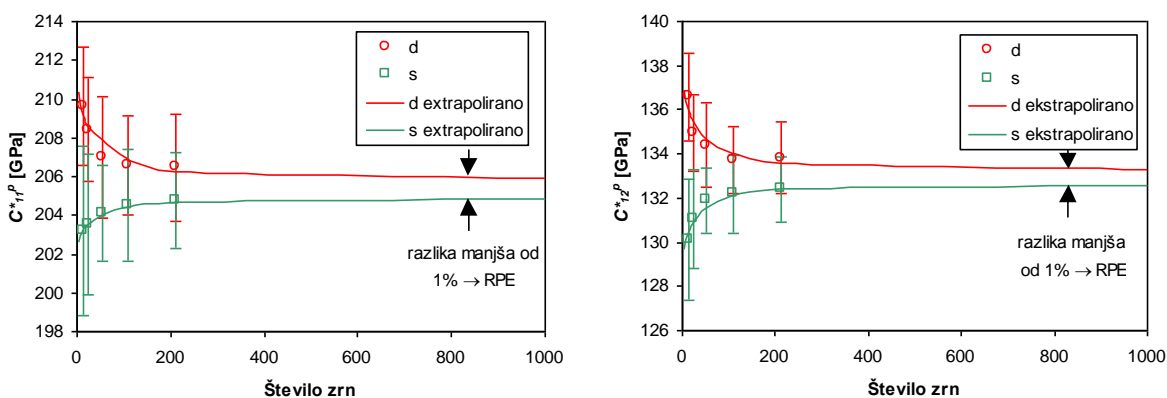
4.1.2 RVE v plastičnem področju

Slika 22 prikazuje raztros makroskopskih primerjalnih napetosti in specifičnih deformacij na polikristalnih skupkih z različnim številom zrn obremenjenih s plastično obremenitvijo. Oznake *d* se nanašajo na robne pogoje s predpisanim pomikom, oznake *s* za robne pogoje s predpisano napetostjo, oznake *ave* na povprečno vrednost prek 30 različnih usmerjenosti (različne za oba robna pogoja). Sledi številka, ki označuje število zrn v polikristalnemu skupku.



Slika 22 Raztros makroskopskih primerjalnih specifičnih deformacij in napetosti v plastičnem območju ($p_1 = 1430 \text{ MPa}$ in $p_2 = 715 \text{ MPa}$)

Opažanja glede raztrosa v območju elastičnih deformacij (Slika 20) so v kvalitativnem smislu veljavna tudi za območje plastične deformacije (Slika 22): (1) zmanjševanje raztrosa, (2) jasen trend h skupnemu povprečju ob povečevanju števila zrn v skupku in (3) bolj tog odziv robnega pogoja s predpisanim pomikom v primerjavi z robnim pogojem s predpisano napetostjo.



Slika 23 Konvergenca komponent makroskopske togostne matrike C_{11}^{*P} (levo) in C_{12}^{*P} (desno) v odvisnosti od števila zrn v polikristlanem skupku $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 5,0\%$

Analične rešitve za ekvivalenten homogen material ni bilo mogoče priskrbeti. Raztros je večji kot v območju elastične deformacije, kar lahko pripišemo zelo nehomogenim mezoskopskim poljem (kot je prikazano v poglavju 4.2). Znatno delež skupka ostane znotraj območja elastične deformacije, čeprav makroskopska primerjalna specifična deformacija dosega 5%.



Ocena velikosti RVE v območju plastične deformacije je bila izvedena enako kot v območju elastične deformacije (poglavje 3.3). Makroskopska primerjalna specifična deformacija je bila 5%. Slika 23 prikazuje komponenti makroskopske togostne matrike C_{11}^* (levo, C_{iiii} , enačba (1)) in C_{12}^* (desno, C_{ijij} , enačba (1)) ter njun raztros v odvisnosti od velikosti polikristalnega skupka. Razvidna je težnja k skupni povprečni vrednosti in manjšemu raztrosu rezultatov ob naraščajočem številu zrn. RVE je tako ocenjen na 880 zrn, kar odgovarja polikristalnemu skupku velikosti $0,81 \text{ mm} \times 0,58 \text{ mm}$.

Tabela 6 prikazuje ocenjene velikosti polikristalnih skupkov pri različnih ostankih.

Tabela 6 Potrebna velikost polikristalnega skupka, da je dosežen željen ostanek v območju plastične deformacije

Ostanek (razlika v odzvu materiala)	Število zrn v polikristalnem skupku	Velikost polikristalnega skupka [mm×mm]
1% (predpostavljen RVE)	880	0,81×0,58
2%	224	0,41×0,29
5%	37	0,17×0,12
10%	10	0,09×0,06

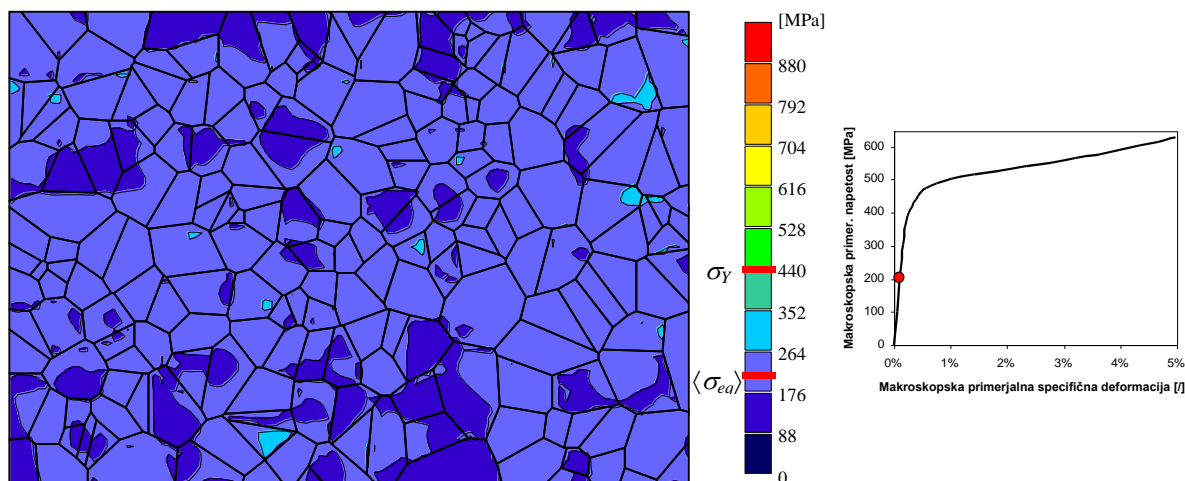


4.2 Mezoskopska polja napetosti in specifičnih deformacij

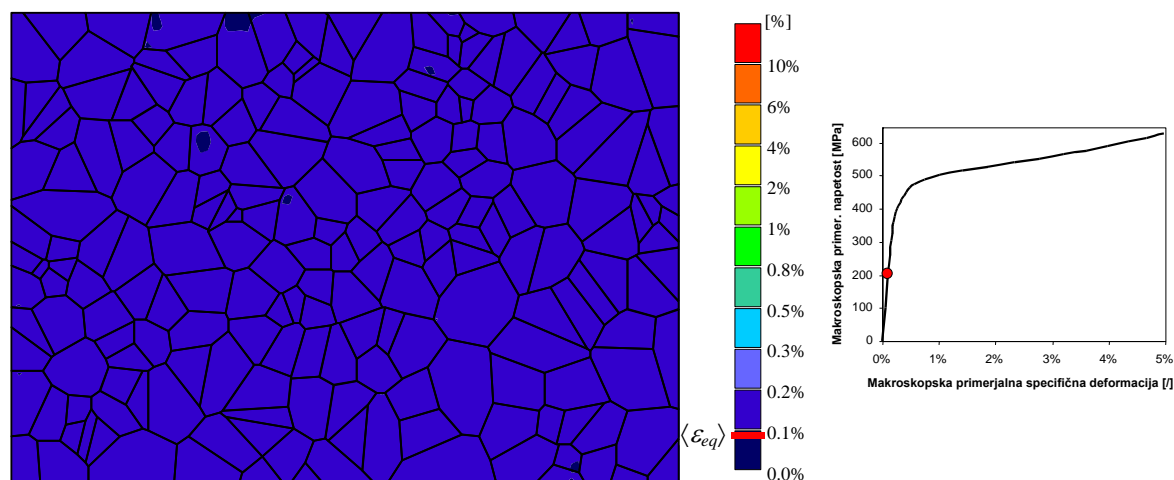
Naključno oblikovana in usmerjena kristalna zrna v smeri glavne obremenitve izkazujejo različno veliko togost oz. podajnost, ki hkrati z zahtevano kompatibilnostjo premikov na kristalnih mejah med obremenitvijo materiala povzročijo nehomogena napetostna in deformacijska polja.

V nadaljevanju predstavljamo izbrane primere mezoskopskih polj napetosti in specifičnih deformacij za reprezentativen primer polikristalnega skupka z 212 zrni z na robu predpisanimi pomiki. Pri računskih primerih smo uporabili enake podatke, kot v poglavju 4.1. Več podrobnosti je mogoče najti v [41]. Rezultati predstavljajo del prispevka IJS k evropskemu projektu LISSAC [44], [45] in [47].

Slika 24 prikazuje primerjalno (Mises) mezoskopsko napetost v skupku, ki smo ga obremenili z dvoosno obremenitvijo $p_1 = 420$ MPa in $p_2 = 210$ MPa, $\langle \langle \epsilon_{eq} \rangle \rangle = 0,1\%$ in $\langle \sigma_{eq} \rangle = 202,3$ MPa. Slika 25 prikazuje pripadajoče mezoskopsko polje primerjalne specifične deformacije.



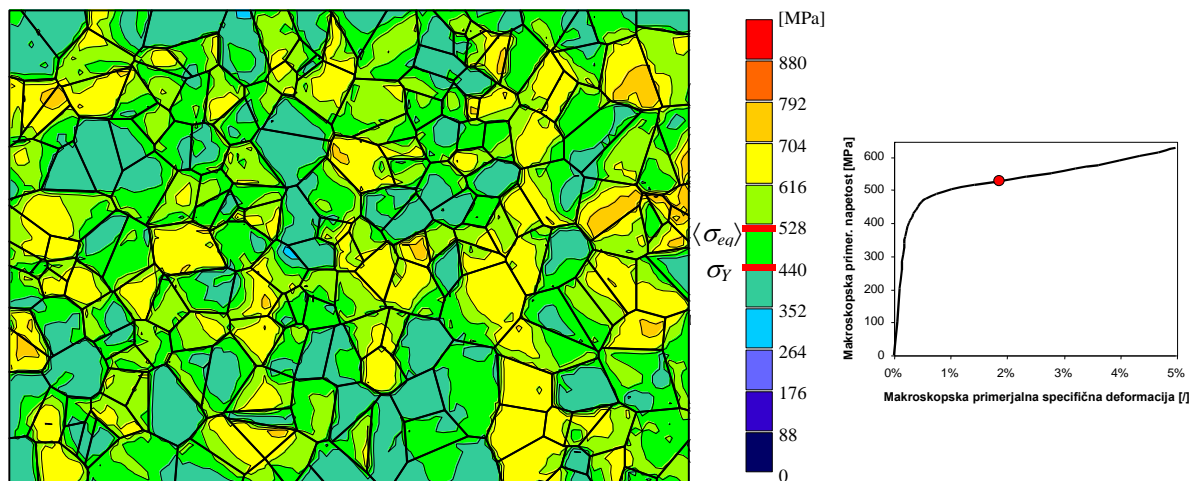
Slika 24 Polje primerjalne mezoskopske napetosti ($p_1 = 420$ MPa in $p_2 = 210$ MPa)



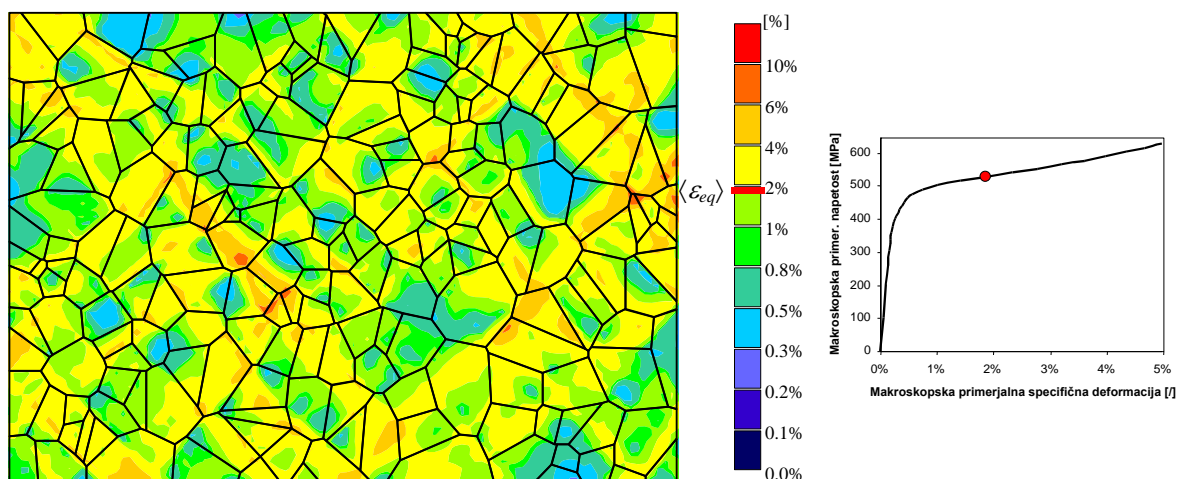
Slika 25 Polje primerjalne mezoskopske specifične deformacije ($p_1 = 420$ MPa in $p_2 = 210$ MPa)



Slika 26 prikazuje primerjalno (Mises) mezoskopsko napetost v skupku, ki smo ga obremenili z dvoosno obremenitvijo $p_1 = 1176$ MPa in $p_2 = 588$ MPa ($\langle \varepsilon_{eq} \rangle = 1,9\%$ in $\langle \sigma_{eq} \rangle = 526,6$ MPa). Slika 27 prikazuje pripadajoče mezoskopsko polje primerjalne specifične deformacije.



Slika 26 Polje primerjalne mezoskopske napetosti ($p_1 = 1176$ MPa in $p_2 = 588$ MPa)



Slika 27 Polje primerjalne mezoskopske specifične deformacije ($p_1 = 1176$ MPa in $p_2 = 588$ MPa)

Na vseh slikah v tem poglavju je razločno vidna mezoskopska heterogenost polj primerjalnih napetosti in primerjalnih specifičnih deformacij. Največje razlike med lokalno (mezoskopsko) in globalno (makroskopsko) specifično deformacijo so v plastičnem območju, Slika 27. Območja z veliko lokalno specifično deformacijo so združena v strižne pasove, ki predstavljajo glavne smeri toka materiala znotraj polikristalnega skupka (Slika 27). Lokalne specifične deformacije znotraj strižnih pasov so tudi do 5-krat večje kot globalne specifične deformacije. Strižni pasovi se tipično razvijejo na mejah med kristalnimi zrn in so manj izraziti, ko tečejo skozi zrna. Pojavijo se približno v smeri pribl. 45° glede na x-os. Tipična razdalja med dvema strižnima pasovoma je nekoliko večja od velikosti 1 zrna (približno 0,04 mm).

Polja primerjalnih napetosti (Slika 24, Slika 26) prav tako kažejo lokalne koncentracije, vendar so te manj izrazite v primerjavi s polji primerjalnih specifičnih deformacij (Slika 25, Slika 27). Razlike med lokalnimi in globalnimi napetostmi so do 60%. Lokalne koncentracije napetosti in



specifičnih deformacij, ki so neposredna posledica kristalne strukture materiala, lahko pomembno prispevajo k razvoju lokalnih poškodb materiala in tako k nastanku in razvoju mikrorazpok. Tok materiala v strižnih pasovih pa lahko povzroči večjo verjetnost nastanka poškodb v materialu zaradi utrujanja le-tega.

Visoki gradienti napetosti na mejah med kristalnimi zrni in strižni pasovi potrjujejo pravilnost neposrednega modeliranja zrnate strukture in kristalnih mej.

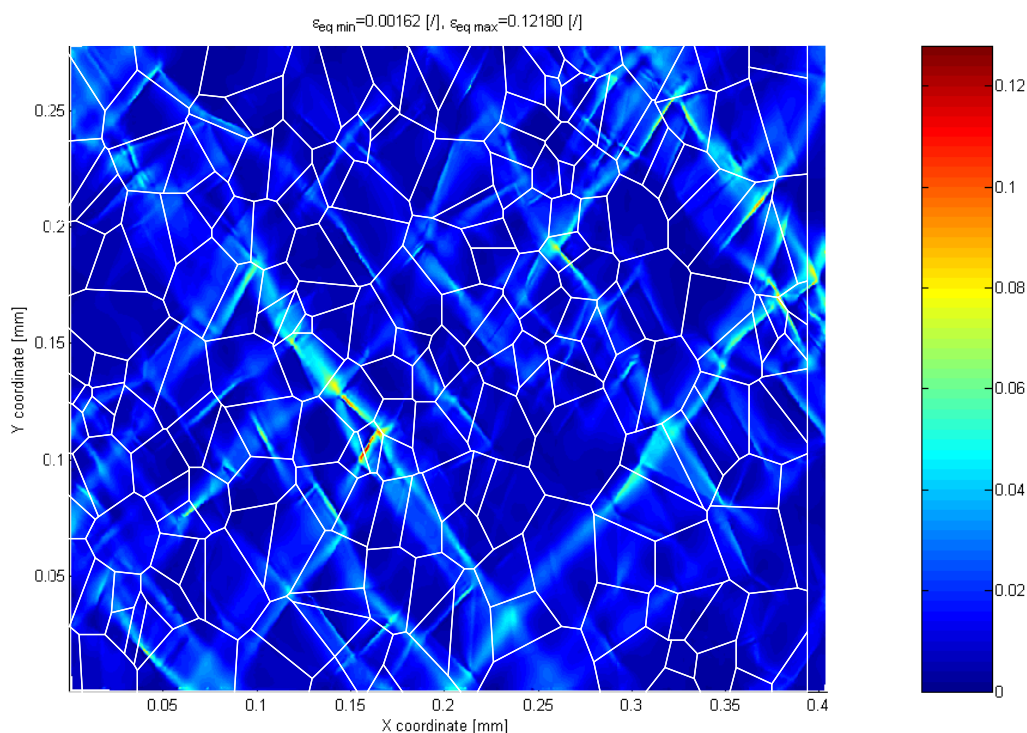


4.3 Korelacijske dolžine (Evropski projekt LISSAC)

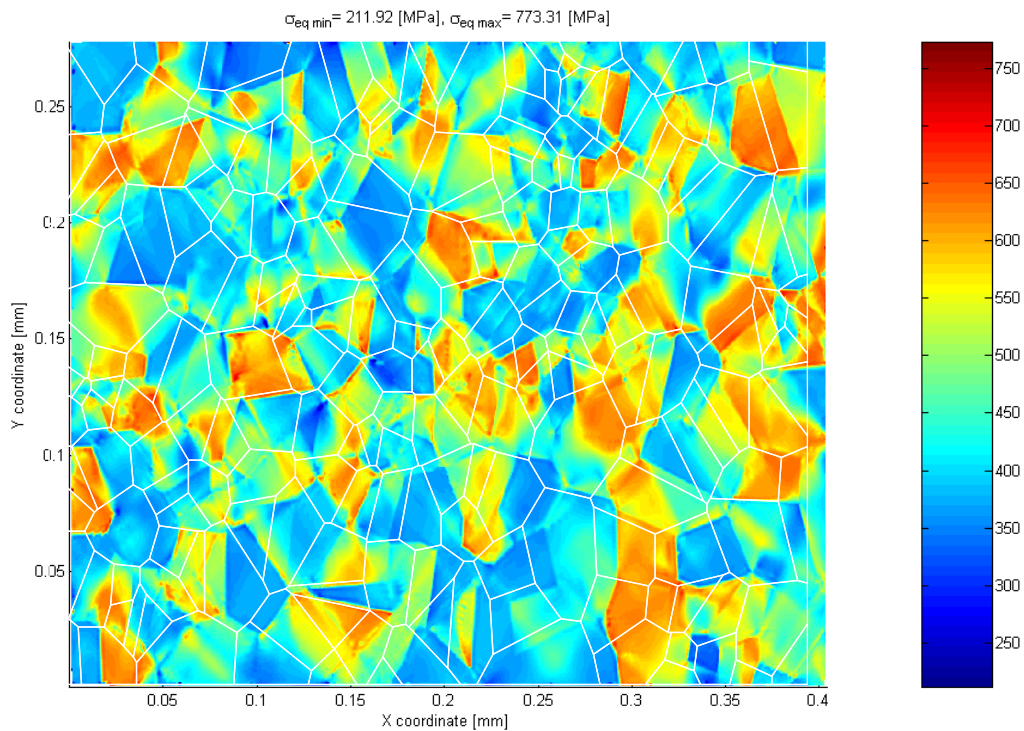
Izračun korelacijske dolžine temelji na mezoskopskem materialnem modelu [13], [41], katerega rešujemo z metodo končnih elementov. Mezoskopski model je za oceno korelacijske dolžine primeren zato, ker vsebuje izrecno modelirane materialne nehomogenosti - strukturo kristalnih zrn z naključnimi oblikami in usmeritvami kristalnih rešetk.

Kot naključni proces lahko izberemo bodisi napetostno bodisi deformacijsko polje mezoskopskega modela. Ti dve veličini lahko namreč predstavljata primarni spremenljivki, nudita pa tudi primerno fizikalno podlago za razlago rezultatov. Izračun korelacijske dolžine za izvedene veličin, npr. modul elastičnosti, je mogoče izvesti po enakem postopku. Statistično gledano lahko zaradi naključne zrnate strukture in različnih lokalnih odzivov napetostno in deformacijsko polje obravnavamo kot 2D naključno spremenljivko, katero lahko obravnavamo s statističnimi metodami (poglavje 3.7).

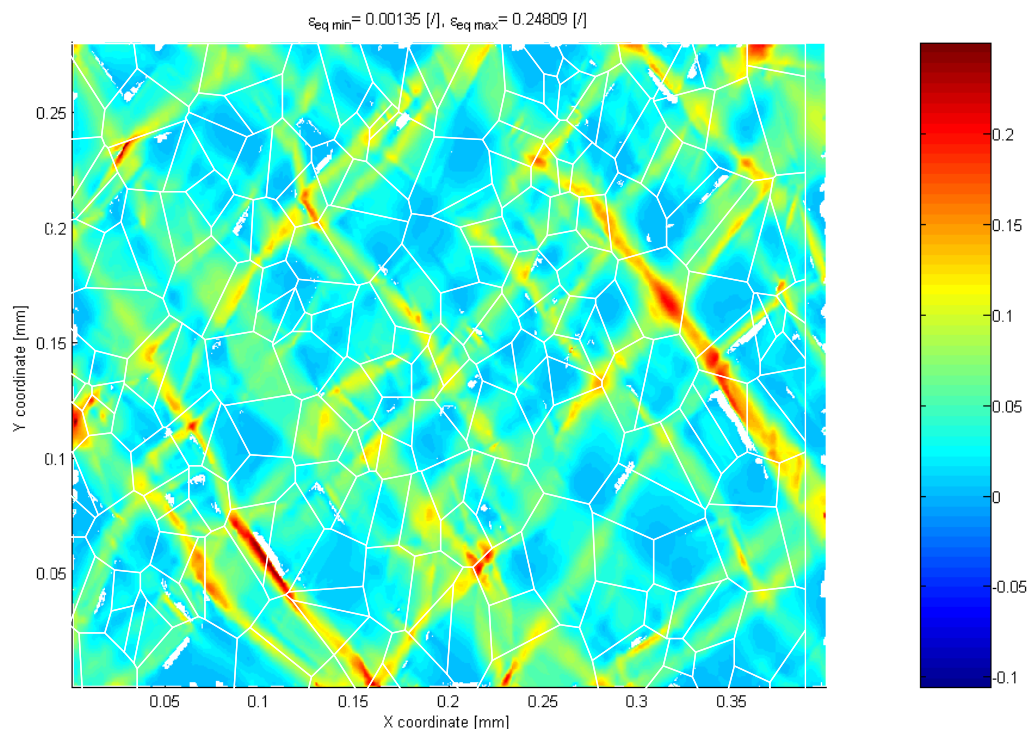
V nadaljevanju povzemamo najpomembnejše rezultate iz [49]. Rezultati predstavljajo del prispevka IJS k evropskemu projektu LISSAC [44], [45] in [47].



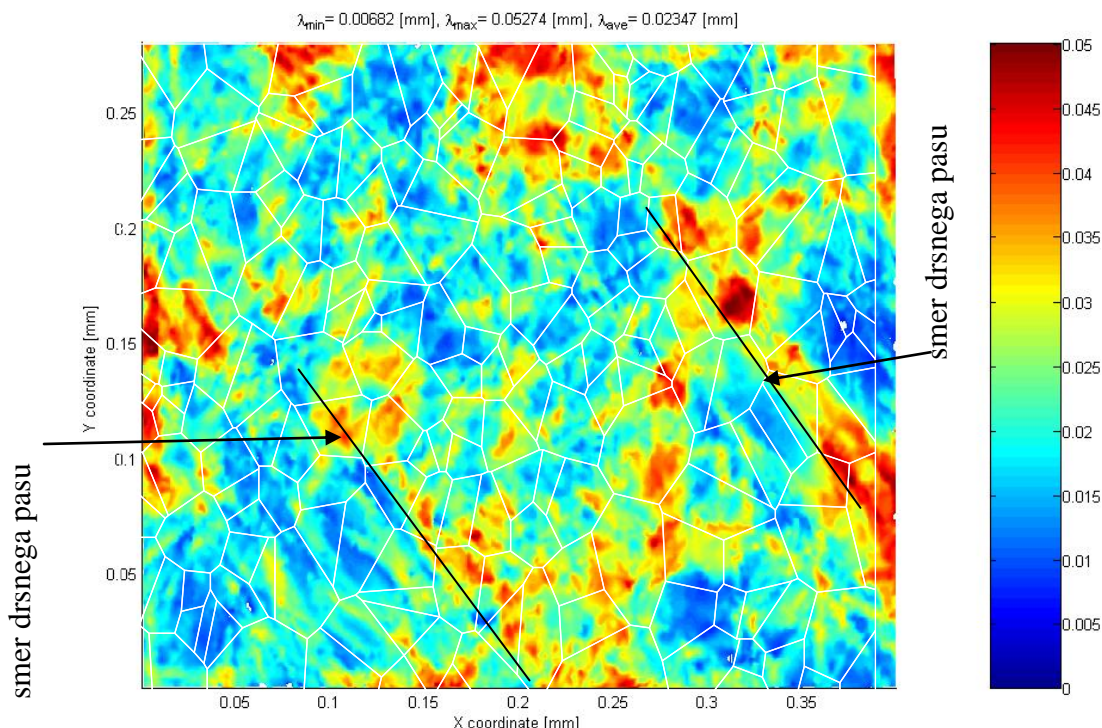
Slika 28 Razvoj drsnih pasov v mezoskopskem materialnem modelu



Slika 29 Vpliv zrnate strukture materiala na Misesovo napetost



Slika 30 Ekvivalentna deformacija ϵ_{eq} ; $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0.035$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 492.12$ MPa. Pasovi zdrsa so lepo vidni kot povišane vrednosti deformacije



Slika 31 Korelacijska dolžina pri: $\langle \epsilon_{eq} \rangle = 0.035$, $\langle \sigma_{eq} \rangle = 492.12 \text{ MPa}$

Slika 28 prikazuje primer razvoja deformacijskega polja. Meje kristalnih zrn so vrisane z belo barvo. Območja povečanih deformacij nakazujejo razvoj drsnih pasov, ki so posledica kristalografskega zdrsa v zrnih.

Slika 29 prikazuje pripadajoče napetostno polje. Jasno so vidne lokalne koncentracije napetosti, ki so posledica znate strukture. Z uporabo klasičnih homogenih materialnih modelov takih podrobnosti v odzivu materiala ne moremo modelirati.

Korelacijsko dolžino lahko v grobem razdelimo v tri območja. Dokler zunanja obremenitev povzroča samo elastične deformacije, je vrednost korelacijske dolžine konstantna in rahlo večja od povprečne velikosti kristalnega zrna. V območju ekvivalentne makroskopske napetosti med 270 in 500 MPa (Slika 30) vrednosti korelacijske dolžine fluktuirajo (Slika 31), na njih pa močno vpliva razvoj drsnih pasov. Z nadaljnjim naraščanjem zunanje obremenitve se vrednosti korelacijske dolžine izračunane iz deformacijskega polja zmanjšujejo, korelacijske dolžine izračunane iz napetostnega polja pa dosežejo najvišjo vrednost, nato pa se tudi te zmanjšajo. Iz prikazanih rezultatov lahko sklepamo, da je značilno območje vpliva nehomogenosti-kristalnega zrna približno enako povprečni velikosti kristalnega zrna (0.023 mm).



4.4 Ciklično obremenjevanje (Evropski projekt THERFAT)

Z večnivojskim modelom IJS je mogoče, vsaj v kvalitativnem smislu, oceniti tudi mezoskopska polja po več obremenitvenih ciklih. Na tak način lahko n.pr. vizualiziramo in napovemo trajne strižne pasove (persistent slip bands), ki so odločilni pri nastajanju utrujenostnih razpok.

V nadaljevanju povzemamo najpomembnejše rezultate iz študije, ki smo jo pripravili za projekt THERFAT [52]:

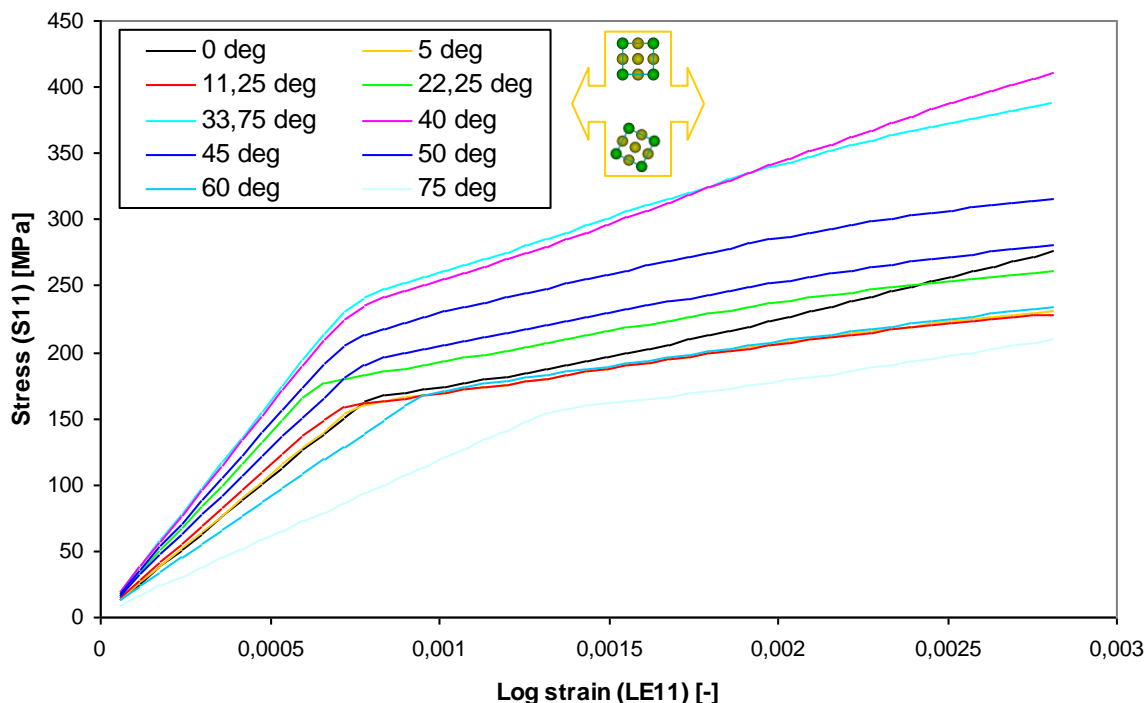
- Odziv monokristala pri monotoni (Slika 32) in ciklični (Slika 33) obremenitvi kot funkcija orientacije monokristala glede na smer obremenitve;
- Ujemanje makroskopskega odziva material v simulaciji in poskusu [38] (Slika 34);
- Lokalizacije specifičnih deformacij pri različnih sistemih naključnih orientacij (Slika 35, Slika 36) in
- Razvoj površinske hrapavosti v prvih nekaj obremenitvenih ciklih (Slika 37).

Rezultati predstavljajo del prispevka IJS k evropskemu projektu THERFAT [46].

4.4.1 Odziv monokristala

Čeprav je v navadi, da odziv monokristalov popišemo v sistemu strižne napetosti in kumulativnega zdrsa (poglavje 0), smo se v našem primeru odločili za sistem inženirskih napetosti in specifičnih deformacij. Sodimo, da bomo s tem načinom lažje razložili nekatere odzive polikristala v nadaljevanju.

Response of a monocrystal - uniaxial load 11

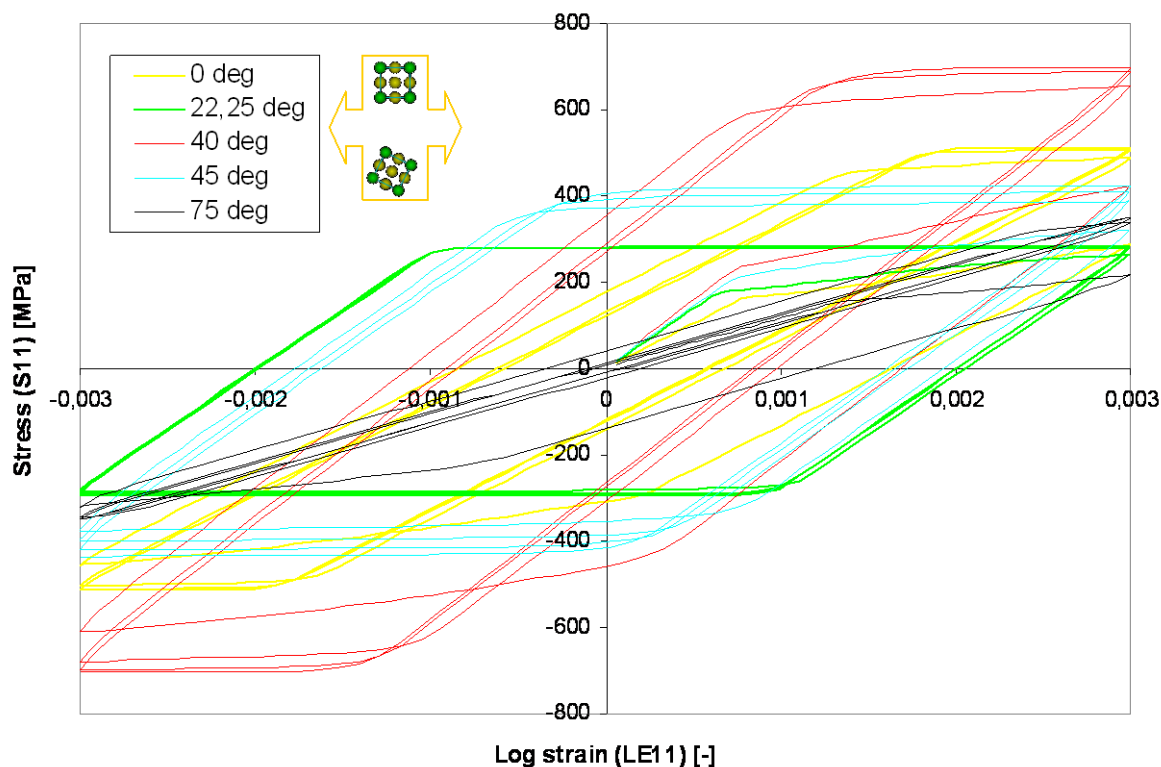


Slika 32 Odziv monokristala na monotono obremenitev



Anizotropnost močno vpliva na elastični in plastični odziv monokristala. Slika 32 prikazuje vpliv relativne usmeritve kristala glede na obremenitev pri monotoni obremenitvi. Slika 33 prikazuje vpliv relativne usmeritve kristala glede na obremenitev v prvih nekaj ciklih izmenične obremenitve. Kot obremenitve je izmerjen glede na kristalografsko os $\langle -101 \rangle$.

Dobljeni rezultati so pričakovani in v literaturi dobro znani. Za naš primer je pomembno spoznanje, da lahko v polikristalnem agregatu pričakujemo izrazito različne odzive posameznih kristalnih zrn, s tega pa tudi razmeroma velike deformacije, ki jih povzroča nekompatibilnost kristalnih zrn.



Slika 33 Odziv monokristala na nekaj ciklov izmenične obremenitve

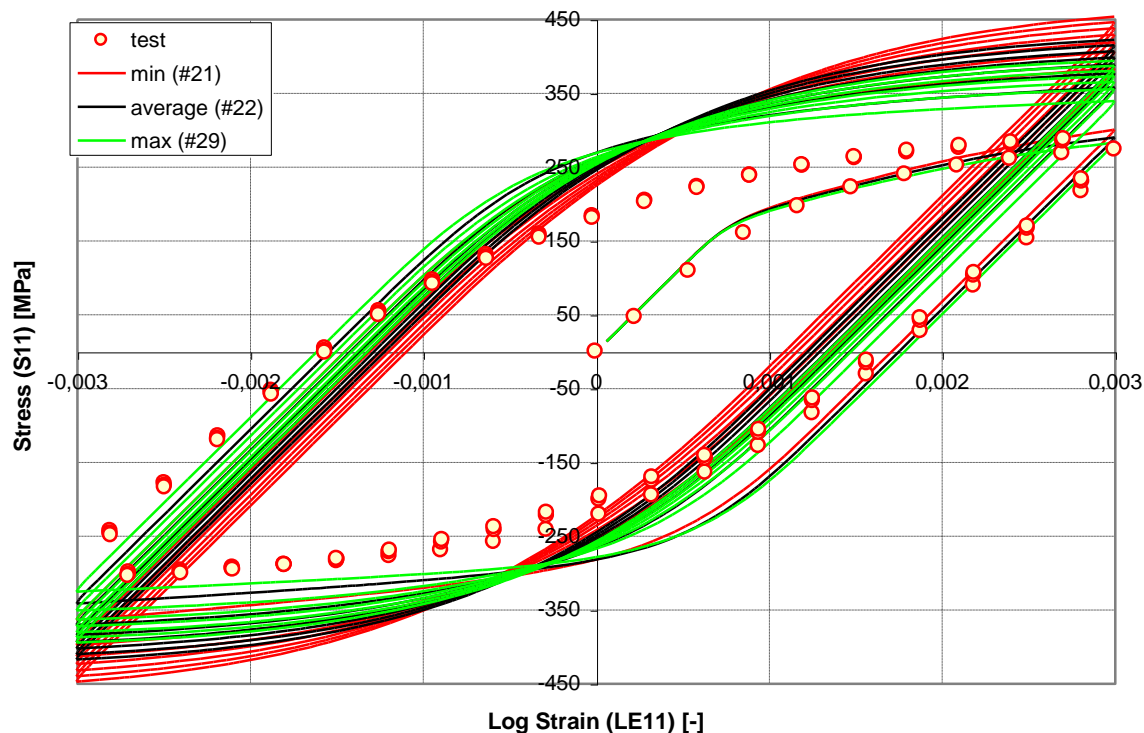
4.4.2 Odziv polikristala

Slika 34 prikazuje homogenizirani eno-osni odziv polikristala na makroskopskem nivoju. Z znaki so označeni rezultati meritev [38], tri krivulje pa prikazujejo odzive treh polikristalnih skupkov z različnimi orientacijami kristalnih zrn. Razlike med odzivi različnih skupkov so razmeroma majhne, saj velikost polikristalnega skupka zagotavlja razlike, manjše od 5% (glej poglavje 4.1).

Med prvim naraščanjem obremenitve je ujemanje med simulacijami in meritvami odlično. Med prvo razbremenitvijo pa se pojavi prva večja razlika, ki nakazuje, da simulacija podceni Bauschingerjev efekt (izguba spomina o utrjanju zaradi spremembe smeri obremenitve). Čeprav Bauschingerjevega efekta na mezoskopskem nivoju nismo modelirali, ga do neke mere lahko vseeno opazimo na makroskopskem nivoju. Pojav je v literaturi znan [39] in ga povezujemo z različno togostjo naključno orientiranih sosednjih kristalnih zrn.



Manjše dodatno utrjanje, ki se pojavlja v vseh naslednjih obremenitvenih ciklih, je neposredna posledica formulacije kristalne plastičnosti, ki jo uporabljamo. Ne glede na to ocenjujemo, da je model dovolj natančen za kvalitativno razpravo o mezoskopskih lokalizacijah deformacij in razvoju hrapavosti površine v nadaljevanju.

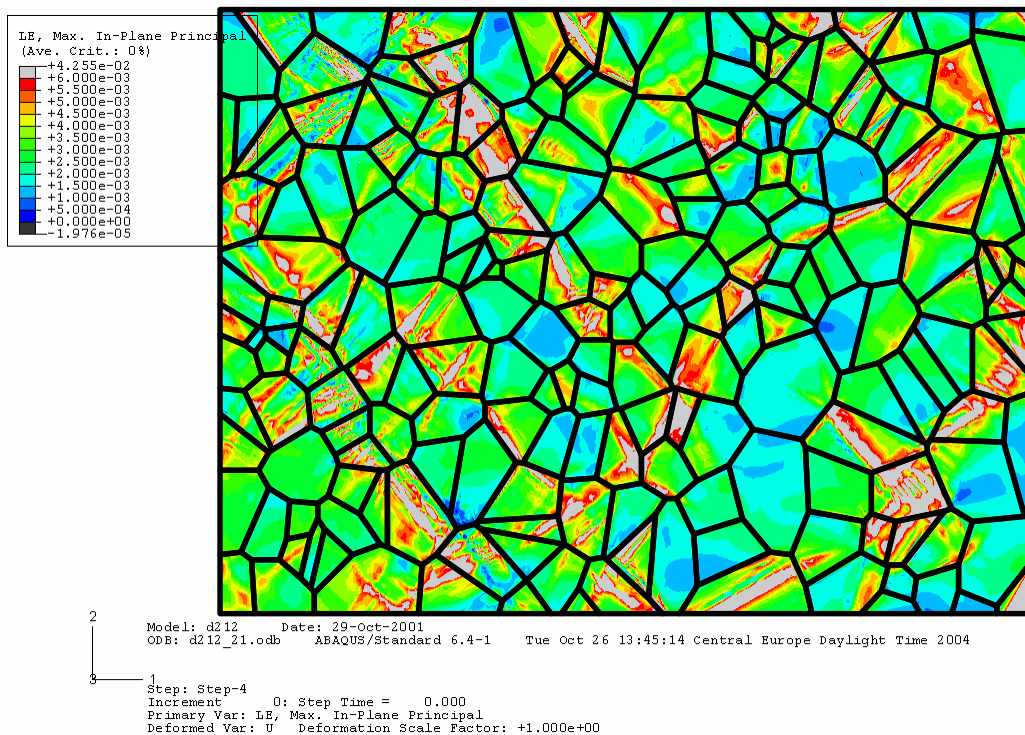


Slika 34 Odziv polikristala (212 zrn) na nekaj ciklov izmenične obremenitve

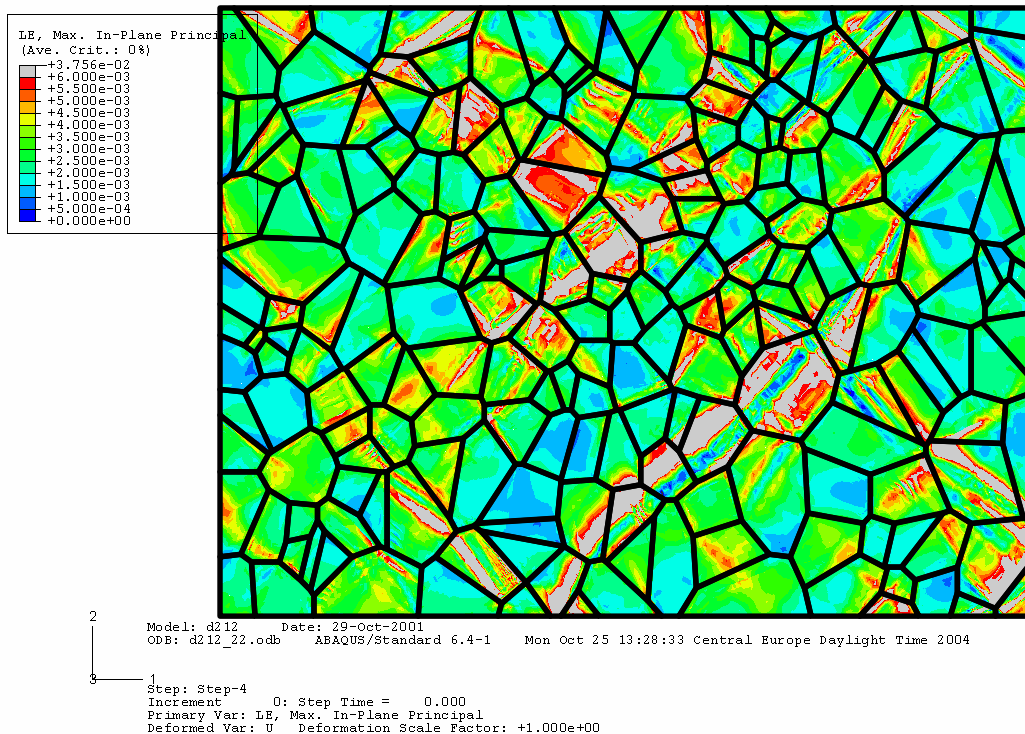
Lokalizacijo specifičnih deformacij v našem modelu povzročajo predvsem nekompatibilna naključno orientirana kristalna zrna. Lokalizacija se značilno pojavi v manj togih zrnih že med monotonim obremenjevanjem in se hitro razvijejo v strižne pasove, ki segajo preko več zrn. Povečevanje obremenitve, pa tudi razbremenitve in obremenjevanje v nasprotni smeri, položaja in oblike strižnih (drsni) pasov ne spremenijo več bistveno. Prej nasprotno: z izmeničnim obremenjevanjem pri kontrolirani specifični deformaciji $\pm 0.3\%$ smo v naši simulaciji dosegli z vsakim obremenitvenim ciklom bolj izražene strižne pasove (simulirali smo največ 7 polnih obremenitvenih ciklov). Trajni drsni pasovi (persistent slip bands) so jasno vidni (Slika 35, Slika 36) v prikazu največje lastne specifične deformacije kot sive površine, ki z smerjo obremenitve oklepajo značilni kot približno 45° .

Značilna širina drsnega pasu je močno odvisna od izbire parametrov slike: za vizualizacijo drsni pasov smo uporabili prag v velikosti dvakratnika makroskopske zunanje obremenitve ($2 * 0,3\% = 0,6\%$). V takšnih razmerah je širina drsnega pasu manjša od velikosti kristalnega zrna. Pripomnimo pa lahko, da so gradienti specifičnih deformacij v okolici drsni pasov razmeroma veliki, zato manjše spremembe pragu ne bi imele večjega vpliva na širino drsni pasov.

Različne naključne orientacije kristalnih zrn povzročijo predvsem drugačno lego drsni pasov (Slika 35, Slika 36). Smeri, širine in razdalje med drsni pasovi pa se zdijo razmeroma stabilne.



Slika 35 Lokalizacija specifičnih deformacij po nekaj ciklih (sistem naključnih orientacij šte. 1)



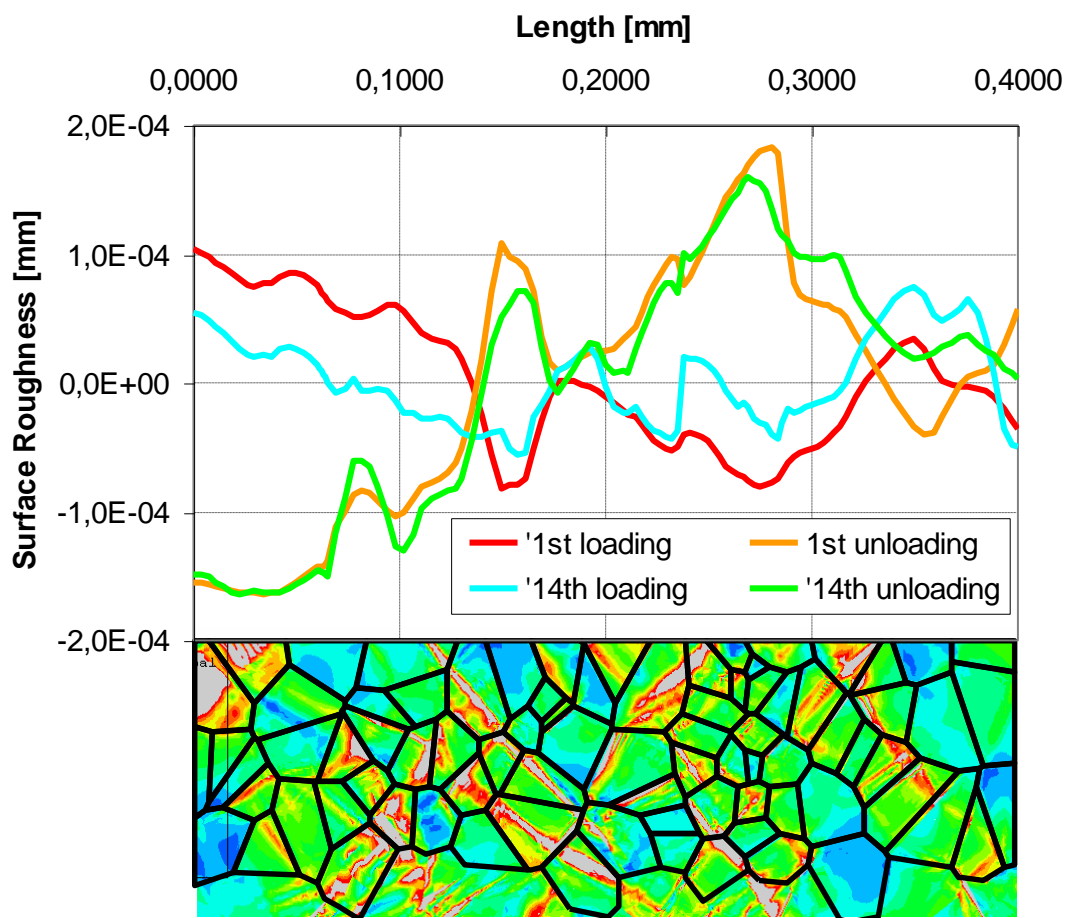
Slika 36 Lokalizacija specifičnih deformacij po nekaj ciklih (sistem naključnih orientacij šte. 2)



4.4.3 Hrapavost površine

Hrapavost proste površine velikostnega razreda $0,1 \mu\text{m}$ se iz začetno povsem ravne površine razvije že v nekaj obremenitvenih ciklih (Slika 37). Krivulje hrapavosti (Slika 37) smo dobili tako, da smo od vertikalnih premikov točk na površini odšteli njihov povprečni premik. S tem smo minimizirali vpliv povprečne Poissonove specifične deformacije pravokotno na smer glavne obremenitve.

Površinska hrapavost se, vsaj v nekaj simuliranih obremenitvenih ciklih, z drsnimi pasovi ne ujema najbolj natančno. Pričakujemo pa, da bi se ujemanje z večjim številom simuliranih obremenitvenih ciklov povečevalo.



Slika 37 Razvoj površinskih neravnin s številom obremenitvenih ciklov



4.5 *Kratke medkristalne razpoke*

Medkristalna napetostna korozija zlitine Inconel 600 v topli vodi velikim raziskovalnim naporom navkljub še vedno ostaja eden od večjih izzivov znanosti o materialih. Še posebej nedorečene so razmere in procesi, ki so odgovorni za nastajanje in zgodnjo rast razpok. Obstaja sicer razmeroma širok konsenz, da sta zrnata struktura zlitine in še posebej razmere na kristalnih mejah, ključna vplivna faktorja. Po naši oceni je torej doseženo stanje razvoja, ko brez uporabe večnivojskih metod ni več mogoče pričakovati pomembnejših premikov pri kvalitativnih in kvantitativnih napovedih razvoja razpok.

Naš prispevek predstavlja simulacijski model, ki omogoča napovedovanje in vizualizacijo medkristalnih razpok na nivoju kristalnih zrn. Osnovni cilj predlagane metode je poiskati nove načine za napovedovanje napredovanja razpok ob upoštevanju najpomembnejših vplivnih parametrov v mikrostrukturi.

V nadaljevanju povzemamo najpomembnejše računske predpostavke in rezultate. Podrobnosti o modelu in njegovih rezultatih so na voljo v [42] in [43].

4.5.1 Osnovne predpostavke

Mogoče poti razpok so omejene na kristalne meje. Te pa so vnaprej definirane z realizacijo naključnega Voronojevega mozaika, ki predstavlja model zrnate strukture kovinske zlitine.

Nastanek razpok simuliramo z naključnim procesom, ki upošteva orientacijo kristalne meje glede na glavno smer obremenitve, bližino kristalne meje površini, dolžino kristalne meje in podobne vplivne parametre. Naključni proces v prvem koraku simulacije izbere poškodovane kristalne meje, ki lahko postanejo zametek daljših razpok. V naslednjih korakih simulacije razpoke napredujejo, hkrati pa lahko nastajajo tudi novi zametki. Tudi napredovanje razpok modeliramo s stohastičnim procesom, ki pa razmeroma močno upošteva napetostno polje v bližini vrha razpoke. Mogoče smeri napredovanja razpok so, kot smo že omenili, določene vnaprej, in sta v vsakem vrhu razpoke vedno natanko dve. Napetostno polje v okolici vrha razpoke uporabimo kot parameter, ki poveča verjetnost napredovanja v smeri, ki je za rast razpoke bolj ugodna. Model napredovanja razpok brez težav upošteva tudi vejenje in združevanje razpok. Upoštevan je tudi medsebojni vpliv razpok v neposredni bližini.

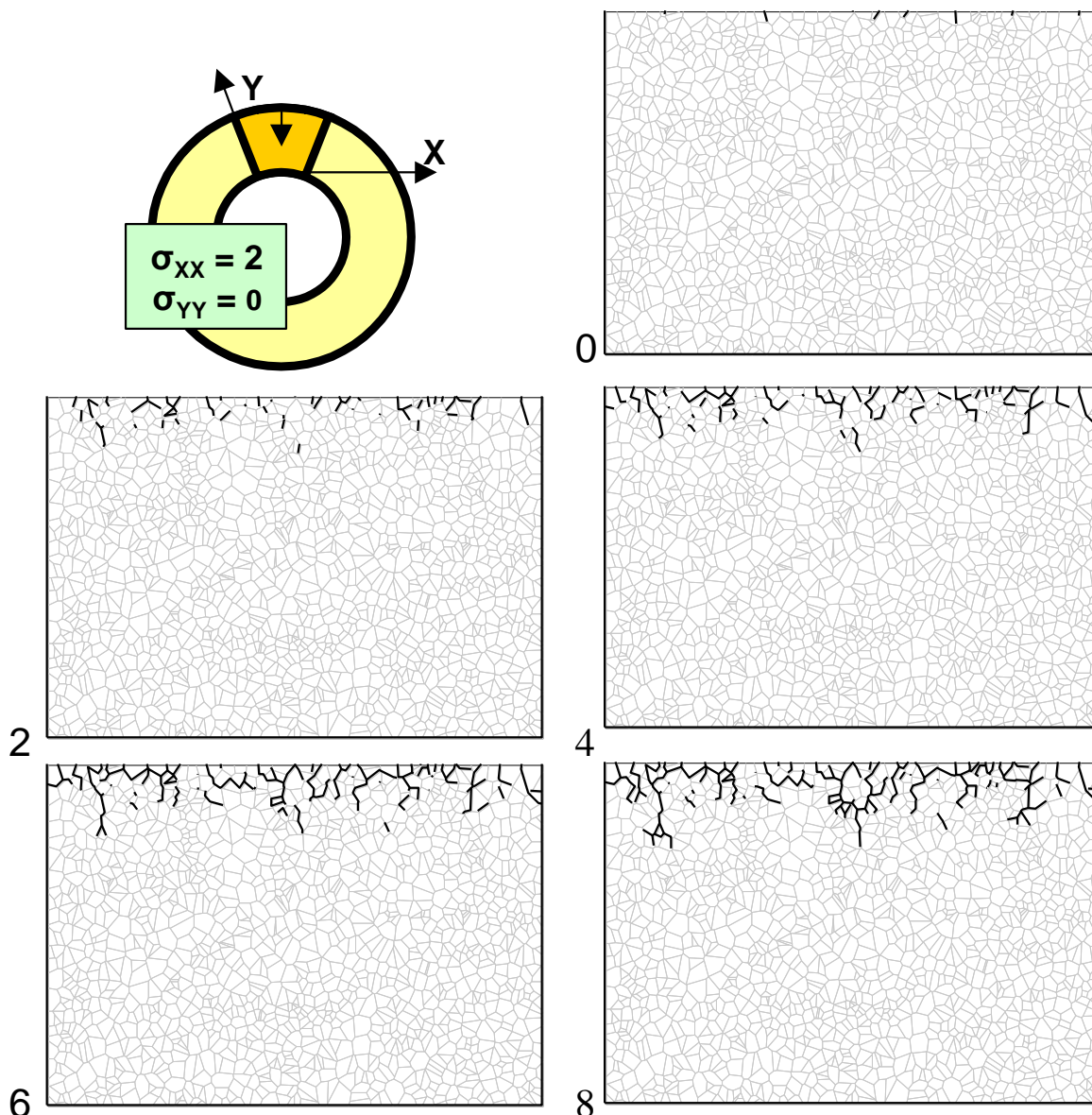
Predpostavimo, da obravnavamo cev uparjalnika, ki je obremenjena z notranjim tlakom. V ravnini, ki jo oklepata osna in obročna smer (zunanja površina cevi, Slika 39, Slika 41), imamo tako opraviti z dvoosnim napetostnim poljem z razmerjem glavnih napetosti 2:1 (obročna:osna). V ravnini, ki jo oklepa radialna smer z osno ali obročno (radialni reženj, Slika 38, Slika 40), pa predpostavimo enoosno napetostno stanje.

V simulacijah upoštevamo dva ključna in medsebojna neodvisna mehanizma, ki delujeta na mikroskopskem nivoju: oksidacijo kristalnih mej in lezenje kristalnih mej.

Oksidacija kristalnih mej se vedno prične na površini cevi, nato pa s pomočjo difuzije napreduje v notranjost. Razpoke bodo torej vedno nastale v kristalnih mejah, ki so v stiku s površino in seveda tudi okoliškimi medijem. V naslednjih korakih simulacije predpostavimo, da se vpliv difuzije počasi širi tudi v notranjost, s tem pa se večja tudi verjetnost za napredovanje razpok v notranjost.



Glavni povzročitelj lezenja je normalna napetost na kristalnih mejah. Večja verjetnost za razpoko torej pripišemo kristalnim mejam, ki so orientirane pravokotno na največjo glavno napetost.



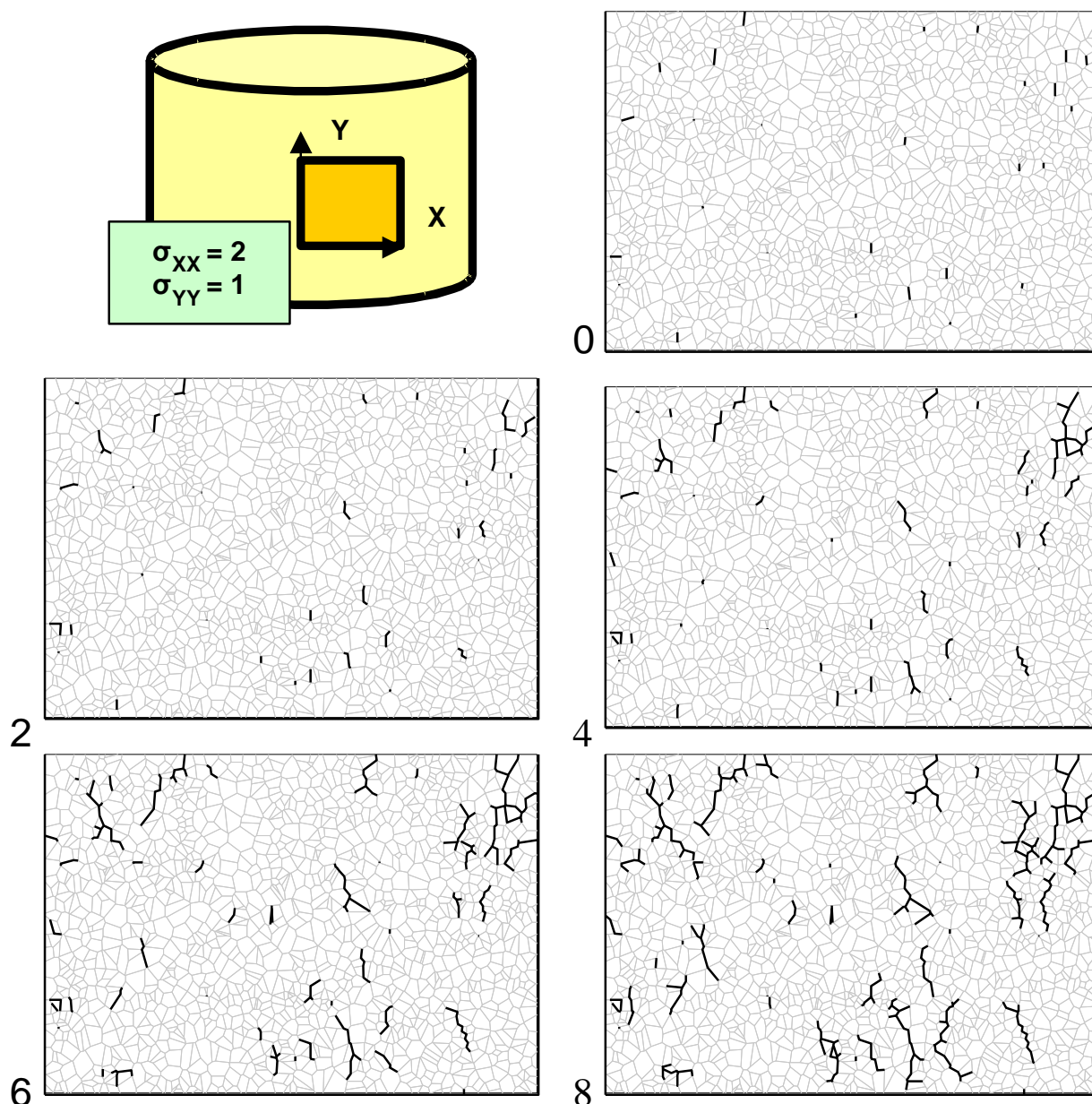
Slika 38 Razvoj mreže medkristalnih razpok: oksidacija kristalnih mej v radialnem režnju



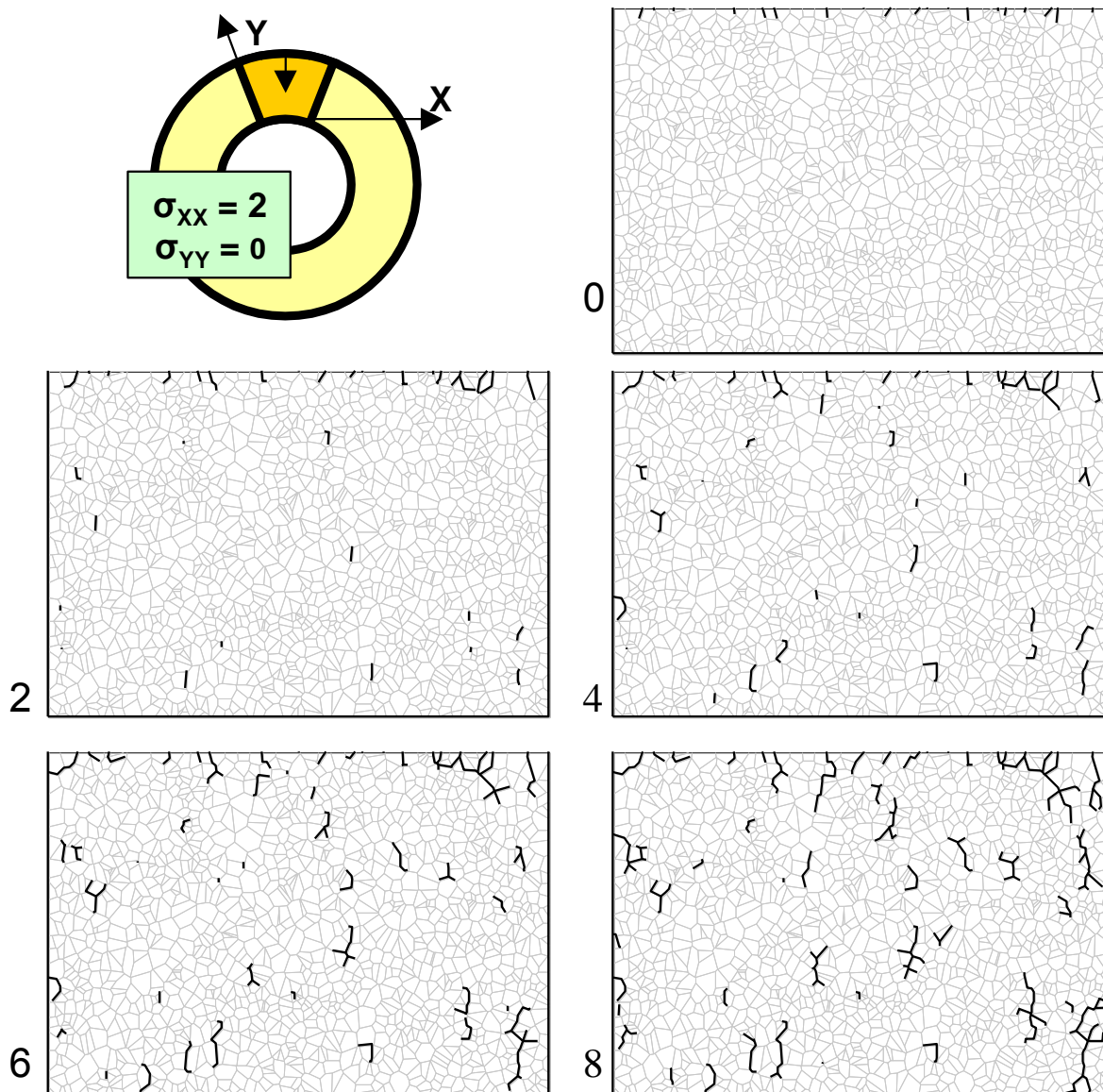
4.5.2 Rezultati

Rezultati simulacij so zbrani v 4 slikah:

- Slika 38 prikazuje razvoj mreže medkristalnih razpok med oksidacijo kristalnih mej v radialnem režnju;
- Slika 39 prikazuje razvoj mreže medkristalnih razpok med lezenjem na zunanji površini cevi;
- Slika 40 prikazuje razvoj mreže medkristalnih razpok pri skupnih učinkih oksidacije kristalnih mej in lezenja v radialnem režnju;
- Slika 41 prikazuje razvoj mreže medkristalnih razpok med oksidacijo kristalnih mej na zunanji površini cevi ter rezultate primerja z eksperimentom.



Slika 39 Razvoj mreže medkristalnih razpok: lezenje na zunanji površini cevi



Slika 40 Razvoj mreže medkristalnih razpok: skupni učinki oksidacije kristalnih mej in lezenja v radialnem režnju

Vse simulacije smo opravili v eni sami realizaciji Voronojevega mozaika s 1400 kristalnimi zrna. Okvirne dimenzije opazovanega okna so 0,5x0,3mm, povprečna velikost kristalnega zrna pa je 10 μm .

Orientacija ravnine, v kateri simuliramo razvoj razpok, je skupaj s smerjo in relativno velikostjo glavnih napetosti prikazana v zgornjem levem robu vseh slik. Simulacijski koraki so označeni s številkami od 0 (nastanek razpok) do 8 (napredovanje razpok). V vsakem koraku lahko posamezna razpoka napreduje največ po eno kristalno mejo v vsaki od mogočih smeri.

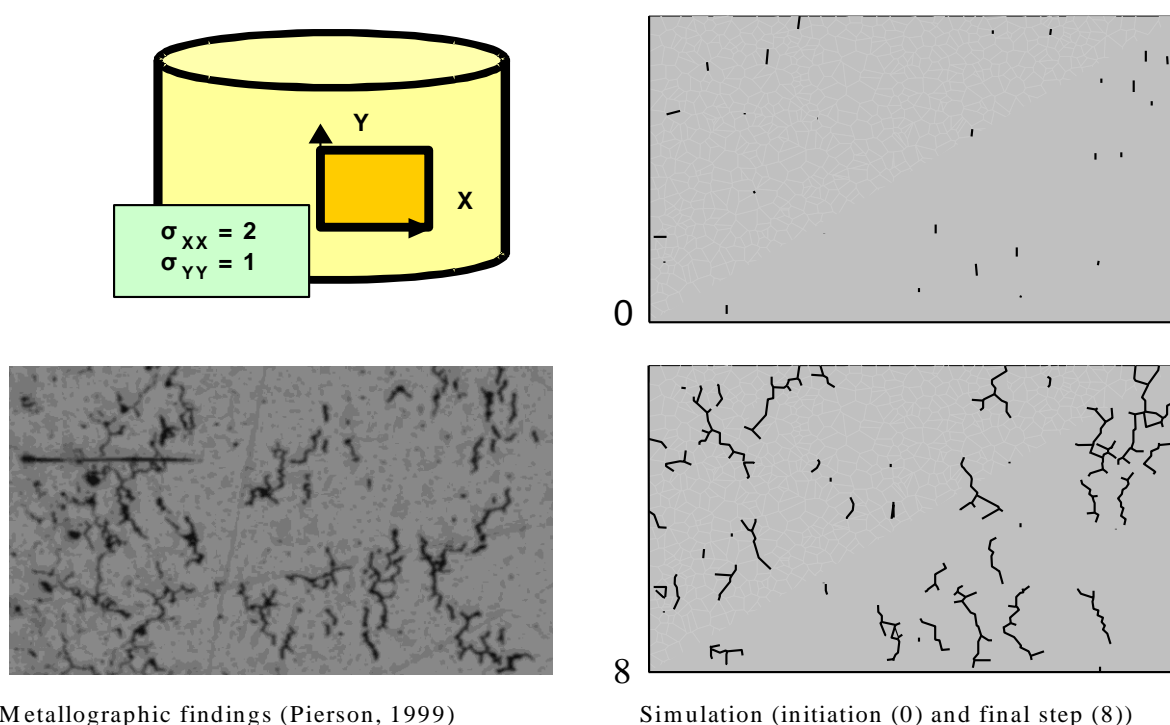
Slika 38 prikazuje razvoj vzorca razpok zaradi oksidacije kristalnih mej v radialnem režnju. Okvarjene kristalne meje so večinoma v bližini zunanje površine cevi in v simulacijskih korakih 2 in 4 segajo do globine okoli 0,05 mm. V kasnejših simulacijskih korakih se pojavi rast daljših razpok v radialni smeri.



Slika 39 prikazuje razvoj vzorca razpok, ki se razvije na zunanji površini cevi zaradi lezenja. Opazno je razmeroma močno vejenje (levo zgoraj), čeprav je napredovanje razpok razmeroma močno odvisno od smeri največje glavne napetosti. Po našem mnenju je to posledica razmeroma močne interakcije med bližnjimi razpokami. Ne glede na vejenje pa je očitna tendenca daljših razpok, da rastejo v vzdolžni smeri cevi.

Slika 40 prikazuje razvoj vzorca, ki se razvije zaradi skupnih učinkov obeh mehanizmov v radialnem režnju. Po pričakovanjih se pokanje kristalnih mej začne na površini, napredovanje skozi debelino cevi pa je pretežno posledica lezenja.

Slika 41 prikazuje razvoj vzorca razpok zaradi oksidacije kristalnih mej na zunanji površini cevi ter rezultate primerja z eksperimentom. Primerjava v kvalitativnem smislu potrjuje rezultate simulacij.



Metallographic findings (Pierson, 1999)

Simulation (initiation (0) and final step (8))

Slika 41 Razvoj mreže medkristalnih razpok: oksidacija kristalnih mej, zunanja površina cevi, primerjava z eksperimentom



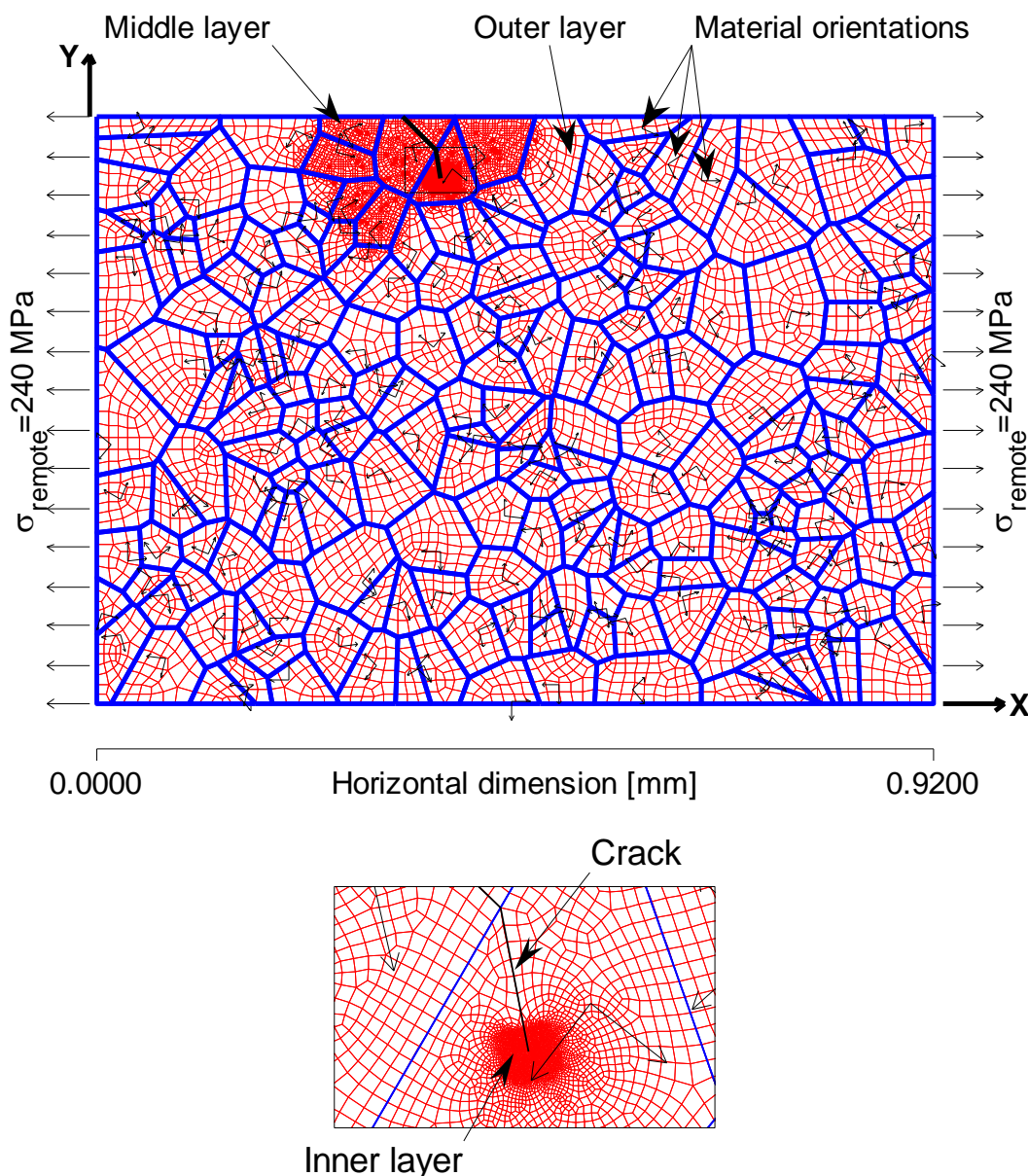
4.6 *Kratke transkristalne razpoke*

V primeru obravnavamo kratko razpoko, ki je ravnokar prerasla prvo kristalno zrno in prešla v sosednje zrno. Takšne razpoke sledijo drsnim ravninam in so značilne za I. stopnjo rasti utrujenostne razpoke, ki največkrat napredujejo po drsnih ravninah kristalne rešetke. Z večnivojskim modelom spremljamo vpliv različnih kristalografskih orientacij razpoke na normalno in prečno odpiranje razpoke (NOR in POR, Slika 14) pri različnih dolžinah razpoke, pri prehodu kristalne meje in seveda pri različnih orientacijah drugega kristalnega zrna, v katerega razpoka vstopi po prehodu kristalne meje,

Model na desnem robu obremenimo s statično zunanjo obremenitvijo. Slika 42 prikazuje predpisane robne pogoje. Z njimi zahtevamo, da se desni oz. zgornji rob lahko premikata samo vzporedno levemu oz. spodnjemu robu. S tem v prvem približku zajamemo vpliv okoliškega materiala, saj predpostavimo, da je model vgrajen v večje telo.

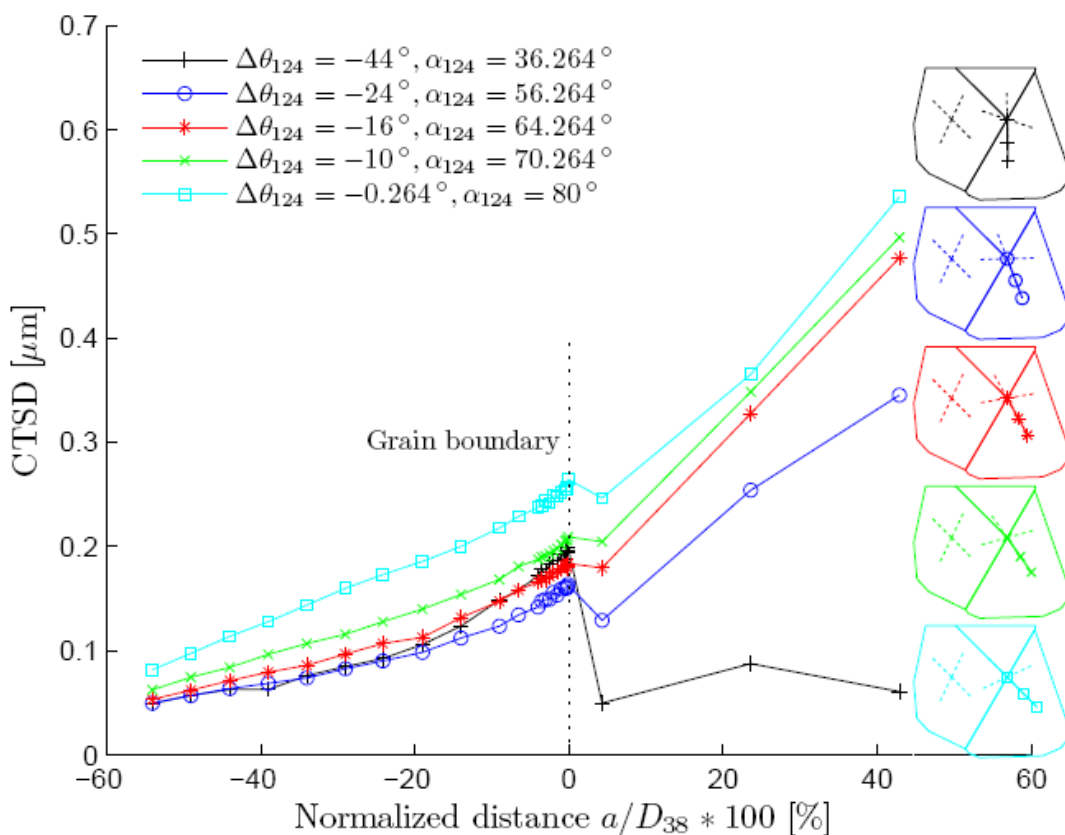
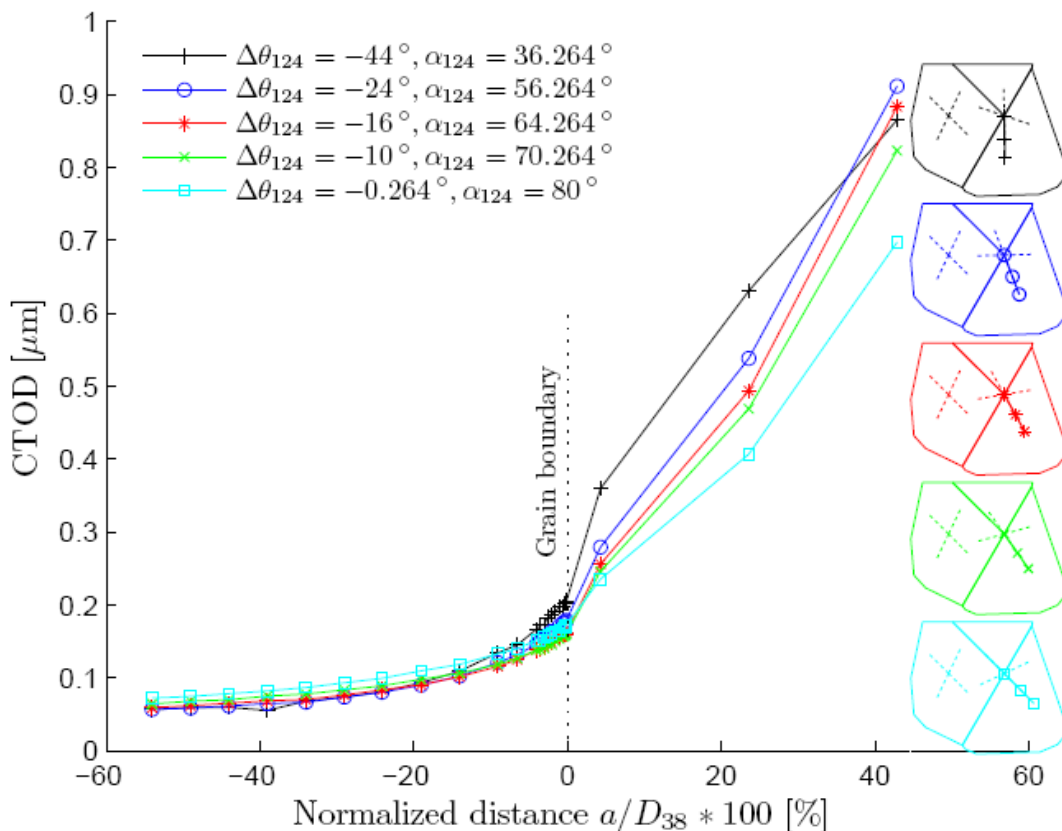
V prvem, površinskem zrnu, leži razpoka v eni izmed smeri največjih strižnih napetosti, Slika 14. Kristalografsko orientacijo prvega zrna z razpoko postavimo na $\alpha=9.735^\circ$ (Slika 13). Z rastjo razpoke se le-ta približuje naslednjemu zrnu, ki pa ima v splošnem drugačno kristalografsko orientacijo. Da lahko razpoka ostane v drsni ravnini mora torej pri prehodu v naslednje zrno spremeniti smer. To seveda neposredno vpliva na spremembo odpiranja vrha konice razpoke, Slika 43.

Model končnih elementov je pravokotni blok, sestavljen iz 212 kristalnih zrn naključne velikosti in oblike (Slika 42). Vsako zrno razdelimo v mrežo 8-vozlíčnih, kvadratičnih končnih elementov namenjenih ravninskemu napetostnemu stanju (CPE8R). Ravninsko deformacijsko stanje v ravnini XY dosežemo s postavitvijo modela na sliki 1 v XY ravnino. Kubično kristalno strukturo vsakega zrna (Slika 13) postavimo tako, da je kot med [100] smerjo kristala in X osjo 135° .



Slika 42 Model končnih elementov, robni pogoji in zunanja obremenitev

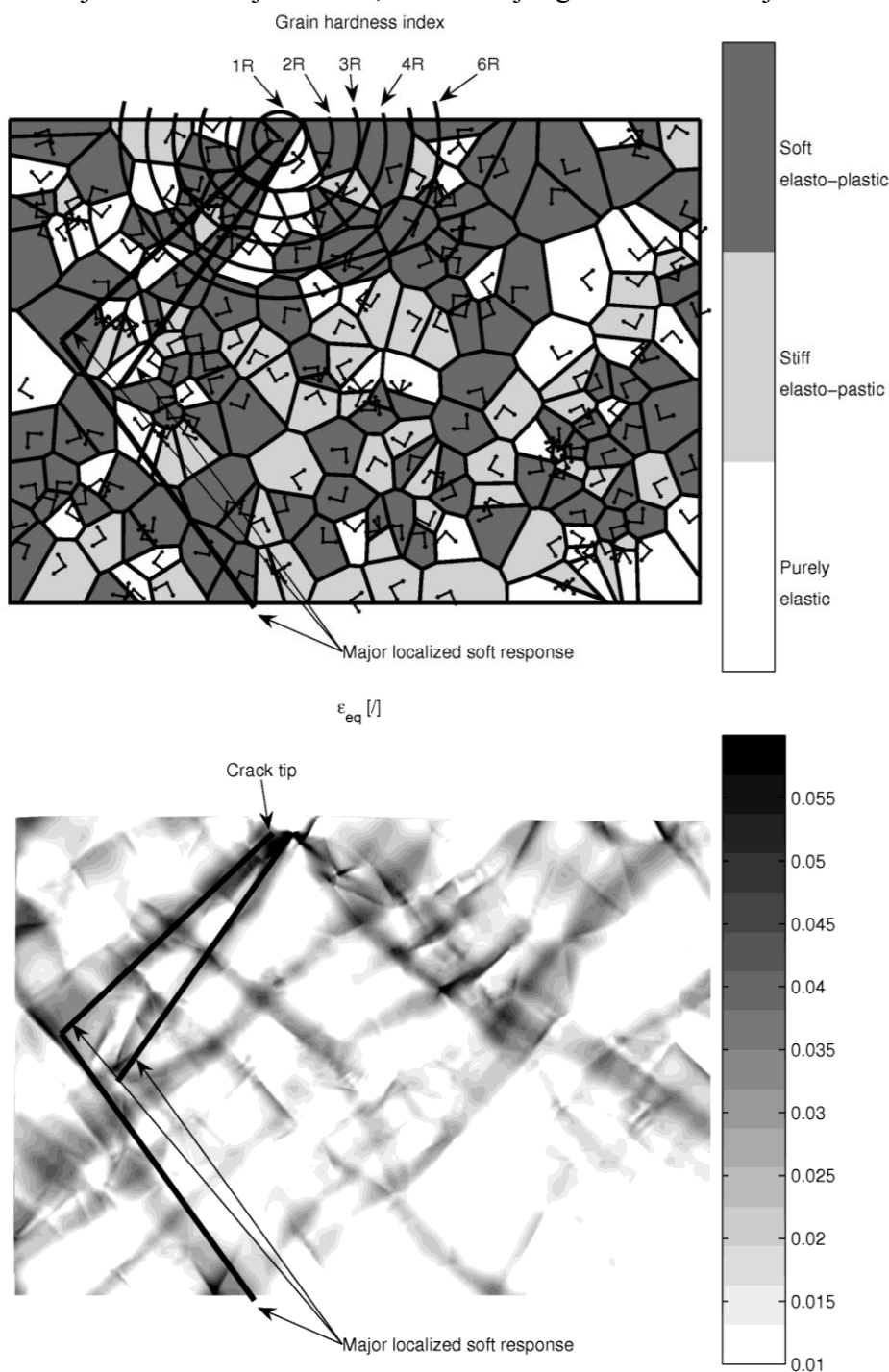
Slika 43 prikazuje razvoj parametrov NOR (=CTOP, crack tip opening displacement) in POR (=CTSD, crack tip sliding displacement) pri različnih orientacijah drugega zrna, v katerega razpoka vstopi po prehodu kristalne meje. Slika 14 prikazuje definiciji NOR in POR. Lepo je vidna rast obeh parametrov z rastjo dolžine razpoke vse do prehoda kristalne meje. Po prehodu kristalne meje pa je očitna razmeroma velika odvisnost od orientacije drugega zrna, ki določa tudi smer drsne ravnine in s tem smer podaljška razpoke.



Slika 43 Vpliv spremembe smeri razpoke na normalno in prečno komponento odpiranja konice razpoke



Kristalografske orientacije vplivajo na odpiranje vrha konice razpoke predvsem preko togosti posameznega zrna. Pri nekaterih kristalografskih orientacijah se zrno na zunanjo obremenitev odzove z večjimi deformacijami (mehko zrno) kot pri ostalih orientacijah. Odpiranje konice razpoke je v mehkejšem zrnju večje od zrna, ki ima bolj tog odziv na zunanjo obremenitev.

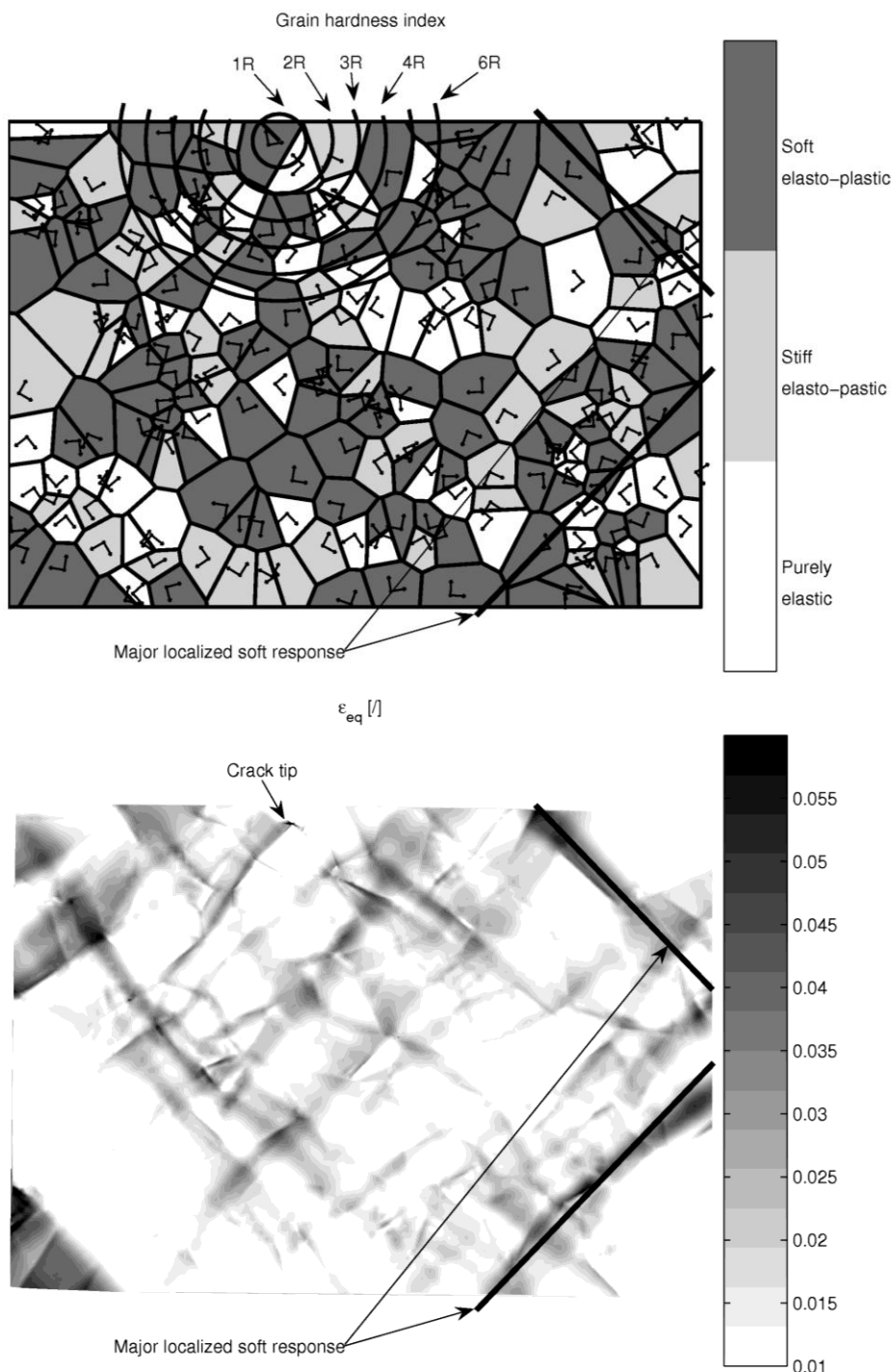


Slika 44 Nastanek strižnega pasu v okolici razpoke povečuje odpiranje konice razpoke. Zgoraj: razdelitev zrn glede na togost na trda, vmesna in mehka. Spodaj: ekvivalentna specifična deformacija.

Obenem kristalografske orientacije močno vplivajo tudi na položaj strižnih pasov, ki predstavljajo glavne smeri toka materiala znotraj polikristalnega skupka. Slika 44 prikazuje primer, kjer mehka zrna v okolici razpoke privedejo do lokalizacije strižnega pasu v okolici



razpoke. To povzroči močno povečanje parametra NOR. Slika 45 prikazuje nasprotni primer, kjer je v okolici razpoke ni zadostnega števila mehkih zrn za nastanek strižnega pasu. Strižni pas nastane stran od razpoke in ne vpliva na dodatno odpiranje vrha razpoke.



Slika 45 Strižni pas nastane stran od razpoke, odpiranje konice razpoke je zato manjše. Zgoraj: razdelitev zrn glede na togost na trda, vmesna in mehka. Spodaj: ekvivalentna specifična deformacija.

Dodatne informacije o vplivu mikrostrukture na transkristalne razpoke so na voljo v [14], [15], [16], [50] in [51].



4.7 Ocena uporabnosti v praksi

Večnivojski modeli so trenutno v razvojni fazi, ki poteka zelo intenzivno. Najpomembnejša faktorja, ki razvoj pospešujeta, sta izjemno hiter razvoj računalnikov in velika koncentracija raziskovalcev ter izrazita mednarodna povezanost raziskovalcev, ki delujejo na tem področju. Razvoj nekoliko zavira eksperimentalna podpora, ki pa v zadnjem času tudi pospešeno dobiva zagon.

Kot pri vseh razmeroma rigoroznih orodjih je pričakovati, da bodo večnivojski modeli v bodočnosti pomemben prispevali k razumevanju in bolj preciznemu napovedovanju tistih ključnih procesov v materialih, ki so odgovorni za staranje in razvoj poškodb. Z današnjega stališča torej pomenijo velik potencial za ocenjevanje varne življenjske dobe za varnost pomembnih komponent jedrskih elektrarn. Ta potencial potrjuje tudi razmeroma veliko zanimanje industrije, ki je že dokumentirano v literaturi.

Neposredno industrijsko rabo bodo večnivojski modeli po naši oceni dosegli že v času 5-10 let. Prve aplikacije bodo najverjetneje na področjih, kjer so eksperimentalni podatki ali predragi ali pa gre za takšne delovne razmere (4. generacija in fuzijski reaktorji), za katere bo materiale potrebno razviti namensko. Pri že delujočih reaktorjih pa med prednostna področja uporabe zagotovo sodita povečevanje krhkosti zaradi nevtronskega sevanja in toplotno utrujanje. Zato sodimo, da je slovensko sodelovanje pri mednarodnih razvojnih prizadevanjih v prihodnjih letih smiselno okrepiti.



5 ZAKLJUČKI

V poročilu opišemo najpomembnejše lastnosti in gradnike večnivojskih modelov. Pri tem se osredotočimo predvsem na modele, ki prispevajo k razumevanju in napovedovanju nastanka in zgodnjega razvoja poškodb v kovinskih materialih, značilnih za varnostno pomembne komponente in konstrukcije v jedrskih elektrarnah. Kratek opis osnovnih gradnikov večnivojskih modelov dopolnjujejo tudi nekatere pomembnejše reference, ki smo jih zbrali v dodatku k poročilu.

Podrobneje predstavimo primer večnivojskega modela, ki smo ga v zadnjih letih razvili v Odseku za reaktorsko tehniko Instituta "Jožef Stefan", njegove najpomembnejše aplikacije ter najverjetnejše smeri razvoja v prihodnosti.

Večnivojski modeli so trenutno v razvojni fazi. Z današnjega stališča torej pomenijo velik potencial za ocenjevanje varne življenjske dobe za varnost pomembnih komponent jedrskih elektrarn. Ta potencial potrjuje tudi razmeroma veliko zanimanje industrije, ki je že dokumentirano tudi v literaturi.

Neposredno industrijsko rabo bodo večnivojski modeli po naši oceni dosegli že v času 5-10 let. Prve aplikacije bodo najverjetneje na področjih, kjer so eksperimentalni podatki ali predragi ali pa gre za takšne delovne razmere (4. generacija in fuzijski reaktorji), za katere bo materiale potrebno razviti namensko. Pri že delujočih reaktorjih pa med prednostna področja uporabe zagotovo sodita povečevanje krhkosti zaradi nevtronskega sevanja in toplotno utrujanje. Zato sodimo, da je slovensko sodelovanje pri mednarodnih razvojnih prizadevanjih v prihodnjih letih smiselno okrepiti.



6 VIRI

6.1 Ključni tuji viri

- [1] Ghoniem, N.M.; Busso, E.P.; Kioussis, N.; Huang, H.; Multiscale Modelling of nanomechanics and mesomechanics: an overview, *Philosophical magazine*. 2003, 83 (31-34): 3475-3528.
- [2] 6th Framework Programme Euratom: Prediction of Irradiation Damage Effect in Reactor Components (2004-2006). www.fp6perfect.net.
- [3] Flewitt, P.E.J. The use of multiscale modelling within the UK nuclear industry. *Materials Science and Engineering A*. 2000, 365: 257-266.
- [4] Needleman, A. Computational Mechanics at the Mesoscale. *Acta Materialia*. 2000; 48:105-124.
- [5] Héripré, E.; Dexet, M.; Crépin, J.; Gélébart, L.; Roos, A.; Bornert, M. and Caldemaison, D. Coupling between experimental measurements and polycrystal finite element calculations for micromechanical study of metallic materials. 2007; 23(9):1512-1539.
- [6] Samaras, M.; Hoffelner, W. and Victoria, M. Modelling of advanced structural materials for GEN IV reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2007; 371 (1-3): 28-36.
- [7] Becquart, C. S. RPV steel microstructure evolution under irradiation: a multiscale approach. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2005; 228 (1-4): 111-121.
- [8] Odette, G. R.; Yamamoto, T.; Rathbun, H. J.; He, M. Y.; Hribernik, M. L. and Rensman, J. W. Cleavage fracture and irradiation embrittlement of fusion reactor alloys: mechanisms, multiscale models, toughness measurements and implications to structural integrity assessment. *Journal of Nuclear Materials*. 2003; 323(2-3):313-340.
- [9] Martin, G. Modelling materials driven far from equilibrium. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 1998; 3(6):552-557.

6.2 Ključni viri IJS

- [10] Weyer, Stefan, Frohlich, Andreas, Riesch-Oppermann, Heinz, Cizelj, Leon, Kovač, Marko. Automatic finite element meshing of planar Voronoi tessellations. *Eng. fract. mech.* [Print ed.], 2002, vol. 69, str. 945-958.
- [11] Leon Cizelj and Heinz Riesch-Oppermann, Modelling the early development of secondary side stress corrosion cracks in steam generator tubes using incomplete random tessellation, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 212, Issues 1-3, March 2002, Pages 21-29.
- [12] Simonovski, Igor, Kovač, Marko, Cizelj, Leon. Estimating the correlation length of inhomogeneities in a polycrystalline material. *Mater. sci. eng., A Struct. mater. : prop. microstruct. process.*, 2004, 381, str. 273-280.
- [13] Kovač, Marko, Cizelj, Leon. Modeling elasto-plastic behavior of polycrystalline grain structure of steels at mesoscopic level. *Nucl. Eng. Des.*, 2005, 235, 1939-1950.
- [14] Simonovski, Igor, Nilsson, Karl-Fredrik, Cizelj, Leon. The influence of crystallographic



orientation on crack tip displacements of microstructurally small, kinked crack crossing the grain boundary. *Comput. mater. sci.*, 2007, vol. 39, no. 4, str. 817-828.

- [15] Simonovski, Igor, Nilsson, Karl-Fredrik, Cizelj, Leon. Crack tip displacements of microstructurally small cracks in 316L steel and their dependence on crystallographic orientations of grains. *Fatigue fract. eng. mater. struct.*, 2007, vol. 30, no. 6, str. 463-478.
- [16] Simonovski, Igor, Cizelj, Leon. The influence of grains' crystallographic orientations on advancing short crack. *Int. j. fatigue. [Print ed.]*, 2007, vol. 29, no. 9-11, str. 2005-2014.

6.3 Ostali pomembnejši tuji viri

- [17] S. Pearson. Initiation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and the subsequent propagation of very short cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 7(7):235–247, 1975.
- [18] H. Kitagawa and S. Takahashi. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage. In *Proceedings of Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials*, pages 627–631, Boston, 1976. ASM.
- [19] K. J. Miller. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Part II-A general summary. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 10(2):93–113, 1987.
- [20] K. Hussain. Short fatigue crack behaviour and analytical models: a review. *Engineering Fracture Mechanics*, 58(4):327–354, November 1997.
- [21] C. Blochwitz, W. Tirschler, and A. Weidner. The growth of small fatigue cracks in 7075-t6 aluminium alloy. *Fatigue Engng Mater. Struct.*, 5:233–248, 1982.
- [22] W. L. Morris. The noncontinuum crack tip deformation behavior of surface microcracks. *Metallurgical Transactions A*, 11A:1117–1123, July 1980.
- [23] T. Zhai, A. J. Wilkinson, and J. W. Martin. A crystallographic mechanism for fatigue crack propagation through grain boundaries. *Acta Materialia*, 48(20):4917–4927, December 2000.
- [24] Aurenhammer, Franz. Voronoi Diagrams-A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. *ACM Computing Surveys*. 1991; 23(3):345-405.
- [25] Riesch-Oppermann, Heinz. VorTess, Generation of 2-D random Poisson-Voronoi Mosaics as Framework for the Micromechanical Modelling of Polycrystalline Materials. Karlsruhe, Germany: Forschungszentrum Karlsruhe; 1999; Report FZKA 6325.
- [26] Nemat-Nasser, Sia and Hori, Muneo. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. Amsterdam: North-Holland; 1993.
- [27] Nye, J. F. *Physical Properties of Crystals*. Oxford: Clarendon Press; 1985.
- [28] Grimvall, Göran. *Thermophysical Properties of Materials*. Amsterdam: North-Holland; 1999.
- [29] Huang, Yonggang. A User-material Subroutine Incorporating Single Crystal Plasticity in the ABAQUS Finite Element Program. Cambridge, Massachusetts: Harvard University; 1991; MECH-178.
- [30] Nemat-Nasser, Sia; Okinaka, Tomoo, and Ni, Luqun. A Physically-based Constitutive Model for BCC Crystals with Application to Polycrystalline Tantalum. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1998; 46(6):1009-1038.



- [31] Asaro, Robert J. Micromechanics of Crystals and Polycrystals. *Micromechanics in Applied Mechanics*. 1983; 23:2-115.
- [32] Peirce, D.; Asaro, R. J., and Needleman, A. Material Rate Dependence and Localized Deformation in Crystalline Solids. *Acta Metallurgica*. 1982; 31:1951.
- [33] Weyer, Stefan. Experimentelle Untersuchung und mikromechanische Modellierung des Schädigungsverhaltens von Aluminiumoxid unter Druckbeanspruchung. Karlsruhe, Germany: Universität Karlsruhe; 2001.
- [34] Bassani, J. L. and Wu, T. Y. Latent hardening in single crystals, II. Analytical characterization and prediction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1991; 435:21-41.
- [35] Ledbetter, H. M., Monocrystal-Polycrystal Elastic Constants of a Stainless Steel, *Physica Status Solidi (A)*, 1984, Vol: 85, Number: 98, Pages: 89-96.
- [36] Materna-Morris, E.; Graf, P., and Zimmermann, H. *Structure and Fracture of 22NiMoCr3 7*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe; 2002.
- [37] Grabec, I. and Gradišek, J., *Description of random phenomena, Opis naključnih pojavov*, 2000, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering.
- [38] Paffumi, Elena. *Simulation and Modeling of Thermal Fatigue Damage in Austenitic Piping Components*. Swansea, UK: University of Wales; 2004.
- [39] Tóth, L. S.; Molinari, A., and Zouhal, N. Cyclic Plasticity Phenomena as Predicted by Polycrystal Plasticity. *Mechanics of Materials*. 2000; 32:99-113.
- [40] Gabriel Petru Potirniche, *Finite Element Modeling Of Crack Tip Plastic Anisotropy With Application To Small Fatigue Cracks And Textured Aluminum Alloys*, Ph. D. Thesis, Mississippi State University, 2003.

6.4 Ostali pomembnejši viri IJS

- [41] Kovač, Marko. *Influence of Microstructure on Development of Large Deformations in Reactor Pressure Vessel Steel*. Ph.D. Thesis, University of Ljubljana; 2004.
- [42] Cizelj, Leon, Riesch-Oppermann, Heinz. Modelling the early development of secondary side stress corrosion cracks in steam generator tubes. V: *International Symposium : Contribution of Materials Investigation to the Resolution of Problems Encountered in Pressurized Water Reactors, Fontevraud IV, 14-18 September 1998 : Contribution des expertises sur matériaux à la résolution des problèmes rencontrés dans les réacteurs à eau pressurisée*. Fontevraud: French Nuclear Energy Society, 1998, 1998, str. 583-594.
- [43] Cizelj, Leon, Riesch-Oppermann, Heinz. Modeling the early development of secondary side stress corrosion cracks in steam generator tubes using incomplete random tessellation. V: *CHANG, Sung Pil (ur.). Structural mechanics in reactor technology : transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Seoul, Korea, August 15-20, 1999*. Seoul: Korean Nuclear Society, cop. 1999, str. V217-V224.
- [44] Krieg, R., Akta, J., Diegele, E., Dolensky, B., Jordan, T., Malmberg, T., Messemer, G., Plitz, H., Rieger, H., Schmitt, R., Julich, P., Kalkhof, D., Talja, H., Solomos, G., Aifantis, E., Cizelj, Leon, Caroli, C., Fokkens, J., Bhandari, S.B., Veron, P., Trauth, M., Kieselbach, R. Limit strains for severe accident conditions description of an European research program and first results. V: *SMIRT 16, 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 12-17*



August 2001, Washington DC. SMIRT 16 Transactions. 2001, 8 str.

- [45] Krieg, R., Cizelj, Leon. Limit strains for severe accident conditions. V: Van Goethem, G. (ur.). FISA 2001, EU research in reactor safety : Euratom framework programme 1998-2002, Key action "Nuclear fission" : Mid-term symposium on shared-cost and concerted actions, Luxembourg, 12-14 November, 2001, (EUR, 20281 EN). Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2002, str. 306-317.
- [46] Metzner, K-J., Cizelj, Leon. Thermal fatigue evaluation of piping systems "TEE"- connections (THERFAT). V: FISA 2003 : EU research in reactor safety : proceedings : conclusion symposium on shared-cost and concerted actions, Luxembourg, 10-13 November 2003. Luxembourg: European Commission, 2004, str. 198-204.
- [47] Krieg, R., Cizelj, Leon. Limit strains for severe accident conditions (LISSAC). V: FISA 2003 : EU research in reactor safety : proceedings : conclusion symposium on shared-cost and concerted actions, Luxembourg, 10-13 November 2003. Luxembourg: European Commission, 2004, str. 379-384.
- [48] Simonovski, Igor, Nilsson, Karl-Fredrik, Cizelj, Leon. Material properties calibration for 316L steel using polycrystalline model. V: ICONS 13, The 13th International Conference on Nuclear Engineering : May 16-20, 2005, Beijing, China. [S.l.]: Atomic Energy, 2005, 8 str.
- [49] I. Simonovski, L. Cizelj, M. Kovač, B. Mavko, Vpliv mezoskopskih nehomogenosti materialov na življenjsko dobo za varnost pomembnih komponent jedrske elektrarne, IJS-DP-9042 (2004).
- [50] SIMONOVSKI, Igor, CIZELJ, Leon. Multiscale model of short cracks in a random polycrystalline aggregate. V: GLUMAC, Bogdan (ur.), LENGAR, Igor (ur.). International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, 2006. Proceedings. Ljubljana: Nuclear Society of Slovenia, 2006, 10 str.
- [51] SIMONOVSKI, Igor, CIZELJ, Leon. Representative volume element size of a polycrystalline aggregate with embedded short crack. V: JENČIČ, Igor (ur.), LENOŠEK, Melita (ur.). Conference proceedings. Ljubljana: Nuclear Society of Slovenia, 2007, 8 str.
- [52] CIZELJ, Leon, KOVAČ, Marko, SIMONOVSKI, Igor. Mesostructural simulations for the THERFAT project, (IJS delovno poročilo, 9010). 2004.