



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivica Galić

# **PROCJENA RADNOG VIJEKA KUĆIŠTA VENTILA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.





University of Zagreb  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
AND NAVAL ARCHITECTURE

Ivica Galić

# **LIFE ASSESSMENT OF VALVE BODY**

DOCTORAL THESIS





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

IVICA GALIĆ

# **PROCJENA RADNOG VIJEKA KUĆIŠTA VENTILA**

DOKTORSKI RAD

prof. dr. sc. Milan Opalić

Zagreb, 2012.





University of Zagreb  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
AND NAVAL ARCHITECTURE

Ivica Galić

# **LIFE ASSESSMENT OF VALVE BODY**

DOCTORAL THESIS

prof. dr. sc Milan Opalić

Zagreb, 2012.





## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 621.646.2

Ključne riječi: Kućište ventila, nastanak pukotine, rast pukotine, zamor materijala, metoda kritičnih ravnina, MKE, X-FEM.

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: Dr. sc. Milan Opalić, red. prof.

Broj stranica: 153

Broj slika: 89

Broj tablica: 20

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 78

Datum obrane: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: Dr. sc. Zdenko Tonković, red. prof. – predsjednik povjerenstva

Dr. sc. Milan Opalić, red. prof. – mentor

Dr. sc. Milan Kljajin, red. prof. – član povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu



# Zahvala

---

Iskreno se zahvaljujem na pomoći i kritičnom pristupu u oblikovanju rada mentoru prof. dr. sc. Milanu Opaliću te članovima povjerenstva prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću i prof. dr. sc. Milanu Kljajinu.

Zahvalio bih se i djelatnicima Katedre za elemente strojeva i konstrukcija FSBa u Zagrebu kao i djelatnicima Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku FSBa u Zagrebu. Zahvaljujem se kolegama doc. dr. sc. Anti Bakiću, doc. dr. sc. Krešimiru Vučkoviću, doc. dr. sc. Janošu Kodvanju, dr. sc. Nenadu Drvaru i Zvonimiru Tomičeviću koji si mi pomagali u provedbi eksperimenata i ispitivanju materijala.

Isto tako bih se zahvalio i kolegama iz firme ATM d.o.o. Zagreb, posebno kolegi Željku Trnskom, koji su mi pomagali u pripremi i provedbi eksperimenata.

Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji, posebno supruzi Robertini bez čije ljubavi podrške i razumijevanja sve ovo ne bi bilo moguće.

Ovaj rad posvećujem svome pokojnom ocu Anđelku, koji me uveo u osnove strojarstva.



---

1	Uvod.....	1
1.1	Pregled dosadašnjeg istraživanja.....	1
1.2	Hipoteza rada.....	3
1.3	Opis istraživanja.....	4
1.4	Očekivani doprinos.....	6
2	Nastanak pukotine.....	7
2.1	Mehanizmi i obilježja zamora.....	7
2.2	$\varepsilon$ - $N$ metoda.....	8
2.3	Odnos naprezanja i deformacije pri promjenjivom opterećenju.....	9
2.4	Definicija nastanka pukotine.....	11
2.4.1	Aproksimativne metode dobivanja cikličkih karakteristika materijala.....	14
2.5	Utjecaj srednjeg naprezanja.....	16
2.6	Nastanak pukotine pri višeosnom stanju naprezanja.....	18
2.6.1	Metoda kritične ravnine.....	18
2.6.2	Draperov pristup.....	22
2.7	Elasto-plastična korekcija.....	23
2.7.1	Neuberovo pravilo.....	24
2.7.2	Inkrementalno Neuberovo pravilo.....	25
3	Rast pukotine.....	26
3.1	Utjecaj zarezno djelovanja na koncentraciju naprezanja.....	26
3.2	Koeficijent intenziteta naprezanja.....	28
3.2.1	Metoda $J$ -integrala.....	29
3.2.2	Procjena koeficijenta intenzivnosti naprezanja na osnovu $J$ -integrala.....	34
3.3	Smjer rasta pukotine.....	35
3.3.1	Kriterij maksimalnog tangencijalnog naprezanja.....	36
3.3.2	Kriterij maksimalnog faktora oslobođene energije.....	36

3.3.3	Kriterij $K_{II} = 0$ .....	37
3.4	Rast pukotine uslijed cikličkog opterećenja .....	37
3.5	Procjena cjelovitosti konstrukcije.....	40
3.5.1	Konstrukcija FAD-a prema opciji 3 .....	41
3.6	Dopušteno opterećenje .....	42
4	Proširena metoda konačnih elemenata .....	44
4.1	Karakteristike X-FEMa .....	45
4.2	Općenita Heaviside-ova funkcija.....	46
4.3	Funkcije asimptotskog polja pomaka .....	47
4.4	X-FEM u dvodimenzijском prostoru.....	47
4.5	X-FEM u trodimenzijском prostoru .....	48
4.6	Jednadžbe ravnoteže .....	49
5	Ispitivanje materijala .....	51
5.1	Ovisnost naprezanje-deformacija čeličnog lijeva.....	51
5.2	Cikličke karakteristike čeličnog lijeva .....	53
5.3	Parisove konstante čeličnog lijeva.....	56
6	Eksperimentalno ispitivanje deformiranja kućišta ventila .....	57
6.1	Ispitivana kućišta ventila .....	57
6.1.1	Kućište ventila DN100 PN40 .....	57
6.1.2	Kućište ventila DN50 .....	66
7	Verifikacija X-FEM metode.....	77
7.1	Procjena koeficijenta intenzivnosti naprezanja .....	77
7.1.1	Savijanje epruvete u tri točke .....	77
7.1.2	Određivanje koeficijenta intenzivnosti naprezanja na kućištu ventila .....	80
7.2	Savijanje cijevi u četiri točke.....	83
8	Radni vijek kućišta ventila s obzirom na zamor materijala .....	91
8.1	Proračun stijenke kućišta ventila prema normi EN 12516-2 .....	91

---

8.2	Određivanje dopuštenog tlaka .....	93
8.3	Određivanje tlaka plastičnog tečenja .....	96
8.4	Nastanak i rast pukotine na kućištu bez greške .....	97
8.4.1	Nastanak pukotine na kućištu ventila .....	97
8.4.2	Rast nastale pukotine do kritične duljine .....	100
8.5	Rast pukotine na kućištu koje sadrži grešku .....	102
8.5.1	Rast hipotetskih pukotine na kućištu ventila DN100 .....	103
8.5.2	Rast hipotetskih pukotina na kućištu ventila DN50 .....	106
8.6	Najveća dozvoljena greška u materijalu kućišta ventila .....	109
8.6.1	Rast pukotine na kućištima DN100 i DN50 .....	109
8.6.2	Nastanak oštre pukotine na mjestu greške kućišta ventila .....	111
9	Zaključak .....	116
10	Literatura .....	119

# Popis slika

---

Slika 2.1 Shematski prikaz ravnina klizanja uslijed promjenjivog opterećenja.....	8
Slika 2.2 Princip sličnosti glatkog laboratorijskog uzorka i vlakna materijala na najopterećenijoj lokaciji .....	9
Slika 2.3 Petlja histereze .....	10
Slika 2.4 a) Efekt cikličkog rasta podatljivosti, b) efekt cikličkog očvršćivanja .....	11
Slika 2.5 Ovisnost deformacije o broju ciklusa do nastanka pukotine.....	13
Slika 2.6 Faze rasta pukotine [54].....	19
Slika 2.7 Moguće ravnine širenja pukotine za vrijeme I i II faze .....	20
Slika 2.8 Orijentacija kritičnih ravnina za: a) krhke materijale, b), c) i d) duktilne materijale [35] .....	22
Slika 2.9 a) Neuberovo pravilo, b) inkrementalno Neuberovo pravilo.....	25
Slika 3.1 Eliptički provrt u ravnoj ploči.....	26
Slika 3.2 Tri tipa opterećenja s odgovarajućim tipovima pukotina [50].....	27
Slika 3.3 Definicija koordinatnog sustava u vršku pukotine.....	28
Slika 3.4 Krivulja za procjenu $J$ -integrala.....	30
Slika 3.5 Zatvorena kontura koja obuhvaća površinu $A$ .....	30
Slika 3.6 Definiranje lokalnog Kartezijevog sustava na fronti pukotine u točki $S$ .....	32
Slika 3.7 Površine $A = A_o + A_t + A_p + A_k$ obuhvaćaju volumen $V$ .....	32
Slika 3.8 Procjena smjera rasta pukotine po različitim kriterijima, [18].....	37
Slika 3.9 Tipični prikaz ovisnosti rasta pukotine o koeficijentu intenzivnosti naprezanja u metalima .....	38
Slika 3.10 Princip formiranja brazdi kod zamora [50].....	39
Slika 3.11 Izgled FAD dijagrama za GP240GH čelični lijev, opcija 3.....	42
Slika 3.12 Definiranje opterećenja plastičnog kolapsa: a) metoda dvostrukog elastičnog nagiba (TES), b) metoda sjecišta tangenti (TI) .....	43
Slika 4.1 Poboljšani čvorovi u mreži konačnih elemenata.....	46
Slika 4.2 Položaj točke u odnosu na pukotinu .....	46
Slika 4.3 Izgled koordinata za funkcije poboljšavanja u vršku pukotine.....	47
Slika 4.4 Izgled koordinata za funkcije poboljšavanja u fronti pukotine.....	49
Slika 4.5 Granice i rubni uvjeti .....	50
Slika 5.1 Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava čeličnog lijeva GP240GH .....	52



Slika 5.2 Stvarni i konvencionalni dijagram naprežanje-deformacija čeličnog lijeva GP240GH .....	53
Slika 5.3 Ispitana epruveta s mjernim ekstenzometrom i nastalom pukotinom.....	54
Slika 5.4 Petlje histerezi: a) početna petlja, b) petlja polovine ispitivanja i c) završna petlja ispitivanja .....	54
Slika 5.5 Ovisnost deformacije o broju ciklusa do nastanka pukotine.....	55
Slika 6.1 Izgled i dimenzije kućišta ventila DN100 PN40.....	58
Slika 6.2 Oznaka kanala i položaj tenzometara na kućištu ventila DN100 PN40 .....	59
Slika 6.3 Kućište ventila DN100 PN40 pripremljeno za eksperiment.....	60
Slika 6.4 Prikaz slomljenog kućišta .....	61
Slika 6.5 Izgled mreže konačnih elemenata korišten za diskretizaciju kućišta DN100 PN40.	62
Slika 6.6 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti deformacije na mjernom kanalu 1 i 2 sa slike 6.2 .....	62
Slika 6.7 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti deformacije na mjernom kanalu 3 i 4 sa slike 6.2 .....	63
Slika 6.8 Izgled zona s iznosom maksimalne ekvivalentne deformacije od 28,5% po debljini stijenke u ovisnosti o unutarnjem tlaku .....	64
Slika 6.9 Ovisnost pomaka o unutarnjem tlaku za realni i elastično-idealno plastični materijalni model.....	65
Slika 6.10 Izgled i dimenzije kućišta ventila DN50 PN160.....	66
Slika 6.11 Oznaka kanala i položaj tenzometara na kućištu ventila DN50 PN160 .....	67
Slika 6.12 Kućište s zalijepljenim tenzometrima spojenim u polu-most s kompenzacijskim tenzometrima .....	68
Slika 6.13 Kućište ventila DN50 PN160 pripremljeno za eksperiment.....	69
Slika 6.14 Shema ispitivanja kućišta ventila.....	70
Slika 6.15 Ispitivanje deformiranja kućišta ventila.....	70
Slika 6.16 Ovisnost cirkularne deformacije o unutarnjem tlaku u kućištu ventila .....	71
Slika 6.17 Ovisnost osne deformacije o unutarnjem tlaku u kućištu ventila .....	72
Slika 6.18 Mreža konačnih elemenata na modelu kućišta ventila.....	73
Slika 6.19 Rubni uvjeti modela kućišta ventila.....	73
Slika 6.20 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata ovisnosti cirkularnih deformacija o unutarnjem tlaku za mjerna mjesta (m.m.) definirana prema slici 6.11 .....	74

Slika 6.21 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata ovisnosti osnih deformacija o unutarnjem tlaku za mjerna mjesta (m.m.) definirana prema slici 6.11 .....	75
Slika 6.22 Odstupanja geometrije numeričkog od stvarnog modela, prikazane vrijednosti su u mm.....	76
Slika 7.1 Dimenzije, mreža konačnih elemenata sa singularnim elementima u okolini vrška pukotine i opterećenja epruvete.....	78
Slika 7.2 X-FEM mreža konačnih elemenata.....	79
Slika 7.3 Vrijednosti koeficijenta intenzivnosti naprezanja duž vrška pukotine.....	80
Slika 7.4 Položaj i dimenzije pukotine na kućištu ventila.....	81
Slika 7.5 Mreža konačnih elementa: a) singularni konačni elementi u vršku pukotine, b) X-FEM konačni element .....	81
Slika 7.6 Vrijednost koeficijenta intenzivnosti naprezanja duž vrška pukotine .....	83
Slika 7.7 Shema opterećenja i geometrija cijevi [77].....	84
Slika 7.8 Mreža konačnih elemenata na geometrijskom modelu analizirane cijevi .....	85
Slika 7.9 Detalj sa slike 7.8 s prikazom progušćene mreže u okolini zareza .....	85
Slika 7.10 Dodijeljeni rubni uvjeti .....	86
Slika 7.11 Broj ciklusa do nastanka pukotine i mjesto nastanka pukotine .....	86
Slika 7.12 Mreža konačnih elemenata korištena za X-FEM analizu .....	88
Slika 7.13 Detalj progušćene mreže u okolini pukotine i ravnine koja definira položaj pukotine.....	89
Slika 7.14 Usporedba eksperimentalnih vrijednosti rasta pukotine s numeričkim i analitičkim vrijednostima.....	89
Slika 8.1 Princip izjednačavanja površina prema EN 12516-2: a) kućište DN100, b) kućište DN50 .....	92
Slika 8.2 Izgled tipične mreže za kućište ventila: a) DN100 i b) DN50 .....	94
Slika 8.3 Rubni uvjeti dodijeljeni kućištu ventila: a) DN100 i b) DN50 .....	94
Slika 8.4 Prikaz lokacije prolaska plastične zone kroz kompletnu debljinu stijenke za: a) DN100 i b) DN50 .....	95
Slika 8.5 Tlak plastičnog kolapsa u ovisnosti o debljini stijenke za kućišta ventila: a) DN100 i b) DN50 .....	95
Slika 8.6 Ovisnost pomaka u odnosu na unutarnji tlak za: a) kućište DN100 i b) kućište DN50 .....	97
Slika 8.7 Mjesto nastanka pukotine na kućištu ventila DN100 – 4 mm debljine stijenke.....	99
Slika 8.8 Mjesto nastanka pukotine na kućištu ventila DN50 – 4 mm debljine stijenke.....	99

Slika 8.9 Ovisnost ekvivalentnog koeficijenta intenzivnosti naprezanja o duljini pukotine .	101
Slika 8.10 Položaj kritičnih pukotina u FAD-dijagramu.....	101
Slika 8.11 Ovisnost duljine pukotine o broju ciklusa na kritičnoj lokaciji .....	102
Slika 8.12 Položaj hipotetskih pukotina na kućištu ventila DN100.....	103
Slika 8.13 Položaj pukotina s najbržim rastom na kućištu DN100 u FAD-dijagramu .....	105
Slika 8.14 Ovisnost duljine pukotine o broju ciklusa na kućištu DN100 .....	105
Slika 8.15 Položaj hipotetskih pukotina na kućištu ventila DN50.....	106
Slika 8.16 Položaj pukotina s najbržim rastom na kućištu DN50 u FAD-dijagramu .....	108
Slika 8.17 Ovisnost duljine pukotine o broju ciklusa na kućištu DN50 .....	108
Slika 8.18 Položaj u FAD dijagramu konačnih pukotina na kritičnim lokacijama.....	110
Slika 8.19 Rast pukotina od 0,5 mm do kritične duljine za kućišta DN100 i DN50 .....	111
Slika 8.20 Globalni model i podmodel kućišta ventila DN100.....	112
Slika 8.21 Mreža konačnih elemenata podmodela kućišta ventila DN100 sa stijenkom 10 mm i greškom duljine 3,5 mm.....	113
Slika 8.22 Prikaz podmodela s određenim brojem ciklusa do nastanka oštre pukotine na kućištu DN100 sa stijenkom 10 mm i s greškom duljine 3,5 mm.....	114

# Popis tablica

---

Tablica 5.1 Kemijski sastav čeličnog lijeva GP240GH .....	51
Tablica 5.2 Mehanička svojstva čeličnog lijeva na sobnoj temperaturi.....	52
Tablica 5.3 Cikličke karakteristike čeličnog lijeva GP240GH .....	55
Tablica 5.4 Parisove konstante čeličnog lijeva [5].....	56
Tablica 6.1 Tlakovi plastičnog kolapsa određeni na osnovu eksperimenta i MKEa, u MPa...	63
Tablica 7.1 Kemijski sastav materijala P275N [77].....	83
Tablica 7.2 karakteristike materijala P275N [77] .....	83
Tablica 8.1 Dopušteno opterećenje kućišta ventila u ovisnosti o debljini stijenke, izraženo u MPa .....	92
Tablica 8.2 Broj čvorova i elemenata po modelu kućišta u odnosu na debljinu stijenke .....	93
Tablica 8.3 Dopušteni tlak za kućišta ventila u MPa .....	96
Tablica 8.4 Tlakovi plastičnog tečenja u ovisnosti o debljine stijenke, izraženo u MPa.....	96
Tablica 8.5 Broj čvorova i elemenata primijenjeni za određivanja mjesta i broja ciklusa do nastanka pukotine .....	98
Tablica 8.6 Broj ciklusa do nastanka pukotine na kućištima DN100 i DN50 .....	99
Tablica 8.7 Broj elemenata i čvorova korišten za diskretizaciju kućišta DN100 .....	104
Tablica 8.8 Broj elemenata i čvorova korišten za diskretizaciju kućišta DN50 .....	107
Tablica 8.9 Broj elemenata i čvorova korišten za diskretizaciju kućišta DN100 i DN50.....	110
Tablica 8.10 Maksimalne duljine greški na kućištima ventila ovisne o debljini stijenke.....	111
Tablica 8.11 Broj elemenata i čvorova korišten za diskretizaciju globalnog modela i podmodela kućišta DN100 i DN50 .....	113
Tablica 8.12 Broj ciklusa do nastanka oštre pukotine u vrhu greške na kućištima ventila DN50 i DN100 .....	114

## Popis važnijih oznaka

---

$a$	mm	duljina pukotine
$\mathbf{a}_I$	--	vektor pomaka čvora dobiven dodavanjem Heavisideove funkcije
$a_I^\alpha$	--	vektor pomaka I-tog čvora
$a_{th}$	mm	duljina nastale pukotine.
$b$	mm	širina pukotine
$\mathbf{b}$	--	volumenske sila
$b_{0i}$	--	eksponent dinamičke čvrstoće pri smicanju
$b_i$	--	eksponent dinamičke čvrstoće
$\mathbf{b}_I^\alpha$	--	vektor pomaka čvora dobiven dodavanjem NT-funkcija čvoru
$c_i$	--	eksponent cikličkih deformacija
$c_{0i}$	--	eksponent cikličke kutne deformacije
$f$	MPa	dopušteno naprezanje
$\mathbf{f}$	--	gustoća obujamne sile
$k$	--	faktor tenzometra
$\mathbf{m}$	--	jedinični vektor u smjeru normale na krivulji
$m$	--	eksponent materijala u Parisovoj jednadžbi
$\mathbf{n}$	--	jedinična vanjska normala
$n'$	--	eksponent cikličkog očvršćivanja
$p_C$	MPa	tlak plastičnog kolapsa
$p_{dop}$	MPa	dopušteni tlak
$p_Y$	MPa	tlak plastičnog tečenja
$\mathbf{q}$	--	jedinični vektor u smjeru rasta pukotine
$\bar{\mathbf{q}}$	--	težinska funkcija
$r$	--	koordinata udaljenosti u lokalnom polarnom koordinatnom sustavu
$\mathbf{t}$	--	površinsko opterećenje
$\bar{\mathbf{t}}$	--	vektor naprezanja

---

 Popis važnijih oznaka
 

---

$v$	--	pomak površine pukotine
$\mathbf{u}_I$	--	vektor pomaka čvora, dobivenog pomoću klasičnog MKEa
$x$	--	odabrana točka
$\mathbf{x}^*$	--	točka sjecišta pukotine sa mrežom konačnih elemenata
$A$	mm <sup>2</sup>	površina
$A_0$	mm <sup>2</sup>	početna površina poprečnog presjeka uzorka
$A_f$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka uzorka kod loma
$\mathbf{C}$	mm <sup>2</sup>	tenzor elastičnosti
$C$	mm <sup>2</sup>	konstante materijala u Parisovoj jednadžbi
$C_1, C_2$	mm <sup>2</sup>	konstante materijala kod Brown - Millerovog kriterija
$E$	GPa	Youngov modul elastičnosti
$F_G$	--	faktor oblika
$G$	--	posmični modul materijala
$H(x)$	--	Heavisideova funkcija
$J$		$J$ – integral
$K'$	MPa $\sqrt{m}$	koeficijent cikličkog očvršćivanja
$K_I, K_{II}, K_{III}$	MPa $\sqrt{m}$	koeficijent intenziteta naprezanja
$K_c$	MPa $\sqrt{m}$	lomna žilavost materijala
$K_{sur}$	--	faktor hrapavosti površine
$\Delta K_{th}$	MPa $\sqrt{m}$	prag širenja pukotine
$\Delta K_{eq}$	MPa $\sqrt{m}$	ekvivalentni koeficijent intenziteta naprezanja
$L$	--	fronta pukotine
$L_f$	--	odnos naprezanja i granice tečenja
$N_i$	ciklus	broj ciklusa
$N_f$	ciklus	broj ciklusa do loma, životni vijek
$N_T$	ciklus	broj ciklusa do granice između nisko cikličkog i visoko cikličkog zamora
$N_a$	--	skup čvorova čiji su elementi presječeni pukotinom
$N_b$	--	skup čvorova u čijim elementima se nalazi vršku pukotine

$N_I$	--	interpolacijska funkcija konačnog elementa, $I = (1, N)$
$N_u$	--	skup svih čvorova mreže konačnih elemenata
$R$	--	omjer najmanjeg i najvećeg naprezanja
$R_e$	MPa	granica rastezanja
$R_m$	MPa	rastezna čvrstoća
$S$	--	faktor materijala kod Brown - Millerovog kriterija
$U$	J	ukupna energija deformiranja ploče
$U_a$	J	gubitak energije uzrokovan nastankom pukotine
$U_A$	V	izlazni napon
$U_E$	V	ulazni napon
$U_o$	J	energija deformiranja ploče prije nastanka pukotine
$U_\gamma$	J	porast energija nastao stvaranjem površinske napetosti na slobodnim površinama pukotine
$W$	J	rad
$W$	--	gustoća energije deformiranja
$Y$	--	bezdimenzijska konstanta
$\varepsilon$	--	duljinska deformacija
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ i $\varepsilon_3$	--	glavne deformacije
$\varepsilon_a$	--	amplituda deformacije
$\varepsilon^e$	--	elastična deformacija
$\varepsilon_f$	--	stvarna deformacija u trenutku loma uzorka
$\varepsilon_f'$	--	koeficijent cikličkih deformacija
$\varepsilon_m$	--	srednja deformacija
$\varepsilon_n$	--	normalna deformacija
$\varepsilon^p$	--	plastična deformacije
$\varepsilon_{ref}$	--	referentna deformacija
$\varepsilon^t$	--	deformacija uslijed utjecaja topline
$\varphi$	°	kut rotacije proizvoljne ravnine oko normale slobodne površine

---

Popis važnijih oznaka

---

$\gamma$	--	gustoća površinske energije sistema
$\gamma_f'$	--	koeficijent cikličke kutne deformacije
$\gamma_{\max}$	--	najveća kutna deformacija
$\gamma_p$	--	rad plastične deformacije potreban za formiranje jedinične površine pukotine
$\lambda(s)$	--	virtualni smjer napredovanja pukotine
$\theta$	°	kut nagiba proizvoljne ravnine u odnosu na slobodnu površinu
$\theta$	°	koordinata kuta u lokalnom polarnom koordinatnom sustavu
$\rho$	mm	polumjer zakrivljenosti vrška pukotine
$\sigma$	--	Cauchyjev tenzor naprezanja
$\sigma$	MPa	lokalno naprezanje
$\sigma_a$	MPa	amplituda normalnog naprezanja
$\sigma_f'$	MPa	koeficijent dinamičke čvrstoće
$\sigma_m$	MPa	srednje naprezanje
$\sigma_{\max}$	MPa	najveće naprezanje uslijed cikličkog opterećenja
$\sigma_{\min}$	MPa	najmanje naprezanje uslijed cikličkog opterećenja
$\sigma_{n,m}$	MPa	srednje normalno naprezanje
$\sigma_{\text{ref}}$	MPa	referentno naprezanje
$\tau_f'$	MPa	koeficijent dinamičke čvrstoće pri smicanju
$\nu$	--	Poissonov omjer
$\nu_e$	--	Poissonov omjer u elastičnom području
$\nu_p$	--	Poissonov omjer u plastičnom području
$\psi_\alpha(\mathbf{x})$	--	funkcije poboljšanja (NT funkcije), $\alpha = (1, M)$
$\Delta$	--	raspon
$\nabla_s$	--	simetrični dio gradijenta operatora



U radu je provedena trodimenzijska analiza nastanka i rasta pukotine kao i rast hipotetskih pukotina na prolaznim i troputim kućištima ventila s različitim debljinama stijenki. Linearno elastičnom analizom kućišta ventila određeno je stanje naprezanja na kućištima opterećenih unutarnjim tlakom. Numerički model je verificiran eksperimentalnim ispitivanjem, pomoću metode tenzometrije, mjerenjem deformacija troputog kućišta ventila DN100 i prolaznog kućišta DN50, opterećenih unutarnjim tlakom. Poznavanjem stanja naprezanja te pomoću ovisnosti amplitude deformacije o broju ciklusa do nastanka pukotine određeno je potencijalno mjesto i broj ciklusa do nastanka pukotine na homogenim kućištima ventila. Nakon toga je provedena analiza rasta nastale pukotine do kritične duljine inkrementalnim povećavanjem duljine pukotine i određivanjem koeficijenta intenzivnosti naprezanja za svaki inkrement. Na osnovu određenih koeficijenata i poznavanjem karakteristika materijala određeni su brojevi ciklusa rasta pukotine korištenjem numeričke integracije Parisovog zakona. Korištenjem dijagrama procijene loma za vrijednosti kritičnih duljina pukotine uočeno je da neće doći do sloma kućišta ventila, nego da će se pojaviti slučaj propuštanja prije loma.

Kako je u praksi rijetkost da se procesom lijevanja dobije homogena struktura, proveden je postupak određivanja najveće dopustive greške u stijenci kućišta ventila. Pukotine koje su smještene u području na kojima su najveća glavna naprezanja imaju najbrži rast a time i kućišta s tim pukotinama imaju najkraći radni vijek. U cilju definiranja najveće dopustive greške s kojom će kućište imati traženi radni vijek, određeni su brojevi ciklusa potrebni za rast hipotetskih pukotina do kritične duljine i na kućišta na kojima nije došlo do nastanka pukotine. Na osnovu brojeva ciklusa rasta pukotine, grafičkim putem određene su najveća duljina pukotina čiji daljnji rast do kritične duljine neće biti kraći od radnog vijeka kućišta ventila. Na greškama koje imaju duljine najvećih dopustivih pukotina, proveden je postupak određivanja nastanka oštre pukotine, na osnovu čega je uočeno da je broj ciklusa do nastanka oštre pukotine kod ovakvih grešaka jako kratak i da se u odnosu na traženi radni vijek može zanemariti.

**Ključne riječi:** Kućište ventila, nastanak pukotine, rast pukotine, zamor materijala, metoda kritičnih ravnina, MKE, X-FEM.

## Summary

---

Three dimensional numerical analysis of fatigue crack initiation, initiated cracks and hypothetical cracks growth were performed on two and three-way valve bodies with different wall thicknesses. Linear elastic finite elements method was used to determine stress states on valve bodies which were loaded by inner pressure. The numerical model was validated experimentally using strain gages and measuring strains on three-way valve body DN100 and two-way valve body DN50, loaded by inner pressure. The time to fatigue crack initiation and potential crack location on homogenous valve body were determined using stress state and local strain-life. After that, analyses of crack growth from initial to critical size were conducted by incremental increased crack length and calculated stress intensity factor for every increment. The time for crack growth was determined using numerical integration of Paris law and material characteristics. Using failure assessment diagram, it was noticed that would happened leak before break.

Since a homogenous structure is very rarely obtained by sand casting, the biggest allowable failure size in the valve body wall was determined. The cracks, which were located in the area of maximum principal stress, had fastest growth and valve bodies with those cracks had shorter life. To define the biggest allowable failure for which valve body would have defined life, the number of stress cycles needed for hypothetical crack growth to critical size was determined. According to this number of cycles, the biggest allowable crack size for which the growth wouldn't be shorter then valve body life was graphically determined. A procedure was conducted determining number of stress cycle for crack initiation on the valve bodies with failure which had size of biggest allowable crack and it was noticed that this time was very short according to valve body life.

**Keywords:** Valve Body, crack initiation, crack growth, fatigue, critical plane method, FEM, X-FEM

# 10

## Literatura

---

- [1] W. Tochtermann, F. Bodenstein, Konstruktionselemente des Maschinenbaus, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1968.
- [2] H. Gaessler, G. Kauer, G. Osterloh, Festigkeitsberechnung von Armaturengehäusen gegen Innendruck. // 3R International. Vol 6, (1979), str. 403 – 413, 1979.
- [3] EN 12516-2, Industrial valves – Shell design strength – Part 2: Calculation method for steel valve shells, ICS 23.060.01, 2004.
- [4] ASME B16.34, Valves flanged, threaded and welding end, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2004.
- [5] C. Berger, G. Blauel, L. Hodulak, B. Pyttel, FKM Guideline, Fracture mechanics, proof of strength for engineering components, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/Main, 2004.
- [6] I. Galić, Z. Tonković, K. Vučković, Experimental and numerical investigation of collapse and burst pressures for a valve housing, Strain: An International Journal for Experimental Mechanics, 47, 2011, str. 519 – 524.
- [7] I. Galić, K. Vučković, Z. Tonković, Nonlinear numerical analysis of two-way globe valve housing, Tehnički vjesnik, 17, 2010, str. 67 – 74.
- [8] C. Zhongbing, L. Guoqing, Z. Hui, C. Chuanyao, Fatigue life prediction of regulating valves on the intermediate-pressure section of a 400 MW steam turbine. // Engineering Failure Analysis. 16, str. 1483 – 1492, 2009.
- [9] A.M.P. De Jesus, A.S. Ribeiro, A.A. Fernandes, Code Based Fatigue Life Prediction of a Pressure Vessel and its Validation. // Proceedings of the Sixth International Conference on Biaxial / Lisboa, Portugal: Multiaxial Fatigue & Fracture, str. 363 – 370, 2001.

- [10] R.G. Colin, R.L. Peter, In-service fatigue failure of engineered products and structures – Case study review, *Engineering Failure Analysis*, 16, str. 1775-1793, 2009.
- [11] F.A. Kandil, M. W. Brown, K.J. Miller, Biaxial low cycle fatigue fracture of 316 stainless steel at elevated temperatures, *Book 280*, The Metals Society, London, 203-210, 1982.
- [12] A.R. Ingraffea, *Computational Fracture Mechanics*, *Encyclopedia of Computational Mechanics*, John Wiley and Sons, Volume 2, 2007.
- [13] A.R. Maligno, S. Rajaratnam, S.B. Leen, E.J. Williams, A three-dimensional (3D) numerical study of fatigue crack growth using remeshing techniques // *Engineering Fracture Mechanics*, 77, str. 94-111, 2010.
- [14] A.R. Shahani, M.R. Amini Fasakhodi, Finite element analysis of dynamic crack propagation using remeshing technique // *Materials and Design*, 30, str.1032-1041, 2009.
- [15] N. Sukumur, N. Möes, B. Moran, T. Belytschko, Extended Finite Element Method for Three-Dimensional Crack Modelling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48, str. 1549 – 1570, 2000.
- [16] J. Réthoré, A. Gravouil, A. Combescure, An energy conserving scheme for dynamic crack growth using the eXtended finite element method // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63, str. 631-659, 2005.
- [17] X. Yangjian, Y. Huang, On damage accumulations in the cyclic cohesive zone model for X-FEM analysis of mixed-mode fatigue crack growth // *Computational Materials Science*, 46, str. 579-585, 2009.
- [18] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. ABAQUS/Standard. User's guide and theoretical manual. verzija 6.11, 2011.
- [19] API 579, API Recommended Practice 579, Fitness for Service, First Edition, March 2000.
- [20] U. Zerbst, M. Schodel, S. Webster, R. A. Ainsworth, *Fitness-for-Service Fracture Assessment of Structures Containing Cracks*, Elsevier, Oxford, 2007.
- [21] I. Skozrit, *Numeričko modeliranje pukotina u metalnim i polimernim materijalima*, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2011.
- [22] Z. Tonković, I. Skozrit, T. Lesičar, *Procjena integriteta opreme pod tlakom*, 8. hrvatski seminar o tlačnoj opremi, 2011.

- [23] ASME “Boiler and pressure vessel code section III and VIII”, New York: American Society for Mechanical Engineers, 1995.
- [24] I. Milne, R.A. Ainsworth, A.R. Dowling, A.T. Stewart, “Assessment of the integrity of structures containing defects”, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, Vol. 32, str. 3-104, 1988.
- [25] J. C. Gerdeen, “A critical evaluation of plastic behaviour data and a united definition of plastic loads for pressure components”, *WRC Bull*, Vol. 254, str. 1-64, 1979.
- [26] H. Li, D. Mackenzie, “Characterizing gross plastic deformation in design by analysis”, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, Vol. 82, str. 777-786, 2005.
- [27] Z. Tonković, I. Skozrit, I. Alfirević, “Influence of flow stress choice on the plastic collapse estimation of axially cracked steam generator tubes”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, str. 1762-1770, 2008.
- [28] M. Save, “Experimental verification of plastic limit analysis of torispherical and toriconical heads”, In: (4th edn ed.), G.J. Bohm et al. *Pressure Vessel and Piping: Design and Analysis Vol. 1*, ASME, str. 382–416, 1972.
- [29] C. Laird, P. Charsley i H. Mughrabi, *Low-Energy Dislocation Structures Produced by Cyclic Deformation*, *Materials Science and Engineering*, (1986), 81, 433-450, 1986.
- [30] T. Mura, *A Theory of Fatigue Crack Initiation*, *Materials Science and Engineering*, (1994), A176, 61-70, 1994.
- [31] J.V. Carstensen, *Structural Evolution and Mechanisms of Fatigue in Polycrystalline Brass*, PhD Thesis, Riso National Laboratory, Roskilde, 1998.
- [32] *MSC/Fatigue User's Manual*
- [33] ASTM Standard E 606-92. *Standard Practise for Strain-Controlled Fatigue Testing* In: *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM; 1998.
- [34] *Fe-Safe, Fatigue Theory Reference Manual*, Safe technologies limited, Sheffield, 2002.
- [35] K. Vučković, *Nastanak zamorne pukotine u korijenu zuba zupčanika s tankim vijencem*, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2009.
- [36] O.H. Basquin, *The exponential law of endurance tests*, *Proc. Am. Soc. Test. Mat.*, Vol. 10, pp 625-630, 1910.

- [37] S.S. Manson, Behaviour of Materials under Conditions of Thermal Stress, Heat Transfer Symp., University of Michigan Engineering Research Institute, 9-75, 1953.
- [38] L.F. Coffin, A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, Trans. Am. Soc. for Test. and Mat., vol.76, 931-950, 1954.
- [39] J.D. Morrow, Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, In: International Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM; 45-86, 1965.
- [40] K.S. Kim, X. Chen, C. Han, H.W. Lee, Estimation methods for Fatigue Properties of Steels under Axial and Torsional Loading, International Journal of Fatigue, 24, 783-793, 2002
- [41] J.D. Morrow, Fatigue Properties of Metals, Fatigue Design Handbook, SAE, Warrendale, section 3.2, 1968
- [42] K.N. Smith, P. Watson, T.H. Topper, A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, Journal of Materials, JMLSA, 5(4), pp. 767-778, 1970
- [43] N.E. Dowling, Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue, SAE Paper No.2004-01-2227, Fatigue 2004: Second SAE Brasil International Conference on Fatigue, 2004.
- [44] S. Podrug, Prilog problematici integriteta zupčanika s obzirom na čvrstoću korijena zuba, Doktorska disertacija, FESB Split, 2004.
- [45] Y.S. Garud, Multiaxial fatigue: a survey of the state of the art, Journal of Testing and Evaluation 9, 165-178, 1981.
- [46] E.H. Jordan, Fatigue-multiaxial aspects, Pressure Vessel and Piping Design Technology: A Decade of Progress, American Society of Mech. Engineers, 507-518, 1982.
- [47] M. W. Brown, K.J. Miller, A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers 187, 745-755, 1973.
- [48] J.A. Bannantine, D.F. Socie, A Variable Amplitude Multiaxial Fatigue Life Prediction Method, Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading, Proc. Third International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, Stuttgart, 1989.
- [49] T. L. Anderson, Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, Second editions, Department of Mechanical Engineering Texas A&M University, 1995.
- [50] M. Husnjak, Mehanika loma – Bilješke s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

- [51] C. E. Inglis, Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners, Transactions of the Institute of Naval Architects, Vol. 55, str. 219-241, 1913.
- [52] G. R. Irwin, Fracture Dynamics, Fracturing of Metals, American Society for Metals, Cleveland, str. 147-166, 1948.
- [53] E. Orowan, Fracture and Strength of Solids, Reports on Progress in Physics, Vol. XII, str 185-232, 1948.
- [54] S. Podrug, Mehanika loma, predavanje s poslijediplomskog studija, Fakultet Elektrotehnike, Strojarsstva i Brodogradnje, Split, 2009.
- [55] C. F. Shih, B. Moran, T. Nakamura, Energy Release Rate along a Three-Dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body, International Journal of Fracture, Vol. 30, str. 79–102, 1986.
- [56] C.F. Shih, R.J. Asaro, Elastic-Plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces: Part I - Small Scale Yielding, Journal of Applied Mechanics, str. 299–316, 1988.
- [57] D.M. Barnett, R.J. Asaro, The Fracture Mechanics of Slit-Like Cracks in Anisotropic Elastic Media, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 20, str. 353–366, 1972.
- [58] F. Erdogan, G.C. Sih, On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, str. 519–527, 1963.
- [59] G.R. Irwin, Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminum Alloys, Sagamore Research Conference Proceedings, 2, str. 289-305, 1956.
- [60] M.A. Hussain, S.L. Pu, J. Underwood, Strain-Energy-Release Rate for a Crack under Combined Mode I and Mode II, ASTM-STP-560, str. 2–28, 1974.
- [61] K. Palaniswamy, W.G. Knauss, On the Problem of Crack Extension in Brittle Solids under General Loading, Mechanics Today, urednik S. Nemat-Nasser, Vol. 4, Pergamon Press, 1978.
- [62] B. Cotterell, J.R. Rice, Slightly Curved or Kinked Cracks, International Journal of Fracture, Vol. 16, str. 155–169, 1980.
- [63] M.R. Andersen, Fatigue Crack Initiation and Growth in Ship Structures, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 1998.
- [64] J. Shi, D. Chopp, J. Lua, N. Sukumar, T. Belytshko, Abaqus Implementation of Extended Method Using a Level Set Representation for Three-Dimensional Fatigue Crack Growth and Life Predictions, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 85, broj 10, str. 2840-2863, 2010.

- [65] N. Möes, J. Dolbow, T. Belytschko, A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46 (1), str. 131-150, 1999.
- [66] T. Belytschko, Y. Y. Lu, L. Gu, Element-free Galerkin methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, str. 229-256, 1994.
- [67] M. Fleming, Y. A. Chu, B. Moran, T. Belytschko, Enriched Element-free Galerkin Methods for Crack Tip Fields, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40 (8), str. 1483 – 1504, 1997.
- [68] M. Stolarska, D. L. Chopp, N. Möes, T. Belytschko, Modeling crack growth by level sets in the extended finite element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51 (8), str. 943-960, 2001.
- [69] EN 10213, Steel casting for pressure purposes, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [70] EN 10002-1, Metallic Materials – Tensile Testing – Part 1: Method of Test at Ambient Temperature, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990.
- [71] I. Galić, Z. Tomičević, Z. Tonković, Fatigue testing of cast steel GP240GH, Proc. Second International of Engineering Against Fracture, urednik S. Pantelakis, Patras, 2011.
- [72] I. Galić, Z. Tonković, K. Vučković, Experimental and numerical investigation of failure pressure of valve housing, *Engineering Against Fracture*, S. Pantelakis, C. Rodopoulos, Springer, Berlin, 2009, str 487 – 497.
- [73] R.G. Sim, Evaluation of reference parameters for structures subjected to creep, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 13, str. 47-50, 1971.
- [74] I.W. Goodal, G.A. Webster, Theoretical determination of reference stress for partially penetrating flaws in plates, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 78, str. 687-695, 2001.
- [75] K. Hoffmann, *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, HBM, Darmstadt, 1989.
- [76] K. Hoffmann, *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*, HBM, Darmstadt, 2005.
- [77] P.K. Singh, K.K. Vaze, V. Bhasin, H.S. Kushwaha, P. Gandhi, D.S. Ramachandra Murthy, Crack initiation and growth behavior of circumferentially cracked pipes under cyclic and monotonic loading, *Elsevier: International Journal Pressure Vessels and Piping*, 80, 2003, str. 629 – 640.



- [78] P. Andersson, M. Bergman, B. Brickstad, L. Dahlberg, F. Nilsson, I. Sattari-Far, A procedure for safety assessment of components with cracks-handbook, SAQ/FoU – Report 96/08, Stockholm: SAQ Kontrol Lab., 1998.

# Životopis

---

Rođen 26. Studenog 1975. godine.

## *Školovanje*

1982-1990, X osnovna škola „Braća Ribar“, Mostar, BiH,  
1990-1992, Mašinska škola, Mostar, BiH,  
1992-1994, Srednja strukovna i tehnička škola, Š. Brijeg, BiH,  
1994-2001, studij motora i motornih vozila na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,  
2001, diplomirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, studij: Motori i motorna vozila  
od 2003, poslijediplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, smjer: Teorija konstrukcija.

## *Zaposlenje*

11/2002 konstruktor ventila i pneumatskih motora, ATM, Zagreb,  
07/2009 asistent na Zavodu za konstruiranje, Katedra za elemente strojeva i konstrukcija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

## *Strani jezici*

Engleski jezik.

## *Broj objavljenih znanstvenih radova*

1 rad u međunarodnom časopisu indeksiran u CCu (eng. *Current Contents*),  
2 rada objavljena u časopisima s međunarodnom recenzijom,  
3 rada u zbornicima radova s međunarodnih znanstvenih skupova,  
1 rad u zbornicima radova sa znanstvenih skupova,  
1 poglavlje u knjizi.

## Curriculum vitae

---

Born on 26<sup>st</sup> November 1975.

### *Education*

1982-1990, 10<sup>th</sup> primary school „Braća Ribar“, Mostar, BiH,  
1990-1992, “Mašinska škola”, Mostar, BIH,  
1992-1994, “Srednja strukovna i tehnička škola”, Š. Brijeg, BIH,  
1994-2001, studies in Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture,  
University of Zagreb,  
2001, graduated in Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical  
Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb,  
since 2003, doctoral study in Theory of Structures and Design at the Faculty of  
Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

### *Employment*

11/2002 designer of valves and pneumatic actuators, ATM, Zagreb,  
07/2009 assistant at Department of Design at the Faculty of Mechanical  
Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

### *Foreign languages*

English language.

### *Number of scientific publications*

1 paper published in CC (*Current Contents*) journals  
2 papers published in other international journals  
3 papers published in proceedings of international conferences  
1 paper published in proceedings of conferences  
1 chapter in book