

# Optimizacija postupka zavarivanja čelika povišene čvrstoće za rad pri niskim temperaturama

---

**Randić, Miroslav**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:911241>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-08**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET**

Miroslav Randić

**OPTIMIZACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA ČELIKA  
POVIŠENE ČVRSTOĆE ZA RAD PRI NISKIM  
TEMPERATURAMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2022.



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET**

Miroslav Randić

**OPTIMIZACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA ČELIKA  
POVIŠENE ČVRSTOĆE ZA RAD PRI NISKIM  
TEMPERATURAMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. sc. Duško Pavletić

Komentor: prof. dr. sc. Goran Turkalj

Rijeka, 2022.



**UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING**

Miroslav Randić

**OPTIMIZATION OF WELDING PROCESS FOR HIGH-  
STRENGTH STEEL USED AT LOW TEMPERATURE**

DOCTORAL DISERTATION

Rijeka, 2022.

Autor doktorske disertacije: Miroslav Randić

Mentor doktorske disertacije: Prof. dr. sc. Duško Pavletić,  
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Komentor doktorske disertacije: Prof. dr. sc. Goran Turkalj,  
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Sastav povjerenstva za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Goran Cukor – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Domagoj Lanc – član
3. Prof. dr. sc. Ivan Samardžić – član

Doktorska disertacija obranjena je dana 12. prosinca 2022. na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Goran Cukor – predsjednik \_\_\_\_\_
2. Prof. dr. sc. Domagoj Lanc – član \_\_\_\_\_
3. Prof. dr. sc. Ivan Samardžić – član \_\_\_\_\_

## ZAHVALA

Izrada ovog doktorskog rada, te organizacija i provedba istraživanja iziskivali su velik fizički i psihički napor, te vremenska i financijska ulaganja. Zbog toga se ovom prilikom želim zahvaliti svima koji su mi pomogli da bi te napore i ulaganja lakše podnio i onima bez čije pomoći sigurno ne bih uspio završiti ovaj rad.

Najprije želim izraziti veliku zahvalu mentoru prof. dr. sc. Dušku Pavletiću, dipl. ing. na pomoći i podršci tijekom izrade ove disertacije, te na pruženim profesionalnim savjetima. Njegove pedagoške sposobnosti i pristupačnost, kao i široko znanje i dugogodišnje iskustvo iz područja zavarivanja uvelike su doprinijeli kvaliteti ovoga doktorskog rada. Hvala ti na trenucima koje si proveo sa mnom pri izradi ovog rada i na vjeri koju si imao da ću uspjeti završiti ovaj rad.

Također se zahvaljujem komentoru prof. dr. sc. Goranu Turkalju, dipl. ing. na stručnim savjetima vezanim uz koncentraciju naprezanja.

Zahvaljujem se Centru za napredno računanje i modeliranje (CNRM) na ustupljenim resursima „ATOS II Triple Scan“ koji se nalazi na Kampusu Sveučilišta u Rijeci. Skener i ostala istraživačka ICT infrastruktura su nabavljeni kroz projekt „Razvoj istraživačke infrastrukture za laboratorije na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“ (RISK) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Posebno se zahvaljujem Vedranu Marganu iz CNRM na tehničkoj podršci.

Zahvaljujem gosp. Ivanu Iviću, vlasniku firme „DALMONT“, Kraljevica, koji mi je pomogao oko pripreme i izvođenja pokusa zavarivanja. Posebnu zahvalnost dugujem gosp. Igoru Bevandiću, ing., iz firme „DALMONT“ koji mi je puno pomogao stručnim savjetima, te mi je pomogao prilikom organizacije i prilikom samog izvođenja pokusa zavarivanja. Igore, hvala ti na strpljenju koje si imao sa mnom dok smo organizirali pokuse zavarivanja. Također zahvaljujem zavarivaču gosp. Josipu Keseru na trudu oko zavarivanja uzoraka.

Zahvaljujem svojim roditeljima mami Nedeljki i pokojnom ocu Jasenku, koji su mi pomogli u trenucima kada mi je pomoć bila najpotrebnija.

I na kraju najveće hvala mojoj Obitelji supruzi Tereziji i sinu Adrijanu, koji su me podnosili dok sam sate i sate sjedio u dnevnom boravku pored kompjutera ili sa knjigom u ruci, umjesto da smo vikende provodili skupa u prirodi.

## SAŽETAK

Geometrija površine zavarenog spoja značajno utječe na nastajanje površinskih pukotina. Najveća koncentracija naprezanja u zavarenom spoju javlja se u rubu šava zavarenog spoja. Da bi se koncentracija naprezanja smanjila, potrebno je rubu zavarenog spoja dati oblik koji ima najmanju koncentraciju naprezanja. To se može napraviti nekom od metoda poslije procesa zavarivanja, ili tijekom zavarivanja promjenom parametara zavarivanja utjecati na oblik ruba zavarenog spoja. Metode kojima se poslije procesa zavarivanja mijenja oblik zavarenog spoja za posljedicu imaju dodatni utrošak vremena i novca. U ovom radu su opisana istraživanja u kojima su se mijenjali parametri zavarivanja na način da se postigne oblik zavarenog spoja koji ima najmanju koncentraciju naprezanja.

Analizom dosadašnjih istraživanja došlo se do spoznaje da sljedeći parametri zavarivanja imaju značajan utjecaj na oblik zavarenog spoja, a do sada o njima nisu rađena veća sustavna istraživanja: kut dodatnog materijala, broj prolaza završnog sloja, dužina slobodnog kraja žice te zaštitni plin.

U svrhu dokazivanja hipoteza napravljeno je 24 pokusa, u kojima su sustavno mijenjani parametri zavarivanja. Nakon provedenih pokusa zavarivanja površina svakog uzorka je snimljena 3D skenerom te je površina zavarenog spoja učitana u računalni program „*GOM inspect*“, u kojemu su izmjerene geometrijske veličine zavarenog spoja koje utječu na faktor koncentracije naprezanja. Pet geometrijskih veličina koje utječu na vrijednost faktora koncentracije naprezanja u sučeljno zavarenom spoju su: radijus ruba šava, kut nadvišenja sljemena šava, visina nadvišenja zavarenog spoja, širina zavarenog spoja te debljina osnovnog materijala. Metodom potpunog plana pokusa napravljena je analiza utjecajnosti parametara zavarivanja s obzirom na faktor koncentracije naprezanja.

**Ključne riječi:** sučeljno zavareni spoj, faktor koncentracije naprezanja, radijus ruba šava, parametri zavarivanja, geometrija površine zavarenog spoja

## ABSTRACT

The surface geometry of the welded joint significantly affects the formation of surface cracks. The highest stress concentration in the welded joint occurs at the edge of the welded joint seam. In order to reduce the stress concentration, it is necessary to apply the lowest stress concentration to the edge of the welded joint. This can be achieved with one of the methods after the welding process, yet, this approach may be time-consuming and costly. Another method is to change the welding parameters during welding by affecting the shape of the edge of the welded joint. This paper describes a new way of changing welding parameters, i.e., we proposed that lowering the stress concentration in the weld face zone through an appropriate choice of welding parameters may prevent surface cracks at the welds.

We discovered that welding parameters, including the angle of additional material, number of passages, length of free wire end, and shielding gas, significantly impact the shape of the welded joint.

In order to prove the hypotheses, 24 experiments were performed, in which the welding parameters were systematically changed. After the experiments, the surface of each sample was recorded with a 3D scanner, and the surface of the welded joint was loaded into the computer program "*GOM inspect*", which analyzed the geometric quantities of the welded joint that affect the stress concentration factor. The five geometric quantities that affect the value of the stress concentration factor in the butt weld are: weld edge radius, weld ridge cantilever angle, weld joint cant height, weld joint width, and base material thickness. The analysis of the influence of welding parameters with respect to the stress concentration factor was performed using the complete test plan method.

**Key words:** butt welded joint, stress concentration factor, weld edge radius, welding parameters, welded joint surface geometry

## SADRŽAJ

	Stranica
<b>ZAHVALA</b> .....	I
<b>SAŽETAK</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>SADRŽAJ</b> .....	IV
<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. Problem uočen u praksi .....	1
1.2. Predmet istraživanja .....	4
1.3. Kratak pregled dosadašnjih istraživanja .....	5
1.4. Svrha i cilj istraživanja .....	11
1.5. Očekivani rezultat istraživanja i znanstveni doprinos .....	11
1.6. Struktura rada .....	11
1.7. Dijagram toka plana istraživanja .....	13
1.8. Ograničenja .....	15
<b>2. KONCENTRACIJA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA</b> .....	16
2.1. Osnovni pojmovi i definicije sučeljno zavarenog spoja .....	18
2.2. Značaj čvrstoće zavara na brodskim konstrukcijama .....	20
2.3. Tretman ruba šava zavara nakon postupka zavarivanja .....	21
2.4. Pukotine u zavarima na brodskoj strukturi i objektima morske tehnologije .....	22
2.5. Faktor koncentracije naprezanja .....	23
2.6. Izračun faktora koncentracije naprezanja $K_t$ .....	28
2.7. Analiza izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja .....	35
2.8. Analiza utjecajnih geometrijskih veličina .....	36
2.9. Zaključak provedene analize utjecaja geometrijskih veličina .....	45
2.10. Propisi i norme vezane uz faktor koncentracije naprezanja u zavarenim	47

<b>3.</b>	<b>MATERIJALI I METODE UPOTRIJEBLJENI U ISTRAŽIVANJU . . . . .</b>	<b>50</b>
3.1.	Proces provedbe pokusa . . . . .	50
3.2.	Upotrijebljeni osnovni materijali . . . . .	55
3.3.	Dodatni materijal . . . . .	58
3.4.	Korišteni postupci zavarivanja . . . . .	60
3.5.	Konstantni ulazni kontrolirani faktori . . . . .	63
3.6.	Promjenjivi kontrolirani ulazni faktori . . . . .	65
3.7.	Nekontrolirani ulazni faktori . . . . .	73
3.8.	Izlaz iz procesa . . . . .	73
3.9.	Zarez na rubu šava . . . . .	73
<b>4.</b>	<b>PROVEDBA POKUSA . . . . .</b>	<b>75</b>
4.1.	Zavarivanje uzoraka . . . . .	75
4.2.	Analiza geometrijskih veličina zavarenog spoja . . . . .	76
4.3.	Metode snimanja geometrijskih veličina zavarenog spoja . . . . .	77
4.4.	Metode mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja . . . . .	81
4.5.	Snimanje uzoraka . . . . .	83
4.6.	Mjerenje geometrijskih veličina zavarenog spoja . . . . .	84
4.7.	Određivanje kritičnog presjeka zavarenog spoja . . . . .	97
4.8.	Optimizacija postupka zavarivanja pomoću najmanjih faktora koncentracije naprezanja . . . . .	102
<b>5.</b>	<b>ANALIZA REZULTATA . . . . .</b>	<b>105</b>
5.1.	Regresijska analiza . . . . .	105
5.2.	Utjecaj parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije naprezanja . . . . .	108
5.3.	Utjecaj međudjelovanja parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije naprezanja . . . . .	110

5.4.	Određivanje parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije naprezanja .....	112
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>114</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>123</b>
	<b>POPIS OZNAKA I KRATICA .....</b>	<b>136</b>
	<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>141</b>
	<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>145</b>
	<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....</b>	<b>146</b>
	<b>POPIS PRIVITAKA .....</b>	<b>148</b>
	<b>PRIVITCI .....</b>	<b>P-1</b>
	<b>ŽIVOTOPIS</b>	



## 1. UVOD

Brodská konstrukcija, kao i konstrukcije odobalnih objekata morske tehnologije su prilikom eksploatacije izložene mnogobrojnim uzastopnim promjenama naprezanja. Pukotine koje nastaju prilikom mnogobrojnih uzastopnih promjena naprezanja koja su manja od prekidne čvrstoće materijala se nazivaju pukotine uslijed zamora materijala. Nakon iniciranja, pukotine se vremenom povećavaju te dolazi do lomova konstrukcije koja trajno ili do popravka onemogućuju brodskoj konstrukciji da izvrši svoju namjenu. Pukotine mogu nastati na raznim mjestima na brodskoj konstrukciji na zavarenim spojevima ili na elementima strukture broskog trupa.

Područje glavne palube i dna broda su mjesta koja su najudaljenija od neutralne osi te su najizloženija uzastopnim promjenama opterećenja. Osim toga u tridesetogodišnjoj eksploataciji brodska struktura doživi oko  $7,5 \cdot 10^7$  ciklusa promjene opterećenja, odnosno prosječno 4 do 5 ciklusa promjene opterećenja u minuti. Iz ovih razloga tehnologiji zavarivanja se na tim mjestima mora posvetiti posebna pažnja [14, 36].

### 1.1. Problem uočen u praksi

Pukotine se mogu inicirati u unutrašnjosti šava zavara ili na površini zavarenog spoja. Pukotine u šavu zavarenog spoja se iniciraju na mjestu gdje se prilikom zavarivanja javila pogreška zbog propusta prilikom zavarivanja. Pukotine koje se iniciraju na površini zavarenog spoja započinju na mjestima površinskih nepravilnosti. Da bi se smanjio broj pogrešaka prilikom gradnje broda ili tijekom popravaka i rekonstrukcije broda, površina zavara se pregledava vizualno od strane inspektora nadležnih institucija, a određeni broj zavara se prema propisima klasifikacijskih društava ispituje metodama bez razaranja. Sve nedopuštene pogreške u zavarenom spoju se moraju otkloniti prije puštanja broda u redovitu eksploataciju. Ovaj rad je fokusiran na geometrijski oblik površine zavarenog spoja odakle se pukotina može proširiti na cijeli zavareni spoj.

Postoji nekoliko načina s kojima se može oblikovati površina zavara radi smanjenja koncentracije naprezanja, a na brodovima je najčešće upotrebljavana metoda brušenja površine zavara. Na objektima morske tehnologije posebno na odobalnim platformama za istraživanje i

eksploataciju nafte i plina često se primjenjuje hladno oblikovanje čekićem (engl. *hammer peening*) [29]. Međutim sve metode koje se primjenjuju nakon završenog zavarivanja iziskuju dodatnu upotrebu materijala i ljudskog rada te povećavaju troškove izrade. Optimizacijom parametara zavarivanja se može odmah tijekom procesa zavarivanja postići geometrija zavarenog spoja koja ima povoljan oblik površine da se u njoj inicira najmanje površinskih pukotina. Na taj način se može uštedjeti na vremenu potrebnom za zavarivanje te se dobije zavareni spoj koji će inicirati najmanje površinskih pukotina [67].

Postoje mnogobrojni primjeri kada su brodovi dolazili u opasnost zbog širenja pukotina koje su inicirane na području palube, gdje se javljaju najveća naprezanja. Ekstremni primjer je pukotine na glavnoj palubi duge preko 20 m koja se je na m/t „CASTOR“ proširila gotovo s jednog boka broda na drugi bok. Na slici 1.1. prikazana je snimka glavne palube na kojoj se vidi kako se pukotina proširila [74].



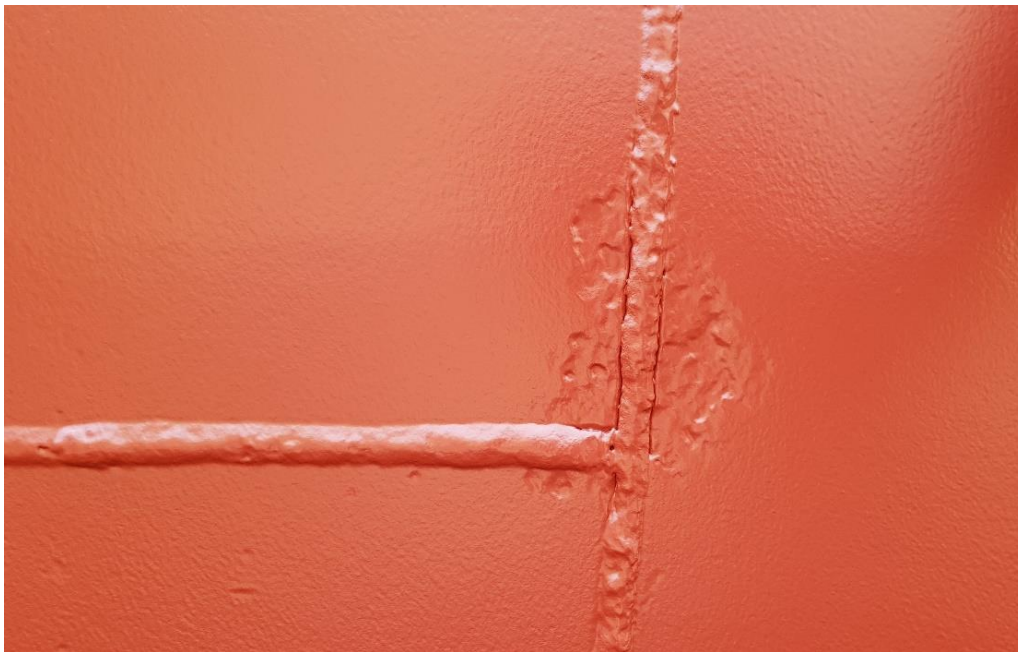
**Slika 1.1.** Pukotina na tankeru „CASTOR“ [74]

Primjeri pukotina na radijusu ruba šava prilikom eksploatacije prikazani su na slikama 1.2. i 1.3. Na slici 1.2. prikazana je pukotina na radijusu ruba šava, koji je snimljen na glavnoj palubi broda za prijevoz naftnih derivata. U trenutku kada je slikana ova slika brod je bio u eksploataciji

5 godina. Na slici 1.3. prikazana je pukotina na poprečnom zavaru na vanjskoj oplati broda za prijevoz asfalta koji je u trenutku snimanja bio u eksploataciji 22 godine.



**Slika 1.2.** Pukotina na radijusu ruba šava na glavnoj palubi tankera (vlastiti izvor)



**Slika 1.3.** Pukotina na radijusu ruba šava na vanjskoj oplati na brodu namjenjenom za prijevoz asfalta (vlastiti izvor)

Prilikom eksploatacije broda kao jedan od problema zbog kojih nastaju pukotine u zavarenom spoju je nesavršenost geometrije sučeljnih zavarenih spojeva. Pukotine u sučeljnom

spoju nastaju u područjima nesavršenosti zavara [62]. Ako se usvoji činjenica da ne postoji odstupanje u liniji limova koji se zavaruju te ako se usvoji činjenica da u zavarenom spoju nema pogrešaka prema normi ISO 6520-1 [39], tada se nesavršenosti zbog kojih nastaju pukotine mogu svesti isključivo na geometrijski oblik zavarenog spoja.

Optimizacijom parametara zavarivanja se može postići povoljna površina zavarenog spoja.

## **1.2. Predmet istraživanja**

S obzirom na otvaranje sjeveroistočnog plovnog puta iz Europe za Daleki istok preko Arktičkog oceana, te s obzirom na moguće otvaranje sjeverozapadnog plovnog puta sjeverno od Kanade, a uzimajući u obzir propise klasifikacijskih društava na brodove se sve više ugrađuje čelik povišene čvrstoće otporan na niske temperature. Sjeverni plovni putovi su najkraći plovni putovi od Europe do Dalekog istoka, odnosno od sjeverne Amerike do Dalekog istoka, te u odnosu na tradicionalne plovne putove predstavljaju znatno smanjenje troška putovanja. Prolaskom kroz sjeveroistočni plovni put od luke Rotterdam do jedne od najvećih kineskih luka Šangaja putovanje se skraćuje za oko 3.000 nautičkih milja ili za oko 8 dana navigacije. Skraćivanjem plovnog puta mogu se znatno smanjiti troškovi transporta materijala i roba te u konačnici može doći do smanjenja cijene konačnog proizvoda zbog manjih transportnih troškova. Osim toga u Arktičkom oceanu su pronađene velike količine sirove nafte, zbog čega se sve više platformi za bušenje morskog dna gradi s namjenom da rade u prostorima Arktičkog oceana. Zbog toga će se kao predmet istraživanja u ovom radu koristiti čelici povišene čvrstoće otporni na niske temperature koji se sve više ugrađuju u brodske konstrukcije i u objekte morske tehnologije.

U ovom radu je postavljena jedna opća hipoteza, te su usvojene dvije pretpostavke.

### Opća hipoteza

Pravilnim odabirom geometrije žlijeba te parametara i načina izvođenja zavarivanja čelika povišene čvrstoće otpornih za rad pri niskim temperaturama, moguće je postići povoljan oblik površine zavarenog spoja sa stajališta otpornosti na inicijaciju površinskih pukotina.

### Pretpostavke

a) Parametri zavarivanja utječu na oblik površine zavarenog spoja, a ona utječe na otpornost zavarenog spoja na inicijaciju površinskih pukotina, odnosno na pojavu povećane koncentracije naprezanja.

b) Promjenom oblika površine zavarenog spoja može se produžiti vijek trajanja zavarenog spoja.

Potrebno je definirati utjecaj geometrijskih veličina zavarenog spoja, te utjecaj svih parametara zavarivanja na geometriju, odnosno na površinu zavarenog spoja. Parametri za koje se utvrdi da su najutjecajnije na formiranje površine zavarenog spoja, te oni parametri koji prilikom dosadašnjih istraživanja još nisu dovoljno istraženi optimizirat će se na način da se prilikom pokusa variraju u dvije ili tri razine. Svaki uzorak bit će snimljen digitalnom kamerom te će se analizirati površina zavara. Za svaki uzorak će se izračunati faktor koncentracije naprezanja te će se metodom planiranja pokusa (engl. *design of experiments*, skr. DOE) odrediti koji promjenjivi ulazni parametri najviše utječu na geometrijske značajke zavarenog spoja. Na taj način će se definirati ulazni parametri procesa zavarivanja s ciljem dobivanja povoljnog oblika površine zavara.

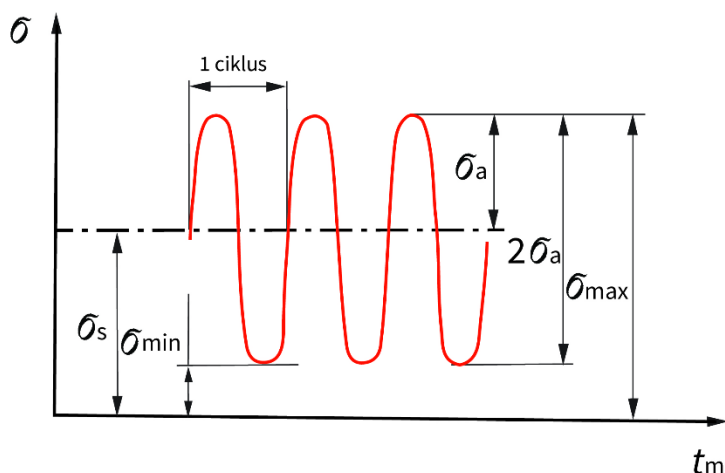
### **1.3. Kratak pregled dosadašnjih istraživanja**

Prve poznate rezultate testiranja zamorne čvrstoće materijala objavio je Albert 1837. godine [1]. Njegova ispitivanja sastojala su se od velikog broja ciklusa naprezanja, a istraživao je lomove na konvejerima koji su upotrebljavani u tadašnjim rudnicima ugljena. Naglim razvojem željezničkog prometa sredinom XIX. stoljeća, počelo je dolaziti do teških nesreća izazvanih pucanjem osovina. Na osovinama su zamijećene pukotine koje su se tijekom eksploatacije povećavale te dovodile do pucanja osovina. Analizirajući ovaj problem pucanja osovina, Rankine je 1842. godine izvršio ispitivanja na osovinama lokomotiva te je utvrdio da se pojava pukotina može smanjiti ako se umjesto oštih rubova izvedu zaobljenja. Prva ispitivanja izvođena su sa stvarnim komponentama, što je znatno otežavalo ispitivanja [106, 108].

Riječ zamor (engl. *fatigue*) je prvi put usvojena 1850-ih godina kao izraz koji opisuje smanjenje sposobnosti materijala da se opire pojavi pukotina zbog cikličkih opterećenja.

Wöhler je u Njemačkoj tijekom pedesetih i šezdesetih godina XIX. stoljeća prvi obavio sustavna laboratorijska istraživanja vezana uz probleme učestalih lomova željezničkih osovina. On je prvi uočio slučajeve loma konstrukcije kod kojih je naprezanje bilo niže od granice razvlačenja. Prvi je upotrijebio S-N dijagram (engl. *Stress – Number curve*) radi prikazivanja odnosa naprezanja i broja ciklusa pri kojem dolazi do razaranja. Njegovi zaključci o produljenju radnog vijeka konstrukcije s opadanjem amplitude ciklusa opterećenja i postojanju vrijednosti amplitude naprezanja kod koje lom neće nastupiti ni kod neograničenog ponavljanja opterećenja (dinamička izdržljivost ili trajna dinamička čvrstoća) temeljne su postavke i današnjeg izučavanja zamora materijala. Wöhler je također uočio da je za zamor materijala važniji raspon naprezanja od samog maksimalnog naprezanja. On se naziva „ocem“ sustavnog ispitivanja materijala na zamor [113]. Na slici 1.4. prikazano je nekoliko ciklusa naprezanja koji se koriste tijekom istraživanja, s pripadnim parametrima [122].

Početkom XX. stoljeća započela je upotreba optičkog mikroskopa prilikom proučavanja klizanja u mikrostrukturi materijala koja dovodi do stvaranja mikropukotine. Polovinom XX. stoljeća započela je upotreba elektronskog mikroskopa, te su uvedene elektrohidrauličke ispitne stanice (umarlalice).



**Slika 1.4.** Ciklusi naprezanja

Griffith je 1921. godine objavio rezultate teorijskih proračuna i rezultate pokusa krhkog loma stakla, u kojima je otkrio da čvrstoća stakla ovisi o veličini mikroskopske pukotine. Između ostalog, otkrio je i da je stvarna čvrstoća materijala znatno niža od teorijske, što je objasnio činjenicom da materijal uvijek sadržava pukotine. Ovim zaključkom Griffith je postao utemeljitelj mehanike loma [25]. Godine 1927. Moore i Kommers prvi su objavili značajniju knjigu, u kojoj su objavili sva dotadašnja istraživanja vezana uz zamor materijala [82].

Neuber je 1937. godine objavio svoj rad u kojem objašnjava metodu kojom na temelju poznatih (izračunatih) faktora koncentracije naprezanja za slučaj elastičnog ponašanja materijala određuje koncentracija naprezanja za slučaj plastičnog ponašanja materijala. Pritom se lokalno naprezanje, odnosno lokalna deformacija može izračunati pomoću faktora koncentracije naprezanja iz poznatih nominalnih naprezanja, odnosno nominalnih deformacija koje vladaju dalje od diskontinuiteta u kojem se javlja koncentracija naprezanja [103, 102].

Bez obzira što ispitivanja vezana uz zamor materijala iziskuju mnogo vremena i velika financijska sredstva, u proteklih stotinu godina izvršeno je mnogo ispitivanja te je objavljeno mnogo znanstvenih radova vezanih uz zamor materijala i stvaranje pukotina u njima. Razvojem zavarivanja, polovicom prošlog stoljeća počinju ispitivanja stvaranja pukotina u zavarenim spojevima [88]. Kobayashi i Onoue su 1943. godine opisali istraživanja pucanja zavarenih spojeva na brodovima serije „*Liberty*“. To su bili prvi brodovi na kojima se upotrebljavalo elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom, a predstavljali su obnovu brodova američke trgovačke mornarice nakon Drugog svjetskog rata. Gradnja tih brodova se odvijala veoma brzo, a metode zavarivanja čeličnih limova još nisu bile u potpunosti istražene. Zbog toga je u zavarenim spojevima ostajalo mnogo pogrešaka koje bi se, ulaskom broda u područje lošeg vremena te u područje niskih temperatura, razvijale u pukotine koje su dovodile do pucanja zavara [61].

Nishida je 1967. godine objavio knjigu „*Stress Concentration*“ u kojoj je opisao eksperimentalna istraživanja koncentracije naprezanja pomoću fotoelastične tehnike. On je vršio ispitivanja s raznim oblicima zavarenog spoja i s raznim vrstama opterećenja te je objavio izraz pomoću kojeg se može izračunati faktor koncentracije naprezanja u sučeljno zavarenom spoju. U prvom izdanju svoje knjige obradio je 150 raznih geometrijskih oblika zavarenih spojeva, dok je u drugom izdanju, objavljenom 1973. godine, dodao još 10 oblika. Nishida je prvi objavio izraz za

izračun faktora koncentracije naprezanja koji uključuje svih 5 geometrijskih parametara: radijus ruba šava, kut nadvišenja sljemena šava, visina nadvišenja sljemena šava, debljina osnovnog materijala i širina šava zavarenog spoja [47, 119].

Pollard i Cover su 1972. godine ispitivali otpornost raznih oblika zavarenih spojeva na zamor, a ispitivanja su uključivala i nekoliko oblika sučeljno zavarenih spojeva. Zbog promjene u geometriji površine zavarenog spoja najveća koncentracija naprezanja javljala se na rubu zavarenog spoja. Utvrdili su da je najmanja koncentracija naprezanja u slučajevima kada je kut nadvišenja sljemena šava jednak nuli, odnosno kada nema nadvišenja sljemena šava [101].

Ushirokawa i Nakayama su 1983. godine analizirali koncentraciju naprezanja u rubu šava zavara za sučeljni, kutni i križni spoj. Istraživanje su proveli s opterećenim zavarenim spojevima pomoću metode konačnih elemenata. Tijekom istraživanja mijenjali su radijus ruba šava, kut nadvišenja sljemena šava, te visinu nadvišenja sljemena šava, dok su debljinu osnovnog materijala držali konstantnom. Kao rezultat svojih istraživanja dobili su izraz s kojim se može izračunati faktor koncentracije naprezanja [73, 114].

Fujisaki i suradnici su 1990. godine objavili rad u kojemu su predstavili izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja za sučeljne spojeve, koji osim jedne konstante ima korekcije za četiri utjecaja koji dolaze iz pet geometrijskih parametara zavarenog spoja. Oni su analizirali utjecaj svake korekcije posebno te su za svaku korekciju u obliku dijagrama objavili koliko koja korekcija utječe na faktor koncentracije naprezanja. Na kraju rada su usporedili faktor koncentracije naprezanja dobiven pomoću predloženog izraza te faktor koncentracije naprezanja dobiven pomoću numeričkih metoda. Za vrijednosti faktora koncentracije naprezanja od 2 do 4, odstupanja su iznosila  $\pm 5\%$ . Istraživanja su vršili na nekoliko raznih oblika sučeljnih zavarenih spojeva [21].

North je 1997. godine objavio rad u kojem opisuje istraživanja koja su rađena u sklopu američkog udruženja „*Ship Structure Committee*“, vezana uz utjecaj oblika zavarenog spoja na koncentraciju naprezanja. Istraživanjima provedenim na zavarenom spoju s punim provarom dokazao je da se oko 70% pukotina inicira u rubu šava zavarenog spoja zbog pojačane koncentracije naprezanja na tom mjestu. On je također analizirao utjecaj tretmana zavarenog spoja poslije procesa zavarivanja te je dao nekoliko prijedloga za poboljšanje postupka zavarivanja



(završni sloj u više prolaza i upotreba posebnih elektroda). Zbog toga se prilikom procesa zavarivanja posebna pažnja mora posvetiti obliku mjesta gdje osnovni materijal prelazi u nadvišenje sljemena šava, odnosno radijusu ruba šava [92].

Goo je 2007. godine razvio izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja za sučeljeno zavarene limove. Prilikom istraživanja koristio je postupak zavarivanja s punom žicom u CO<sub>2</sub> zaštitnoj atmosferi. U svom je istraživanju analizirao utjecaj radijusa ruba šava, kuta nadvišenja sljemena šava i visine sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja. Faktore koncentracije naprezanja dobivene prema predloženom izrazu usporedio je s rezultatima dobivenima metodom konačnih elemenata te je utvrdio da obje metode daju slične rezultate [24].

Da bi se faktor koncentracije naprezanja mogao izračunati empirijskim izrazima, potrebno je izmjeriti geometrijske veličine zavarenog spoja čim je moguće točnije. Peng je 2006. godine upotrijebio računalni projektor za projekciju strukturiranog svjetla te je digitalnom kamerom snimio površinu zavarenog spoja. Učitavanjem i analizom dobivenih podataka u računalni softver razvio je 3D matematički model za analizu površina objekata. Pomoću tog matematičkog modela koji se zasniva na tri algoritma za mjerenje površine objekta, znatno je poboljšao i unaprijedio postupak snimanja površine objekta. Ovaj način snimanja površine je brz, jeftin i jednostavan te se lako prilagodi za komercijalnu upotrebu [98].

Lindgren i Stenberg su 2011. godine usporedili mjerenja radijusa ruba šava zavarenog spoja dobivenih izravnom metodom pomoću lisnatog mjernog instrumenta, s rezultatima dobivenim skeniranjem površine zavarenog spoja te naknadnom računalnom analizom skeniranih snimaka. Skeniranje površine zavarenog spoja vršili su pomoću dvije metode: snimanjem površine zavarenog spoja laserom te snimanjem projekcije strukturnog svjetla. Prilikom usporedbe dobivenih rezultata utvrdili su da vrijednosti radijusa šava zavarenog spoja izmjerene izravnom metodom imaju veće vrijednosti uspoređujuće s vrijednostima dobivenim računalnim programom. Stoga su predložili algoritam za evaluaciju površine zavarenog spoja u kojemu operater neće imati utjecaj [70].

Stenberg i suradnici su 2012. godine objavili algoritam koji podatke sa snimanja površine zavarenog spoja učitava u računalni program MATLAB. Prema učitanim podacima algoritam

prikazuje radijus ruba šava uzduž presjeka zavarenog spoja u obliku dijagrama. Taj algoritam, također izračunava faktor koncentracije naprezanja za križne zavarene spojeve te kako parametri zavarivanja utječu na radijus ruba šava [109].

Harati i suradnici su 2014. godine utvrdili da je zbog velikog utjecaja radijusa ruba šava na koncentraciju naprezanja, od velikog značaja isti izmjeriti što je preciznije moguće. Oni su mjerili radijus ruba šava zavarenog spoja upotrijebivši tri metode bez razaranja materijala: snimanje otisaka zavara, snimanje geometrije zavara laserom te snimanje projekcije strukturnog svjetla. Snimanje metodom otiska zavara je pogodno kada je potrebno izmjeriti radijus šava zavara u jednom presjeku, dok su ostale dvije metode, a posebno metoda snimanjem projekcije strukturnog svjetla, pogodna ako je potrebno analizirati promjenu radijusa ruba šava uzduž zavarenog spoja [31].

Jonsson i suradnici su 2016. godine predstavili uputu Međunarodnog društva za zavarivanje vezanu za kvalitetu zavarenih spojeva. Prikazali su klasifikaciju prihvatljivosti nepravilnosti u zavarenim spojevima s obzirom na vrstu zavarenog spoja. Utvrdili su da nedovoljan provar te ugorina u obliku zarezna na rubu šava imaju najveći utjecaj na pojavu pukotina na površini zavarenog spoja [54].

Upotrijebivši metodu konačnih elemenata Brennan i suradnici su predložili model predviđanja koncentracije naprezanja u raznim oblicima zavarenog spoja. Na njihova istraživanja su se nadovezali Kiyak i suradnici te su predložili empirijski izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja. Usporedbom rezultata dobivenih pomoću izraza predloženih od raznih autora s rezultatima koje su oni dobili, došli su do zaključka da postoje minimalna odstupanja rezultata dobivenih njihovom novom metodom [6, 60].

Još je nekoliko autora u svojim radovima predložilo izraze za izračun faktora koncentracije naprezanja za razne vrste zavarenih spojeva. Pachoud i suradnici su analizirali faktor koncentracije naprezanja za zavarene spojeve u kojima osnovni materijal nije u istoj ravnini [95], dok su Luo i suradnici vršili istraživanja u slučajevima kada je osnovni materijal pod kutom [73].

#### **1.4. Svrha i cilj istraživanja**

Cilj ovog istraživanja je analizirati utjecaje parametara zavarivanja na oblik površine zavarenog spoja za MAG postupak zavarivanja u horizontalnom položaju.

Odredit će se nekoliko najutjecajnijih ulaznih parametara zavarivanja te provedbom pokusa optimizirati ulazne faktore da se dobije povoljan oblik površine zavarenog spoja koja će imati najveću otpornost prema iniciranju površinskih pukotina.

Rezultati dobiveni ovim istraživanjem će pomoći prilikom odabira tehnologije zavarivanja na način da se odabranim parametrima zavarivanja dobije zavareni spoj u kojem će se inicirati najmanje pukotina.

#### **1.5. Očekivani rezultat istraživanja i znanstveni doprinos**

Mnogobrojna znanstvena istraživanja su rađena s ciljem dobivanja što pouzdanijeg načina određivanja faktora koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima. U ovom radu su ta istraživanja upotpunjena analizom osjetljivosti izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja. Nadalje, mnogobrojna znanstvena istraživanja su rađena na optimizaciji postupaka zavarivanja, upotrebljavajući metodu faktorijalnog eksperimenta. Međutim, u istraživanjima koja su opisana u ovom radu napravljen je iskorak u istraživanjima fokusirajući se na geometrijski oblik površine zavarenog spoja te su za MAG postupak zavarivanja mijenjani parametri koji su u prethodnim istraživanjima bili rijetko ili nikako istraženi, odnosno parametri koji prema dostupnim istraživanjima imaju najveći utjecaj na površinu zavarenog spoja. Tim više što se ovaj rad fokusira na čelik povišene čvrstoće otporan na niske temperature.

#### **1.6. Struktura rada**

Ovaj rad se sastoji od šest tematskih poglavlja. U prvom, uvodnom poglavlju opisan je problem koji je uočen u praksi u vezi s pojavom pukotina u zavarenim spojevima, postavljena je opća hipoteza te su utvrđene pretpostavke. Nadalje, određeni su svrha i cilj istraživanja, spomenute su upotrijebljene znanstvene metode te su naznačena ograničenja vezana uz izvršena istraživanja.

U drugom poglavlju dan je prikaz dosadašnjih istraživanja iz područja koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima. Prikazani su izrazi koji su u znanstvenoj literaturi predloženi za izračun faktora koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima. Napravljena je analiza osjetljivosti tih izraza te je prikazano koliko koja geometrijska veličina u zavarenom spoju utječe na faktor koncentracije naprezanja, nadalje napravljena je usporedba rezultata dobivenih tim izrazima. Također je napravljena analiza utjecaja svake od pet geometrijskih veličina. Na kraju ovog poglavlja dan je prikaz propisa i normi u vezi s faktorom koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima.

U trećem poglavlju opisani su materijali i metode koje su upotrijebljene u istraživanju. Opisani su parametri koji sudjeluju u procesu zavarivanja. Na rezultate pokusa utjecaj imaju kontrolirani ulazni faktori koji mogu biti konstantni i promjenjivi. Promjenjivi ulazni faktori su varirani tijekom pokusa da bi se analizom odredio njihov utjecaj na izlaze iz procesa, odnosno na rezultate pokusa. U ovom poglavlju je opisana metodologija eksperimentiranja i način na koji će se vršiti pokusi.

U četvrtom poglavlju opisan je tijek provedbe pokusa te način na koji su mjerene geometrijske veličine zavarenog spoja, kao izlazi iz procesa. O ovom poglavlju također je prikazan način na koji su izračunati faktori koncentracije naprezanja.

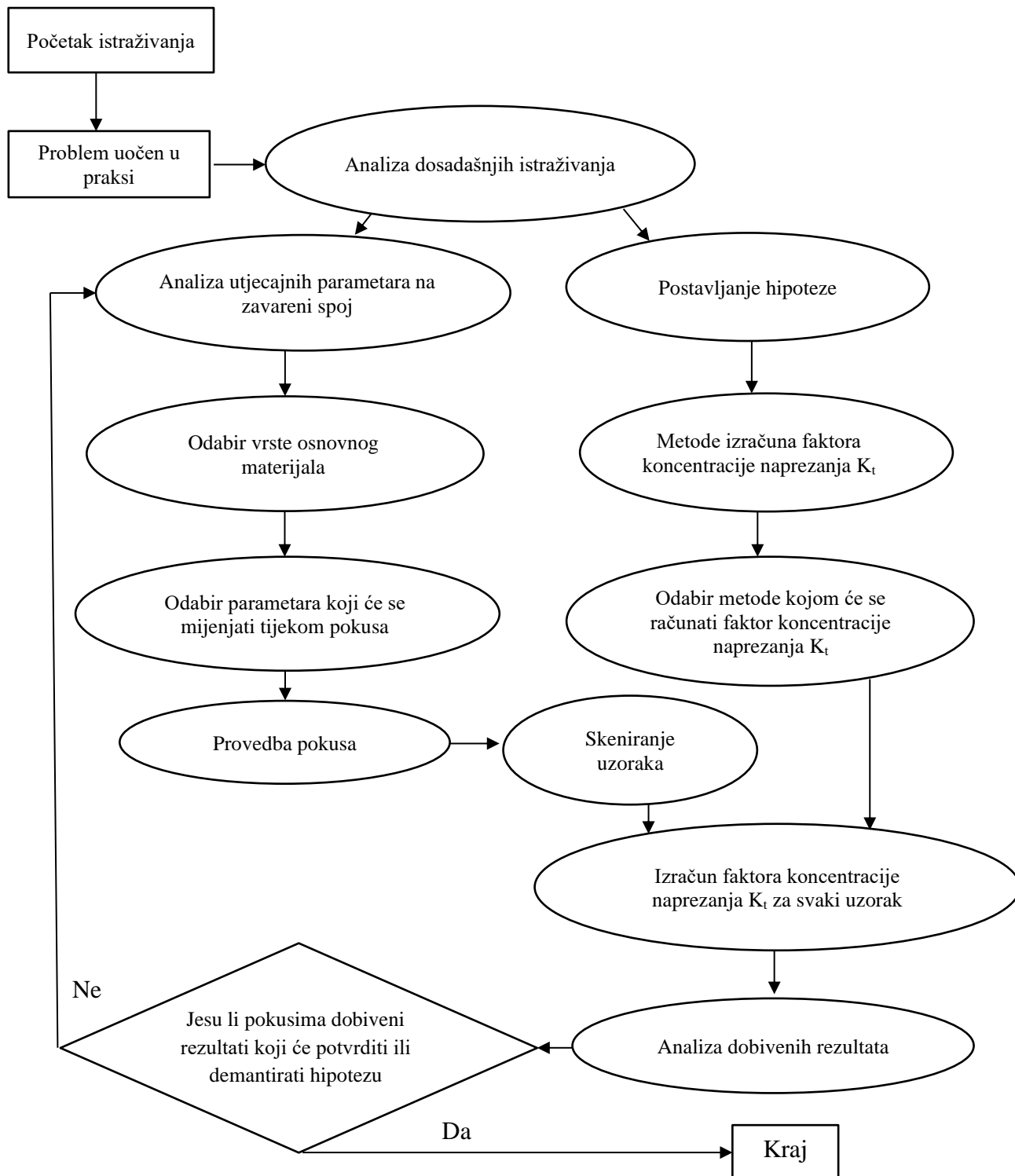
Analiza rezultata dobivenih pokusima rađena je u računalnom programu „MINITAB 20.3“ te je prikazana u petom poglavlju. Napravljena je analiza najvećih i najmanjih faktora koncentracije naprezanja. Prema dobivenim rezultatima dobivene su vrijednosti parametara zavarivanja koje treba izbjegavati zbog moguće pojave povećane koncentracije naprezanja, odnosno vrijednosti parametara zavarivanja koje je poželjno upotrebljavati s obzirom da je velika vjerojatnost da će generirati povoljan oblik površine geometrije zavarenog spoja u kojem se javlja najmanja koncentracija naprezanja.

Zaključak je dan u šestom poglavlju, u kojemu se nalazi i komentar prihvaćanja hipoteze koja je postavljena na početku rada.

### **1.7. Dijagram toka istraživanja**

Na slici 1.5. prikazan je dijagram toka istraživanja. Istraživanje se odvija u tri faze. U prvoj fazi koja se naziva pripremna faza uočava se problem, dolazi se do spoznaje problema te se definira problem. Nadalje se utvrđuje cilj istraživanja te se postavlja hipoteza. U ovom istraživanju definirana je jedna hipoteza i dvije pretpostavke. Nakon toga se razrađuje model te se vrši izbor i definiranje faktora istraživanja, definiraju se neovisne i ovisne varijable pokusa. U drugoj fazi ili u fazi provedbe pokusa vrši se izbor vrste pokusa te izrada projekta pokusa. Određuje se kontrolna i mjerna oprema koja će se koristiti tijekom pokusa. Ova oprema mora biti umjerena. Uzorci na kojima će biti izvršeni pokusi se pripremaju te se može pristupiti provedbi pokusa.

Prije provedbe glavnih pokusa rade se probni pokusi radi umjeravanja i prilagodbe opreme. Glavni pokus je najbitniji dio istraživanja. O uspješno izvršenom glavnom pokusu ovise rezultati cjelokupnog istraživanja, zato je od velike važnosti obaviti sve pripremne radnje da bi glavni pokus bio što točnije napravljen. Treća faza je obrada rezultata pokusa. Nakon provedenih pokusa sređuju se rezultati dobiveni pokusom te se radi statistička obrada rezultata. U ovoj fazi se može testirati je li hipoteza potvrđena ili nije. Ako pokusima nisu dobiveni rezultati koji mogu potvrditi ili demantirati hipotezu, tada se radi ponovna analiza utjecajnih faktora na parametre zavarivanja te se pokusi rade sa izmjenjenim parametrima. Rezultati statističke obrade pokusa se uspoređuju s rezultatima do sada publiciranih radova. Iz dobivenih rezultata se izvodi zaključak te se piše izvještaj.



Slika 1.5. Dijagram toka plana istraživanja

## 1.8. Ograničenja

Ovaj rad i istraživanja koja su provedena odnose se samo na sučeljne zavarene spojeve opterećene na vlačna naprezanja, koji su zavareni u vodoravnom položaju MAG postupkom zavarivanja. Istraživanja su rađena s osnovnim materijalom koji je bio brodograđevni čelik povišene čvrstoće otporan na niske temperature (čelik oznake EH36) debljine 10 mm. Nema razloga da se zaključci koji su u ovom radu doneseni ne primijene na ostale brodograđevne čelike zavarene MAG postupkom zavarivanja u vodoravnom položaju. Za ostale postupke zavarivanja te za ostale položaje zavarivanja ne preporučuje se primijeniti zaključke ovog rada prije nego se provedu sustavna istraživanja.

Rezultati se ne preporučaju upotrebljavati na drugim materijalima, kao što je aluminij. Rezultati se mogu upotrebljavati za radijuse ruba šava od 0,20 mm do 2 mm. Također rezultati se mogu upotrijebiti za kutove nadvišenja od 10° do 50°.

Zavarivanje završnog sloja uzoraka rađeno je u laboratorijskim uvjetima te se prilikom zavarivanja koje se ne vrši u laboratorijskim uvjetima mogu pojaviti razlike uslijed vanjskih utjecaja na provedbu pokusa zavarivanja.

## 2. KONCENTRACIJA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA

U ovom radu analizirani su sučeljno zavareni spojevi te koncentracija naprezanja koja se javlja u ovim zavarima. Zbog toga su ovdje obrađena istraživanja te je iznesen pregled najznačajnijih radova i knjiga koji su se odnosili samo na sučeljno spojene zavare. Ponašanje kutnih, točkastih i ostalih zavarenih spojeva ovdje nije razmatrano.

Na mjestu najveće koncentracije naprezanja dolazi do zamora materijala te može doći i do loma materijala na tom mjestu. Ovaj utjecaj se pojačava pa do loma može doći još i brže ako je materijal pod utjecajem cikličkih uzastopnih opterećenja te pod utjecajem niskih temperatura uz istovremeno djelovanje agresivnih medija koji djeluju na materijal, npr. morska voda [100]. Ovi utjecaji se posebno manifestiraju kod brodskih konstrukcija koje su konstantno pod utjecajem promjenjivih opterećenja te morske vode, a veoma često i pod utjecajem niskih temperatura.

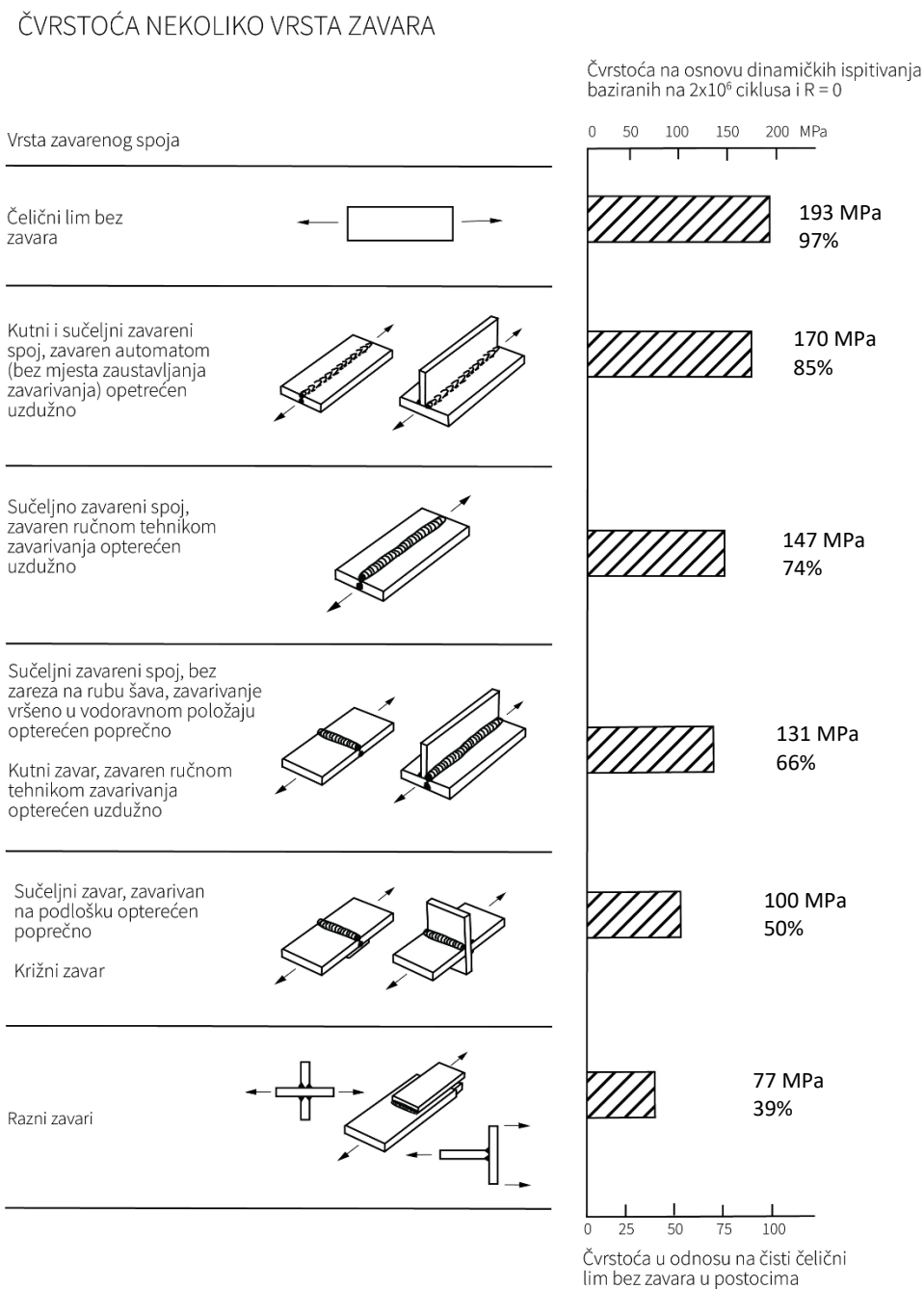
Zamor materijala je vrlo složen proces koji još do danas nije u potpunosti protumačen. Iniciranje pukotine počinje u kristalnoj strukturi materijala. U početnom stadiju razvoja pukotina se ne može vidjeti ljudskim okom nego isključivo pomoću metoda ispitivanja bez razaranja. Pukotina postaje vidljiva u kasnijim fazama razvoja kada se formiranjem mikro pukotina javljaju plastične deformacije te kada se mikro pukotine spoje u jednu ili više pukotina. Na inicijaciju i propagaciju pukotina utječu mnogobrojni faktori [4, 30, 64, 65].

Zamor zavarenih spojeva je zbog promjene geometrijskog oblika još složeniji proces. Proces zavarivanja utječe na materijal zbog naglog zagrijavanja prilikom zavarivanja te naknadnog procesa hlađenja kao i procesa spajanja osnovnog i dodatnog materijala što rezultira nehomogenošću u zavarenom spoju. Zavar najčešće nije savršen, već sadrži razne uključine, pore i nepravilnosti. Geometrijski oblik površine zavara, a posebno rub šava gdje dolazi do nagle promjene geometrijskog oblika je mjesto gdje dolazi do pojave značajne koncentracije naprezanja. To je mjesto gdje dolazi do zamora materijala te je to potencijalno mjesto gdje dolazi do inicijacije pukotine koja može izazvati lom [20].

Zavareni spoj može izdržati manja opterećenja u usporedbi s istim osnovnim materijalom na kojem nije izvedeno zavarivanje. Na slici 2.1. je prikazano koliku čvrstoću imaju razni oblici zavarenih spojeva u odnosu na čelični lim bez zavara. Ova ispitivanja su rađena na osnovi  $2 \cdot 10^6$



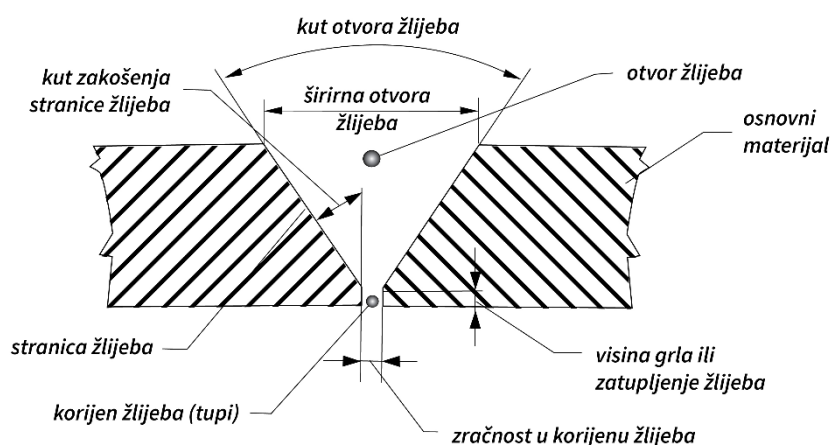
ciklusa dinamičkog ispitivanja te su prikazana u obliku postotaka u odnosu na čelični lim bez zavara. Ispitivanja su rađena za sučeljni i kutni spoj te za nekoliko oblika zavarenih konstrukcija, kao i za uzdužno i poprečno opterećenje [110].



**Slika 2.1.** Čvrstoća nekoliko vrsta zavarenih spojeva u odnosu na lim bez zavara [110]

## 2.1. Osnovni pojmovi i definicije sučeljno zavarenog spoja

Žlijeb čine rubni dijelovi osnovnog materijala koji mogu biti obrađeni ili neobrađeni i koji su pripremljeni za spajanje zavarivanjem. Ovi spojevi mogu imati nekoliko oblika žlijeba: „I“, „V“, „Y“, dvostrani „V“ ili „X“, „U“, „K“ i drugi. Zbog oblika spoja oblik žlijeba određen je debljinom osnovnog materijala. Ovaj oblik spoja se najčešće primjenjuje na elementima strukture koji prenose uzdužno opterećenje, kao što je paluba i vanjska oplata broda s uzdužnim elementima strukture. U istraživanjima koja su opisana u ovom radu bit će korišten „V“ žlijeb, prikazan na slici 2.2. [77].

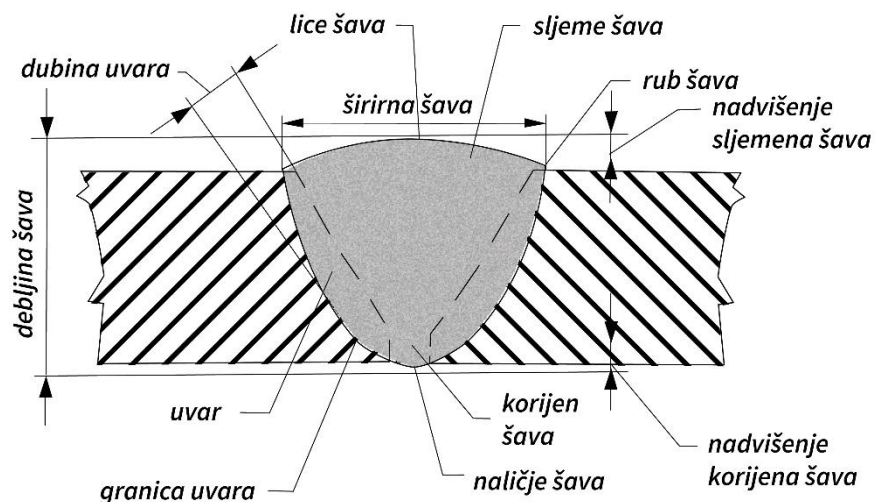


Slika 2.2. Elementi „V“ žlijeba [77]

Zavareni spoj je cjelina koja je dobivena zavarivanjem dva ili više krajeva materijala, a obuhvaća skrutnuti dio metala šava formiran taljenjem i rubne dijelove zavarenih materijala. Uobičajeno se koristi nekoliko tipova zavarenih spojeva: sučeljni spoj, preklopni spoj, kutni spoj i sl. Sučeljni zavareni spoj je oblik spoja dva kraja lima pod kutom  $180^\circ \pm 20^\circ$ . Osnovni elementi sučeljno zavarenog spoja su prikazani na slici 2.3.

Šav je dio zavarenog spoja nastao taljenjem samo osnovnog materijala ili osnovnog materijala i dodatnog materijala u jednom ili u više prolaza.

Zavar je dio šava nastao u jednom prolazu zavarivanja.



**Slika 2.3.** Elementi šava sučeljno zavarenog spoja [77]

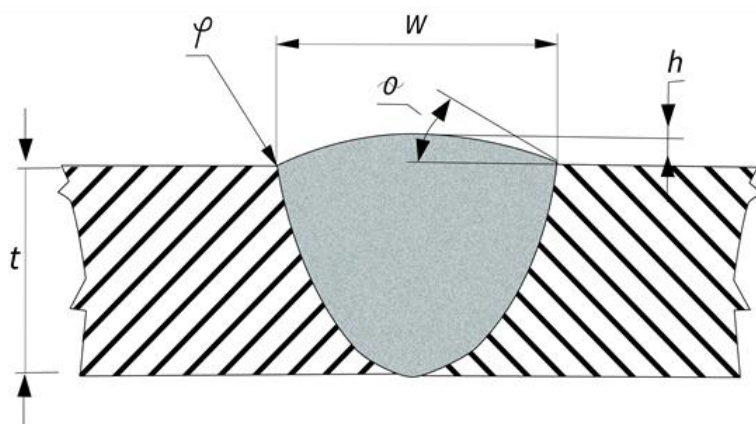
Osam elemenata žlijeba i šava u sučeljno zavarenom spoju ima utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Od tih osam elemenata pet elemenata izravno utječu na faktor koncentracije naprezanja, to su:

- debljina osnovnog materijala,
- radijus ruba šava,
- kut nadvišenja sljemena šava,
- visina nadvišenja sljemena šava, te
- širina šava [103].

Ovih pet elemenata je prikazano na slici 2.4., a u ovom radu će biti nazvani utjecajne geometrijske veličine. Ostala tri elementa koji neizravno utječu na faktor koncentracije naprezanja su:

- kut otvora žlijeba,
- zračnost u korijenu žlijeba te
- zarez na rubu šava [103].

Kut otvora žlijeba i zračnost u korijenu žlijeba utječu na širinu šava te oni imaju utjecaj na faktor koncentracije naprezanja preko širine šava. Ugorina u obliku zarez na rubu šava ima vrlo negativan utjecaj na pojavu koncentracije naprezanja, i ona spada u pogreške u zavarenom spoju koje nisu dopuštene te se uzorci koji budu imali zarez na rubu šava neće analizirati u ovom radu.



**Slika 2.4.** Utjecajne geometrijske veličine sučeljno zavarenog spoja

## 2.2. Značaj čvrstoće zavara na brodskim konstrukcijama

Suvremeni brodovi, posebno VLCC i ULCC, čija dužina doseže i više od 400 m, su najveći zavareni pokretni objekti na svijetu. Oni se koriste u raznim ekstremnim situacijama kao npr.:

- niske i visoke temperature okoline,
- ukrcaj i iskrcaj tereta s broda,
- vibracije strukture,
- loši vremenski uvjeti, oluje, nemirno more,
- korozivno djelovanje morske vode.

S druge strane oni moraju biti pouzdani zbog opasnosti da u slučaju havarije ugroze ljudske živote i onečiste okoliš. Zbog toga brodska struktura mora biti sigurna da izdrži sve ekstremne situacije ne ugrozivši ljudske živote i okoliš.

Zbog navedenih razloga se odabiru tehnika i parametara zavarivanja pridaje velika pažnja, ne prepuštajući slučaju ni najmanji detalj vezan uz zavarivanje brodske strukture. IACS je izdao

nekoliko uputstava kojima se propisuje kvaliteta zavarenih spojeva na brodovima. Tijekom gradnje broda klasifikacijska društva vrše nadzor nad gradnjom broda posebnu pažnju posvećujući strukturnim detaljima na kojima se tijekom eksploatacije javlja najveća koncentracija naprezanja, a zavareni spojevi spadaju u tu grupu strukturnih detalja [49, 51].

Zaključci dobiveni u istraživanjima opisanim u ovom radu bi trebali biti prilog poboljšanju kvalitete zavarenog spoja, koji se mogu primijeniti u tehničkoj praksi.

### **2.3. Tretman ruba šava zavara nakon postupka zavarivanja**

Zbog promjene geometrijskog oblika najveća koncentracija naprezanja se javlja na rubu šava zavara. Zato je razvijeno nekoliko metoda kojima se može povećati otpornost ruba šava na zamor te smanjiti mogućnost stvaranja površinskih pukotina. Sve metode koje se upotrebljavaju imaju dva osnovna cilja: smanjenje koncentracije naprezanja u rubu šava zavara te smanjenje zaostalih naprezanja [13, 33, 59, 66].

#### **2.3.1. Smanjenje koncentracije naprezanja u rubu šava zavara**

Za postizanje ovog cilja najčešće se upotrebljavaju dvije metode: brušenje kružnom brusilicom (engl. *burr grinding*) i „omekšavanje“ ruba šava zavara pomoću TIG-a (engl. *TIG dressing*). Osnovni cilj ove dvije metode je oblikovati rub šava zavara na način da se poveća otpornost na zamor te da se smanji lokalna koncentracija naprezanja [12]. Brušenje kružnom brusilicom je metoda u kojoj se kružnom brusilicom prolazi uzduž zavarenog spoja te se skida dio materijala i na taj način oblikuje rub zavarenog spoja s ciljem smanjenja koncentracije naprezanja. TIG metodom se taljenjem materijala na rubu šava zavara oblikuje površina zavarenog spoja s ciljem smanjenja lokalnih koncentracija te se osigurava glatki prijelaz između osnovnog materijala i nadvišenja zavarenog spoja [28, 35].

### 2.3.2. Smanjenje zaostalih naprezanja

Zaostala naprezanja u području zavarenog spoja se javljaju zbog neadekvatnog hlađenja i stezanja rastaljenog materijala u zavarenom spoju. Tretman površine zavara udaranjem čekićem (engl. *hammer peening*) i čeličnim iglama (engl. *needle peening*) su dvije metode koje se najčešće upotrebljavaju radi smanjenja zaostalih naprezanja u zavarenom spoju [29].

Uspješna primjena ovih metoda u prvom redu ovisi o istreniranosti operatera i inspektora koji nadzire radove [28]. Međutim sve ove metode uzimaju određeno vrijeme, potrošak energije, te utrošak materijala. Zbog toga su u ovom radu rađena istraživanja s ciljem dobivanja površine zavarenog spoja koja će biti otporna na iniciranje površinskih pukotina bez naknadnog tretmana površine.

## 2.4. Pukotine u zavarima na brodskoj strukturi i objektima morske tehnologije

Brodaska konstrukcija je izložena stalnim promjenama opterećenja te je pojava pukotina na njoj česta. Pukotine se mogu pojaviti na elementima strukture broskog trupa koji su izloženi najvećim opterećenjima te se mogu pojaviti u zavarenim spojevima. U zavarenim spojevima pukotine se mogu inicirati zbog pogreške prilikom zavarivanja, koje nisu otkrivene nakon procesa zavarivanja ili se mogu inicirati na površini zavara zbog nepravilnosti površine.

Zavarivanje je jedna od najkritičnijih operacija prilikom konstrukcije broda. Pukotine nastale uslijed zamora za vrijeme eksploatacije broda su velika opasnost za cjelovitost brodske strukture. Pukotine koje se stvaraju tijekom eksploatacije broda se iniciraju na mjestima gdje dolazi do naglih promjena u obliku zavarenog spoja pa je na taj način geometrija zavara na kojoj dolazi do naglih promjena u obliku zavarenog spoja izložena inicijaciji pukotina. Nepravilnosti u zavarenom spoju povećavaju lokalno naprezanje te smanjuju životni vijek zavarenog spoja. Najveća nepravilnost u geometriji zavarenog spoja se nalazi na rubu šava zavara, gdje dolazi do nagle promjene oblika [83].

## 2.5. Faktor koncentracije naprezanja

Prilikom proračuna strukturnih elemenata brodske konstrukcije koriste se izrazi koji su bazirani na pretpostavci da ne postoji povećana koncentracija naprezanja u strukturnim elementima uključujući zavarene spojeve, zbog promjena u površini na zavarenim spojevima. Povećana koncentracija naprezanja koja se može javiti lokalno na radijusu zavarenog spoja se ne uzima u obzir prilikom proračuna brodske konstrukcije. Zbog toga je značajno izbjeći povećanu koncentraciju naprezanja u zavarenim spojevima. Prisustvo neravnina, udubina, zareza i sličnih nepravilnosti u zavarenom spoju lokalno povećava koncentraciju naprezanja. Koncentracija naprezanja u nekoj točki mjeri se faktorom koncentracija naprezanja [100].

Koncentracija naprezanja u zavarenim spojevima nastaje zbog nekoliko razloga:

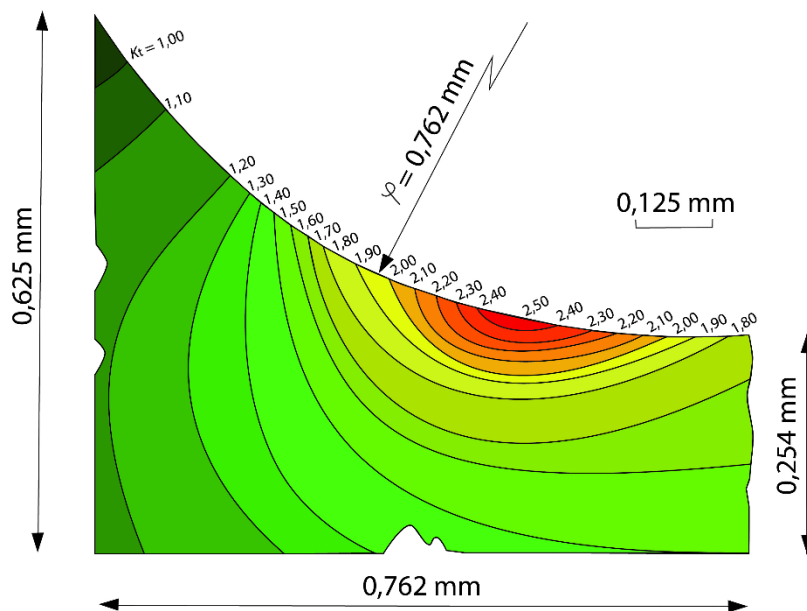
- lokalne promjene u geometriji površine zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal,
- lokalni zarez u zavarenom spoju,
- netočnosti izrade i ostalo.

U ovom istraživanju će se ispitivati samo zavari koji nemaju lokalnih zareza te oni u kojima ne postoji netočnost izrade. Nekoliko geometrijskih veličina ima utjecaja na koncentraciju naprezanja u zavaru, a tri najbitnije veličine su: zarez u osnovnom materijalu, radijus ruba šava te kut nadvišenja sljemena šava. Ostali geometrijski parametri kao što su: visina nadvišenja sljemena šava, debljina osnovnog materijala i širina šava se mogu smatrati manje bitnima u promatranju koncentracije naprezanja u zavaru [103].

### 2.5.1. Mjesto nastanka pukotine

Prvi korak u analizi naprezanja je određivanje mjesta u kojemu se javlja najviše naprezanja, a prema tome i mjesta gdje se može očekivati pojavljivanje pukotina. Lawrence i suradnici su primjenom metode konačnih elemenata došli do zaključka da se u rubu šava javljaju najveća naprezanja. Područje najvećih naprezanja je vrlo usko područje koje se proteže kroz cijelu dužinu zavara, a široko je svega 0,125 mm. Ovako usko područje sprječava izravno mjerenje koncentracije naprezanja pomoću mjerača naprezanja ili drugih prikladnih metoda mjerenja naprezanja.

Udaljavanjem od mjesta vršnih naprezanja, koncentracija naprezanja se naglo smanjuje te brzo poprimi vrijednost nominalnog naprezanja. Koncentracija naprezanja se podjednako naglo smanjuje udaljavanjem po površini zavarenog spoja ili udaljavanjem u dubinu materijala. Na slici 2.5. prikazano je mjesto ruba šava, a konturni dijagram prikazuje koncentraciju naprezanja na rubu šava zavara. Ova slika prikazuje radijus ruba šava od 0,762 mm [66].



**Slika 2.5.** Konturni dijagram koncentracije naprezanja u rubu šava zavara [66]

### 2.5.2. Faktor koncentracije naprezanja $K_t$

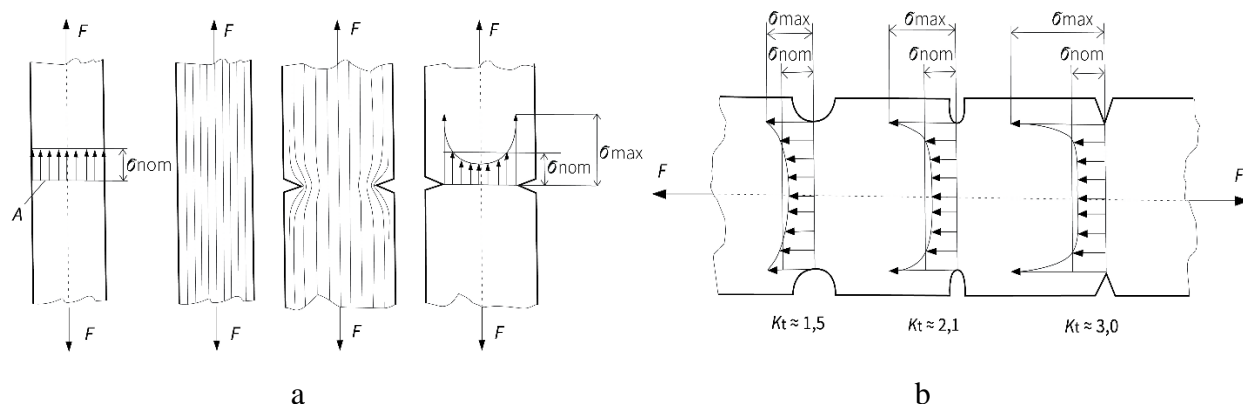
Utjecaj lokalnih promjena naprezanja uslijed geometrijskih nepravilnosti oblika može se uzeti u obzir pomoću faktora koncentracije naprezanja. On se može definirati kao omjer maksimalnog i nominalnog naprezanja kako je prikazano na slici 2.6a. i izrazima (2.1a) i (2.1b) Ovi izrazi vrijede za vlačno opterećenje [90, 91].

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (2.1a)$$

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{A} \quad (2.1b)$$



Na slici 2.6b. može se vidjeti da maksimalno naprezanje koje se javlja na rubu mjesta promjene oblika ovisi o obliku zareza u materijalu. Tako je za oštre zarezove maksimalno naprezanje znatno veće od maksimalnog naprezanja koje se javlja u oblicima koji imaju blagu promjenu oblika [118].



**Slika 2.6.** Maksimalno i nominalno naprezanje [118]

S obzirom da ovaj faktor koncentracije naprezanja ovisi o geometrijskom obliku ponegdje se ovaj faktor naziva i faktor oblika ili geometrijski faktor koncentracije naprezanja. U ovom radu koristit će se naziv faktor koncentracije naprezanja. Različiti pristupi analize lokalnih naprezanja u rubu šava zavarenog spoja, od nekoliko autora, doveli su do raznih načina izračuna koncentracije naprezanja u rubu šava zavarenog spoja. Lawrence i suradnici dobili su izraz kojim se ovaj faktor može približno izračunati za zavarene spojeve, izraz (2.2). U istraživanjima koja su oni proveli faktor koncentracije naprezanja ovisi o tri parametra: koeficijentu koji ovisi o kutu nadvišenja sljemena zavora, debljini osnovnog materijala i radijusu na rubu šava [66].

$$K_t = 1 + \alpha \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \quad (2.2)$$

Koeficijent  $\alpha$  za dvostrano zavaren sučeljni spoj opterećen na vlačno naprezanje, s pripremom osnovnog materijala od  $90^\circ$ , i kutom nadvišenja sljemena šava  $\theta$  od  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$ , iznosi 0,013, 0,18, 0,23, i 0,27. Može se uočiti da ovaj koeficijent naglo raste za veće kutove nadvišenja sljemena šava, na taj način faktor koncentracije naprezanja se povećava za veće kutove

nadvišenja sljemena šava. S obzirom da se radijus ruba šava nalazi u nazivniku, također se uočava da faktor koncentracije naprezanja raste ako se radijus ruba šava smanjuje.

Izraz (2.2) se može revidirati na način da se uvede koeficijent koji ovisi o obliku zavarenog spoja te se dobije opći oblik izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja, izraz (2.3) [119].

$$K_t = \beta \left[ 1 + \alpha \left( \frac{t}{\varphi} \right)^\lambda \right] \quad (2.3)$$

Za sučeljno zavarene spojeve dobivene su vrijednosti koeficijenata  $\beta = 1$ ,  $\lambda = 0,5$ . Dok koeficijent  $\alpha$  ovisi o vrsti naprezanja:

$$\alpha = 0,27 (\operatorname{tg} \theta)^{0,25} \text{ – za vlačno opterećenje}$$

$$\alpha = 0,165 (\operatorname{tg} \theta)^{0,167} \text{ – za savijanje}$$

Uvrštavanjem ovih koeficijenata u (2.3) dobivaju se izrazi (2.4a) i (2.4b) [119].

$$K_t = 1 + 0,27 (\operatorname{tg} \theta)^{0,25} \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \text{ (za vlačno naprezanje)} \quad (2.4a)$$

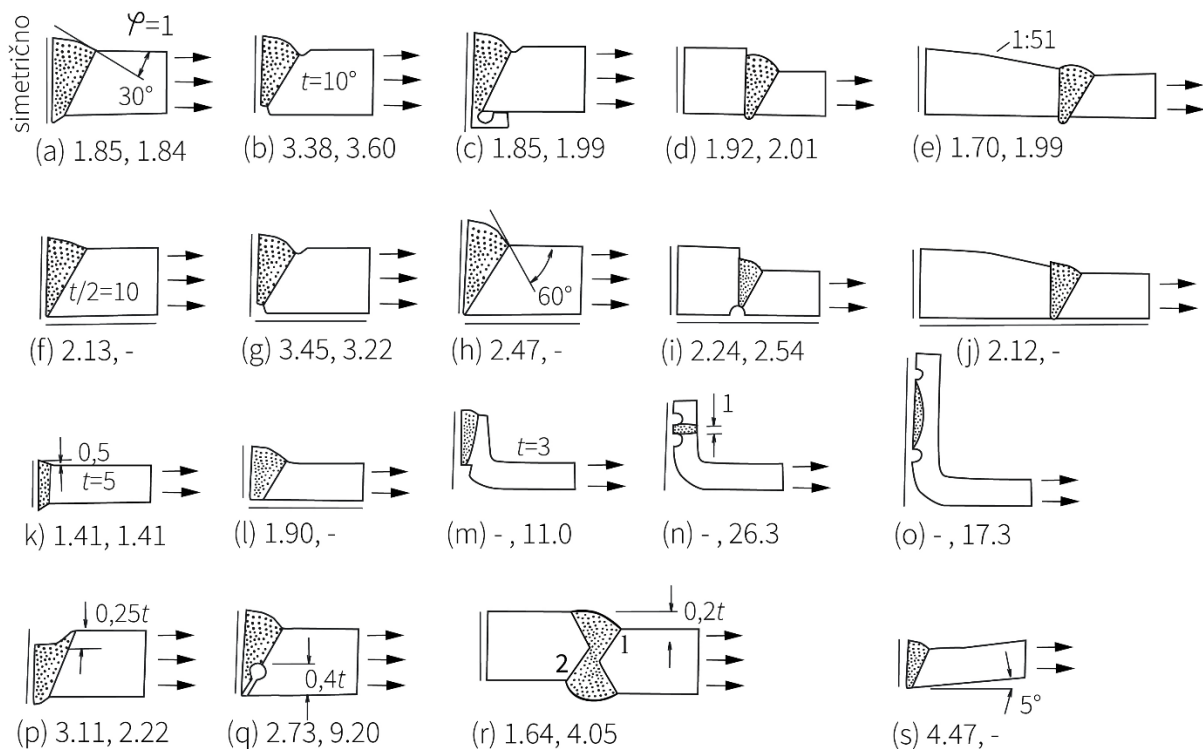
$$K_t = 1 + 0,165 (\operatorname{tg} \theta)^{0,167} \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \text{ (za savijanje)} \quad (2.4b)$$

Lehrke je predložio izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja u kojem imaju utjecaj četiri geometrijske veličine, izraz (2.5) [68].

$$K_t = \frac{4 \left( 2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{1-2m}}{2\theta + \sin(2\theta)} \cdot \left( \frac{t}{4\varphi} \right)^m \text{ vrijedi za } t = W \quad (2.5)$$

Na slici 2.7. prikazani su razni oblici sučeljnih spojeva opterećenih na vlačna naprezanja s vrijednostima faktora koncentracije naprezanja. Na ovoj slici prvi broj prikazuje vrijednost faktora koncentracije naprezanja u rubu šava zavarenog spoja na licu šava zavara, a drugi broj prikazuje vrijednost na rubu zavara na naličju zavarenog spoja. Iz ove slike se vidi da je najmanji faktor

koncentracije naprezanja za sučeljne spojeve zavarivane jednostrano s podlogom od keramičke podloške, te kutom nadvišenja od  $30^\circ$ .



**Slika 2.7.** Vrijednosti faktora koncentracije naprezanja ovisno o obliku sučeljno zavarenog spoja [103]

Referirajući se na sliku 2.7., može se izvući nekoliko zaključaka o vezi između geometrije zavarenog spoja i faktora koncentracije naprezanja:

- keramička podloška je korisna jer daje oblik zavarenog spoja u kojemu se javljaju najmanja koncentracija naprezanja (usporedba slika a i f);
- povećano nadvišenje sljemena zavara povećava koncentraciju naprezanja, kao i povećani kut nadvišenja sljemena zavara (usporedba slika f i h);
- svaka geometrijska nesavršenost znatno povećava faktor koncentracije naprezanja (usporedba a i b, te p, q, r i s);

- spoj osnovnog materijala različitih debljina koji nije izveden postupno povećava faktor koncentracije naprezanja (usporedba d i e);
- smanjenje debljine osnovnog materijala smanjuje koncentraciju naprezanja (usporedba a, f i k).

## 2.6. Izračun faktora koncentracije naprezanja $K_t$

U prethodnim poglavljima utvrđeno je da pet geometrijskih veličina zavarenog spoja utječe na faktor koncentracije naprezanja. On se može smanjiti promjenom geometrijskih veličina, te se na taj način poboljšavaju mehanička svojstva zavarenog spoja. Kako bi se poboljšala mehanička svojstva i sigurnost zavarenih konstrukcija od velike je važnosti postizanje povoljne geometrije zavarenih spojeva. Ne može se promatrati utjecaj samo jedne geometrijske veličine bez uzimanja u obzir i ostalih geometrijskih veličina zavarenog spoja.

Faktor koncentracije naprezanja se može izračunati teorijskim izrazom, odrediti metodom konačnih elemenata, fotoelastičnom metodom i dr.

U dostupnoj literaturi se može naći nekoliko izraza po kojima se može izračunati faktor koncentracije naprezanja u sučeljno zavarenim spojevima opterećenim na vlačna naprezanja. Geometrija zavarenog spoja se može definirati s pet geometrijskih veličina: radijus ruba šava, debljina osnovnog materijala, visina nadvišenja sljemena šava, kut nadvišenja sljemena šava i širina šava. To se može prikazati u obliku (2.6) [103].

$$K_t = f(\varphi, t, h, \theta, W) \quad (2.6)$$

Izraz (2.6) prikazuje opći oblik izraza za izračunavanje faktora koncentracije naprezanja. U dostupnoj znanstvenoj literaturi autori su u nekoliko radova upotrijebili ovaj izraz kao osnovni izraz za izračunavanje geometrijskog faktora koncentracije naprezanja [103]. U nastavku je prikazano pet izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja koji uzimaju u obzir svih pet geometrijskih veličina zavarenog spoja.

### 2.6.1. Analiza izraza kojeg je predložio Nishida

Nishida je bio istaknut japanski znanstvenik koji se bavio istraživanjem naprezanja materijala pomoću fotoelestične tehnike. On je polovicom XX. stoljeća vršeci eksperimentalna istraživanja koncentracije naprezanja na raznim oblicima zareza u materijalu, uključio i istraživanja oblika koji odgovara geometriji sučeljno zavarenog spoja. Prvi je objavio izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja koji uključuje svih pet geometrijskih veličina. Osnova za njegova istraživanja bio je izraz (2.3), te je eksperimentalnim metodama odredio koeficijente  $\alpha$  i  $\lambda$ , izrazi (2.7a) i (2.7b), s tim da je za sučeljno zavarene spojeve utvrdio koeficijent  $\beta=1$  [47, 119].

$$\alpha = \left( \frac{1 - e^{\left( -0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{(2h)^\lambda}} \right)}}{1 - e^{\left( -0,45 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{(2h)^\lambda}} \right)}} \right) \cdot \left( 1 - 0,48 \cdot e^{-0,74 \frac{W}{t}} \right) \cdot \left( \frac{h}{2,8(2h+t) - 2t} \right) \quad (2.7a)$$

$$\lambda = 0,65 - 0,1 e^{-0,63 \frac{W}{t}} \quad (2.7b)$$

Uvrštavanjem koeficijenata  $\lambda$ ,  $\alpha$  i  $\beta$  u 2.3 dobije se izraz (2.8) kojega je za izračun geometrijskog faktora koncentracije naprezanja predložio Nishida.

$$K_t = 1 + \left( \frac{1 - e^{\left( -0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{(2h)^{0,65-0,1e^{-0,63 \frac{W}{t}}}}} \right)}}{1 - e^{\left( -0,45 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{(2h)^{0,65-0,1e^{-0,63 \frac{W}{t}}}}} \right)}} \right) \cdot \left( 1 - 0,48 \cdot e^{-0,74 \frac{W}{t}} \right) \cdot \left( \frac{h}{2,8(2h+t) - 2t} \right) \cdot \left( \frac{t}{\varphi} \right)^{0,65-0,1e^{-0,63 \frac{W}{t}}} \quad (2.8)$$

### 2.6.2. Analiza izraza kojeg su predložili Ushirokawa i Nakayama

Analizirajući zamor u zavarima na spremnicima za prirodni plin Ushirokawa i Nakayama su 1983. godine razvili izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja u rubu sučeljno zavarenog

spoja. Oni su analizu koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima radili pomoću FEM metode. Ispitani uzorci su bili u slijedećim granicama:

- debljina osnovnog materijala 10 mm,
- kut nadvišenja sljemena šava od 20° do 50°,
- radijus ruba šava od 0,5 mm do 7 te
- visinu nadvišenja sljemena šava od 2 mm do 5 mm.

Analitički su oni odredili faktor koncentracije naprezanja kao omjer maksimalnog naprezanja u rubu šava i nominalnog naprezanja te su to predstavili općim izrazom (2.9) [47, 121].

$$K_t = [1 + f(\theta) \cdot (g(\varphi) - 1)] \cdot C \left( \frac{a}{t} \right) \quad (2.9)$$

Ovaj izraz je baziran na tri korelacijska faktora. Korelacijski faktor za kut nadvišenja sljemena šava je prikazan izrazom (2.10), dok je korelacijski faktor za radijus ruba šava prikazan izrazom (2.11). Treći korelacijski faktor za nedostatak provara se neće uzimati u obzir jer se u istraživanju koje je opisano u ovom radu analizira zavareni spoj bez nedopustivih pogrešaka, a nedostatak provara spada u nedopustive pogreške.

$$f(\theta) = \frac{1 - e^{-0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{t+2h+0,6W}{2h}}}}{1 - e^{-0,90 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{t+2h+0,6W}{2h}}}} \quad (2.10)$$

$$g(\varphi) = 1 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{h}{\varphi} \right) \cdot \frac{1}{2,8 \cdot \frac{t + 2h + 0,6W}{t} - 2} \right]^{0,65} \quad (2.11)$$

Nakon uvrštavanja ovih korekcijskih faktora u izraz (2.9), izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja poprima konačni izgled (2.12).

$$K_t = 1 + \left( \frac{1 - e^{-0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{t+2h+0,6W}{2h}}}}{1 - e^{-0,90 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{t+2h+0,6W}{2h}}}} \right) \cdot 2 \cdot \left[ \left( \frac{h}{\varphi} \right) \cdot \frac{1}{2,8 \cdot \frac{t + 2h + 0,6W}{t} - 2} \right]^{0,65} \quad (2.12)$$

### 2.6.3. Analiza izraza kojeg su predložili Fujisaki i suradnici

Fujisaki i suradnici su u svom radu 1990. godine predložili izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja za zavarene spojeve opterećene na naprezanja te su dokazali da faktor koncentracije naprezanja koji su dobili uz pomoć izraza (2.13) ima mala odstupanja u odnosu na faktor koncentracije naprezanja koji je dobiven numeričkim metodama. Odstupanja iznose  $\pm 5\%$  za iznose faktora koncentracije naprezanja do 4. Istraživanja su vršili na nekoliko različitih sučeljnih zavarenih spojeva s ciljem dobivanja najpovoljnije geometrije zavarenog spoja u kojoj će se generirati najmanja koncentracija naprezanja. Oni su u svojim istraživanjima došli do sljedećih zaključaka [21]:

- faktor koncentracije naprezanja je konstantan i najnepovoljniji ako je kut nadvišenja sljemena šava veći od  $60^\circ$ , tada je omjer visine nadvišenja sljemena šava i debljine osnovnog materijala veći od 0,2 te omjer širine šava i debljine osnovnog materijala veći od 1;

- faktor koncentracije naprezanja je proporcionalan kvadratnom korijenu  $t/\varphi$ ;

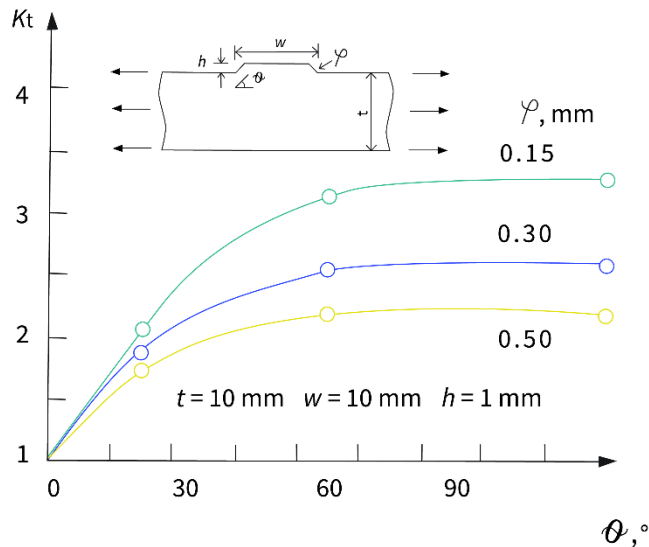
- faktor koncentracije naprezanja se može smanjiti ako se kontroliraju kut nadvišenja sljemena šava i radijus ruba šava.

Izraz koji su predložili Fujisaki i suradnici se sastoji od konstante koja ovisi o vrsti naprezanja i vrsti zavarenog spoja te o četiri korelacijska faktora, (2.13). Utjecaj svakog korelacijskog faktora je prikazan u obliku dijagrama na slikama (2.8) do (2.11), te u obliku izraza (2.14) do (2.17).

$$K_t = 1 + C \cdot f(\theta) \cdot f\left(\frac{W}{t}\right) \cdot f\left(\frac{h}{t}\right) \cdot f\left(\frac{t}{\varphi}\right) \quad (2.13)$$

Koeficijent C su Fujisaki i suradnici usvojili 0,322.

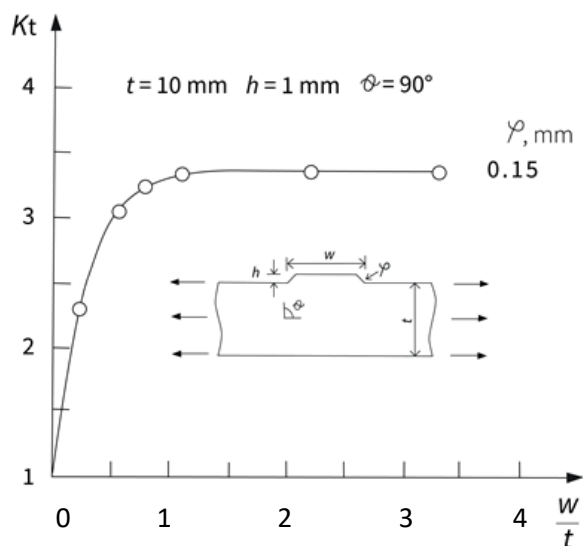
Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava prikazan je u dijagramu na slici 2.8, i izrazom (2.14).



**Slika 2.8.** Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja [21]

$$f(\theta) = \frac{1 - e^{-4,10 \cdot \theta \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0,10}}}{1 - e^{-4,10 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0,10}}} \quad (2.14)$$

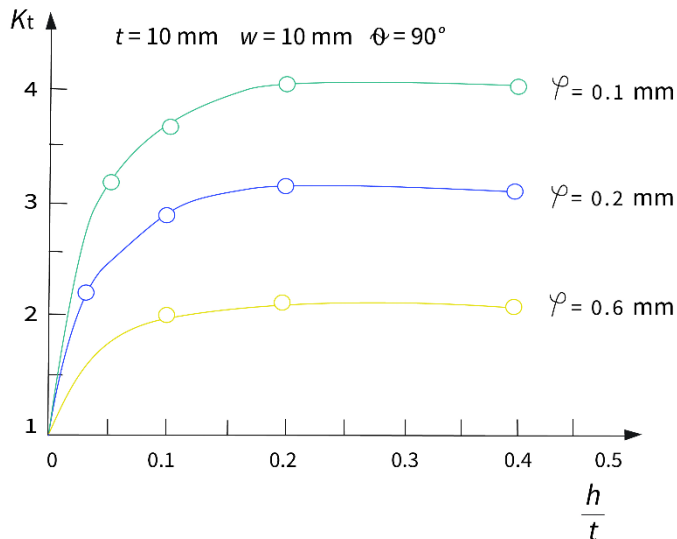
Utjecaj omjera širine šava i debljine osnovnog materijala prikazan je u dijagramu na slici 2.9, i izrazom (2.15).



**Slika 2.9.** Utjecaj omjera širine šava i debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije naprezanja [21]

Utjecaj omjera visine nadvišenja sljemena šava i debljine osnovnog materijala prikazan je u dijagramu na slici 2.10., i izrazom (2.16).



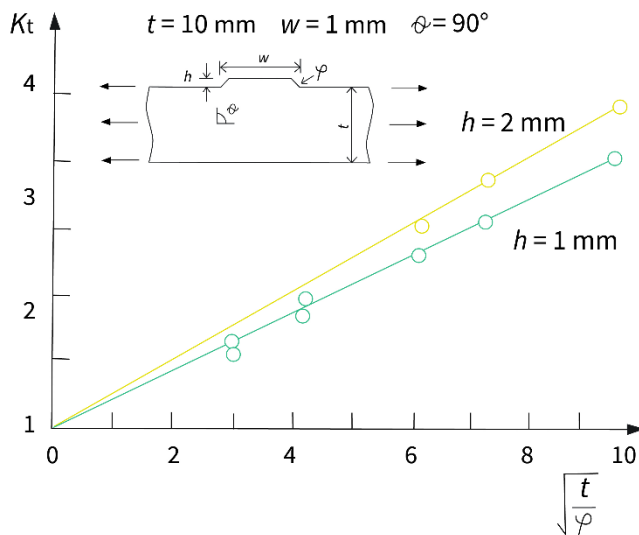


**Slika 2.10.** Utjecaj omjera visine nadvišenja sljemena šava i debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije napreznja [21]

$$f\left(\frac{W}{t}\right) = 1 - e^{-4,92 \cdot \left(\frac{W}{t}\right)^{1,13}} \quad (2.15)$$

$$f\left(\frac{h}{t}\right) = 1 - e^{-10,4 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0,70}} \quad (2.16)$$

Utjecaj omjera debljine osnovnog materijala i radijusa na rubu šava prikazan je u dijagramu na slici 2.11.



**Slika 2.11.** Utjecaj omjera debljine osnovnog materijala i radijusa ruba šava na faktor koncentracije napreznja [21]

$$f\left(\frac{t}{\varphi}\right) = \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \quad (2.17)$$

Uvrštavanjem ovih korelacijskih faktora u izraz (2.13) dobije se konačni izraz za izračun faktora koncentracije naprežanja, izraz (2.18).

$$K_t = 1 + 0,322 \cdot \left( \frac{1 - e^{-4,10 \cdot \theta \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0,10}}}{1 - e^{-4,10 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0,10}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-4,92 \cdot \left(\frac{W}{t}\right)^{1,13}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-10,4 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0,70}} \right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \quad (2.18)$$

#### 2.6.4. Analiza izraza kojeg je predložio Goo

Goo je 2007. godine analizirao utjecaj geometrijskih veličina u sučeljno zavarenom spoju na faktor koncentracije naprežanja. Istraživanja je proveo poluautomatskim MAG postupkom zavarivanja, zavarivajući uzorke čeličnih ploča debljine 10 mm, s dodatnim materijalom punom žicom dijametra 1,2 mm. Za izračun geometrijskog faktora koncentracije naprežanja predložio je izraz (2.19).

Rezultate koje je dobio pomoću ovog izraza usporedio je s rezultatima dobivenim pomoću metode konačnih elemenata te je utvrdio da obje metode daju slične rezultate [24].

$$K_t = 1 + \left( \frac{1 - e^{\left(-0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{2}}\right)}}{1 - e^{\left(-0,90 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{2}}\right)}} \right) \cdot (a_1 - 1) \quad (2.19)$$

Koeficijenti  $\Delta$  i  $a_1$  se izračunavaju prema izrazima (2.20) i (2.21).

$$\Delta = \frac{2h + t}{t} \quad (2.20)$$

$$a_1 = 1 + c \cdot \left( \frac{1}{2,8 \cdot \Delta - 2} \cdot \frac{h}{\varphi} \right)^{\beta_1} \quad (2.21)$$

Koeficijenti  $c$  i  $\beta_1$  iz izraza 2.21 se računaju prema izrazima (2.22) i (2.23).

$$c = 1 - 0,40 \cdot e^{0,74 \frac{W}{t}} \quad (2.22)$$

$$\beta_1 = 0,65 - 0,3 \cdot e^{-0,63 \frac{W}{t}} \quad (2.23)$$

Uvrštavanjem izraza (2.20) do (2.23) u izraz (2.19) dobije se konačni izraz kojeg je Goo predložio za izračun geometrijskog faktora koncentracije naprezanja, (2.24).

$$K_t = 1 + \left( \frac{1 - e^{\left(-0,90 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{2t}}\right)}}{1 - e^{\left(-0,90 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{2t}}\right)}} \right) \cdot \left(1 - 0,40 \cdot e^{-0,74 \frac{W}{t}}\right) \cdot \left(\frac{1}{2,8 \frac{2h+t}{t} - 2} \cdot \frac{h}{\varphi}\right)^{0,65 - 0,3e^{-0,63 \frac{W}{t}}} \quad (2.24)$$

### 2.6.5. Analiza izraza kojeg su predložili Kiyak i suradnici

Kiyak i suradnici predložili su izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja na osnovi analize 2D modela koje su napravili pomoću FEM, (2.25). Prilikom izrade modela vrijednost debljine osnovnog materijala iznosila je 10 mm, a širine zavarenog spoja 14,6 mm [60].

$$K_t = 1 + 1,3905 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0,2081 \cdot \theta} \cdot \theta^{1,0756} \cdot e^{-1,7483 \cdot \theta} \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{-0,295 \cdot \theta} \cdot \left(0,021 + \frac{\varphi}{t}\right)^{-0,4413} \quad (2.25)$$

### 2.6.6. Analiza izraza kojeg su predložili Pachoud i suradnici

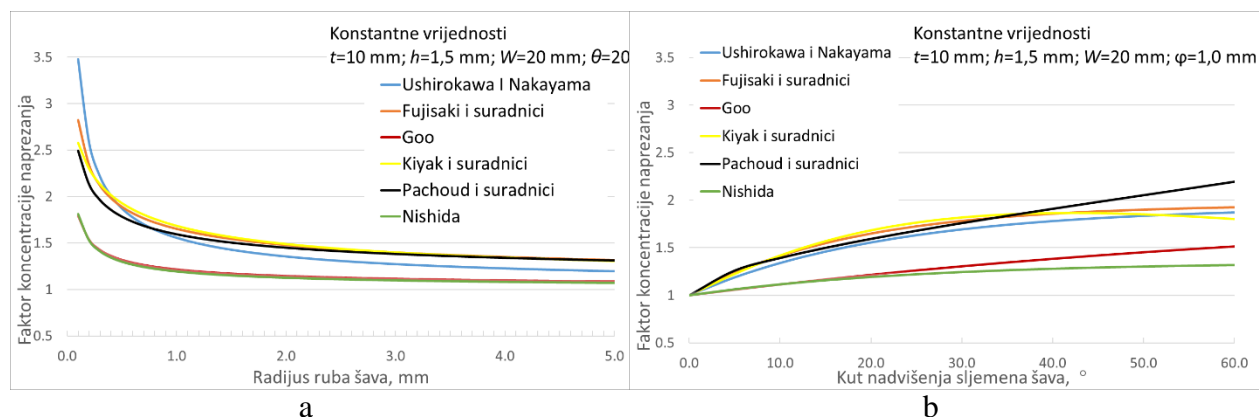
Pachoud i suradnici su svoje istraživanje bazirali na sučeljnim spojevima u kojima je došlo do okomitog pomaka osnovnog materijala. S obzirom da ovaj pomak spada u nedopuštene pogreške, a u ovom istraživanju se analiziraju samo zavareni spojevi bez nedopuštenih pogrešaka, u izrazu (2.26) je izostavljena komponenta utjecaja okomitog pomaka [95].

$$K_t = 1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0,11} \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{-0,40} \cdot tg\left(\frac{\theta}{2}\right)^{0,59} \quad (2.26)$$

## 2.7. Analiza izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja

U prethodnom poglavlju prikazano je šest izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja. U dijagramima na slici 2.12., prikazana je usporedba rezultata dobivenih prema prije spomenutim izrazima. Tri geometrijske vrijednosti su držane konstantnima i to debljina osnovnog

materijala 10 mm, širina zavora 20 mm te visina nadvišenja 1,5 mm. Radijus ruba šava je mijenjan u rasponu od 0,1 mm do 5 mm, dok je kut nadvišenja sljemena šava mijenjan u rasponu od 0° do 60°. U dijagramu (a), na slici 2.12, prikazana je usporedba rezultata za radijus ruba šava uz vrijednost kut nadvišenja sljemena šava od 20°, dok je u dijagramu (b) prikazana usporedba rezultata za kut nadvišenja sljemena šava uz radijus ruba šava od 1,0 mm.



**Slika 2.12.** Usporedba rezultata dobivenih pomoću izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja

Iz dijagrama na slici 2.12. može se zaključiti da postoji značajna razlika u rezultatima dobiveni pomoću izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja. To se događa zbog složene geometrije zavarenog spoja te zbog različitih pristupa prilikom izračuna faktora koncentracije naprezanja, a posebno zbog različitih pristupa utjecajnosti pojedinih geometrijskih veličina. Iz tog razloga je napravljena analiza osjetljivosti, s ciljem utvrđivanja geometrijskih veličina koje najviše utječu na faktor koncentracije naprezanja, Pravitak 1.

## 2.8. Analiza utjecajnih geometrijskih veličina

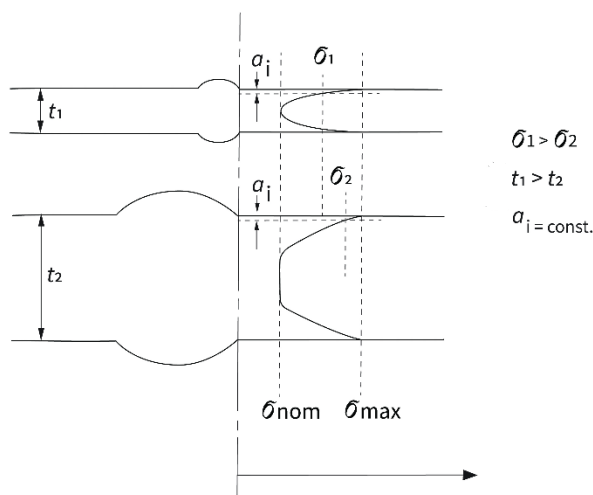
U utjecajne geometrijske veličine se može ubrojiti pet geometrijskih veličina koji se pojavljuju u izrazima za izračun faktora koncentracije naprezanja. U nastavku je napravljena analiza utjecaja svake od pet geometrijskih veličina koje imaju izravan utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Ova analiza je rađena s dva aspekta: pomoću računalnog programa

„*Wolfram Mathematica 10.3*“, te je napravljena analiza dosadašnjih istraživanja. Analiza rađena pomoću računalnog programa „*Wolfram Mathematica 10.3*“ je prikazana u Pravitku 2.

### 2.8.1. Utjecaj debljine osnovnog materijala

Teng i suradnici su u svom istraživanju vršili ispitivanja utjecaja nekoliko geometrijskih veličina zavarenog spoja uključujući i debljinu osnovnog materijala, na inicijaciju pukotina u zavarenom spoju. Ispitivanja su vršena s pet debljina osnovnog materijala (10 mm, 15,8 mm, 20 mm, 25 mm i 32 mm) dok su ostale geometrijske veličine bile konstantne ( $\theta=60^\circ$ ,  $\phi=1,2$  mm i  $\phi=90^\circ$ ). Zaključeno je da debljina osnovnog materijala utječe na geometrijski faktor koncentracije naprezanja na način da povećanje debljine osnovnog materijala izaziva povećanje koncentracije naprezanja u rubu šava zavarenog spoja. Taj utjecaj je neznatan za debljine osnovnog materijala do 20 mm [112].

Berge je izradio geometrijski model kojim je opisao utjecaj promjene debljine osnovnog materijala na koncentraciju naprezanja u rubu šava sučeljno zavarenog spoja. Uz uvjet da je nominalno naprezanje u debljem i tanjem osnovnom materijalu jednako, gradijent opadanja naprezanja od maksimalnog do nominalnog u tanjem limu je veći, slika 2.13. To znači da je na istoj, ali maloj udaljenosti u osnovnom materijalu od ruba šava naprezanje u tanjem limu manje nego u debljem limu [5, 93].

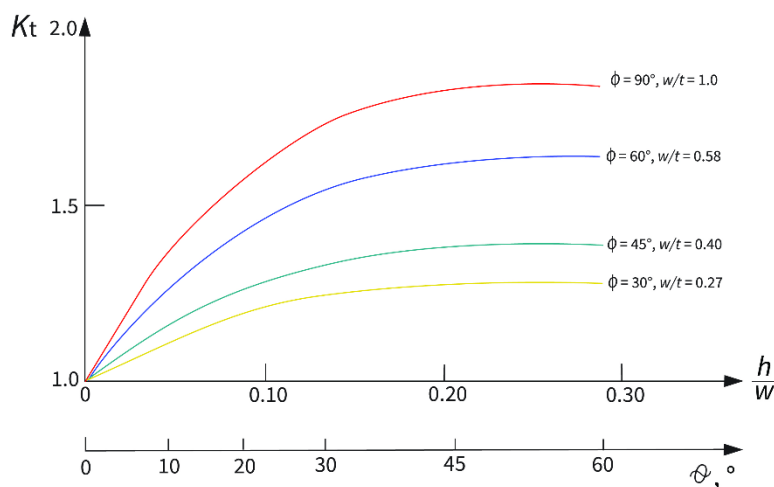


**Slika 2.13.** Geometrijski model utjecaja debljine osnovnog materijala [5]

## 2.8.2. Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava

Kut nadvišenja sljemena šava, prema analizi osjetljivosti, spada u jedan od dvije geometrijske veličine koje najviše utječu na geometrijski faktor koncentracije naprezanja u zavarenom spoju. Ovu veličinu je više autora analiziralo u nekoliko znanstvenih radova.

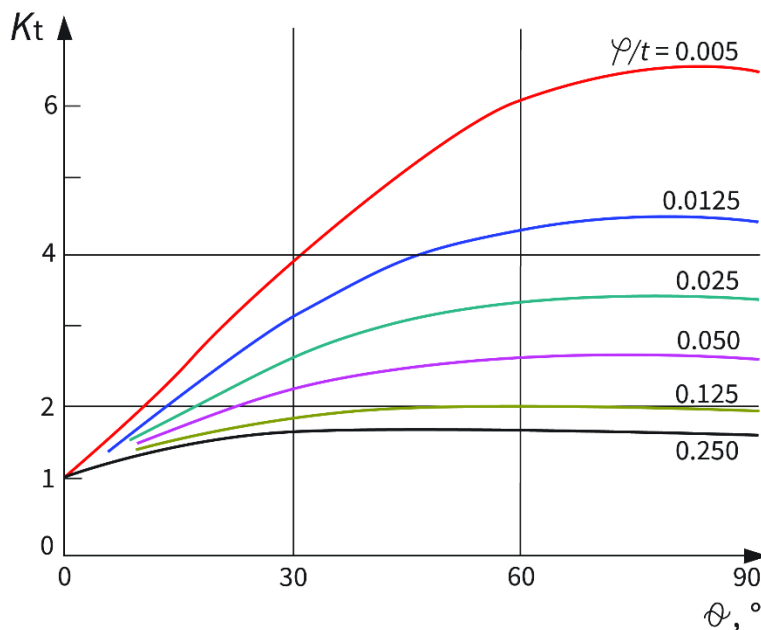
Lawrence je provodio istraživanja sučeljno zavarenih spojeva s raznim kutovima nadvišenja sljemena šava te je došao do zaključka da faktor koncentracije naprezanja naglo raste ako se kut nadvišenja sljemena šava povećava od  $0^\circ$  do  $30^\circ$ . Za područje kuta nadvišenja sljemena šava od  $30^\circ$  do  $45^\circ$  rast faktora koncentracije naprezanja je znatno manji, dok za kutove nadvišenja sljemena šava preko  $45^\circ$  faktor koncentracije naprezanja je konstantan. Ispitivanja je radio na sučeljno zavarenim spojevima s raznim visinama nadvišenja sljemena šava, raznim kutovima nadvišenja sljemena šava te raznim kutovima otvora žlijeba. Ispitivanjima je dokazano da geometrijski oblik zavarenog spoja, ovdje se to posebno odnosi na kut nadvišenja sljemena šava, utječe na faktor koncentracije naprezanja, na način da zavareni spojevi koji su imali nadvišenje sljemena imaju veći faktor koncentracije naprezanja. Zavareni spojevi koji nemaju nadvišenje sljemena ili im je ono uklonjeno imaju manji faktor koncentracije naprezanja. Također je utvrdio da omjer širine šava i debljine osnovnog materijala utječe na faktor koncentracije naprezanja. Taj omjer je povezao s kutom otvora žlijeba te je utvrdio da je faktor koncentracije naprezanja manji za manje kutove otvora žlijeba, slika 2.14 [64].



**Slika 2.14.** Faktor koncentracije naprezanja za kutove nadvišenja sljemena zavara [64]

Na dijagramu na slici 2.15. prikazan je utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja s obzirom na omjer radijusa u rubu šava i debljine osnovnog materijala. Iz dijagrama je vidljivo da je faktor koncentracije naprezanja malen za manji kut nadvišenja sljemena šava te za veći omjer radijusa u rubu šava i debljine osnovnog materijala. Faktor koncentracije naprezanja raste ako se omjer  $\varphi/t$  smanjuje te ako kut nadvišenja sljemena šava raste od  $0^\circ$  do  $60^\circ$  [103].

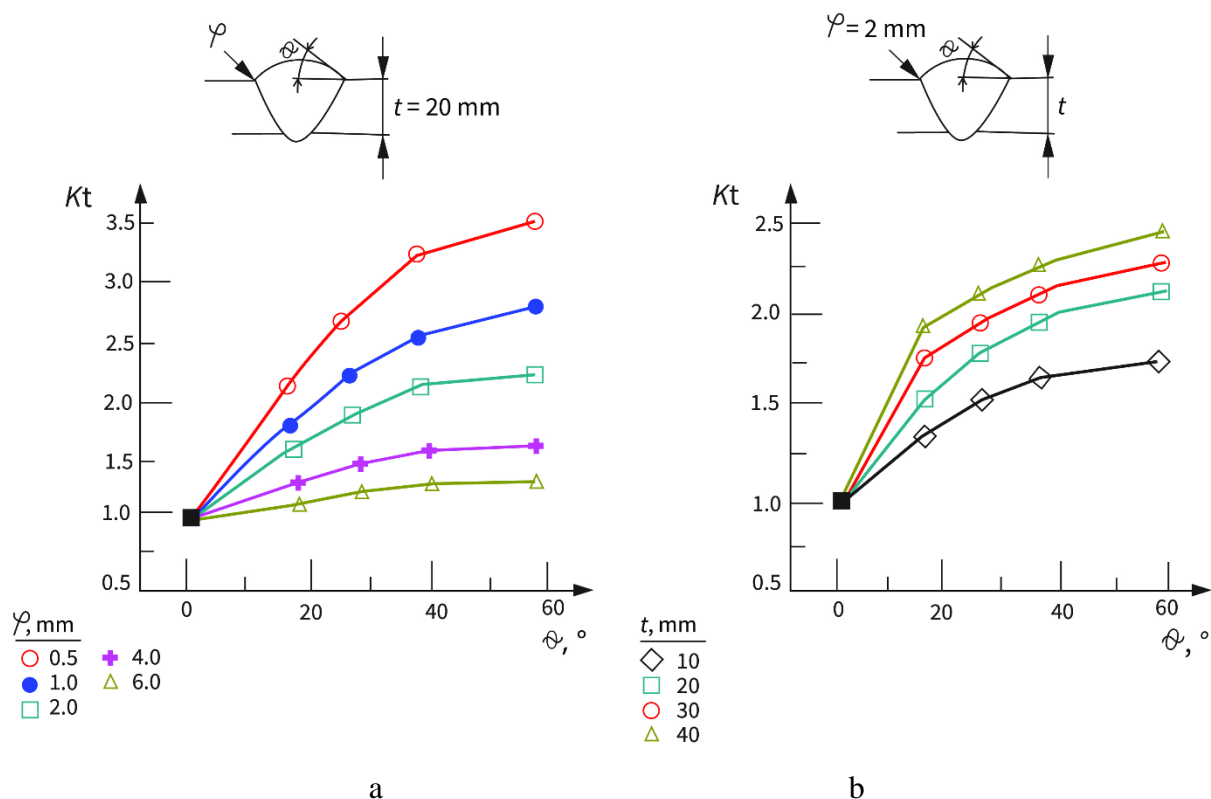
Iz ovog dijagrama se može povezati utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava te utjecaj debljine osnovnog materijala i radijusa ruba šava, za manje debljine osnovnog materijala radijus ruba šava mora biti veći da bi se geometrijski faktor koncentracije naprezanja smanjio, dok za veće debljine osnovnog materijala radijus može biti manji.



**Slika 2.15.** Dijagram utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja s obzirom na omjer radijusa na rubu šava i debljine osnovnog materijala [103]

Cerit i suradnici su FEM metodom proveli istraživanja utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava na koncentraciju naprezanja, u odnosu na radijus ruba šava i debljinu osnovnog materijala. Oni su u istraživanjima utvrdili da faktor koncentracije naprezanja poprima vrijednosti veće od 3 ako se kut nadvišenja sljemena šava poveća na  $60^\circ$ , a radijus ruba šava smanji na 0,5 mm.

Vrijednost faktora koncentracije naprezanja se znatno poveća prilikom povećanja kuta nadvišenja sljemena šava i smanjenja radijusa ruba šava, dijagram (a) na slici 2.16. Analizom utjecaja debljine osnovnog materijala utvrđeno je da se faktor koncentracije naprezanja poveća od 1,6 do 2,4 ako se debljina osnovnog materijala poveća od 10 mm na 40 mm kod kuta nadvišenja sljemena šava od 60°. Za manje kutove nadvišenja sljemena šava utjecaj debljine osnovnog materijala je znatno manji, dijagram (b) na slici 2.16 [10].



**Slika 2.16.** Dijagram utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja s obzirom na radijus ruba šava i debljinu osnovnog materijala [10]

### 2.8.3. Utjecaj radijusa ruba šava

Radijus ruba šava je geometrijska veličina koja najviše utječe na pojavu koncentracije naprezanja zbog toga jer se najveća koncentracija naprezanja javlja upravo na mjestu gdje se mijenja geometrijski oblik, a kod zavarenog spoja to je mjesto rub šava. Pukotine koje se javljaju

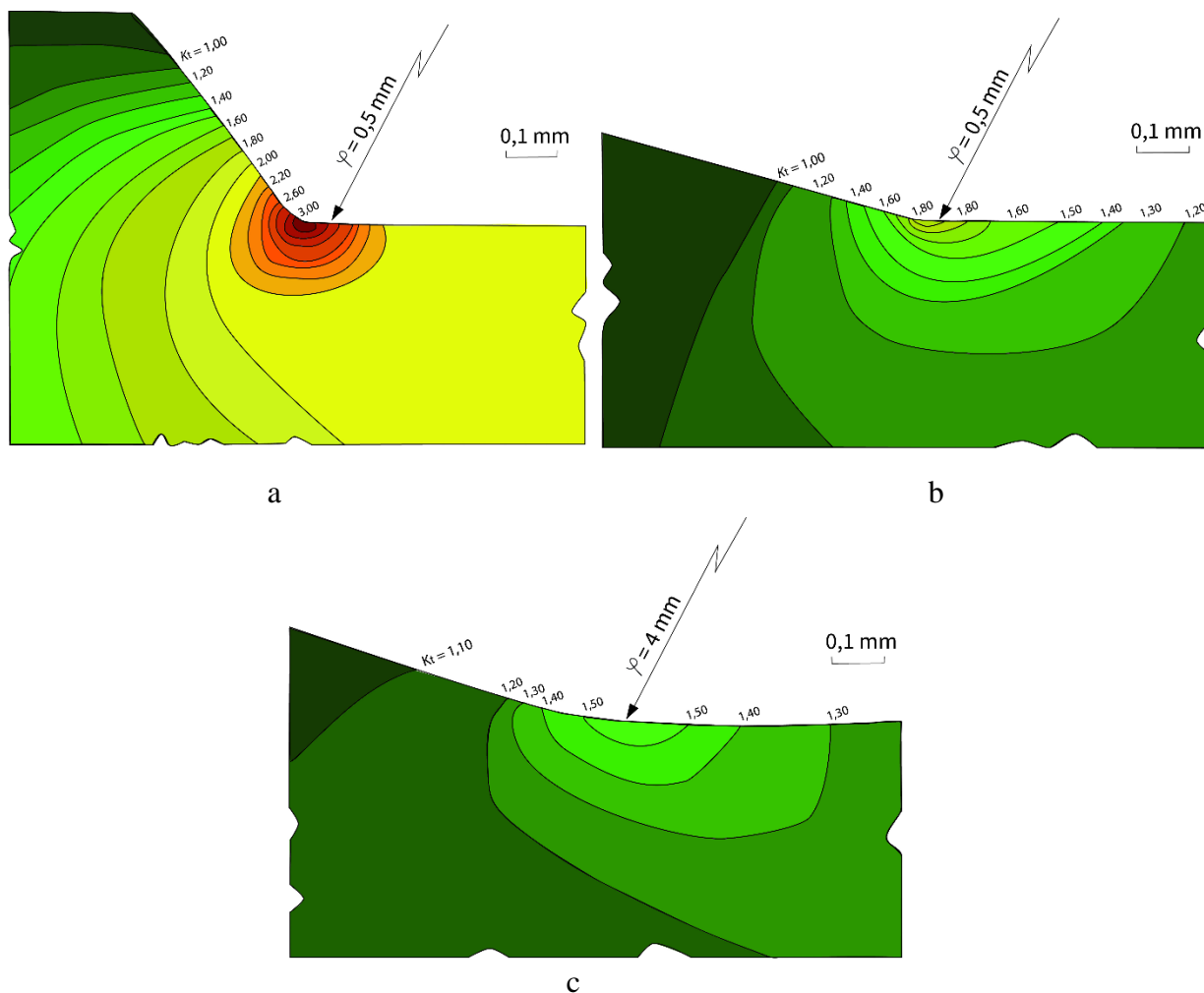


zbog koncentracije naprezanja najčešće se iniciraju u području ruba šava. Promjenom radijusa ruba šava znatno se mijenja faktor koncentracije naprezanja. Povećanjem radijusa ruba šava povećava se otpornost ruba šava na koncentraciju naprezanja te se smanjuje mogućnost inicijacije pukotine na rubu šava [11, 89, 97, 99].

Slika 2.17. prikazuje odnos između koncentracije naprezanja u rubu šava zavarenog spoja, te kuta nadvišenja i radijusa na rubu šava. Na slici 2.17a se može vidjeti da je faktor koncentracije naprezanja u rubu šava zavarenog spoja više od 3 puta veći od nominalnog naprezanja ako je radijus ruba šava 0,5 mm, na slikama 2.17b i 2.17c se može vidjeti razlika faktora koncentracije naprezanja za isti kut nadvišenja, ali za dva različita radijusa 0,5 mm, te 4 mm. Faktor koncentracije naprezanja je za radijus od 0,5 mm oko 1,85 puta veći od nominalnog naprezanja, a ako se radijus ruba šava poveća na 4 mm faktor koncentracije naprezanja se smanji na 1,47 od nominalnog [10].

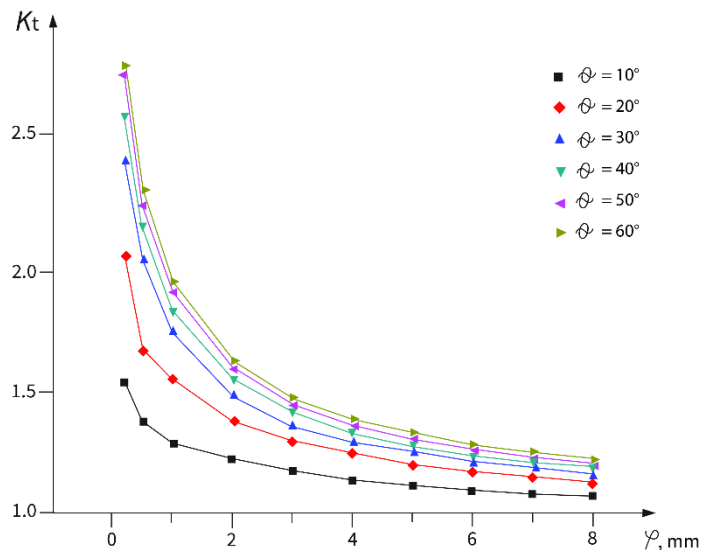
Radijus ruba šava je u nekim slučajevima ovisan o visini nadvišenja sljemena šava te o kutu nadvišenja sljemena šava. Ako je visina nadvišenja sljemena šava nula, a kut nadvišenja sljemena šava također nula, tada je radijus ruba šava teoretski beskonačno velika vrijednost. Ipak, zbog toga što je poprečni presjek zavarenog spoja nepravilnog geometrijskog oblika ne može se uspostaviti geometrijska zavisnost ova tri geometrijska parametra te se svaki parametar promatra zasebno.

Ispitivanja utjecaja radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja radili su He i Zhang. Zaključili su da je za male vrijednosti radijusa ruba šava faktor koncentracije naprezanja velik, također za male promjene radijusa ruba šava, promjena faktora koncentracije naprezanja je velika. Vrijedi i obrnuto tj. kod većih vrijednosti radijusa ruba šava ( $\varphi > 3$  mm) faktor koncentracije naprezanja ima manje vrijednosti. Odnosno, za povećanje radijusa od 0,2 mm do 3 mm faktor koncentracije naprezanja se smanjuje. Kao što se vidi na dijagramu na slici 2.18., promjena faktora koncentracije naprezanja ovisi o kutu nadvišenja te o radijusu ruba šava [32].



**Slika 2.17.** Koncentracija naprezanja u zavarenom spoju (dijagram a:  $\theta=60^\circ$ ,  $\varphi=0,5$  mm,  $t=20$  mm; dijagram b:  $\theta=20^\circ$ ,  $\varphi=0,5$  mm,  $t=20$  mm; c:  $\theta=20^\circ$ ,  $\varphi=4$  mm,  $t=20$  mm) [10]

He i Zhang su također utvrdili da se utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja može aproksimirati izrazom (2.31), ako je kut nadvišenja sljemena šava  $30^\circ$  [32].



Slika 2.18. Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja [32]

$$K_t = 0,817 \cdot e^{-\frac{\varphi}{1,013}} + 0,482 \cdot e^{-\frac{\varphi}{9,717}} + 0,629 \cdot e^{-\frac{\varphi}{0,215}} + 1,038 \quad (2.31)$$

#### 2.8.4. Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava

Nadvišenje sljemena šava zavarenog spoja je udaljenost od osnovnog materijala do najviše točke sljemena šava. Ono utječe na čvrstoću zavarenog spoja, koncentraciju naprezanja te na potrošnju dodatnog materijala. Visina nadvišenja sljemena šava se može smanjiti s povećanjem brzine prolaza te smanjenjem duljine električnog luka kod elektrolučnog zavarivanja. Na visinu nadvišenja sljemena šava utječe i vrsta zaštitnog plina [53, 117].

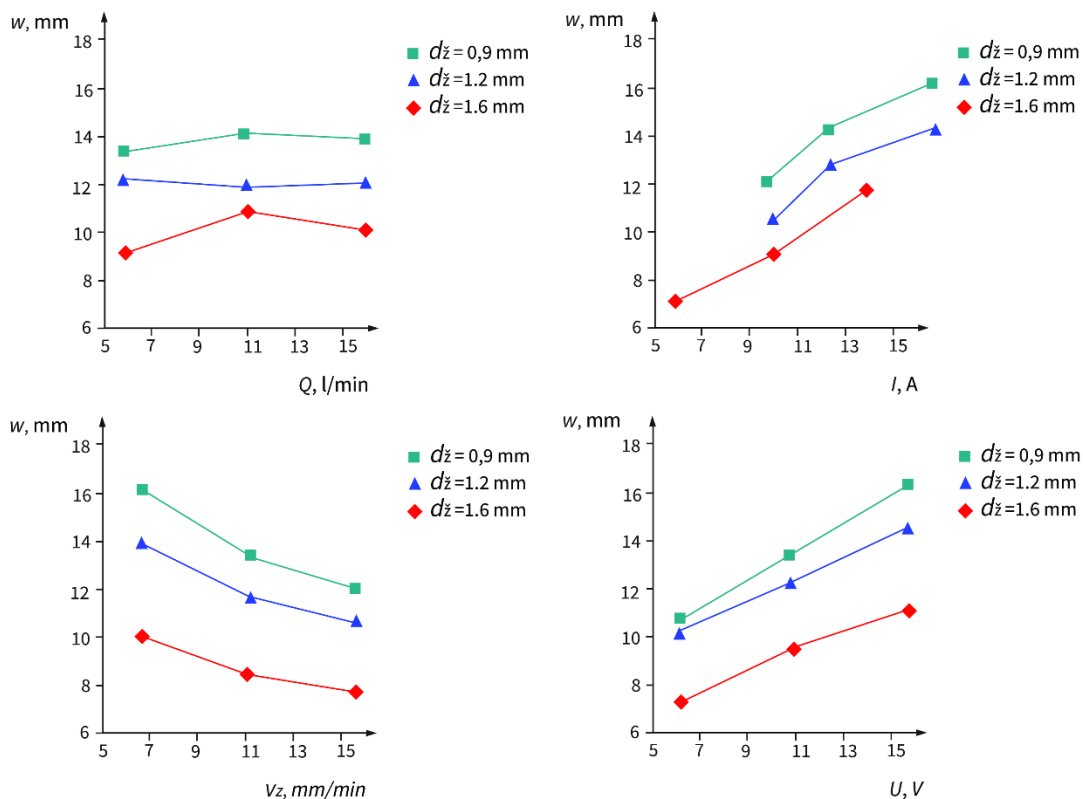
Wu i suradnici su u svom radu pretpostavili da za idealan oblik zavarenog spoja kontura poprečnog presjeka nadvišenja sljemena šava ima oblik parabole. Tako da se visina nadvišenja može izračunati prema izrazu (2.32). Iz ovog izraza se vidi da visina nadvišenja sljemena šava ovisi o kutu nadvišenja šava [116]. S obzirom da poprečni presjek zavarenog spoja skoro nikad nije idealna parabola, ovaj izraz se može primijeniti samo kod idealnog poprečnog presjeka zavara.

$$h = \frac{\text{tg}^2 \theta}{4 \cdot p} \quad (2.32)$$

Visina nadvišenja zavarenog spoja se može predvidjeti pomoću matematičkog modela kojega su razvili Kamble i suradnici, prema poznatoj jakosti struje zavarivanja i naponu struje te protoka zaštitnog plina i brzine zavarivanja. Oni su došli do zaključka da struja zavarivanja ima mali utjecaj na visinu zavarenog spoja, dok napon ima značajan utjecaj, do sličnog zaključka su došli Kumar i suradnici [55, 63].

#### 2.8.5. Utjecaj širine šava

Širina šava zavarenog spoja je poprečna širina nanesenog dodatnog materijala u zavarenom spoju. Faktori koji utječu na širinu šava jesu jakost struje zavarivanja, dijametar dodatnog materijala, napon struje zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice dodatnog materijala. Način širenja dodatnog materijala preko osnovnog materijala ovisi o protoku zaštitnog plina, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, dijametru dodatnog materijala te o brzini prolaza zavarivanja [79]. Na dijagramima na slici 2.19. prikazan je utjecaj prije spomenutih utjecaja, a s obzirom na dijametar dodatnog materijala na širinu šava zavarenog spoja. Iz ovih dijagrama se može zaključiti da se širina šava zavarenog spoja znatno povećava s povećanjem dijametra žice dodatnog materijala [58]. Mukhopadhyay i suradnici su analizirali utjecaj jakosti struje zavarivanja i brzine žice za zavarivanje na širinu zavarenog spoja te su razvili matematički model predviđanja širine zavara s obzirom na jakost struje i brzinu žice za zavarivanje [85]. Murugan i Gunaraj su predložili matematički model predviđanja širine zavara ako je poznat osim prije spomenutih napona struje zavarivanja i brzine žice zavarivanja, i brzina zavarivanja te udaljenost vrha mlaznice pištolja za zavarivanje do osnovnog materijala [86].



**Slika 2.19.** Utjecaj protoka zaštitnog plina, jakosti struje zavarivanja, brzine zavarivanja te napona zavarivanja na širinu šava zavarenog spoja s obzirom na dijаметar dodatnog materijala [58]

Veća širina šava zavarenog spoja može se postići povećavanjem jakosti struje zavarivanja. Na taj način u zavareni spoj tijekom zavarivanja dolazi do većeg unosa topline te do taljenja veće količine materijala. Nasuprot tome manja širina šava zavarenog spoja se može postići povećanjem brzine zavarivanja [23, 111].

## 2.9. Zaključak provedene analize utjecaja geometrijskih veličina

Iz izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja se može zaključiti da će faktor koncentracije naprezanja biti jednak jedan ako je kut nadvišenja sljemena šava  $0^\circ$ . Međutim, ako vrijednost kuta nadvišenja sljemena šava poprimi negativne vrijednosti, tada će faktor koncentracije naprezanja poprimiti velike vrijednosti, a to znači da zavareni spoj nije prihvatljiv za

upotrebu, zato se može reći da će zavareni spoj biti geometrijski idealan i siguran za upotrebu ako je  $\theta \geq 0^\circ$ . Isto vrijedi i za visinu nadvišenja sljemena šava.

### 2.9.1. Debljina osnovnog materijala

Debljina osnovnog materijala ima mali utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Zbog malog utjecaja u pokusima će biti korištena jedna debljina osnovnog materijala.

### 2.9.2. Kut nadvišenja sljemena šava

Kut nadvišenja sljemena šava spada među dvije najutjecajnije geometrijske veličine. Za kutove nadvišenja šava od  $0^\circ$  faktor koncentracije naprezanja poprima minimalnu vrijednost. Prilikom povećanja kuta nadvišenja sljemena šava od  $0^\circ$  do  $30^\circ$  faktor koncentracije naprezanja se naglo povećava, a za vrijednosti kuta nadvišenja sljemena šava od  $30^\circ$  do  $45^\circ$  povećavanje faktora koncentracije naprezanja je umjereno, dok je za vrijednosti kuta nadvišenja šava preko  $45^\circ$  faktor koncentracije naprezanja konstantan.

U pokusima će se težiti da kut nadvišenja šava ima vrijednosti čim bliže  $0^\circ$ , ali nikako ne smije biti negativan jer je tada zavareni spoj neprihvatljiv.

### 2.9.3. Radijus ruba šava

Prema provedenoj analizi osjetljivosti te prema analizi geometrijskih veličina može se reći da je radijus ruba šava geometrijska veličina koja najviše utječe na faktor koncentracije naprezanja. Utjecaj je posebno velik u području malih radijusa ruba šava.

Radijus ruba šava se ponaša obrnuto proporcionalno u odnosu na faktor koncentracije naprezanja. Faktor koncentracije naprezanja će biti jednak jedan ako radijus ruba šava poprimi beskonačnu vrijednost, a ako je radijus ruba šava jednak nuli tada će faktor koncentracije naprezanja poprimiti beskonačnu vrijednost. Vrijednost radijusa ruba šava je povezana s kutom

nadvišenja i visinom nadvišenja sljemena šava, ako je vrijednost kuta nadvišenja sljemena šava i visina nadvišenja sljemena šava jednaka nuli tada je veličina radijusa ruba šava beskonačna.

#### 2.9.4. Visina nadvišenja sljemena šava

Za visine nadvišenja sljemena šava od 0 mm faktor koncentracije naprezanja poprima minimalne vrijednosti. Za vrijednosti visine nadvišenja sljemena šava od 0 mm do 2 mm geometrijski faktor koncentracije naprezanja ima znatan rast, a za vrijednosti visine nadvišenja sljemena šava veće od 2 mm geometrijski faktor koncentracije naprezanja je konstantan. Prilikom pokusa težit će se da vrijednost visine nadvišenja sljemena šava poprimi vrijednosti čim bliže nuli, a zbog geometrijske povezanosti kao i kod kuta nadvišenja sljemena šava, visina nadvišenja sljemena šava ne smije biti manja od nule jer je tada zavareni spoj neprihvatljiv.

#### 2.9.5. Širina šava

Širina šava ima mali utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Faktor koncentracije naprezanja je konstantan za sve vrijednosti širine šava.

### **2.10. Propisi i norme vezane uz faktor koncentracije naprezanja u zavarenim spojevima**

Propise i norme vezane uz koncentraciju naprezanja donosi nekoliko nacionalnih i internacionalnih instituta, a klasifikacijski zavodi izdaju svoje upute i propise vezane uz zavare na brodskim konstrukcijama. Nekoliko nacionalnih instituta za standarde izdaje preporuke na koji način razmatrati pukotine u zavarenim strukturama.

Međunarodni institut za zavarivanje (engl. *International Institute of Welding*, skr. IIW)<sup>1</sup> je osnovan s ciljem objedinjavanja zahtijeva za tehnologiju zavarivanja te objavljuje preporuke i kodove vezane uz postupke zavarivanja.

Britanski institut za standarde (engl. *British Standards Institute*, skr. BSI)<sup>2</sup> kao jedan od najvažnijih instituta koji izdaju standarde izdao je dvije upute vezane uz pukotine u zavarenim strukturama. U uputama BS 7608 prikazani su najčešći zavareni spojevi s mjestima na kojima može nastati pukotina. Tako je za sučeljni spoj prikazano da pukotina najčešće nastaje u području ruba šava [7].

Za proračun zamora u zavarenim spojevima u uputama BS 7910 prikazane su tri metode uz pomoć kojih se može izračunati zamor, odnosno mogućnost stvaranja pukotina. Koja metoda će biti upotrijebljena ovisi o vrsti materijala i o podacima s kojima se raspolaže [8].

Američko udruženje za zavarivanje (engl. *American Welding Society*, skr. AWS)<sup>3</sup> je prva uputstva o zavarenim spojevima izdalo 1928. godine. Trenutno je na snazi 22. izdanje ovih uputa izdano 2010. godine. U ovim uputama su detaljno prikazani načini izradbe postupaka za zavarivanje te kriteriji prihvatljivosti zavarenih spojeva kao i načini ispitivanja s razaranjem i bez razaranja [2].

Međunarodno udruženje klasifikacijskih zavoda (engl. *International Association of Classification Societies*, skr. IACS)<sup>4</sup> je izdalo okružnicu kojim propisuje analizu pukotina u

---

<sup>1</sup> Međunarodni institut za zavarivanje je međunarodno znanstveno i inženjering udruženje za zavarivanje, lemljenje i srodne tehnologije, sa sjedištem u mjestu Villepinte pored Parisa, osnovano 1948. godine. U ovo udruženje trenutno je učlanjeno 57 nacionalnih tijela. Izvor: <http://www.iiwelding.org> (srpanj 2015.)

<sup>2</sup> Britanski institut za standarde je osnovan kao Odbor za inženjerske standarde u Londonu 1901. Potom je proširio svoj rad na standardizaciji i postao Britansko udruženje inženjerskih standarda 1918. godine. 1931. godine mijenja naziv u Britanski institut za standarde. Godine 1998. revizija Statuta omogućila je organizaciji diverzifikaciju i stjecanje drugih poslova, a trgovačko ime promijenjeno je u BSI Group. BSI trenutno radi u 195 zemalja svijeta. Izvor: <https://www.bsigroup.com> (srpanj 2021.)

<sup>3</sup> Američko društvo za zavarivanje osnovano je 1919. godine kao neprofitna organizacija za unapređenje znanosti, tehnologije te primjene zavarivanja i srodnih procesa spajanja i rezanja. Sjedište je u Miamiu na Floridi, a ima više od 73 000 članova širom svijeta. Sastoji se od 250 odsjeka i studentskih poglavlja. Izvor: <https://www.aws.org> (srpanj 2021.)

<sup>4</sup> Međunarodno udruženje klasifikacijskih zavoda je osnovano 11. rujna 1968. godine u Hamburgu, kao nevladina organizacija s ciljem promocije i unapređenja sigurnosti i zaštite okoliša na moru. Glavni ured udruženja je u Londonu, trenutno je 12 klasifikacijskih zavoda učlanjeno u ovo udruženje. Izvor: <https://www.iacs.org.uk> (srpanj 2021.)



zavarenim spojevima na brodovima [48]. Ova okružnica je podloga svim klasifikacijskim društvima koja su članovi IACS udruženja prilikom razrade svojih uputa vezanih uz analizu pukotina u zavarenim spojevima.

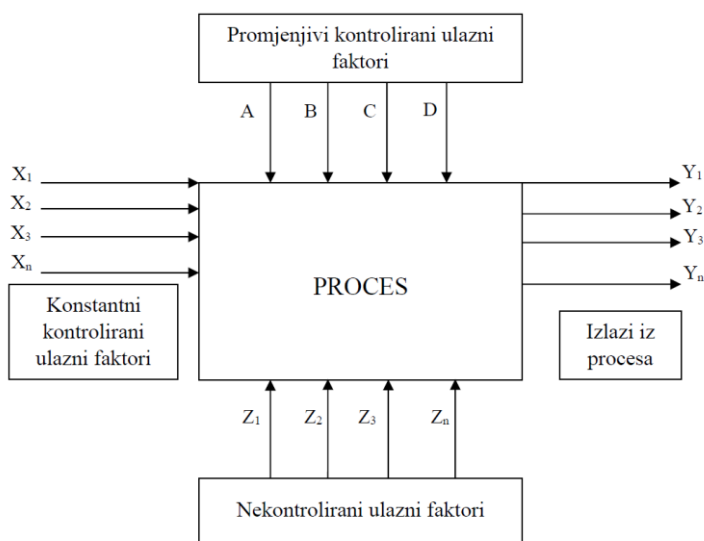
Jedno od najvećih klasifikacijskih društava grupacija *Det Norske Veritas* i *Germanischer Lloyd* (skr. DNVGL) je u svojoj okružnici iznijelo prijedlog da se koncentracija naprezanja u zavaru može smanjiti ako se rub šava izbrusi do maksimalne dubine od 2 mm ili 7% debljine osnovnog materijala, što je manje. Ovo se posebno odnosi na platforme za istraživanje nafte i objekte morske tehnologije, a manje na trgovačke brodove [14].

### 3. MATERIJALI I METODE UPOTRIJEBLJENI U ISTRAŽIVANJU

U brodograđevnoj industrijskoj praksi danas se može susresti mnogo „pasivnih eksperimenata“. Dobro je da se eksperimentiranjem pokušava doći do što boljih rezultata, ali je loše da su to eksperimenti provedeni bez prethodno izrađenog plana te je rezultat eksperimentiranja znanstveno nepotvrđen. U istraživanjima koja su opisana u ovom radu izvršeno je sustavno i plansko istraživanje optimizacije MAG postupka zavarivanja uzimajući u razmatranje sve parametre koji mogu utjecati na geometrijski izgled površine zavarenog spoja.

#### 3.1. Proces provedbe pokusa

Pokus je jedna od osnovnih metoda znanstvenih spoznaja i može se izvoditi u svim znanstvenim područjima. Može se reći da je eksperiment niz pokusa u kojima se namjerno ili nenamjerno mijenjaju ulazni parametri procesa te se promatraju i identificiraju promjene na izlaznim parametrima procesa. Pokus je dio eksperimenta s jednom kombinacijom vrijednosti faktora. Težište ovog rada će biti stavljeno na provedbu suvremenih eksperimenata u cilju optimiziranja parametara procesa zavarivanja. Proces na slici 3.1. prikazuje ulazne faktore u proces te izlaze iz procesa [80].



Slika 3.1. Model procesa eksperimenta [80]

Proces se može predstaviti kao kombinacija strojeva, uređaja, ljudi, postupaka i ostalih resursa koji pretvaraju ulaze u proces u izlaze iz procesa (na slici 3.1. označeno s  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ ). Na proces imaju utjecaj kontrolirani ulazni faktori koji mogu biti promjenjivi ili konstantni te nekontrolirani ulazni faktori. Na slici 3.1. konstantni kontrolirani ulazni faktori su označeni s  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , dok su promjenjivi kontrolirani označeni slovima A, B, C i D. Nekomontrolirani ulazni faktori su na slici 3.1. označeni  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ . Zbog potreba eksperimenta nekontrolirani ulazni faktori se moraju držati pod kontrolom čim je više moguće.

U ovom istraživanju analizira se proces optimizacije postupka zavarivanja sučelnog spoja. Kontrolirani ulazni faktori će u ovom istraživanju biti promjenjivi ili konstantni parametri. Izlaz iz procesa je zavareni čelični lim, odnosno izgled površine zavara, a nekontrolirani faktori, tj. vrijednosti koje se ne mogu kontrolirati, jesu utjecaji okoline i ljudski faktori. Da bi se nekontrolirani faktori tijekom pokusa sveli na minimum, odnosno da bi oni bili jednaki tijekom cijelog ispitivanja, pokusi će se izvoditi u zatvorenoj radionici, odnosno u laboratoriju.

Svi nabrojeni faktori mogu biti:

- kvantitativni i
- kvalitativni.

Kvantitativni faktor se opisuje brojčanom vrijednošću i mjernom jedinicom, npr. brzina zavarivanja (m/s), kut dodatnog materijala ( $^{\circ}$ ), radijus ruba šava (mm) i slično.

Kvalitativni faktor se opisuje riječima, npr. zaštitni plin može biti  $\text{CO}_2$  ili mješavina (18%  $\text{CO}_2$  i 82% Ar) i slično.

Ciljevi eksperimenta mogu uključiti (ali ne i limitirati):

- a) koji je promjenjivi kontrolirani ulazni faktor najutjecajni na izlaz iz procesa  $Y_i$ ;
- b) kako odabrati vrijednost utjecajnog ulaznog faktora, tako da je vrijednost varijable  $Y_i$  gotovo uvijek u blizini željene nominalne vrijednosti;
- c) kako odabrati vrijednost utjecajnog ulaznog faktora, tako da je vrijednost varijable  $Y_i$  minimalna;

d) kako odabrati vrijednost utjecajnog ulaznog faktora, tako da su posljedice nekontroliranog faktora  $Z_i$  svedene na minimum.

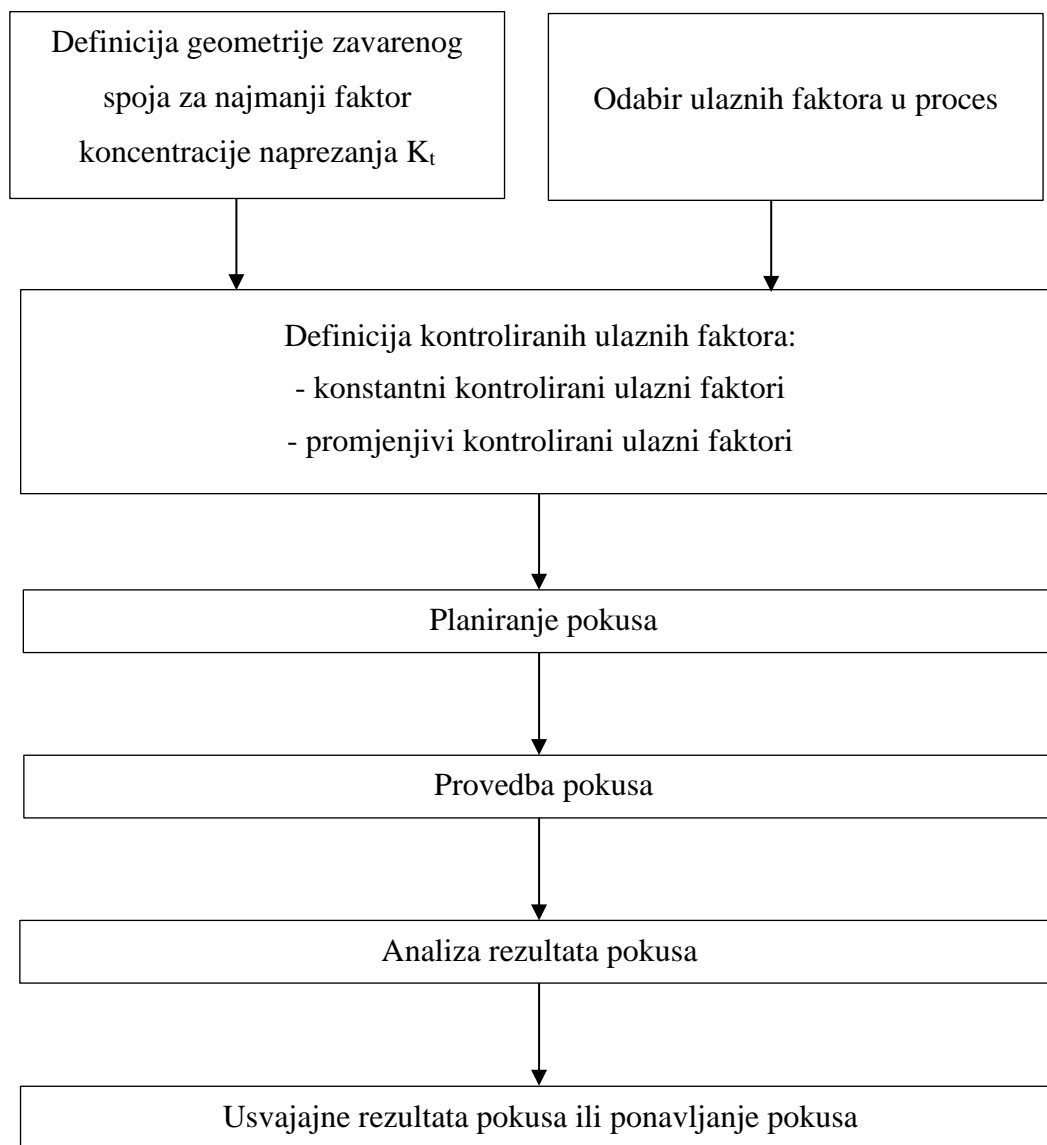
Suvremenom pristupu planiranja eksperimenata prethodile su tri faze [80]:

1. Fisherova faza se odnosila na eksperimentiranje u poljoprivredi kako bi se povećali prinosi. Ovu fazu je u 1920-im godinama utemeljio R. A. Fisher promatrajući kako kiša, sunce, gnojivo i slično utječu na prinose u poljoprivredi. U ovoj fazi se počinje koristiti metoda faktorijalnog eksperimentiranja u pripremi pokusa te se počinje koristiti analiza varijance u obradi rezultata.

2. Box/Wilsonova faza se odnosila na eksperimentiranje u kemijskoj i procesnoj industriji kako bi se povećali prinosi proizvoda. Počinje se koristiti metoda odzivnih površina u obradi rezultata. Unapređenjem računalnih programa za statističku obradu rezultata ova metoda dobiva na važnosti.

3. Taguchijeva faza se odnosila na eksperimentiranje u proizvodnom strojarstvu kako bi se povećala kvaliteta proizvoda. Počinju se razvijati robusni proizvodi i robusni procesi.

Na slici 3.2. prikazan je tok provedbe istraživanja. Prilikom planiranja istraživanja najprije je iz dosadašnjih teoretskih spoznaja definirana geometrija površine zavarenog spoja da bi se postigao najmanji geometrijski faktor koncentracije naprezanja. Također su se na osnovi analize problema koji su uočeni u praksi definirali ulazni faktori u proces. Definiran je model procesa eksperimenta, odnosno konstantni i promjenjivi ulazni faktori. Definirani su načini na koji će nekontrolirani ulazni faktori imati najmanji utjecaj na provedbu pokusa. Nakon planiranja pokusa, isti su provedeni te je napravljena analiza dobivenih rezultata. Rezultati dobiveni pokusima su usvojeni, na način da je postavljena hipoteza usvojena.



**Slika 3.2.** Gantogram provedbe istraživanja

U tablici 3.1. prikazani su ulazni faktori koji sudjeluju u procesu zavarivanja te vrijednosti tih faktora tijekom eksperimenta ili vrijednosti kojima se teži prilikom istraživanja. Konstantni kontrolirani ulazni faktori određeni su u proizvođačevoj radnoj uputi za zavarivanje, Prvitak 5a i 5b.

**Tablica 3.1.** Ulazni faktori u procesu zavarivanja te izlazi iz procesa [105]

Ulazni faktori u procesu zavarivanja		Vrijednost faktora	
Kontrolirani ulazni faktori	Konstantni	Osnovni materijal	Čelik EH36
		Dodatni materijal	Žica punjena praškom
		Geometrijski oblik žlijeba	„V“ žlijeb
		Kut otvora žlijeba	50°
		Zračnost u korijenu žlijeba	5,8 mm
		Temperatura okoline	20°C
		Jakost struje zavarivanja	190 A (prvi prolaz) 250 A (ostali prolazi)
		Napon struje zavarivanja	27 V
		Polaritet	istosmjerna struja, elektroda spojena na pozitivan pol (DCEP)
		Brzina zavarivanja	150 mm/min (prvi prolaz) 300 mm/min (ostali prolazi)
		Brzina žice zavarivanja	9,6 m/min
	Promjenjivi	Položaj dodatnog materijala	naprijed / okomito / natrag
		Broj prolaza završnog sloja	1 prolaz / 3 prolaza
		Dužina slobodnog kraja žice	15 mm / 25 mm
Nekontrolirani ulazni faktori	Zaštitni plin	(82% Ar + 18% CO <sub>2</sub> ) / (100% CO <sub>2</sub> )	
	Ljudski faktor	Atestirani zavarivač	
Izlazi iz procesa	Utjecaj okoline	Laboratorijski uvjeti	
	Kut nadvišenja sljemena šava	Ove vrijednosti su mjerene nakon provedbe pokusa	
	Radijus ruba šava		
	Visina nadvišenja sljemena šava		
Širina šava zavara			

### 3.2. Upotrijebljeni osnovni materijal

U provedenom istraživanju osnovni materijal je konstantan kontrolirani ulazni faktor u proces.

#### 3.2.1. Brodograđevni čelik

U brodograđevnoj industriji se uobičajeno koristi brodograđevni čelik koji sadrži od 0,18 do 0,23% ugljika, s granicom razvlačenja  $235 \text{ N/mm}^2$  pri temperaturi okoline od  $20^\circ\text{C}$  do  $-40^\circ\text{C}$ . Međutim, prilikom gradnje VLCC i ULCC brodova sve se više upotrebljavaju čelici povišene čvrstoće s granicom razvlačenja 315, 355 i  $390 \text{ N/mm}^2$  [15, 37]. S obzirom da se sve više brodova gradi s namjenom da plove sjevernim plovnim putem, sve više se upotrebljavaju čelici povišene čvrstoće koji zadržavaju žilavost na niskim temperaturama od  $0^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $-40^\circ\text{C}$  te  $-60^\circ\text{C}$ .

Prema propisima Hrvatskog registra brodova [37] obični brodograđevni čelici su podijeljeni prema temperaturi na kojoj moraju zadržati žilavost, dok su čelici povišene čvrstoće još podijeljeni na dodanih 12 grupa, tablica 3.2.

Brodograđevni čelici povišene čvrstoće se općenito označavaju oznakom „H“ umjesto brojeva nakon prvog slova n. pr. AH, DH, EH i FH.

Međunarodno udruženje klasifikacijskih zavoda je donijelo preporuke o upotrebi čelika povišene čvrstoće prilikom gradnje brodskog trupa. Preporučeno je da se čelici povišene čvrstoće koriste prilikom gradnje raznih strukturnih elemenata brodskog trupa. Preporuke ovise o debljini ugrađenog materijala, mjestu gdje se čelik ugrađuje na brodskom trupu te o tipu i veličini broda. Posebno se preporučuje ugradnja čelika povišene čvrstoće oznake EH na vanjskoj oplati na brodovima za prijevoz rasutog tereta s jednostrukom oplatom [50].

**Tablica 3.2.** Obični brodograđevni čelici i čelici povišene čvrstoće [37]

Vrsta čelika	Oznaka čelika				Granica razvlačenja, N/mm <sup>2</sup>	Žilavost pri temperaturi, °C			
	A	B	D	E		+20	0	-20	-40
Običan brodograđevni čelik	A	B	D	E	235	+20	0	-20	-40
Brodograđevni čelik povišene čvrstoće	A32	D32	E32	F32	315	0	-20	-40	-60
	A36	D36	E36	F36	355	0	-20	-40	-60
	A40	D40	E40	F40	390	0	-20	-40	-60

Løseth i suradnici su analizirali ekonomsku isplativost ugradnje čelika povišene čvrstoće na brodu klase VLCC. Oni su analizirali VLCC brod koji je u potpunosti građen od običnog brodograđevnog čelika te isti takav brod koji je građen od čelika povišene čvrstoće. Cijena broda izgrađenog od čelika povišene čvrstoće je veća, a povećani su i troškovi popravka limova zbog dotrajalosti te zbog pukotina uslijed zamora. Ipak zbog činjenice da je brod građen od čelika povišene čvrstoće manje mase od broda građenog od običnog materijala te zbog toga ima veću korisnu nosivost, sve je veća upotreba čelika povišene čvrstoće prilikom gradnje broskog trupa [72].

Za ovo ispitivanje koristit će se osnovni materijal oznake EH36. U tablici 3.3. prikazan je zahtijevani kemijski sastav za osnovni materijal EH36 prema zahtjevima HRB-a [37], te je prikazan stvarni kemijski sastav prema potvrdi o osnovnom materijalu brodograđevnom čeliku kojeg izdaje *Det Norske Veritas*, Privitak 3.

**Tablica 3.3.** Kemijski sastav osnovnog materijala EH36 korištenog u istraživanju

Kemijski element, %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti
Zahtijevano	≤ 0,18	≤ 0,50	0,90 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,20	≤ 0,08	≤ 0,40	≥ 0,015	≤ 0,35	0,02 - 0,05	≤ 0,02
Stvarno	0,176	0,340	1,420	0,014	0,001	0,050	0,003	0,020	0,024	0,020	0,026	0,003



### 3.2.2. Zavarljivost čelika

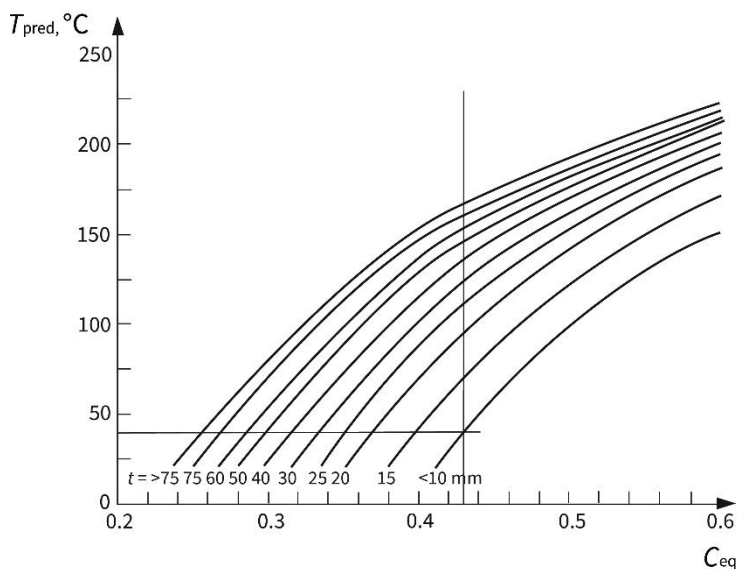
Za procjenu zavarljivosti čelika najčešće služi vrijednost koja se zove ekvivalent ugljika. Ugljik ima značajan utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika, zbog toga jer u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ugljik ima odlučujući utjecaj na njegovu zavarljivost. Sa stajališta zavarivanja poželjno je imati što niži sadržaj ugljika u čeliku.

Iskustveno dobiven izraz (3.1) služi za izračun ekvivalenta ugljika. Prema pravilima HRB-a ekvivalent ugljika za čelik EH36, debljine 10 mm mora biti maksimalno 0,38% [37].

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%) \quad (3.1)$$

Uvrštavanjem kemijskog sastava iz tablice 3.1. dobije se da je ekvivalent ugljika za osnovni materijal koji je korišten u eksperimentu 0,43%. S obzirom da je on veći od maksimalno preporučenog prema pravilima, osnovni materijal se mora predgrijati prije procesa zavarivanja.

Prema odobrenim Radnim uputama za zavarivanje, Privitak 4a i 4b, temperatura predgrijavanja mora biti 100°C. Također prema Yurioki i Kasuyi, dijagram na slici 3.3. osnovni materijal se mora zagrijavati na oko 40°C [120].



**Slika 3.3.** Temperature predgrijavanja prema debljini osnovnog materijala [120]

S obzirom da se je fokus istraživanja stavljen na oblik geometrijske površine zavara, te zavari neće biti ispitivani umaranjem, predgrijavanje nije vršeno.

### **3.3. Dodatni materijal**

Dodatni materijal je u ovom istraživanju isto kao i osnovni materijal konstantan kontrolirani ulazni faktor u proces.

#### **3.3.1. Vrste dodatnog materijala u obliku žice**

Kao dodatni materijal za zavarivanje u ovom eksperimentu će biti korištena taljiva žica ispunjena praškom. Kod elektrolučnog zavarivanja s taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi dodatni materijal u obliku žice je namotan na kolut. Žica se kontinuirano odmotava s koluta i dostavlja do mjesta zavarivanja. Površina žice mora biti glatka i čista te je najčešće površina žice presvučena tankim slojem bakra ili nikla. Promjer žice mora biti ujednačen s vrlo malim dopuštenim odstupanjima, jer se samo na taj način može osigurati kontinuirano dovođenje žice bez zapinjanja i održavanje stalnog električnog kontakta. Prema poprečnom presjeku žice mogu biti punog presjeka ili punjene praškom [42, 77].

##### **a) Žice punog presjeka**

Žice punog presjeka se izrađuju raznih promjera uobičajeno od 0,6 mm do 5,0 mm. One svojim kemijskim sastavom odgovaraju osnovnom materijalu.

##### **b) Žice punjene praškom**

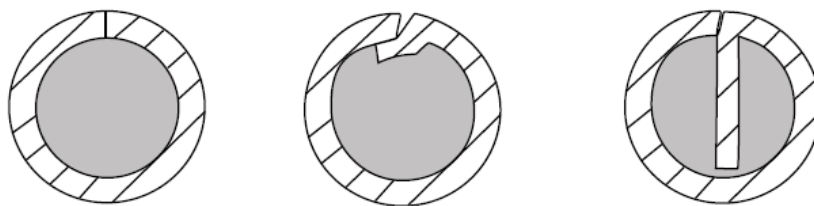
Zbog boljih karakteristika uglavnom se upotrebljavaju žice punjene praškom. Ove žice punjene praškom izrađuju se s vanjskim promjerom od 1,0 mm do 4,0 mm. One imaju metalni omotač koji svojim sastavom odgovara osnovnom materijalu, dok je središnji dio ispunjen praškom. Vanjski poprečni presjek žice je uvijek kružnog oblika, dok žica može biti raznih poprečnih oblika, slika 3.4. Ipak najčešće se koristi prstenasti poprečni presjek žice u čijoj sredini se nalazi prašak.

Prašak ima sličnu ulogu kao obloga kod elektrode za REL postupke zavarivanja. Prašak unutar žice stvara plin koji stvara zaštitnu atmosferu oko električnog luka. Jezgre mogu biti od metalnog, rutilnog, bazičnog te mješovitog praška.

Uglavnom se upotrebljavaju žice promjera od 1,0 mm do 1,6 mm. Žice manjeg promjera daju bolje karakteristike zavarenog spoja te se njima lakše rukuje.

Prednosti zavarivanja praškom punjenom žicom su:

- manja vjerojatnost nastanka uobičajenih pogrešaka u zavarenom spoju,
- zavarivanje se može provesti u svim položajima,
- zbog manjeg rasprskavanja taline bolji je izgled zavara,
- prašku nije potrebno dodati vezivno sredstvo jer se prašak nalazi unutar žice.



**Slika 3.4.** Oblici poprečnog presjeka praškom punjene žice [77]

### 3.3.2. Označavanje dodatnog materijala

Dodatni materijal mora osigurati da nakon procesa zavarivanja ima iste karakteristike kao i osnovni materijal te da se na njemu ne pojave pukotine.

Tijekom eksperimenata koristit će se dvije vrste dodatnog materijala. Za zavarivanje s čistim CO<sub>2</sub> koristit će se žica Outershield 71E-H koju proizvodi „*LINCOLN*“, a za zavarivanje s mješavinom plinova koristit će se žica Supercored 71 koju proizvodi „*HYUNDAI*“. U tablici 3.4. prikazana su svojstva dodatnog materijala. Potvrde za dodatni materijal se nalaze u Privicima 5a i 5b. S obzirom da će se pokusi raditi s čelikom pogodnim za rad pri niskim temperaturama, važno

je da dodatni materijal zadovoljava zahtjeve pravila za žilavost pri temperaturama od  $-40^{\circ}\text{C}$ , što se vidi iz tablice 3.4 [44].

**Tablica 3.4.** Karakteristike dodatnih materijala

Proizvođač	Komercijalni naziv	Žilavost pri $-40^{\circ}\text{C}$ , J		Oznaka žice prema HRN EN ISO 17632 [44]
		Zahtijevana pravilima [38]	Prema specifikaciji	
LINCOLN [69]	Outershield 71MS-H	47	75	A T 46 4 P C 2 H5
HYUNDAI [46]	Supercored 71MJ	47	80	A T 46 4 P M 1 H5

### 3.4. Korišteni postupci zavarivanja

Ispitivanje će se vršiti MAG postupkom zavarivanja koji se koristi prilikom zavarivanja montažnih zavara na novogradnjama. Tijekom ispitivanja će se koristiti dvije vrste zaštitnog plina. U tablici 3.5. su navedeni korišteni postupci zavarivanja prema HRN EN ISO 4063:2010 [41].

**Tablica 3.5.** Korišteni postupci zavarivanja [41]

Oznaka postupka zavarivanja	Opis postupka zavarivanja
136	Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi mješavine argona i ugljičnog dioksida
	Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina

U istraživanju je korišten vodoravni položaj zavarivanja prema HRN EN ISO 9606-1:2017 [43], tablica 3.6., te sučeljni spoj.

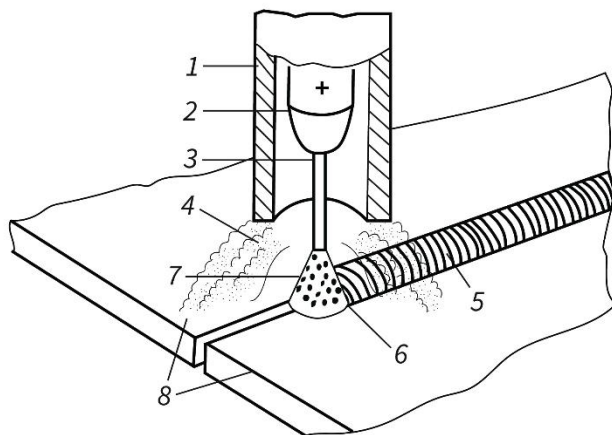
**Tablica 3.6.** Korišteni način zavarivanja [43]

Oznaka zavarivanja	Opis zavarivanja
PA	vodoravni položaj
BW	sučeljni spoj

### 3.4.1 Specifičnosti elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštitnoj plinskoj atmosferi

Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom žicom u zaštitnoj plinskoj atmosferi električni luk gori između metalne elektrode (žice) koja se tali i osnovnog materijala. Žica se odmata s koluta brzinom koja ovisi o jakosti struje te se dovodi na mjesto zavarivanja. Osnovni princip MAG zavarivanja prikazan je na slici 3.5 [71, 94].

Prilikom zavarivanja taljivom žicom u zaštitnoj plinskoj atmosferi do električnog luka treba dovesti zaštitni plin. Iz tog razloga je ova tehnika zavarivanja složenija od ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom. Međutim ova tehnika zavarivanja ima mnogobrojne prednosti u brodograđevnoj industriji te se postupak sve više koristi. Ovaj postupak zavarivanja je pogodan za zavarivanje tankih i debelih materijala te je pogodan za sve položaje zavarivanja. Obuka zavarivača za ovu tehniku zavarivanja je kratkotrajna te se zavarivači brzo izuče za zavarivanje ovom tehnikom. Prilikom zavarivanja dugačkih ravnih spojeva često se koristi automatski ili poluautomatski postupak zavarivanja, što znatno ubrzava i pojeftinjuje postupak zavarivanja [123].



1 - sapnica; 2 - kontaktna vodilica; 3 - elektrodna žica; 4 - zaštitni plin;  
5 - zavar; 6 - rastaljeni metal; 7 - električni luk; 8 - osnovni materijal

**Slika 3.5.** Princip zavarivanja MIG / MAG [71]

Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi se s obzirom na zaštitni plin može podijeliti na:

a) MIG postupak (engl. *Metal Inert Gas*, skr. MIG) ili elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina. U ovom postupku se kao dodatni materijal koristi gola žica ili praškom punjena žica, a za zaštitu električnog luka koristi inertni plin.

b) MAG postupak (engl. *Metal Active Gas*, skr. MAG) ili elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina. U ovom postupku se, isto kao i u MIG postupku, kao dodatni materijal koristi gola žica ili praškom punjena žica, jedino je razlika da se za zaštitu električnog luka koristi aktivni plin.

Princip zavarivanja i uređaji za MIG i MAG zavarivanje su jednaki. Razlika je jedino u vrsti zaštitnog plina i području primjene.

Danas je MIG / MAG način zavarivanja najzastupljeniji posebno u brodograđevnoj industriji. Više od 60% svih zavara na brodu se izvodi ovim načinom zavarivanja. Na brodu za prijevoz naftnih prerađevina nosivosti oko 50.000 t, izgrađenom u hrvatskim brodogradilištima više od 11 km zavara je zavareno ovim načinom zavarivanja.

### 3.4.2. Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje

Za svaki postupak zavarivanja koji se primjenjuje na brodskoj konstrukciji mora biti pripremljena Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje (engl. *Welding Procedure Specification*, skr. WPS) [45]. Da bi ova uputa bila valjana, nju treba ovjeriti klasifikacijski zavod. Klasifikacijski zavod će prihvatiti uputu nakon što se izvrši probno zavarivanje, a uzorci izuzeti iz zavara se testiraju prema propisima klasifikacijskog zavoda [38]. Uputa za zavarivanje određuje bitne parametre zavarivanja kojih se mora pridržavati zbog postizanja zavara zadovoljavajućih karakteristika [83].

Pokusi su rađeni s jednim postupkom zavarivanja, međutim upotrijebljena su dva različita zaštitna plina, zbog toga su pokusi zavarivani sukladno dvije upute za zavarivanje. Parametri zavarivanja su propisani u Proizvođačevoj radnoj uputi za zavarivanje, Privitci 4a i 4b, osim onih parametara koji su mijenjani tijekom izvođenja pokusa.

## 3.5. Konstantni kontrolirani ulazni faktori

U tablici 3.1. definirani su konstantni kontrolirani ulazni faktori koji će se koristiti u eksperimentu.

### 3.5.1. Geometrijski oblik žlijeba

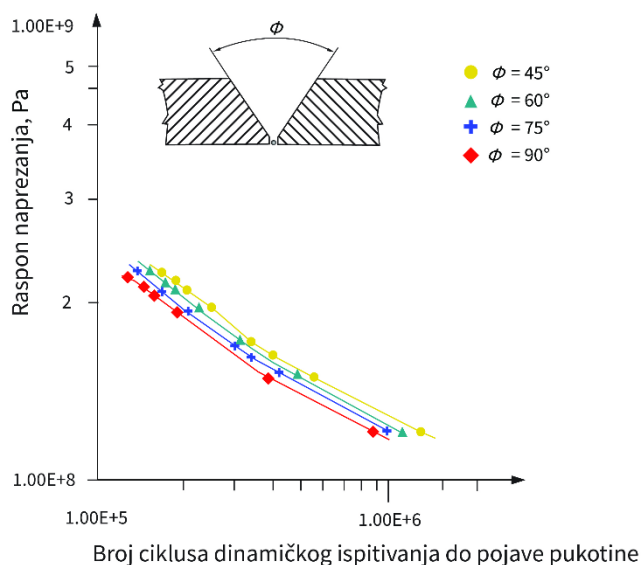
Izbor oblika žlijeba ovisi o nizu čimbenika:

- debljina i vrsta materijala,
- položaj i postupak zavarivanja te
- vrsta spoja.

Za sučeljni spoj čeličnih limova debljine od 6 mm do 16 mm, kada se koristi MIG/MAG ili REL postupak zavarivanja, gdje se traži potpuni provar najbolje je primijeniti „V“ oblik žlijeba. Ujedno je ovo je najčešći oblik žlijeba za jednostrano zavarivanje s podloškom, bez obzira je li ona keramička traka ili metalna podloška [115, 9].

### 3.5.2. Kut otvora žlijeba

Teng i suradnici su ispitivali utjecaj oblika žlijeba na koncentraciju naprezanja u zavarenom spoju. Vršena je analiza s četiri kuta otvora žlijeba ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  i  $90^\circ$ ) dok su ostali geometrijski parametri tijekom pokusa bili konstantni ( $\theta=20^\circ$ ,  $\varphi=0$  mm i  $t=15,8$  mm). Istraživanja su pokazala da uzorci s manjim kutom otvora žlijeba imaju manju koncentraciju naprezanja. Ako se kut otvora žlijeba smanji sa  $90^\circ$  na  $45^\circ$  izdržljivost prilikom dinamičkih ispitivanja se poveća za 6%. Utjecaj kuta otvora žlijeba je znatno manji nego što je utjecaj ostalih geometrijskih parametara kao što su kut nadvišenja sljemena šava, radijus ruba šava i debljina osnovnog materijala. Kut otvora žlijeba prikazan je na slici 2.2. Ovaj utjecaj je prikazan na dijagramu na slici 3.6 [112].



**Slika 3.6.** Utjecaj kuta otvora žlijeba na izdržljivost prilikom dinamičkih ispitivanja [112]

S obzirom na istraživanja koje su proveli Teng i suradnici odlučeno je da će se u ovom istraživanju koristiti ispitni uzorak koji ima kut otvora žlijeba  $50^\circ$ .

### 3.5.3. Zračnosti u korijenu žlijeba

Promjene zračnosti u korijenu žlijeba utječu na površinu presjeka žlijeba. Povećanjem zračnosti povećava se površina žlijeba, a samim time i količina materijala koji je potreban da bi se mogao ispuniti žlijeb. Za žlijeb sljedećih karakteristika  $t=12$  mm i  $\phi=45^\circ$  površina presjeka žlijeba



se poveća s  $59,65 \text{ mm}^2$  na  $131,65 \text{ mm}^2$ , ako se zračnost u korijenu žlijeba poveća s 0 mm na 6 mm [75].

Jang i suradnici su istraživali utjecaj zračnosti u korijenu zavara na mehanička svojstva zavarenog spoja. Analizu su proveli s tri zračnosti i to od 0 mm i 6 mm te s zračnošću od 30 mm. U zavarenim spojevima koji su imali zračnost od 0 mm i 6 mm, nisu zamijećene veće razlike u mehaničkim svojstvima i deformacijama. Šav koji ima 30 mm zračnosti nije moguće zavariti bez navarivanja na stranice žlijeba i smanjenja otvora žlijeba [52].

Zračnost u korijenu žlijeba ovisi o postupku s kojim će se zavarivati i obliku žlijeba kojega će se zavarivati. Za „V“ žlijeb koji se zavaruje bez podložne pločice preporučena zračnost je od 0 mm do 3 mm, dok je za zavare koji se zavaruju na podložnu pločicu preporučena zračnost od 3 mm do 9 mm [51].

Može se zaključiti da je najbitnije svojstvo zračnosti u korijenu žlijeba da osigurava potpuni provar zavarenog spoja. Zato će se za istraživanje koristiti otvor žlijeba od 6 mm.

#### 3.5.4. Temperatura okoline

Temperatura okoline se smatra konstantnim kontroliranim ulaznim faktorom. Kasuya i Yurioka su analizirali utjecaj okolne temperature na pojavu površinskih pukotina za temperature od  $20^\circ\text{C}$  do  $-30^\circ\text{C}$  te su došli do zaključka da se kod viših temperatura stvara znatno manje površinskih pukotina. Preporuka je da se kod zavarivanja na temperaturama ispod  $0^\circ\text{C}$  vrši predgrijavanje osnovnog materijala. Eksperiment će se izvoditi kod temperature okoline od  $20^\circ\text{C}$  [57].

### 3.6. Promjenjivi kontrolirani ulazni faktori

Svi uzorci koji se budu zavarivali bit će ispitani ultrazvučnom metodom kako bi se utvrdilo da nema nedopuštenih pogrešaka u zavarenom spoju. Ako se utvrde nedopuštene pogreške zavarivanje uzorka će se ponoviti.

Zavarivač koji bude zavarivao uzorke ima položen ispit i izdanu Potvrdu o atestiranju zavarivača prema ISO 9609-1, od Hrvatskog registra brodova [43].

Svi uzorci će se zavarivati u brodogradilišnoj radionici, i to do završnog sloja, dok će se zavarivanje završnog sloja izvršiti u zavarivačkom laboratoriju na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Zavarivanje će se vršiti u vodoravnom položaju.

U tablici 3.7. prikazani su ulazni kontrolirani faktori koji će tijekom eksperimenta biti mijenjani u dvije odnosno tri razine.

**Tablica 3.7.** Promjenjivi kontrolirani ulazni faktori

Promjenjivi kontrolirani ulazni faktori	Razina		
	Niža (oznaka -)	Srednja (oznaka o)	Viša (oznaka +)
Kut dodatnog materijala	tehnika prema naprijed	okomita tehnika	tehnika prema natrag
Broj prolaza završnog sloja	1 prolaz	-	3 prolaza
Dužina slobodnog kraja žice	5 mm	-	15 mm
Zaštitni plin	82% Ar + 18% CO <sub>2</sub>	-	100% CO <sub>2</sub>

Ukupno će biti napravljena 24 pokusa, a prema potpunom planu pokusa prikazanom u tablici 3.8. Svi pokusi su označeni oznakom koja se sastoji od jednog slova koji označava nivo kuta dodatnog materijala i jednog broja koji označava redni broj pokusa. Pokusi su razvrstani u tri grupe pokusa koje su označene slovima A, B i C. Svaka grupa ima osam pokusa, te svaka grupa je drugi kut dodatnog materijala.

**Tablica 3.8.** Plan pokusa

Ulazni faktor	Grupa pokusa i oznaka pokusa Nivo ulaznog faktora																											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8				
Kut dodatnog materijala	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
Broj prolaza završnog sloja	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+			
Dužina slobodnog kraja žice	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+			
Zaštitni plin	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+			

### 3.6.1. Kut dodatnog materijala

Kut dodatnog materijala, kut pištolja za zavarivanja, radni kut nazivi su za kut između osnovnog materijala i dodatnog materijala, žice. S ovim kutom se može kontrolirati taljevina zavara.

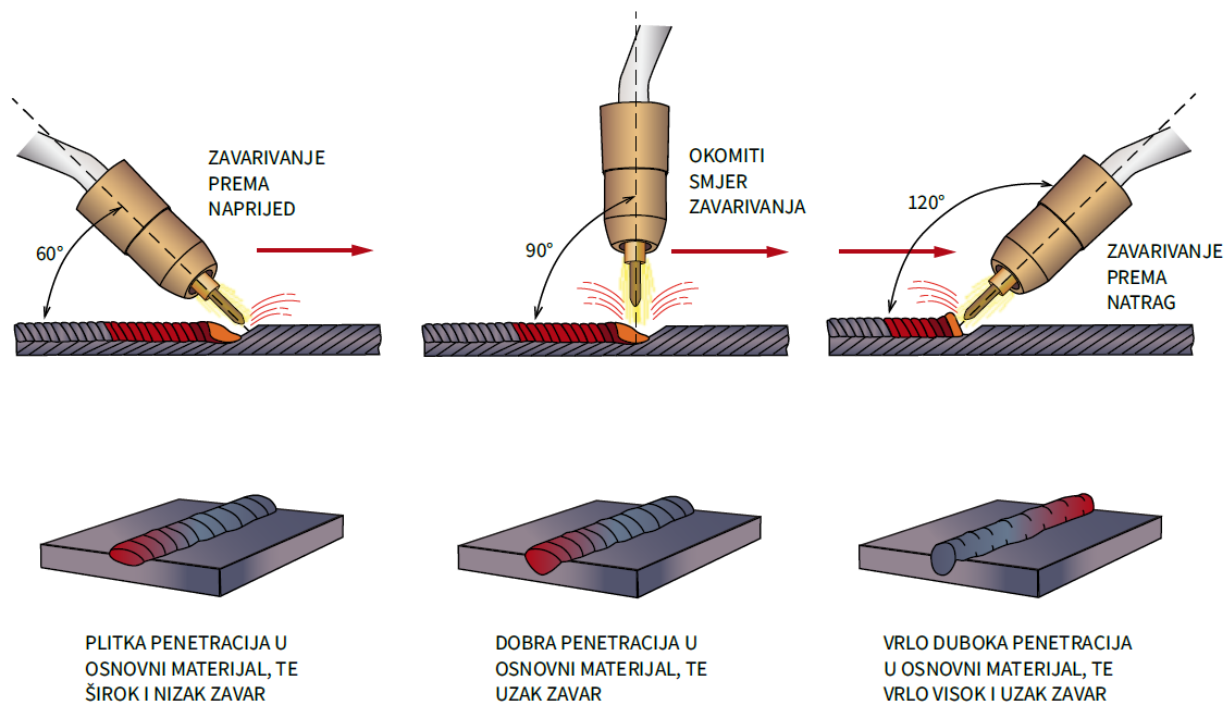
Ovaj ulazni parametar su istraživali Sudhakaran i suradnici, te Ghazvinloo i suradnici, koji su dokazali da ovaj parametar ima utjecaja na širinu šava [22, 111]. Upravo zbog značajnog utjecaja ovog parametra na širinu zavara on je odabran kao jedan od četiri ulazna faktora koji će se varirati prilikom istraživanja. Pokusi će se vršiti s tri vrijednosti kuta dodatnog materijala, slika 3.14:

- položaj dodatnog materijala prema naprijed (kut oko 65°),
- okomiti položaj dodatnog materijala (kut oko 90°), te
- položaj dodatnog materijala prema nazad (kut oko 120°).

Ovaj parametar je odabran za istraživanje zato jer je u dostupnim znanstvenim radovima ovaj parametar vrlo malo sustavno istraživano. U vodoravnom položaju ovaj parametar ovisi o načinu držanja dodatnog materijala. Položaj dodatnog materijala može biti prema naprijed ili prema natrag. Osim toga, dodatni materijal se može držati okomito u odnosu na osnovni materijal što se može smatrati središnjim slučajem. Tako se i nazivaju smjerovi zavarivanja koji dolaze od

engleskih riječi *forehand* i *backhand*, te *perpendicular*. *Forehand* se naziva smjer zavarivanja prema naprijed kada se zavar „gura“ ispred pištolja, dok se *backhand* naziv upotrebljava za smjer zavarivanja prema natrag kada se zavar vuče za dodatnim materijalom, slika 3.7 [53].

Ako se zavarivanje vrši *forehand* smjerom, dodatni materijal ima manju penetraciju u osnovni materijal, zavarivač ima bolji pregled žlijeba, dok zavar vidi slabije. *Backhand* smjer zavarivanja omogućava zavarivaču bolju preglednost zavarenog spoja, i dublju penetraciju dodatnog materijala u osnovni materijal. *Perpendikularni* smjer zavarivanja je sredina između prethodna dva smjera zavarivanja, a zbog boljeg iskorištavanja energije električnog luka i zbog najbolje zaštite taline zaštitnim plinom često se upotrebljava kod automatiziranog zavarivanja.



**Slika 3.7.** Kut dodatnog materijala [53]

Mostafa i suradnici su vršili istraživanja koje je uključivalo smjer zavarivanja. Oni su istraživali dubinu penetracije dodatnog materijala za kutove od 90° do 60°. Postavili su

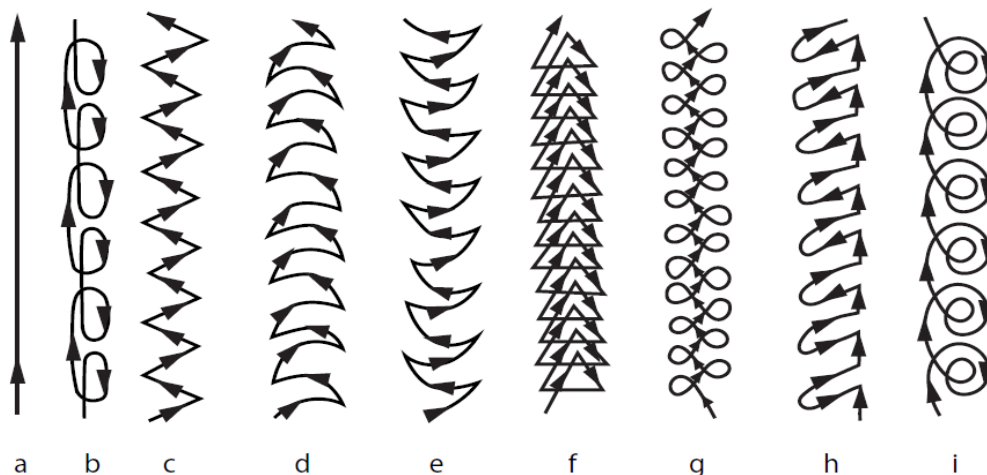
matematički model, a također su dokazali pokusima da je bolja penetracija dodatnog materijala u osnovni materijal kada je dodatni materijal nagnut za  $60^\circ$  od osnovnog materijala [84].

### 3.6.2. Broj prolaza završnog sloja

Zavarivanje se može raditi s različitim brojem prolaza. Ako se zavarivanje vrši s većim brojem prolaza brzina zavarivanja je veća te je zagrijavanje osnovnog materijala manje. S obzirom da se u ovom istraživanju vrši analiza površine zavarenog spoja, završni sloj će se zavarivati s manjim i većim brojem prolaza, dok će broj ostalih prolaza biti isti.

Ovaj parametar ima utjecaj na površinu zavarenog spoja te je od velikog interesa napraviti istraživanja s ovim parametrom. U dostupnim istraživanjima ovaj parametar nije istraživan, jedino su dostupni iskustveni podaci iz prakse.

Ako se želi dobiti uzak zavar malog poprečnog presjeka te ako se osnovnom materijalu želi dovesti malo topline, tada se završni sloj zavaruje pravolinijski kao što je prikazano na slici 3.8a. Ovakav završni sloj je pogodan za tanje limove kod kojih je otvor žlijeba manji. Međutim ako se zavaruju deblji limovi, potrebno je ili nekoliko puta povući jedan pravolinijski završni zavar ili upotrijebiti neku od poprečnih kretanja elektrode kako je prikazano na slici 3.8(b-i) [71].

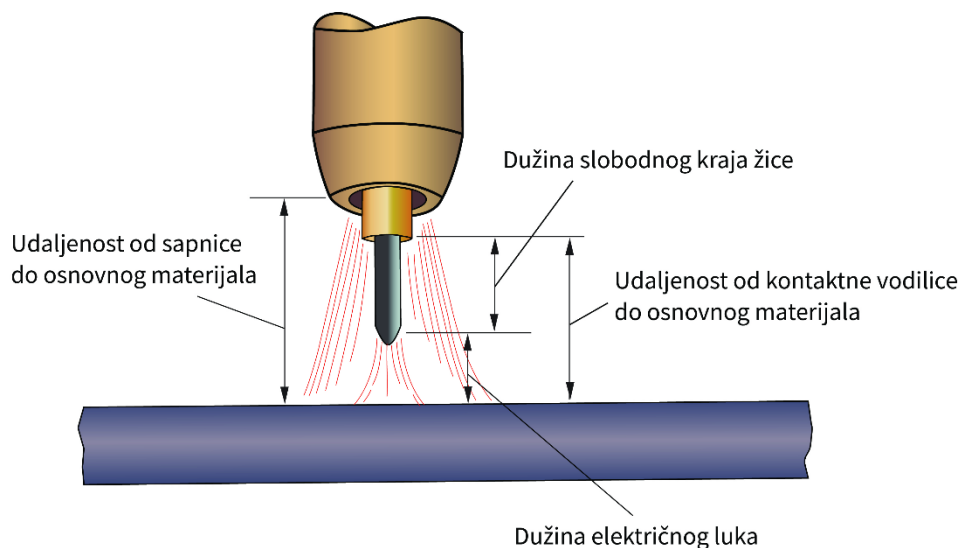


**Slika 3.8.** Kretanje elektrode u završnom sloju [71]

### 3.6.3. Dužina slobodnog kraja žice

Dužina slobodnog kraja žice je udaljenost od vrha cijevi kontaktne vodilice kroz koju izlazi žica za zavarivanje do kraja žice za zavarivanje mjereno uzduž žice za zavarivanje, slika 3.9. Odmicanjem ili primicanjem pištolja za zavarivanje od osnovnog materijala dužina slobodnog kraja žice se povećava ili smanjuje. S obzirom da se slobodni kraj žice nalazi u strujnom krugu dužina slobodnog kraja žice bitno utječe na proces zavarivanja. Povećavajući dužinu slobodnog kraja žice povećava se električni otpor prolazu struje te se povećava napon električnog luka struje zavarivanja. Međutim s obzirom da je napon prilikom zavarivanja održavan konstantnim to se kompenzira automatski reduciranjem jakosti struje. Povećanjem slobodnog kraja žice smanjuje se unos topline u zavar, smanjuje se penetracija dodatnog materijala u osnovni materijal te se povećava nadvišenje zavara. Električni luk postaje nestabilan [78].

Utjecaj dužine slobodnog kraja žice su u svom radu istraživali Nabendu i suradnici. Oni su proveli istraživanja s tri dužine slobodnog kraja žice i to s 9, 12 i 15 mm, na uzorcima čeličnih limova debljine 3 mm. Površine uzoraka dobivene pokusima su vizualno pregledane te su snimane radiografskom metodom. Analizom dobivenih rezultata utvrdili su da je najbolji rezultat dobiven za manje dužine slobodnog kraja žice s jakostima struje od 124 A [87].



**Slika 3.9.** Duljina slobodnog kraja žice [53]

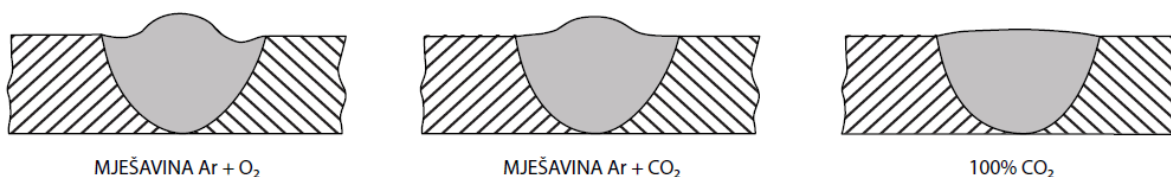
U istraživanjima koja opisuje ovaj rad vršit će se pokusi s duljinom slobodnog kraja žice od 5 i 15 mm.

#### 3.6.4. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se koriste prilikom elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom se mogu podijeliti na dvije osnovne skupine, i to aktivni plinovi i inertni plinovi.

Najzastupljeniji aktivni plin je ugljični dioksid  $\text{CO}_2$ , dok je najzastupljeniji inertni plin argon. U posljednje vrijeme se sve češće koriste mješavine plinova koje daju bolje karakteristike nego čisti plinovi. Prema vrsti plina koji se koristi naziva se i postupak zavarivanja.

Vrsta zaštitnog plina koji se koristi ima utjecaj na izgled površine zavarenog spoja. Upotreba čistog ugljičnog dioksida daje ravnu površinu zavara, dok mješavina plinova kao rezultat ima nadvišenje u zavarenom spoju. Istraživanje će se provoditi s čistim ugljičnim dioksidom i mješavinom (82% Ar i 18%  $\text{CO}_2$ ) s ciljem utvrđivanja utjecaja promjena vrste zaštitnog plina na površinu zavarenog spoja [123]. Na slici 3.10. prikazan je izgled poprečnog presjeka zavarenog spoja s obzirom na vrstu zaštitnog plina koji se upotrebljava. Utjecaj vrste zaštitnog plina analiziran je u nekoliko znanstvenih radova, ali u ovom radu će biti napravljena analiza utjecaja vrste zaštitnog plina i ostalih kontroliranih ulaznih parametara na površinu zavarenog spoja.



**Slika 3.10.** Geometrijski izgled poprečnog presjeka zavarenog spoja s obzirom na vrstu zaštitnog plina [53]

U tablici 3.9. prikazana je podjela zaštitnih plinova, ovdje su prikazani samo plinovi, odnosno mješavine koje imaju udjela ugljičnog dioksida ili argona [40].

U pokusima će se koristiti dva zaštitna plina, i to mješavina 18% ugljičnog dioksida i 82% argona koja spada u grupi M21 te čisti ugljični dioksid koji spada u grupu C1.

**Tablica 3.9.** Podjela zaštitnih plinova [40]

Oznaka plina		Udio komponente u volumenu mješavine plina, %					Naziv postupka
Grupa	Podgrupa	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>	
I	1			100			MIG
	2				100		
	3			ostatak	0 ≤ He ≤ 95		
M1	1	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5		ostatak			MAG
	2	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5		ostatak		0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 5	
	3		0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	ostatak			
	4	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	ostatak			
M2	0	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15		ostatak			
	1	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25		ostatak			
	2		3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	ostatak			
	3	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	ostatak			
	4	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	ostatak			
	5	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 15	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	ostatak			
	6	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	ostatak			
7	15 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	3 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	ostatak				
M3	1	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50		ostatak			
	2		10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	ostatak			
	3	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50	2 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 10	ostatak			
	4	5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 25	10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	ostatak			
	5	25 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 50	10 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 15	ostatak			
C	1	100					
	2	ostatak	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 30				

Prema terminologiji koju je usvojilo Europsko udruženje za puzanje materijala (engl. *European Creep Collaborative Committee*, skr. ECC<sup>5</sup>) postupak zavarivanja u kojem se kao zaštitni plin koristi čisti argon ili mješavina argona s helijem naziva se elektrolučno zavarivanje u

<sup>5</sup> Europsko udruženje za puzanje materijala je dobrovoljna grupacija osnovana 1991. godine te osigurava platformu radi suradnje i zajedničkog istraživanja te objedinjavanja raznih pravila unutar europske zajednice. Trenutno je u ovu grupaciju učlanjeno 40 velikih istraživačkih centara, tvornica, i sličnih institucija iz 16 zemalja europske zajednice. Izvor: <http://www.ommi.co.uk/etd/eccc/advancedcreep/index.htm> (siječanj 2016.)



zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. *Metal Inert Gas*, skr. MIG). Dok se postupci zavarivanja u kojima se koristi čisti ugljični dioksid ili mješavina ugljičnog dioksida s kisikom i argonom naziva elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. *Metal Activ Gas*, skr. MAG) [16, 27].

### **3.7. Nekontrolirani ulazni faktori**

Nekontrolirani ulazni faktori su oni na koje se ne može utjecati i ne može ih se kontrolirati, a imaju značajan utjecaj na izlaze iz procesa. U provedenom eksperimentu mogu se izdvojiti dva nekontrolirana ulazna faktora: ljudski faktor i utjecaj okoline.

Obzirom da se zavarivanje radi ručnom tehnikom, utjecaj zavarivača može biti značajan. Da bi se ovaj utjecaj smanjio, eksperiment je radio jedan zavarivač koji ima položen ispit za atestiranog zavarivača. Završni sloj je zavarivan u jednom danu, tako da se smanji utjecaj raspoloženja zavarivača u dva ili više dana.

Zavarivanje se je vršilo u zatvorenom laboratoriju, tako da se utjecaj okoline gotovo potpuno smanjio.

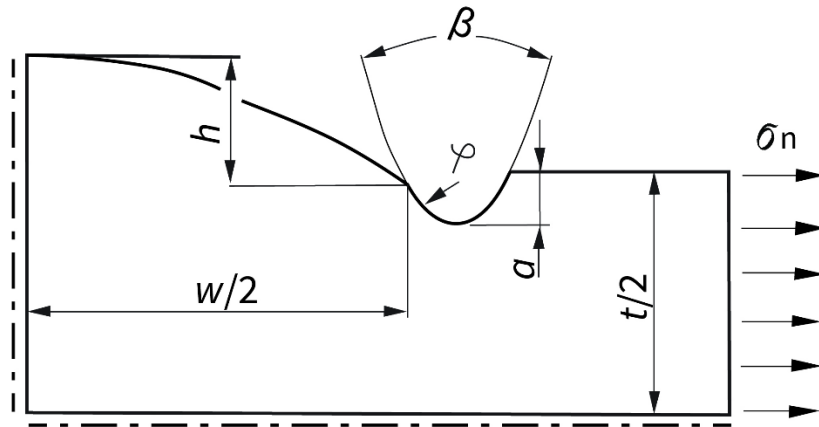
### **3.8. Izlaz iz procesa**

Izlaz iz procesa je zavareni spoj, odnosno geometrijske veličine površine zavarenog spoja koje utječu na faktor koncentracije naprezanja. O geometrijskim veličinama zavarenog spoja bilo je riječi u prethodnom poglavlju, a način na koji su mjerene bit će opisan u narednim poglavljima.

### **3.9. Zarez na rubu šava**

Zarez na rubu šava spada u parametre koji imaju znatan utjecaj na pojavu koncentracije naprezanja na rubu šava. Slika 3.11. prikazuje zarez na rubu šava. Radaj i suradnici su opisali istraživanja koja su rađena u vezi zarez koji se može pojaviti na rubu šava [103]. Za istu debljinu osnovnog materijala ( $t=30$  mm) varirane su razne dubine zarez. Tako su istraživanja rađena za

male vrijednosti radijusa na rubu šava ( $\varphi$ ) i velike vrijednosti nadvišenja sljemena šava ( $h$ ). Za ova ispitivanja dobiva se velik faktor koncentracije naprezanja  $K_t$  i mali vijek izdržljivosti zavara. Također su istraživanja rađena s obrnutim ulaznim parametrima (veliki  $\varphi$  i mali  $h$ ) te su dobiveni rezultati bili suprotni od onih u prethodnom istraživanju. Zarez na rubu šava spada u nedopuštene pogreške u zavarenom spoju te će se zavar smatrati defektan ako se one pojave tijekom pokusa.



**Slika 3.11.** Poprečni presjek sučelnog zavarenog spoja s prikazanim zarezom na rubu šava [103]

## 4. PROVEDBA POKUSA

Za sve uzorke zajedničko je da su zavarivani u vodoravnom položaju, na materijalu debljine 10 mm i čeliku pojačane čvrstoće otpornom na niske temperature oznake EH36 prema zahtjevima HRB-a [37].

### 4.1. Zavarivanje uzoraka

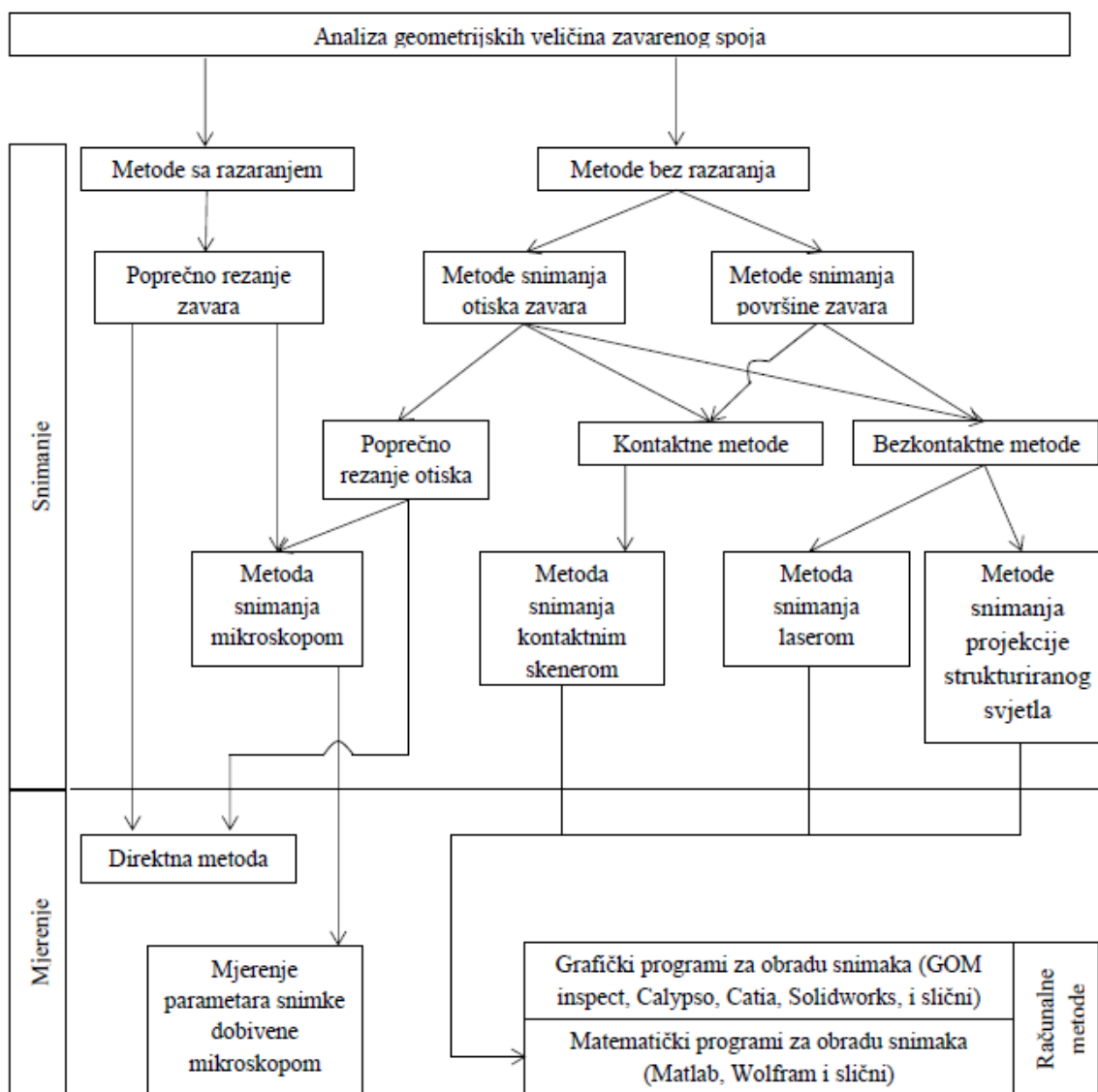
Do završnog sloja uzorci su zavareni u brodograđevnoj radioni firme „Dalmont“, dok je završni sloj zavaren u Laboratoriju za zavarivanje i kontrolu kvalitete na Tehničkom fakultetu Rijeka. Zavarivanje je izvršio zavarivač koji ima položen ispit za atestiranog zavarivača. Na slici 4.1. prikazani su uzorci nakon zavarivanja.



Slika 4.1. Zavareni uzorci

## 4.2. Analiza geometrijskih veličina zavarenog spoja

Analiza geometrijskih veličina zavarenog spoja se može podijeliti na snimanje i na mjerenje. Na slici 4.2. su prikazane metode snimanja i mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja.



Slika 4.2. Gantogram analize geometrijskih veličina zavarenog spoja [104]

### **4.3. Metode snimanja geometrijskih veličina zavarenog spoja**

Kao što je spomenuto u poglavlju 2.8 pet geometrijskih veličina zavarenog spoja utječe na faktor koncentracije naprezanja: debljina osnovnog materijala, radijus ruba šava, kut nadvišenja sljemena šava, visina nadvišenja sljemena šava te širina šava. Točno mjerenje ovih geometrijskih veličina je posebno značajno zbog točnog određivanja faktora koncentracije naprezanja. To se posebno odnosi na radijus ruba šava i na kut nadvišenja sljemena šava jer ove dvije veličine imaju najveći utjecaj na faktor koncentracije naprezanja.

Snimanja geometrijskih veličina zavarenog spoja se mogu podijeliti na dvije osnovne metode:

- metode s razaranjem te
- metode bez razaranja.

#### **4.3.1. Metode snimanja s razaranjem**

Ova metoda je pogodna samo prilikom istraživanja jer se zavareni spoj na kojemu se mjere geometrijske veličine mora prerezati te taj zavareni spoj više nije za upotrebu. Ovo je ujedno najveći nedostatak ove metode. Prilikom rezanja se ne smije lokano promijeniti oblik zavarenog spoja zbog toga se rezanje vrši postupcima hladnog rezanja bez unosa topline koja mijenja oblik površine zavarenog spoja. Rezanje se vrši pilom i sličnim postupcima rezanja.

Mjerenje geometrijskih veličina se može izvršiti samo na presjeku gdje je zavareni spoj prerezan, tako da se ovom metodom ne može pratiti promjena geometrijskih veličina uzduž zavarenog spoja. Nakon rezanja geometrijske veličine zavarenog spoja se mjere izravnom metodom, opisanom u točki 4.4.2 ili se geometrijske veličine mjere na snimci dobivenoj snimanjem pomoću mikroskopa.

Zbog nedostataka koje ima, ova metoda se rijetko upotrebljava.

#### 4.3.2. Metoda snimanja bez razaranja

Metode bez razaranja se ovisno o opremi s kojom se ispitivanje radi, za razliku od metoda s razaranjem, mogu upotrijebiti na zavarenim spojevima koji su u eksploataciji jer nakon ispitivanja zavareni spoj zadržava mehanička svojstva. Metode mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja bez razaranja se mogu podijeliti na dvije grupe mjerenja:

- a) metoda snimanja otisaka zavara, (engl. *Weld Impression Analyses*, skr. WIA) te
- b) metode snimanja površine zavara.

##### 4.3.2.1. Metoda snimanja otiska zavara

Ova metoda je jednostavna i ne zahtijeva skupu opremu, a dobiveni podaci su dosta točni [31].

Primjena ove metode započinje čišćenjem zavarenog spoja, zatim se pripremi dvokomponentna smjesa kojom će se raditi kalup. Pripremljena smjesa se nanese na zavareni spoj i pričekava nekoliko minuta da ona stvrdne. Stvrdnuta smjesa se odvoji od zavarenog spoja te je tako napravljen otisak spreman za analizu. Prednost ove metode je da se otisak zavarenog spoja može napraviti na mjestu gdje nije moguće pristupiti uređajima za beskontaktno snimanje zavarenih spojeva te se otisak zavarenog spoja može analizirati u laboratorijskim uvjetima.

Dobiveni otisak se analizira na tri načina:

- Poprečno rezanje otiska. Otisak se prereže na presjeku gdje se žele mjeriti geometrijske veličine zavarenog spoja te se mjerenje može izvršiti na dva načina. Prvi način je izravnom metodom koja je opisana u točki 4.4.2, a drugi način je da se poprečno prerezani otisak snimi mikroskopom te se na dobivenoj snimci izmjere geometrijske veličina poprečnog presjeka zavarenog spoja.

- Snimanje kontaktnim i beskontaktnim metodama bit će opisano u idućem potpoglavlju.

#### 4.3.2.2. Metode snimanja površine zavara

Metode snimanja površine zavara se mogu podijeliti u dvije skupine: [26]

- a) kontaktne metode te
- b) beskontaktne metode.

##### a) Kontaktne metode snimanja

Kontaktne metode snimanja zavarenog spoja su metode kojima se zavareni spoj snima uz pomoć dodira. Najpoznatija je metoda snimanja kontaktnim skenerom.

Ova metoda se zasniva kroz fizički dodir glave skenera koji je pričvršćen na koordinatnom mjernom stroju. Metoda je spora i zahtijeva posebno dizajniran skener te se rijetko upotrebljava, posebno se rijetko upotrebljava prilikom snimanja zavarenih spojeva. Ova metoda ima primjenu prilikom skeniranja objekata koji se ne smiju izložiti zračenju svijetla (razna umjetnička djela). Također ovom metodom se snimaju geometrijski oblici šuplje izrade gdje druge metode kao što je skeniranje nije moguće. Obrada snimljenog uzorka se vrši primjenom neke od računalnih metoda mjerenje geometrijskih parametara.

##### b) Beskontaktne metode snimanja

Najpoznatije su dvije beskontaktne metode:

- snimanje laserom, (engl. *Laser Scanning Profiling*, skr. LSP) i
- snimanje projekcije strukturiranog svjetla (engl. *Structured Light Projection*, skr. SLP)

[31].

##### Snimanje laserom

Laserski uređaji imaju široku primjenu u privredi i znanosti. Osnovni princip rada laserskog uređaja je da emitira monokromatsku (ima samo jednu valnu dužinu) vrlo stabilnu svjetlosnu zraku

pomoću optičkog pojačanja svjetlosti stimuliranim zračenjem. Metoda snimanja laserom koja se upotrebljava u snimanju površine upotrebljava princip optičke triangulacije. Glava lasera preko ogledala projicira zraku svjetla u vidljivom spektru na površinu zavarenog spoja kojega se snima. Projicirana zraka se odbija od površine zavarenog spoja u senzor koji povratnu zraku dvodimenzionalno obrađuje, na temelju kuta pod kojim se zraka vraća u senzor i na temelju zakona o sličnosti trokuta. Na ovaj način se dobije trodimenzionalni računalni model, pogodan za daljnju obradu nekom od računalnih metoda mjerenja geometrijskih parametara [31].

### Snimanje projekcije strukturiranog svjetla

Snimanje projekcije strukturiranog svjetla je postupak projekcije poznatog svjetlosnog uzorka na objekt snimanja. Svjetlosni uzorak može biti u obliku mreže ili u obliku paralelnih linija. Strukturirano svjetlo se može projicirati pomoću LCD (engl. *Liquid Crystal Display*) projektoru ili bilo kojeg drugog stabilnog izvora svjetlosti. Svjetlo se od snimanog objekta odbija u kameru, gdje se metodom triangulacije pretvara u trodimenzionalnu sliku snimanog objekta, pogodnu za daljnju računalnu obradu. Za postizanje najveće moguće točnosti objekt se snima iz nekoliko kutova (obično 8 kutova) [31].

Strukturirano svjetlo može raditi u vidljivom ili u nevidljivom svjetlosnom spektru. Prilikom rada u vidljivom spektru može doći do miješanja strukturiranog svjetla sa svjetlom okoline. Kako bi se izbjegli mogući problemi koji mogu nastati zbog interferencije svjetala upotrebljavaju se izvori strukturiranog svjetla koji rade u nevidljivom svjetlosnom spektru. Prema valnoj dužini svjetla kojega izvor projicira, postoje tri vrste nevidljivog strukturiranog svjetla [19]:

- infracrveno strukturirano svjetlo (engl. *InfraRed Structured Light*, IRSL),
- neprimjetno strukturirano svjetlo (engl. *Imperceptible Structured Light*, ISL) te
- filtrirano strukturirano svjetlo (engl. *Filtered Structured Light*, FSL).

Prednost ove metode je velika brzina i velika preciznost snimanja. Umjesto snimanja jedne točke kao u metodi snimanja laserom, u ovoj metodi se vrši snimanje cijelog područja odjednom.

Točno snimanje površine zavarenog spoja od velikog je značaja za daljnje točno mjerenje geometrijskih veličina te za određivanje geometrijskog faktora koncentracije naprezanja, a samim



time i kritičnog mjesta gdje može doći do pojave površinskih pukotina. Snimanje pomoću projekcije strukturiranog svjetla je najtočnije mjerenje, a posebno je značajno da se snimljena površina može učitati u neki od računanih programa te pomoću računala izmjeriti geometrijske veličine.

#### **4.4. Metode mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja**

Geometrijske veličine zavarenog spoja se mogu mjeriti s dvije metode:

- a) direktnom metodom te
- b) računalnim metodama za analizu površine.

##### 4.4.1. Direktna metoda mjerenja

Ova metoda je najjednostavnija i najbrža te se lako može primijeniti tijekom svakodnevnog rada, međutim rezultati koji se dobiju ovom metodom su nepouzdana i uvelike ovise o mjeritelju koji vrši očitavanja mjerenja. Ovo se posebno odnosi na dvije geometrijske veličine koje najviše utječu na faktor koncentracije naprezanja: radijus ruba šava i kut nadvišenja sljemena šava.

Debljina osnovnog materijala, širina zavora te visina nadvišenja zavora se mjere pomičnom mjerkom.

Kut nadvišenja sljemena šava se mjeri pomoću pomičnog kutomjera, ili pomoću posebno dizajniranog lisnatog mjerila.

Radijus ruba šava se mjeri lisnatim mjerilom koje se sastoji od seta lisnatih mjerki, od kojih svaka na vrhu ima različit predefiniran radijus, slika 4.3. Mjeritelj ručno naslanja vrh listića lisnate mjerke na radijus ruba šava zavora te uspoređuje radijuse. Mjeritelj mijenja listiće s različitim radijusima dok se po njegovoj ocjeni radijusi ne podudare.



**Slika 4.3.** Lisnato mjerilo za mjerenje radijusa

#### 4.4.2 Računalne metode za analizu površine

U primjeni je nekoliko metoda uz pomoć kojih se iz slike snimljenog zavara obrađuju geometrijske veličine zavarenog spoja. Te metode se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine:

- grafičko određivanje geometrijskih veličina zavarenog spoja te
- matematičko određivanje geometrijskih veličina zavarenog spoja.

Grafičko određivanje geometrijskih veličina zavarenog spoja se radi pomoću grafičkih programa za obradu snimaka. Nakon snimanja površine zavarenog spoja nekom od prije opisanih metoda, podaci se učitaju u neki od grafičkih računalnih programa za obradu slike. Grafički računalni programi za mjerenje geometrijskih veličina omogućavaju da se s velikom točnošću izmjere geometrijske veličine zavarenog spoja. Najčešće upotrebljavani grafički programi su „GOM inspect“, „Calypso“, „Catia“, te „Solidworks“.

Nedostatak grafičkih računalnih programa je subjektivnost istraživača koji očitava podatke, a to se posebno odnosi na radijus ruba šava.

Matematičko određivanje geometrijskih veličina zavarenog spoja se radi pomoću računalnih programa koji služe za matematički izračun geometrijskih parametara, a na temelju

podataka koji su dobiveni snimanjem zavarenog spoja. Najčešće se matematički programi koriste na način da se koordinate točaka površine zavarenog spoja očitaju u nekom od grafičkih programa te se ti podaci učitaju u matematičke programe koji ih obrade. Najčešće upotrebljavani matematički programi su „*Matlab*“ i „*Wolfram mathematica*“.

U ovim programima subjektivnost istraživača je znatno smanjena, međutim točnost izmjerenog radijusa ovisi o točkama koje su izmjerene u nekom od grafičkih programa.

#### **4.5. Snimanje uzoraka**

Snimanje uzoraka skenerom za trodimenzionalno snimanje rađeno je u Centru za napredno računanje i modeliranje, Sveučilišta u Rijeci.

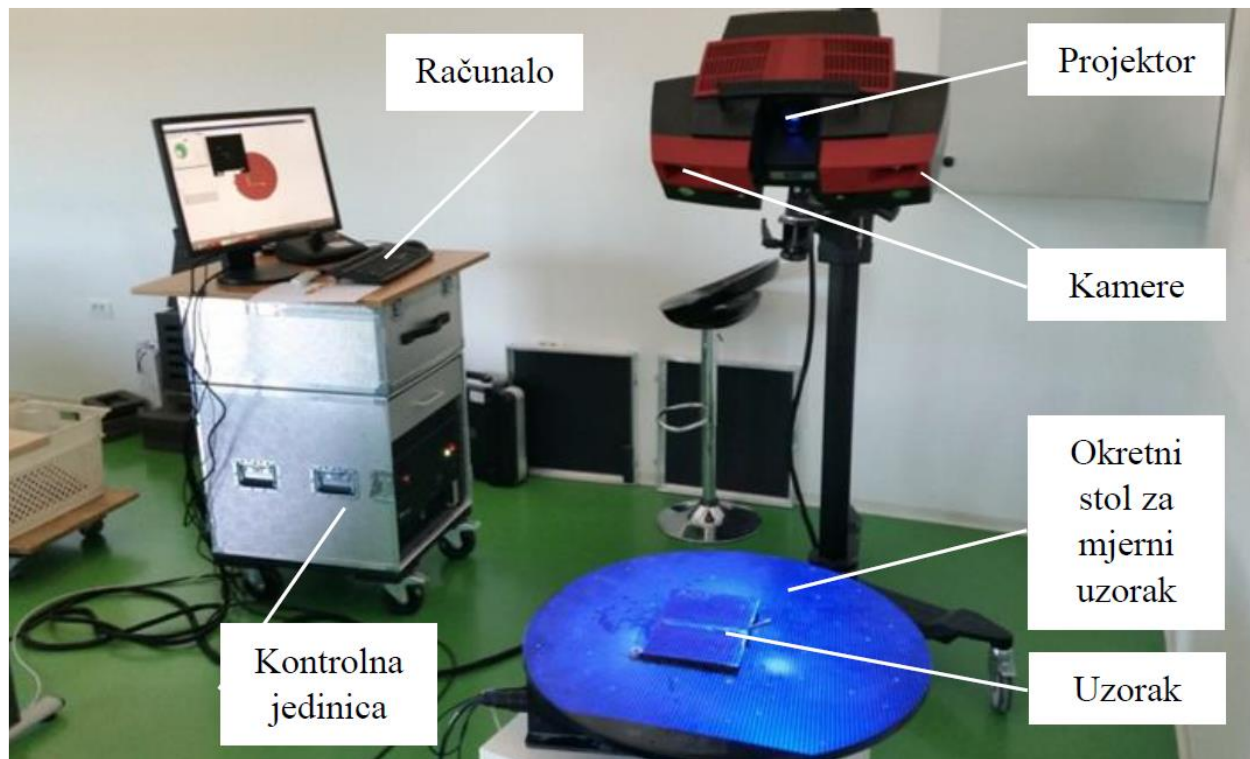
Za snimanje je korišten ATOS (*Advanced Topometric Sensor*) sustav za digitalizirano mjerenje objekata. Snimanje je rađeno s „*ATOS II Triple Scan*“ uređajem, koji kao i svi ostali ATOS uređaji radi na principu triangulacije. Uređaj se sastoji od:

- projektora,
- dvije kamera te
- kontrolne jedinice.

Ovim dijelovima se još dodaje: postolje za uređaj, okretni stol za mjerni uzorak te računalo, slika 4.4.

Projektor koji je smješten u sredini glave uređaja služi za emitiranje plavog svjetla uske valne duljine koje omogućuje precizno mjerenje i digitalizaciju potpuno neovisno o uvjetima osvjetljenja okoline. Projicirano svjetlo se odbija od predmeta koji se mjeri, u dvije kamere koje imaju rezoluciju  $5 \times 10^6$  piksela, svaka. Minimalni razmak između točaka na mjernom uzorku je 0,02 mm [124].

Snimanjem uzorka dobiva se baza podataka formata .stl (*Surface Tessellation Language*) koji je jedan od najčešće korištenih formata za snimanje trodimenzionalnih površina.



**Slika 4.4.** Skeniranje uzoraka 3D skenerom

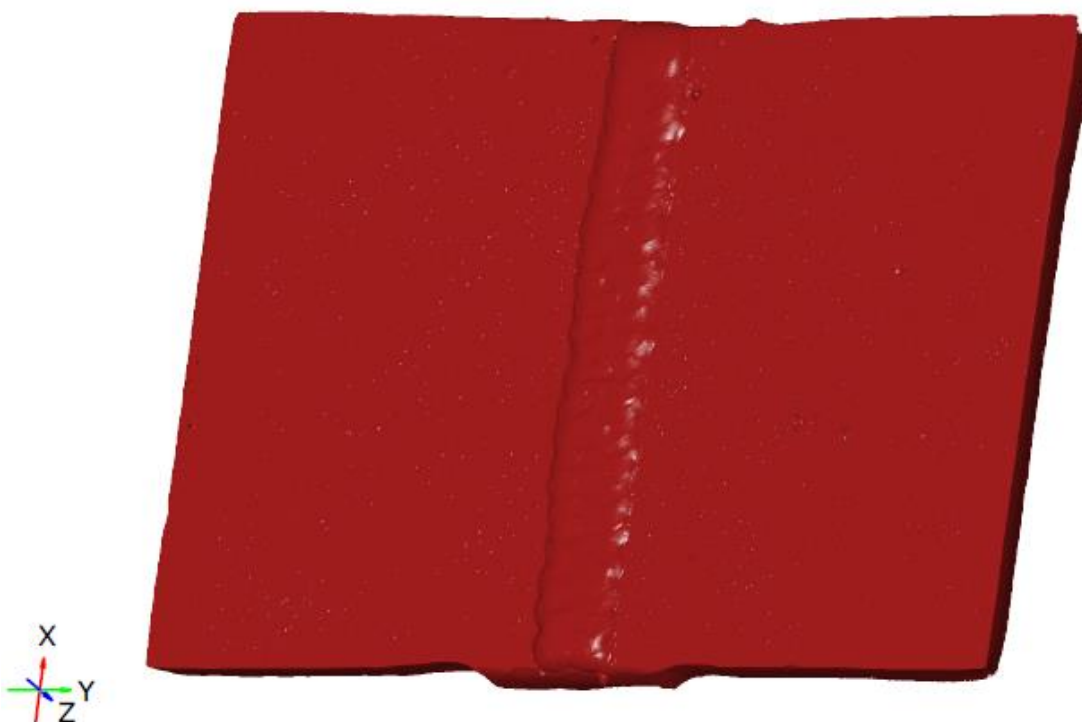
#### **4.6. Mjerenje geometrijskih veličina zavarenog spoja**

Radi što točnijeg izračuna faktora koncentracije naprezanja bitno je točno izmjeriti geometrijske veličine zavarenog spoja, a to se posebno odnosi na radijus ruba šava i kut nadvišenje sljemena šava, kao dvije najutjecajnije geometrijske veličine.

##### **4.6.1 Skeniranje uzoraka**

Očitavanje geometrijskih veličina zavarenog spoja rađeno je uz pomoć računalnog programa „*GOM inspect*“ 2019, Hotfox 6, verzija 2.0.1. To je računalni program koji je razvijen za analizu podataka dobivenih trodimenzionalnim skeniranjem. STL datoteke skeniranih uzoraka su učitane u računalni program „*GOM inspect*“. Prilikom učitavanja definiran je koordinatni sustav na način da je os „X“ postavljena uzduž zavarenog spoja, a počinje na mjestu gdje je početak

zavarivanja. Grafički prikaz izgleda uzorka B03 nakon učitavanja u ovaj računalni program prikazan je na slici 4.5.



**Slika 4.5.** Grafički prikaz uzorka B3 nakon učitavanja u računalni program „*GOM inspect*“

Prilikom skeniranja svakog zavarenog uzorka skener je napravio preko 200.000 točaka, te je „*GOM inspect*“ te točke povezo u trokute. Na mjestima na kojima se pojavljuju neravnine skenirano je više točaka, dok je na ravnim površinama skenirano manje točaka.

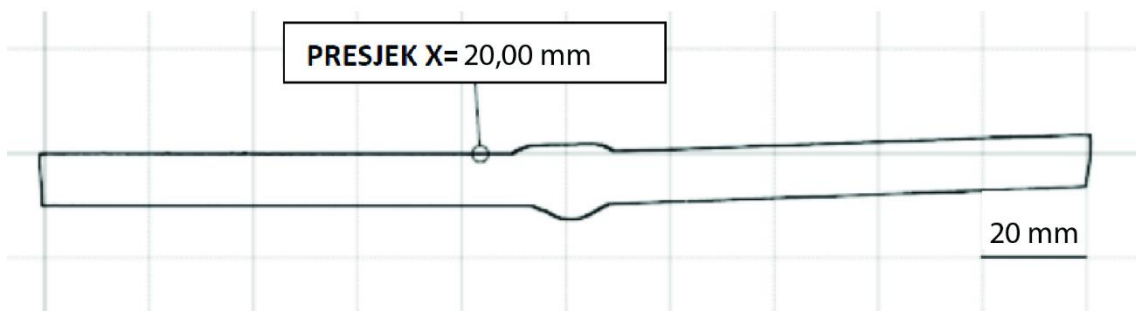
Na svakom uzorku mjerenja geometrijskih veličina su rađena u tri pojasa. Prvi pojas je određen u području od 20 do 30 mm nakon početka zavarivanja, drugi pojas je određen u sredini uzorka od 70 do 80 mm od početka zavarivanja te je treći pojas određen u području od 120 do 130 mm od početka zavarivanja. Tijekom zavarivanja vršeno je automatsko očitavanje parametara zavarivanja (jakost struje zavarivanja, napon struje zavarivanja i brzina prolaza žice). Ovi pojasevi su odabrani zato jer je utvrđeno da su se parametri zavarivanja stabilizirali prije početnog pojasa u

kojem se mjere geometrijske veličine zavarenog spoja. Također, treći pojas je odabran zato je je utvrđeno da su parametri zavarivanja u tom dijelu još uvijek stabilni, nakon trećeg pojasa parametri zavarivanja prestaju biti stabilni. Nadalje u sredini zavarenog uzorka odabran je još jedan pojas.

Svaki pojas je širok 10 mm, a razmak između presjeka je 1 mm. Na taj način je u svakom pojasu dobiveno 11 presjeka u kojima su se mjerili geometrijske veličine zavarenog spoja. Na slici 4.6a. prikazan je uzorak generiran u „GOM inspect“-u s pojasevima na kojima je vršeno mjerenje geometrijskih veličina presjeka te je na slici 4.6b prikazana fotografija uzorka s označenim pojasevima. Na slici 4.7. prikazan je poprečni izgled jednog presjeka, u ovom slučaju to je presjek na udaljenosti 20 mm od početka zavarivanja.



Slika 4.6. Uzorak B3 s označenim pojasevima



Slika 4.7. Grafički prikaz presjeka X=20,00 mm, za uzorak B3

Na svakom presjeku napravljeno mjerenje sljedećih geometrijskih veličina:

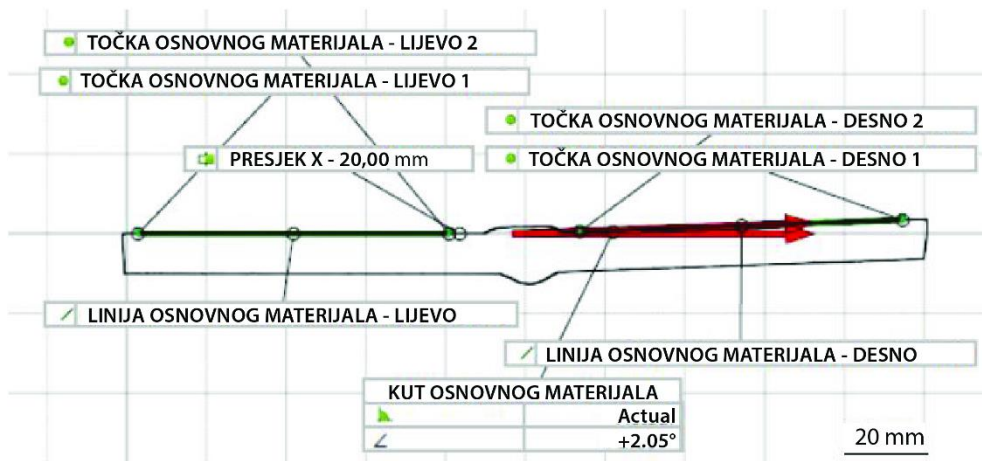
- kut osnovnog materijala,
- radijus ruba šava,
- kut nadvišenja sljemena šava,
- visina nadvišenja sljemena šava, te
- širina šava.

#### 4.6.2. Kut osnovnog materijala

Prilikom zavarivanja uzoraka zbog unosa topline je došlo do deformacije kutnog otklona između zavarenih elemenata. S obzirom da se ovo dogodilo prilikom zavarivanja korijenskog zavara, dakle prije nego se zavarivao završni sloj, korekcija kutnog otklona nije uzeta u obzir.

Kut osnovnog materijala je kut između dviju zavarenih elementa u uzorku, a izmjeren je na način da su na gornjoj površini svake polovice uzorka unesene dvije točke, na slici 4-13 te točke su označene „TOČKA OSNOVNOG MATERIJALA – LIJEVO 1“ i „TOČKA OSNOVNOG MATERIJALA – LIJEVO 2“ na lijevoj polovici uzorka, te „TOČKA OSNOVNOG MATERIJALA – DESNO 1“ i „TOČKA OSNOVNOG MATERIJALA – DESNO 2“ na desnoj polovici uzorka. Kroz dvije točke na svakoj polovici uzorka povučeni su pravci koji se nazivaju, za lijevu polovicu uzorka „LINIJA OSNOVNOG MATERIJALA – LIJEVO“, te „LINIJA OSNOVNOG MATERIJALA – DESNO“ za desnu polovicu uzorka. Kut između ove dvije linije je kut osnovnog materijala. Za analizirane uzorke on je izmjeren od 1° do 6°, što je manje od 20°, a to znači da ovaj oblik spada u sučeljno spojene zavarene spojeve [77].

Na slici 4.8. prikazan je kut osnovnog materijala koji u promatranom presjeku iznosi 2,05°.



**Slika 4.8.** Grafički prikaz kuta osnovnog materijala na presjeku X = 20,00 mm, za uzorak B3

#### 4.6.3. Radijus ruba šava

Radijus ruba šava je mjereno za svaki presjek s lijeve i desne strane zavora (šava). To je geometrijska veličina koja najviše utječe na faktor koncentracije naprezanja te je napravljena usporedba tri metode kojima je dobiven radijus ruba šava, to su:

- direktno mjerenje radijusa ruba šava pomoću lisnatog mjerila za mjerenje radijusa,
- grafičko očitavanje radijusa ruba šava pomoću „GOM inspect“-a te
- izračun radijusa ruba šava zavora pomoću „Wolfram mathematica“-e.

##### 4.6.3.1. Direktno mjerenje radijusa ruba šava pomoću mjerila za mjerenje radijusa

Na uzorku su označeni pojasevi te presjeci pomoću pomičnog mjerila mjereći od početka zavarivanja te je na mjestu svakog poprečnog presjeka izvršeno mjerenje radijusa pomoću lisnatog mjerila prikazanog na slici 4.9. Lisnato mjerilo kojim je vršeno mjerenje je imalo najmanji radijus 0,5 mm te su nakon toga radijusi povećavani svakih 0,125 mm. Dobivene vrijednosti su upisane u tablicu 4.1. Na slici 4.9. prikazano je direktno mjerenje na uzorku B3 presjek 20 mm lijevo.





**Slika 4.9.** Direktno mjerenje na uzorku B3 za presjek  $X=20,00$  mm lijevo

#### 4.6.3.2. Grafičko očitavanje radijusa ruba šava pomoću „GOM inspect“-a

Na svakom presjeku je određena točka u kojoj površina osnovnog materijala prelazi u nadvišenje sljemena šava. Za lijevu stranu zavara ta točka ima oznaku „TOČKA LIJEVO 02“. Ova točka je na svim presjecima za sve uzorke označena na istom mjestu, odnosno na mjestu gdje započinje nadvišenje sljemena šava.

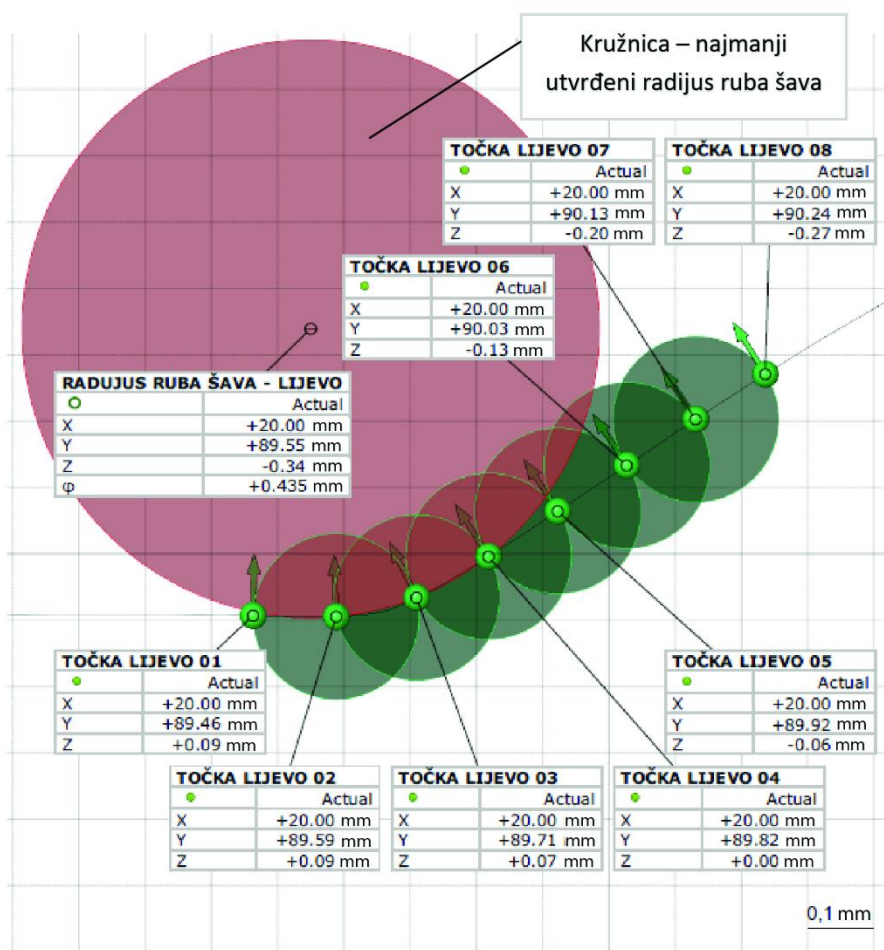
Radijus ruba šava se može definirati kao radijus kružnice koja prolazi kroz tri točke na površini zavara. U tom slučaju vrijednost radijusa ruba šava ovisi o razmaku između točaka kroz koje kružnica prolazi.

Razmak između točaka je određen 0,125 mm zato jer je utvrđeno da se najveća koncentracija naprezanja javlja u području od 0,125 mm uzduž zavarenog spoja. O području u kojem se javlja najveća koncentracija naprezanja bilo je govora u potpoglavlju 2.5.1 [66]. Razmak između točaka na presjeku na površini zavarenog spoja je konstruiran na način da je oko „TOČKE LIJEVO 02“ nacrtana kružnica radijusa 0,125 mm. Mjesto gdje kružnica siječe liniju površine zavarenog spoja označena je točkama „TOČKA LIJEVO 01“, te „TOČKA LIJEVO 03“. Nakon toga je ucrtana iduća kružnica sa središtem u „TOČKA LIJEVO 03“. Na mjestu gdje ova kružnica siječe liniju površine zavarenog spoja označena je „TOČKA LIJEVO 04“. Na slici 4.10. ove

kružnice su označene zelenom bojom. Na taj način su kružnice crtane do mjesta infleksije linije površine zavarenog spoja.

S obzirom da je površina zavarenog spoja nepravilnog oblika, ne postoje dva presjeka s istim oblicima površine, stoga je za svaki presjek očitano  $n$  točaka, gdje broj točaka  $n$  za svaki presjek nije nužno isti.

Prilikom mjerenja radijusa ruba šava zavara konstruirane su kružnice kroz svake od tri označene točke na površini zavara. S obzirom da je koncentracija naprezanja najveća u području najmanjeg radijusa ruba šava, za daljnju analizu se promatra kružnica s najmanjim radijusom. U slučaju prikazanom na slici 4.10. to su „TOČKA LIJEVO 02“, „TOČKA LIJEVO 03“ i „TOČKA LIJEVO 04“, a kružnica koja prolazi kroz te tri točke je označena crvenom bojom.



Slika 4.10. Radijus ruba šava zavara u „GOM inspectu“

#### 4.6.3.3. Izračun radijusa ruba šava zavara

Za izračun radijusa ruba šava korišten je računalni program „*Wolfram mathematica*“. Osnova za izračun radijusa ruba šava zavara je jednadžba kružnice sa središtem u točki  $(a, b)$ , radijusa  $r$ , i koja prolazi kroz točku  $(x, y)$ , izraz (4.1).

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (4.1)$$

Ako se točke kružnice  $(x, y)$ , očitane iz programa „*GOM inspect*“, uvrste u jednadžbu kružnice, tada ova jednadžba ima 3 nepoznanice  $(a, b, r)$  i potrebne su tri jednadžbe da se izračuna radijus kružnice, odnosno radijus ruba šava zavara. U „*GOM inspect*“-u za svaki presjek je očitano  $n$  točaka te se izraz (4.1) može pisati u obliku sustava jednadžbi od  $n$  točaka, (4.2).

$$\begin{aligned} (x_1 - a_1)^2 + (y_1 - b_1)^2 &= r_1^2 \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ (x_n - a_n)^2 + (y_n - b_n)^2 &= r_n^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

U programu „*Wolfram mathematica*“ je napravljen algoritam koji računa radijus za svaku kombinaciju od tri točke. Za  $n$  točaka koje su označene u „*GOM inspect*“-u, algoritam izračunava  $(n-2)^2$  radijusa ruba šava. S obzirom da je koncentracija naprezanja na mjestu najmanjeg radijusa, kao konačno rješenje algoritam daje radijus koji je najmanji od svih izračunatih.

#### 4.6.3.4. Usporedba rezultata

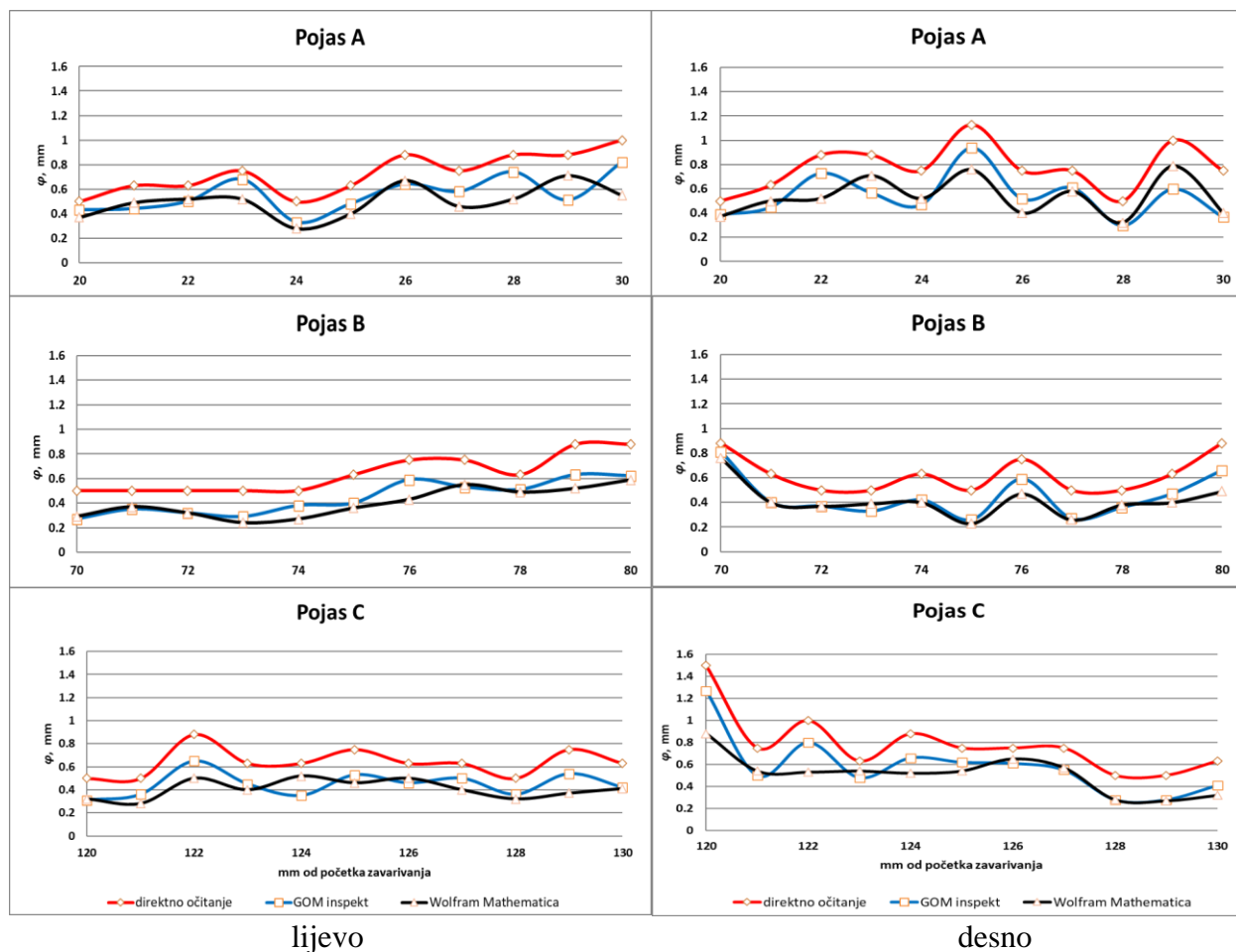
Prethodno su prikazane tri metode kojima se može odrediti radijus ruba šava zavara. Prva metoda je izravno očitavanje radijusa pomoću lisnatog mjerila, dok je za ostale dvije metode zajedničko da su koordinate točaka površine zavara određene pomoću programa „*GOM inspect*“. U tablici 4.1 prikazana je usporedba rezultata dobivenih pomoću tri metode za 33 presjeka (lijevo i desno) na uzorku B3.

Grafikon na slici 4.11. prikazuje usporedbu rezultata dobivenih pomoću tri metode mjerenja ruba šava. Iz ovog grafikona se može iščitati da direktno mjerenje daje najveće vrijednosti radijusa

ruba šava te se može zaključiti da je za rad u praksi direktno mjerenje dovoljno točno, s time da se direktnim mjerenjem dobivaju rezultati koji su veći od stvarnih vrijednosti radijusa.

**Tablica 4.1.** Usporedba rezultata mjerenja radijusa ruba šava za uzorak B3

Metoda mjerenja radijusa ruba šava	presjek [mm]	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Direktno očitavanje	lijevo [mm]	0,50	0,63	0,63	0,75	0,50	0,63	0,88	0,75	0,88	0,88	1,00
	desno [mm]	0,50	0,63	0,88	0,88	0,75	1,13	0,75	0,75	0,50	1,00	0,75
„GOM inspect“	lijevo [mm]	0,43	0,44	0,50	0,68	0,33	0,48	0,64	0,58	0,74	0,51	0,82
	desno [mm]	0,39	0,45	0,73	0,57	0,47	0,94	0,52	0,61	0,30	0,60	0,37
„Wolfram mathematica“	lijevo [mm]	0,37	0,49	0,52	0,52	0,28	0,40	0,67	0,46	0,52	0,71	0,55
	desno [mm]	0,37	0,50	0,52	0,71	0,52	0,76	0,40	0,58	0,32	0,79	0,40
Metoda mjerenja radijusa ruba šava	presjek [mm]	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Direktno očitavanje	lijevo [mm]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,63	0,75	0,75	0,63	0,88	0,88
	desno [mm]	0,88	0,63	0,50	0,50	0,63	0,50	0,75	0,50	0,50	0,63	0,88
„GOM inspect“	lijevo [mm]	0,27	0,35	0,32	0,29	0,38	0,40	0,59	0,53	0,51	0,63	0,62
	desno [mm]	0,81	0,40	0,37	0,33	0,42	0,26	0,59	0,27	0,36	0,47	0,66
„Wolfram mathematica“	lijevo [mm]	0,29	0,37	0,32	0,24	0,27	0,36	0,43	0,55	0,49	0,52	0,59
	desno [mm]	0,76	0,40	0,37	0,39	0,40	0,23	0,47	0,26	0,38	0,40	0,49
Metoda mjerenja radijusa ruba šava	presjek [mm]	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
Direktno očitavanje	lijevo [mm]	0,50	0,50	0,88	0,63	0,63	0,75	0,63	0,63	0,50	0,75	0,63
	desno [mm]	1,50	0,75	1,00	0,63	0,88	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	0,63
„GOM inspect“	lijevo [mm]	0,31	0,36	0,65	0,45	0,35	0,53	0,46	0,50	0,36	0,54	0,42
	desno [mm]	1,27	0,50	0,80	0,48	0,66	0,62	0,61	0,55	0,28	0,28	0,41
„Wolfram mathematica“	lijevo [mm]	0,32	0,28	0,50	0,40	0,52	0,46	0,50	0,40	0,32	0,37	0,41
	desno [mm]	0,88	0,54	0,53	0,54	0,52	0,54	0,65	0,57	0,28	0,27	0,32



**Slika 4.11.** Usporedba tri metode mjerenja radijusa ruba šava za uzorak B3

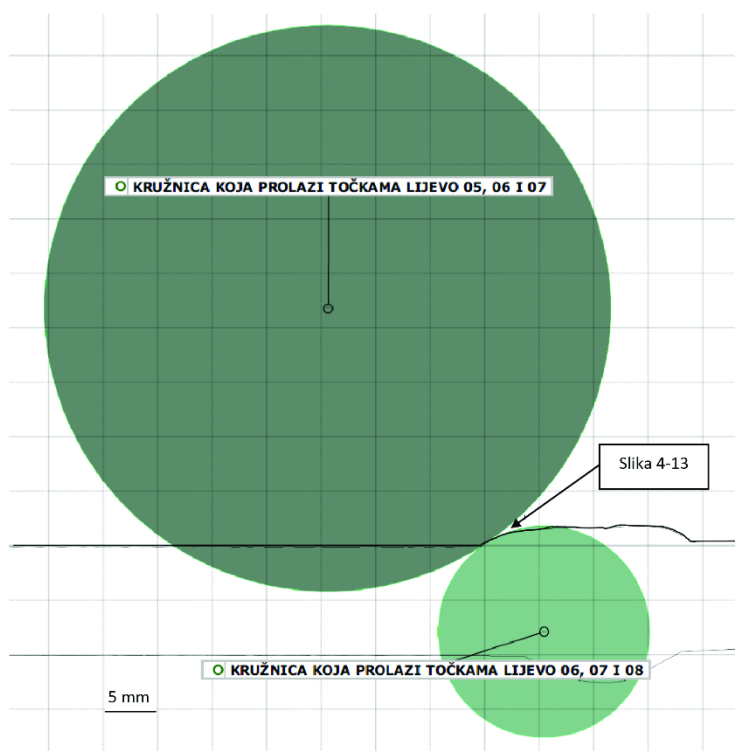
#### 4.6.4. Kut nadvišenja sljemena šava

Kut nadvišenja sljemena šava je kut između linije osnovnog materijala i tangente u točki infleksije na površini šava zavara.

Ovaj kut je određen pomoću računalnog programa „GOM inspect“. Kut je određen pomoću točaka koje su označene na površini zavarenog spoja kako je opisano u 4.6.3.3. Mjesto infleksije je točka u kojoj krivulja površine zavarenog spoja prelazi iz konkavnog oblika u konveksni oblik, slika 4.12. Ta točka je određena crtajući kružnice kroz tri točke koje su označene na površini zavarenog spoja. Na slici 4.13. prikazana je kružnica koja prolazi kroz točke 05, 06 i 07, u tom

dijelu površina zavarenog spoja ima konkavan oblik. Kružnica koja je prošla kroz iduće tri susjedne točke 06, 07 i 08, ima konveksan oblik. To znači da se točka infleksije nalazi između točaka 06 i 07. Na slici 4.13. točka infleksije je označena na polovici udaljenosti između ove dvije točke, „TOČKA INFLEKSIJE – LIJEVO“.

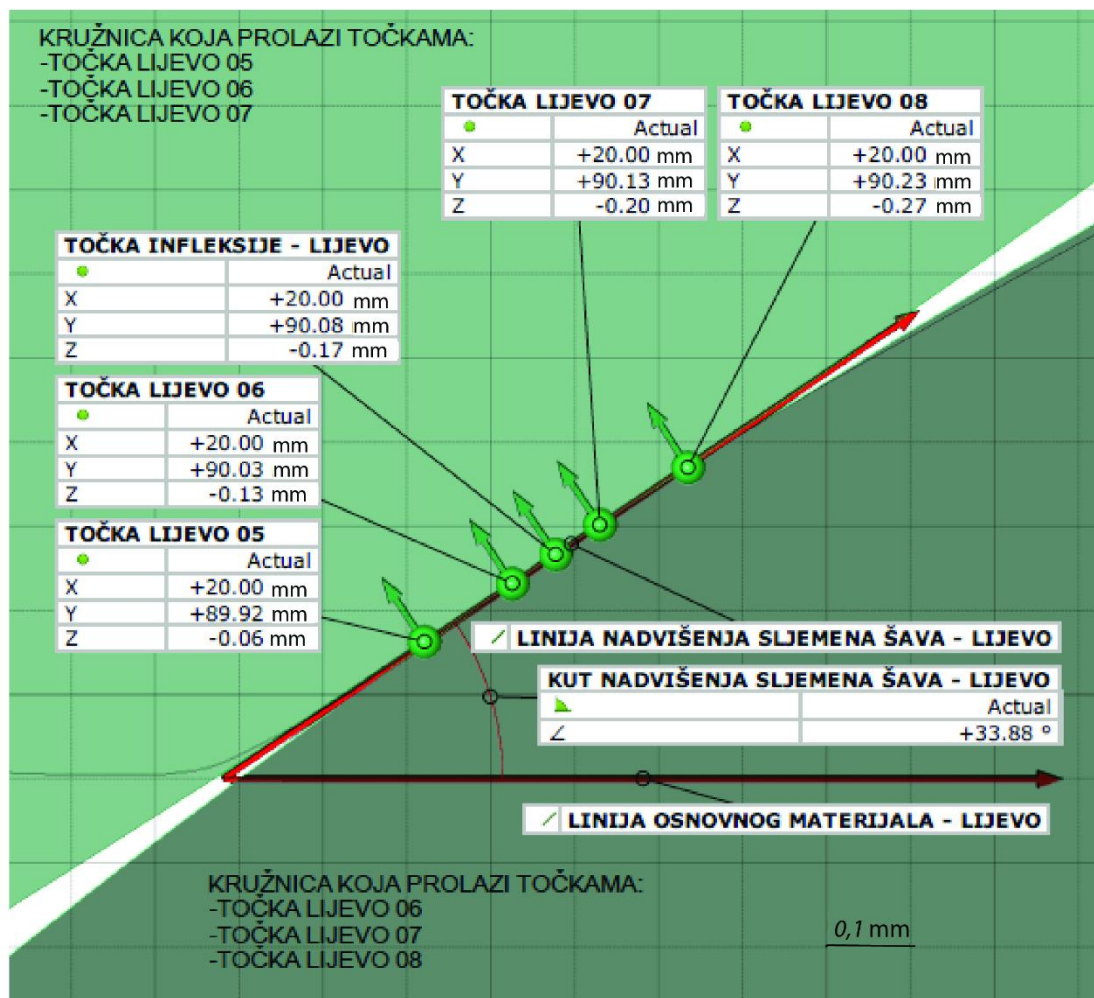
Linija koja prolazi kroz ovu točku, a ujedno je tangenta na krivulju površine zavarenog spoja je označena „LINIJA NADVIŠENJA SLJEMENA ŠAVA – LIJEVO“. Kut između „LINIJE OSNOVNOG MATERIJALA – LIJEVO“ i „LINIJE NADVIŠENJA SLJEMENA ŠAVA – LIJEVO“ je „KUT NADVIŠENJA SLJEMENA ŠAVA – LIJEVO“.



**Slika 4.12.** Određivanje kuta nadvišenja sljemena šava na presjeku  $X=20,00$  mm, za uzorak B3 s lijeve strane

Teoretski je ovo najveći kut koje je nadvišenje sljemena šava poprimilo za svaki presjek.

Na slici 4.13. je grafički prikazano kako je u „GOM inspectu“ određen kut nadvišenja sljemena šava za lijevu stranu zavarenog spoja, na isti je način izmjeren kut nadvišenja sljemena šava za desnu stranu.



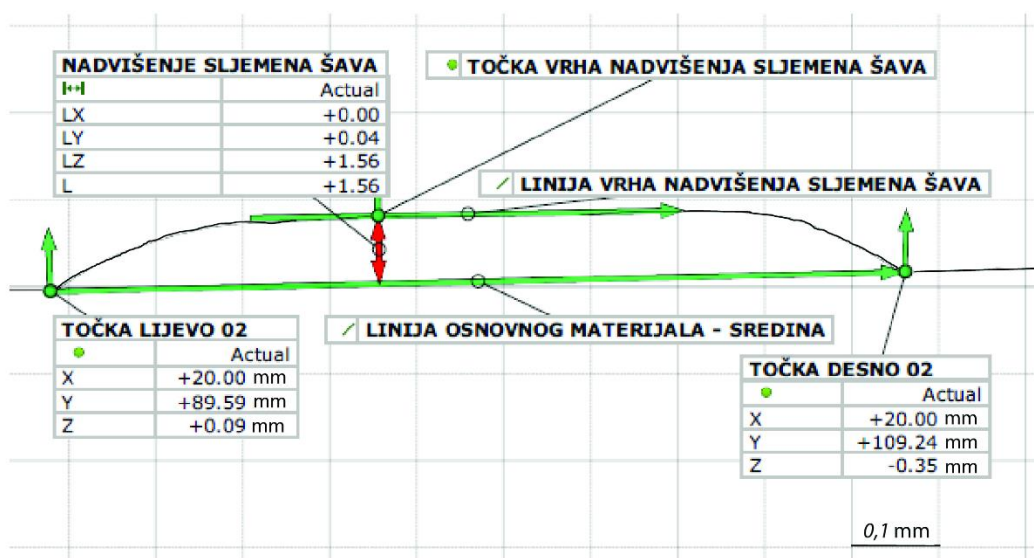
**Slika 4.13.** Grafički prikaz kuta nadvišenja sljemena šava na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 s lijeve strane

#### 4.6.5. Visina nadvišenja sljemena šava

Visina nadvišenja sljemena šava je udaljenost između linije osnovnog materijala u području šava zavarenog spoja i njoj paralelne linije koja prolazi najvišom točkom nadvišenja sljemena šava.



Linija osnovnog materijala se može definirati kao linija koja spaja točke u kojima započinje nadvišenje sljemena šava s lijeve i s desne strane, a to su „TOČKA LIJEVO 02“ i „TOČKA DESNO 02“. Ta linija je na slici 4.14. označena s „LINIJA OSNOVNOG MATERIJALA – SREDINA“. „LINIJA VRHA NADVIŠENJA SLJEMENA ŠAVA“ je linija koja je paralelna s „LINIJOM OSNOVNOG MATERIJALA – SREDINA“, a prolazi kroz najvišu točku koja je najviše udaljena od „LINIJE OSNOVNOG MATERIJALA – SREDINA“. Udaljenost te dvije linije je visina nadvišenja sljemena šava, na slici 4.14. ta geometrijska veličina je označena s „NADVIŠENJE SLJEMENA ŠAVA“ i za uzorak B03, na presjeku 20 mm lijevo iznosi 1,56 mm.

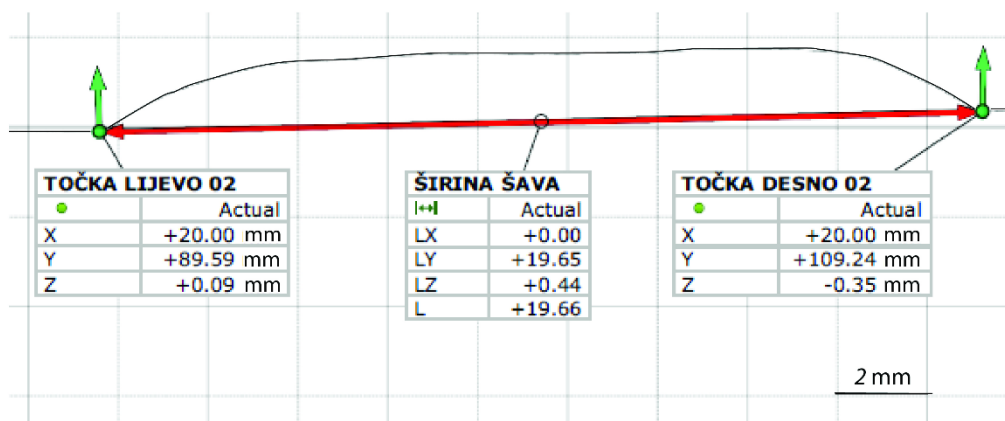


**Slika 4.14.** Grafički prikaz visine nadvišenja sljemena šava na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3

#### 4.6.6. Širina šava

Širina šava je izmjerena udaljenost između točaka „TOČKA LIJEVO 02“ i „TOČKA DESNO 02“. Na slici 4.15. prikazana je širina šava za uzorak B3, na presjeku 20,00 mm.





Slika 4.15. Grafički prikaz širine šava zavarenog spoja na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3

#### 4.7. Određivanje kritičnog presjeka zavarenog spoja

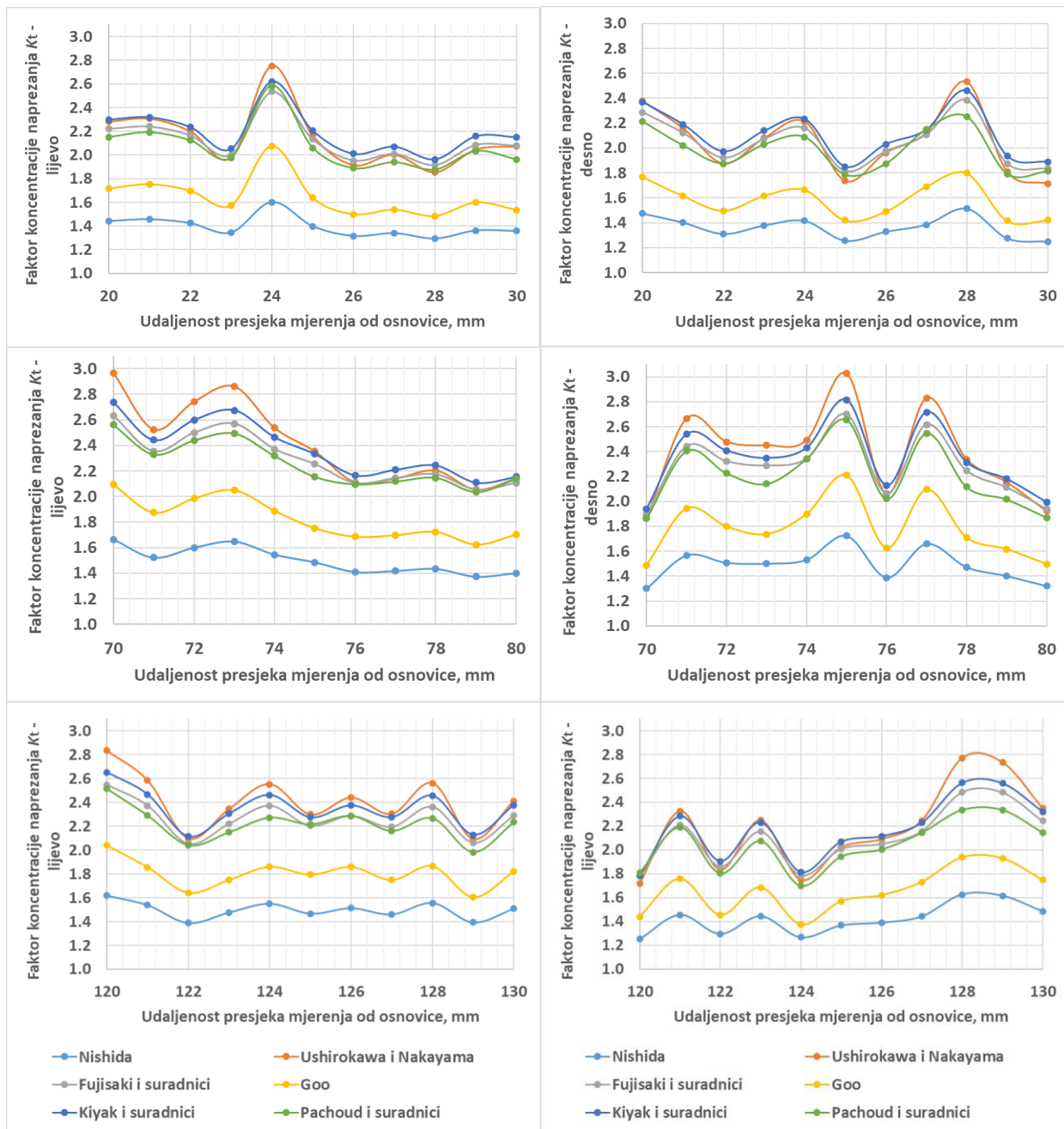
Za svaki uzorak je na 33 presjeka pomoću računalnog programa „*GOM inspect*“ napravljena analiza, odnosno očitavanje četiri geometrijske veličine s kojima se može izračunati faktor koncentracije naprezanja. U tablici 4.2. prikazane su izmjerene geometrijske veličine za uzorak B3.

U poglavlju 2.6. prikazano je šest izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja u zavrenom spoju, izrazi (2.8), (2.12), (2.18), (2.24), (2.25), te (2.26). Za svaki presjek je pomoću tih šest izraza izračunat faktor koncentracije naprezanja. Ovaj faktor je izračunat za lijevi i desni dio šava zavarenog spoja prema očitanim geometrijskim veličinama koje se nalaze u tablici 4.2. Tako da je za svaki zavareni uzorak izračunat faktor koncentracije naprezanja na ukupno 66 mjesta. Faktor koncentracije naprezanja je izračunat pomoću računalnog programa „*Wolfram mathematica*“. U Pravitku 6 nalazi se ispis iz računalnog programa za uzorak B3, presjek 20 mm.

Na slici 4.16. grafički je prikazana promjena faktora koncentracije naprezanja uzduž zavarenog spoja za uzorak B3, za svih šest izraza po kojima je računat.

**Tablica 4.2.** Analiza geometrijskih parametara zavarenog spoja za uzorak B3

Pokus broj B3								
Debljina osnovnog materijala 10 mm								
	Udaljenost presjeka mjerenja od osnovice	Kut osnovnog materijala	Visina nadvišenja sljemena šava	Širina šava zavara	Kut nadvišenja sljemena šava		Radijus ruba šava	
					o		mm	
					mm	o	mm	mm
Pojas A	20	2,05	1,56	19,66	33,88	34,59	0,43	0,39
	21	2,07	1,58	19,94	36,13	28,59	0,44	0,45
	22	2,05	1,62	20,19	35,56	30,36	0,50	0,73
	23	2,07	1,61	19,86	34,75	33,60	0,68	0,57
	24	2,07	1,59	19,34	47,01	32,57	0,33	0,47
	25	2,09	1,52	19,36	31,94	30,38	0,48	0,94
	26	2,06	1,49	19,58	29,02	24,63	0,64	0,52
	27	2,06	1,52	19,00	29,65	42,11	0,58	0,61
	28	2,06	1,43	19,28	31,45	31,16	0,74	0,30
	29	2,06	1,26	19,84	32,94	23,80	0,51	0,60
	30	2,05	1,12	19,98	31,02	24,62	0,82	0,37
Pojas B	70	2,15	1,74	19,20	40,05	31,35	0,27	0,81
	71	2,13	1,76	19,19	39,82	39,72	0,35	0,40
	72	2,19	1,76	19,59	39,12	33,23	0,32	0,37
	73	2,16	1,82	20,02	38,78	27,32	0,29	0,33
	74	2,18	1,84	20,44	37,66	41,22	0,38	0,42
	75	2,16	1,80	20,92	31,62	42,55	0,40	0,26
	76	2,17	1,74	21,31	33,52	37,53	0,59	0,59
	77	2,16	1,59	21,20	36,72	40,05	0,53	0,27
	78	2,15	1,65	20,71	37,11	28,39	0,51	0,36
	79	2,13	1,67	19,94	36,00	28,93	0,63	0,47
	80	2,16	1,71	19,60	27,91	41,29	0,62	0,66
Pojas C	120	2,19	1,75	19,00	41,56	36,72	0,31	1,27
	121	2,19	1,86	19,17	35,08	38,01	0,36	0,50
	122	2,19	1,96	19,92	33,90	27,12	0,65	0,80
	123	2,23	2,01	20,41	33,17	31,08	0,45	0,48
	124	2,19	1,89	20,62	33,60	19,12	0,35	0,66
	125	2,20	1,93	20,57	40,72	30,00	0,53	0,62
	126	2,20	1,99	20,38	40,33	32,53	0,46	0,61
	127	2,20	1,97	20,10	36,16	37,56	0,50	0,55
	128	2,20	2,04	20,76	33,55	31,02	0,36	0,28
	129	2,21	1,90	20,83	29,23	31,42	0,54	0,28
	130	2,19	1,88	20,91	35,99	31,49	0,42	0,41



**Slika 4.16.** Dijagrami promjene geometrijskih faktora koncentracije naprezanja po dužini zavarenog spoja uzorka B3

U tablici 4.3. prikazani su faktori koncentracije izračunati za uzorak B3, na svakom pojasu je određeno mjesto s najvećom i najmanjom koncentracijom naprezanja. Mjesta s najvećom koncentracijom naprezanja su označena crveno podebljano, a mjesta s najmanjom koncentracijom naprezanja su označena plavo podebljano.

Analiza optimizacije postupka zavarivanja rađena je u dva smjera. Određeni su maksimalni i minimalni faktori koncentracije naprezanja za svaki pojas na svakom uzorku. Ti faktori koncentracije naprezanja su poslužili kao ulazni parametri u analizi optimizacije postupka zavarivanja. Napravljena je analiza minimalnih faktora koncentracije naprezanja te su na taj način dobiveni parametri zavarivanja koje je preporučljivo upotrebljavati tijekom zavarivanja kako bi se izbjegla pojava površinskih pukotina. Nadalje napravljena je analiza maksimalnih faktora koncentracije naprezanje, na taj način su dobiveni parametri zavarivanja koje je poželjno izbjegavati jer je velika vjerojatnost pojave površinskih pukotina tijekom eksploatacije zavarenog spoja. U narednim poglavljima je detaljno objašnjen postupak optimizacije procesa zavarivanja.

**Tablica 4.3.** Izračunati faktori koncentracije naprezanja za uzorak B3

Pokus broj B3													
Debljina osnovnog materijala 10 mm													
Udaljenost presjeka mjerjenja od osnovice		Nishida		Ushirokawa i Nakayama		Fujisaki i suradnici		Goo		Kiyak i suradnici		Pachoud i suradnici	
	mm	lijevo	desno	lijevo	desno	lijevo	desno	lijevo	desno	lijevo	desno	lijevo	desno
Pojas A	20	1,44198	1,47416	2,28083	2,37676	2,22059	2,28729	1,71565	1,76872	2,29927	2,37023	2,15028	2,21174
	21	1,45656	1,40122	2,30574	2,15778	2,23991	2,12163	1,75311	1,61536	2,31853	2,19009	2,19094	2,02027
	22	1,42442	1,31060	2,20022	1,87461	2,16478	1,92159	1,69899	1,49684	2,23654	1,97249	2,12338	1,87490
	23	1,34445	1,37833	1,97664	2,07957	1,99946	2,07323	1,57393	1,61721	2,05085	2,13763	1,97842	2,02806
	24	<b>1,60167</b>	1,41490	<b>2,75131</b>	2,21234	<b>2,53489</b>	2,15946	<b>2,07541</b>	1,66468	<b>2,61978</b>	2,23361	<b>2,58450</b>	2,08766
	25	1,39841	1,25605	2,16533	1,73573	2,13328	<b>1,81313</b>	1,63801	1,41998	2,20601	<b>1,84941</b>	2,06025	<b>1,78554</b>
	26	1,31581	1,32797	1,91407	1,96156	1,95211	1,97324	1,49985	1,48947	2,01055	2,03018	1,88862	1,87335
	27	1,33939	1,38547	2,00170	2,11977	2,00788	2,10613	1,53781	1,69026	2,07081	2,14526	1,93869	2,14751
	28	1,29438	1,51303	1,85499	2,53120	1,91335	2,38477	1,48458	1,79806	1,96383	2,46165	1,87725	2,25162
	29	1,36171	1,27555	2,04683	1,80941	2,08448	1,87486	1,59901	1,41658	2,15866	1,93555	2,03336	1,79299
	30	1,35792	<b>1,24832</b>	2,07145	<b>1,71400</b>	2,07786	1,83251	1,53538	<b>1,41994</b>	2,15090	1,88617	1,96089	1,81266
Pojas B	70	1,66430	<b>1,30020</b>	2,96626	<b>1,86593</b>	2,63237	<b>1,89584</b>	2,09340	<b>1,48695</b>	2,73847	<b>1,94037</b>	2,56234	<b>1,86286</b>
	71	1,52108	1,56666	2,52524	2,66517	2,35306	2,44262	1,87438	1,94414	2,44143	2,53946	2,32967	2,40488
	72	1,59831	1,50757	2,74025	2,47719	2,49690	2,32121	1,98488	1,79850	2,59743	2,40599	2,43973	2,22558
	73	1,64617	1,50101	2,85903	2,44997	2,56917	2,28750	2,05023	1,73694	2,67462	2,34763	2,49474	2,14086
	74	1,54480	1,53188	2,53641	2,49178	2,36950	2,34245	1,88864	1,89973	2,46345	2,42932	2,31837	2,34192
	75	1,48479	<b>1,72487</b>	2,35304	<b>3,02593</b>	2,25277	<b>2,69851</b>	1,75100	<b>2,21022</b>	2,33231	<b>2,81352</b>	2,15462	<b>2,65538</b>
	76	1,40944	1,38861	2,11142	2,05959	2,10499	2,06437	1,68527	1,62684	2,16493	2,12806	2,09644	2,02116
	77	1,41767	1,65996	2,14204	2,82906	2,14275	2,61586	1,69674	2,09542	2,20914	2,71583	2,11765	2,54693
	78	1,43352	1,47207	2,20337	2,33728	2,17272	2,24566	1,72254	1,70977	2,24246	2,31326	2,14726	2,11602
	79	1,37290	1,40151	2,05495	2,15433	2,05258	2,11211	1,62334	1,61651	2,10842	2,18021	2,03561	2,01617
	80	1,40117	1,32022	2,14217	1,92146	2,10724	1,93891	1,70168	1,49590	2,15275	1,99367	2,14037	1,87003
Pojas C	120	1,61840	<b>1,25104</b>	<b>2,83354</b>	<b>1,71660</b>	<b>2,54694</b>	<b>1,77872</b>	<b>2,03944</b>	1,43917	<b>2,65072</b>	<b>1,78209</b>	<b>2,51491</b>	1,80920
	121	1,53749	1,45471	2,58396	2,32459	2,37263	2,20770	1,85510	1,75733	2,46516	2,28388	2,28967	2,18968
	122	1,38801	1,29493	2,09698	1,83338	2,05288	1,86016	1,63934	1,45320	2,11286	1,90629	2,03909	1,80350
	123	1,47692	1,44320	2,34462	2,24890	2,22001	2,15478	1,74857	1,68489	2,30413	2,23142	2,14866	2,07497
	124	1,55060	1,26637	2,55282	1,74821	2,37117	1,78552	1,85961	<b>1,37289</b>	2,46097	1,81490	2,27175	<b>1,69928</b>
	125	1,46707	1,36649	2,29799	2,02183	2,20294	2,00759	1,79272	1,56997	2,27317	2,06930	2,21591	1,94513
	126	1,51254	1,38930	2,43950	2,08977	2,28669	2,04993	1,85817	1,61832	2,37333	2,11594	2,28698	2,00367
	127	1,46026	1,44134	2,30362	2,24570	2,19478	2,15622	1,74815	1,73015	2,27504	2,22874	2,15998	2,14375
	128	1,55664	<b>1,62552</b>	2,56242	2,77044	2,36147	2,48356	1,86458	1,93664	2,45512	2,56226	2,26693	2,33419
	129	1,39303	1,61476	2,09272	2,73636	2,06138	2,48233	1,60243	1,92865	2,12746	2,55995	1,98123	2,33436
	130	1,50882	1,48396	2,41278	2,34983	2,28952	2,24166	1,81978	1,74722	2,37772	2,32167	2,23371	2,14582

#### 4.8. Optimizacija postupka zavarivanja pomoću najmanjih faktora koncentracije naprezanja

Optimizacija postupka zavarivanja je napravljena analizirajući najveće te najmanje faktore koncentracije naprezanja. Kao rezultat analize najvećih faktora koncentracije naprezanja dobiveni su parametri zavarivanja koje treba izbjegavati tijekom procesa zavarivanja jer postoji velika mogućnost pojave površinskih pukotina. U analizi najmanjih faktora koncentracije naprezanja dobiveni su parametri zavarivanja s kojima je poželjno zavarivati jer je mogućnost pojave površinskih pukotina malena. Na svakom uzorku je za svaki pojas određeno mjesto najvećeg i najmanjeg faktora koncentracije naprezanja. Najveći faktor koncentracije naprezanja je izračunat po svakom od prije spomenutih šest izraza, rezultati su prikazani u tablici 4.4.

**Tablica 4.4.** Najveći faktori koncentracije naprezanja za svaki pojas na svakom uzorku

Uzorak	Pojas	Nishida	Ushirokawa i Nakayama	Fujisaki i suradnici	Goo	Kiyak i suradnici	Pachoud i suradnici
A1	A	1,68803	3.00063	2,62092	2,12216	2,72159	2,62826
	B	1,66548	2.67797	2,73485	2,06410	2,81320	2,58482
	C	1,58181	2.91315	2,60408	1,99867	2,70688	2,52783
A2	A	1,56629	2.37045	2,47376	1,87421	2,54738	2,32544
	B	1,41060	3.25803	2,15109	1,62052	2,23440	2,09135
	C	1,54483	2.16623	2,36809	1,80355	2,42965	2,21212
A3	A	1,62819	3.49582	2,62539	2,06890	2,72442	2,57885
	B	1,48658	2.08323	2,40232	1,80892	2,50406	2,32402
	C	1,55901	2.84955	2,47031	1,73604	2,54125	2,31660
A4	A	1,49629	2.64513	2,33196	1,77067	2,41046	2,20402
	B	1,50753	2.75131	2,33510	1,76783	2,40280	2,18894
	C	1,80805	3.10406	2,73638	2,25587	2,84363	2,60372
A5	A	1,97996	2.13222	2,94616	2,57821	3,08818	2,85665
	B	1,66488	2.57120	2,49661	2,00686	2,59040	2,36636
	C	1,62433	3.37053	2,47172	1,93572	2,55719	2,33155
A6	A	1,43550	2.97514	2,11401	1,63388	2,17142	2,00934
	B	1,42295	2.13783	2,10339	1,60725	2,15380	1,97078
	C	1,64611	2.02720	2,48665	2,00570	2,57312	2,36353
A7	A	1,97615	2.72258	2,93434	2,62490	3,12351	2,94954
	B	1,77614	2.49756	2,68127	2,24964	2,81344	2,62151
	C	1,90294	2.58589	2,81395	2,53251	2,95147	2,79094
A8	A	1,43865	2.19741	2,13403	1,72682	2,19243	2,03452
	B	1,55071	3.21482	2,35310	1,84405	2,42916	2,22155
	C	1,40052	2.99275	2,05196	1,58326	2,10969	1,93764

**Tablica 4.4.** Najveći faktori koncentracije naprezanja za svaki pojas na svakom uzorku  
(nastavak)

B1	A	1,65532	3.14644	2,60380	2,11430	2,70736	2,58094
	B	1,67469	2.22901	2,68260	2,16921	2,78928	2,68323
	C	1,59086	2.49118	2,42377	2,05035	2,50564	2,53442
B2	A	1,70309	2.40631	2,59720	2,12044	2,69715	2,49394
	B	1,40840	2.73726	2,10598	1,59857	2,16436	1,98049
	C	1,41959	2.07235	2,13123	1,61938	2,31272	2,15355
B3	A	1,60167	3.09867	2,53489	2,07541	2,61978	2,58450
	B	1,72487	2.29261	2,69851	2,21022	2,81352	2,65538
	C	1,62552	3.04475	2,54694	2,03944	2,65072	2,51491
B4	A	1,75180	2.08500	2,64492	2,19862	2,79041	2,59075
	B	1,69088	3.02593	2,63086	2,09260	2,73383	2,51935
	C	1,73135	2.97545	2,65232	2,11012	2,74336	2,49973
B5	A	1,45328	2.11083	2,19338	1,69412	2,26788	2,08385
	B	1,42280	2.67973	2,13705	1,62625	2,19995	2,01231
	C	1,43827	2.85384	2,17105	1,66320	2,24472	2,05243
B6	A	1,62667	2.48434	2,43594	1,92319	2,49976	2,27393
	B	1,61990	2.57578	2,47158	1,95288	2,54818	2,34757
	C	1,77783	2.35138	2,67540	2,26651	2,79941	2,62983
B7	A	1,87790	3.22014	2,77685	2,47857	2,97726	2,85700
	B	1,69494	2.59032	2,59659	2,11361	2,70617	2,51161
	C	1,86593	2.79377	2,82885	2,47222	2,99994	2,88389
B8	A	1,76215	2.45243	2,62327	2,16297	2,73762	2,49975
	B	1,58795	3.41211	2,39682	1,90988	2,48375	2,28529
	C	1,60317	2.67739	2,44619	1,92818	2,52445	2,30982
C1	A	1,42072	2.68716	2,13361	1,65332	2,20495	2,04671
	B	1,61274	2.57906	2,50435	1,99168	2,59554	2,40880
	C	1,41206	2.63630	2,12344	1,61271	2,18406	2,00136
C2	A	1,35252	2.08724	2,07682	1,54315	2,16679	1,97747
	B	1,44872	2.78109	2,24400	1,67041	2,30594	2,10143
	C	1,50905	2.52565	2,34816	1,95828	2,42800	2,45346
C3	A	1,56618	3.37907	2,42849	1,92827	2,53240	2,38584
	B	1,73718	1.95971	2,67683	2,15858	2,81012	2,58912
	C	1,56978	2.64319	2,43535	1,93139	2,52827	2,32493
C4	A	1,51676	2.14206	2,35095	1,77466	2,41459	2,19908
	B	1,55271	2.83354	2,46956	1,93096	2,56144	2,41059
	C	1,59048	3.04756	2,48244	1,92231	2,56798	2,35724
C5	A	1,54923	2.08249	2,41892	1,83252	2,48599	2,26446
	B	1,60874	3.02610	2,59136	1,99426	2,64142	2,45885
	C	1,63345	3.38071	2,57256	2,04981	2,65807	2,50789
C6	A	1,53174	2.50564	2,31286	1,80562	2,38647	2,17726
	B	1,61485	2.12144	2,42749	1,92825	2,49969	2,28038
	C	1,48227	2.47248	2,19960	1,69890	2,25400	2,05679
C7	A	1,87131	2.73507	2,63337	2,43095	2,88045	2,73274
	B	2,04291	2.70594	2,94931	2,66035	3,17236	2,91977
	C	1,78428	2.83544	2,57997	2,26752	2,74122	2,58127

**Tablica 4.4.** Najveći faktori koncentracije naprezanja za svaki pojas na svakom uzorku  
(nastavak)

C8	A	1,81244	2.16835	2,57778	2,37200	2,77448	2,70314
	B	1,68539	2.89105	2,49671	1,99091	2,54682	2,31350
	C	1,66623	2.57175	2,42273	2,04434	2,54494	2,36632

Analiza izračunatih faktora koncentracije naprezanja je rađena pomoću računalnog programa „Minitab 20.3“ te je prikazana u idućem poglavlju [3, 34, 76, 107].



## 5. ANALIZA REZULTATA

Pokusi su rađeni s dvije i tri razine promjenjivih ulaznih parametara te su metodom faktorijskog eksperimenta (engl. *design of experiments*, skr. DOE) određeni koji promjenjivi ulazni parametri najviše utječu na geometrijske značajke zavarenog spoja [81].

Analiza dobivenih rezultata pokusa i interpretacija istih je bitna radi dobivanja zaključaka pokusa koji mogu biti od koristi u tehničkoj praksi. Statistička analiza rađena je pomoću računalnog programa „MINITAB 20.3“ [17].

### 5.1. Regresijska analiza

Napravljena je analiza s najmanjim faktorima koncentracije naprezanja prikazanim u tablici 4.4., za svaki od šest izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja koji su analizirani u ovom radu. U Pravitku 7 se nalazi ispis iz računalnog programa „MINITAB 20.3“ za analizu prema izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama. Analiza rađena prema ostalim izrazima je dala slične rezultate. Ovaj Pravitak se sastoji od nekoliko dijelova. U dijelu A prikazane su informacije o modelu koji se analizira. Ovdje je bitno napomenuti da „MINITAB 20.3“ koristi drugačije oznake nivoa od onih koje su prije korištene, usporedba označavanja nivoa je prikazana u tablici 5.1.

**Tablica 5.1.** Usporedba oznake razine prilikom pokusa i u „MINITAB 20.3“

Tehnika zavarivanja s tri razine	niža razina	srednja razina	viša razina
Oznaka razine korištenih u pokusima	-	o	+
Oznaka razina korištenih u „MINITAB 20.3“	1	2	3
Tehnike zavarivanja s dvije razine	niža razina		viša razina
Oznaka razina korištenih u pokusima	-		+
Oznaka razina korištenih u „MINITAB 20.3“	1		2

U tablici 5.2. prikazane su oznake parametara zavarivanja koje se koriste u „MINITAB 20.3“

**Tablica 5.2.** Oznake parametara zavarivanja u „MINITAB 20.3“

Parametar zavarivanja	Oznaka u „MINITAB 20.3“
Kut dodatnog materijala	A
Broj prolaza završnog sloja	B
Dužina slobodnog kraja žice	C
Zaštitni plin	D

S obzirom da su rađena 24 pokusa, i da je na svakom uzorku faktor koncentracije naprezanja određen na tri pojasa, statistički model je definiran na način da su rađena 24 pokusa s tri replikacije. S obzirom da su sve tri replikacije rađene u istim uvjetima, blokovi nisu primijenjeni. Svi pokusi su razmatrani kao jedan blok.

Učinci ulaznih faktora i njihova međudjelovanja prikazani su u Pravitku 7, u dijelu B.

Stupac *DF*, označava stupnjeve slobode analiziranog modela. Stupnjevi slobode koriste se za definiranje broja nezavisnih varijabli koje se mogu dodijeliti statističkoj raspodjeli. Taj broj se odnosi na pozitivan cijeli broj koji pokazuje nedostatak ograničenja u sposobnosti da se izračunaju nedostajući faktori.

Stupac *Adj SS* prikazuje zbroj kvadrata odstupanja vrijednosti varijable od prosjeka, dok stupac *Adj MS* prikazuje sredinu zbroja kvadrata pogreške pokusa zavisne varijable, ove dvije vrijednosti „MINITAB“ koristi za izračun *P-Value*. *F-Value* se koristi za određivanje je li varijabla (parametar) povezana s izlazom iz procesa. Velike vrijednosti *F-Value* znače da varijabla ima značajan utjecaj na izlaz iz modela. U posljednjem desnom stupcu u ovoj tablici prikazane su vrijednosti *P-Value*. Ova vrijednost služi da bi se odredilo koliko je neka varijabla (parametar) značajna za rezultate eksperimenta. Uobičajeno je uzeti stupanj signifikantnosti 95%. To znači ako je vrijednost *P-Value* manja od 0,05 taj učinak ili međudjelovanje je signifikantno, odnosno ima utjecaj na konačni rezultat eksperimenta. Čim je vrijednost *P-Value* manja, signifikantnost je

značajnija. Može se vidjeti da su učinci C i D te međudjelovanja AB, AC, AD, ABD, ABC, te ACD signifikantni sa stupnjem signifikantnosti 95%.

Ovo je također prikazano u Pareto dijagramu koji se nalazi u dijelu C, Prिवitak 7.

Dio D prikazuje četiri podatka kao sažetak analiziranih podataka istraživanja. S predstavlja standardnu devijaciju ulaznih podataka od očekivane vrijednosti.

$R-sq$  ( $R^2$ ) pokazuje koliko dobro dobiveni podaci odgovaraju predviđenom modelu, odnosno kolika su odstupanja od predviđenog modela koji se analizira. Ova vrijednost se kvadrira da bi se anulirale negativne vrijednosti. Veće vrijednosti  $R-sq$  znače da podaci bolje odgovaraju modelu. U slučaju analiziranog modela vrijednost  $R-sq = 83,61\%$ , te se može reći da rezultati provedene regresijske analize odgovaraju 83,61% podataka dobivenih mjerenjem.

$R-sq(adj)$  ili prilagođen  $R-sq$  se koristi ako treba usporediti dva ili više modela s različitim brojem prediktora (nezavisnih promjenjivih X). Što više X-ova postoji u modelu,  $R-sq(adj)$  je veće, bez obzira da li dodatni X-ovi zaista utiču na rezultat.  $R-sq(adj)$  eliminira matematički utjecaj i uvijek je manji od  $R-sq$ .

$R-sq(pred)$  ili predviđeni  $R-sq$  pokazuje koliko dobro postojeći model predviđa odgovor. Ako je  $R-sq(pred)$  značajno manji od  $R-sq$ , moguće je da je model nije moguće upotrijebiti. U analiziranom modelu  $R-sq(pred)$  je 63,69%, i to daje naznaku da je model upotrebljiv za analizu.

U dijelu E prikazana je regresijska jednadžba ili analitički izraz koji određuje funkcionalnu zavisnost između parametara u analiziranom modelu.

U dijelu F prikazan je dijagram normalne razdiobe. S obzirom da podaci na ovom dijagramu tvore približno ravnu liniju, može se zaključiti da su podaci normalno raspoređeni te da tvore normalnu distribuciju.

Dijagram „Versus Fits“ u dijelu G prikazuje dobivene izlazne vrijednosti na osi X te veličine rezidualnih vrijednosti na osi Y. Vrijednosti na dijagramu su raspršene, što je znak da je model (dobiveni rezultati) prihvatljiv za analizu. Dijagram „Versus Order“ prikazuje dobivene vrijednosti redosljedom kako su prikupljeni podaci s istraživanja. Ovakva raspodjela podataka

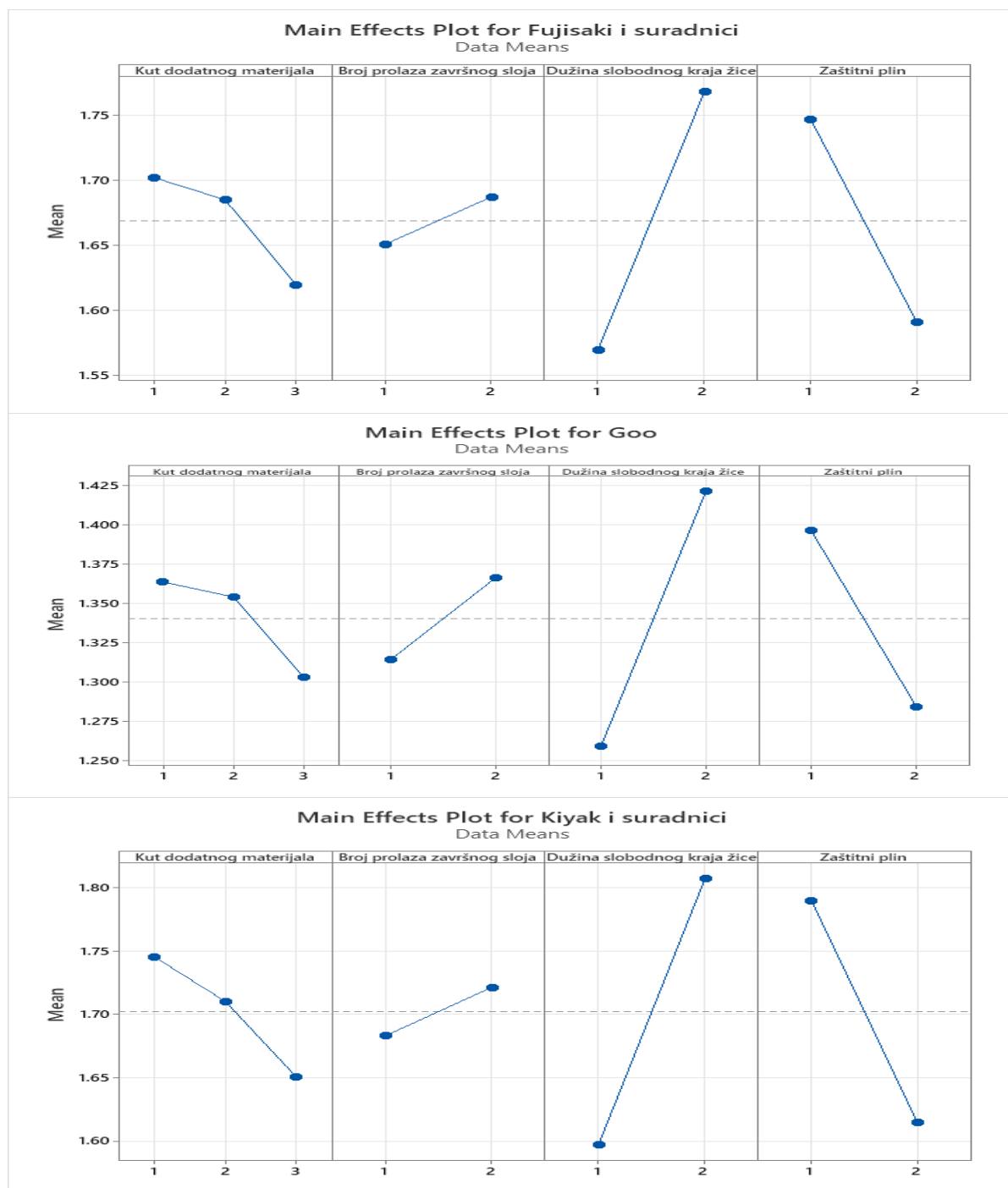
pokazuje da podaci nisu dobiveni nekom zavisnošću, odnosno da dobiveni podaci ne zavise jedan o drugome. Dakle, i po ovom kriteriju podaci su korisni za analizu.

## 5.2. Utjecaj parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije naprezanja

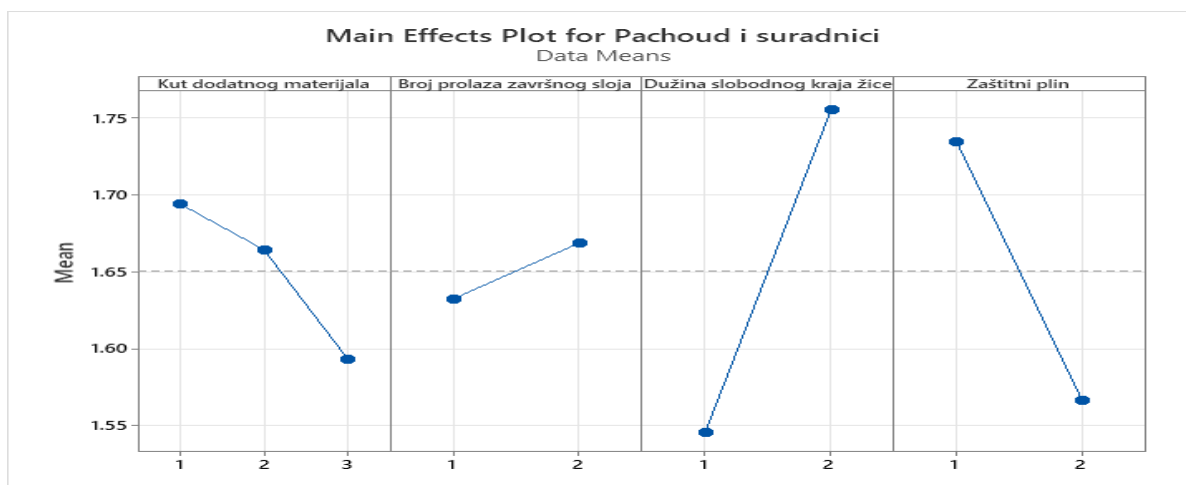
S obzirom da je analiza rađena prema šest izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja u dijagramima na slici 5.1. prikazan je utjecaj četiri promjenjiva ulazna parametra zavarivanja na faktor koncentracije naprezanja za svaki od korištenih izraza.



Slika 5.1. Utjecaj parametara zavarivanja na faktor koncentracije naprezanja



Slika 5.1. (nastavak) Utjecaj parametara zavarivanja na faktor koncentracije naprezanja



**Slika 5.1.** (nastavak) Utjecaj parametara zavarivanja na faktor koncentracije naprezanja

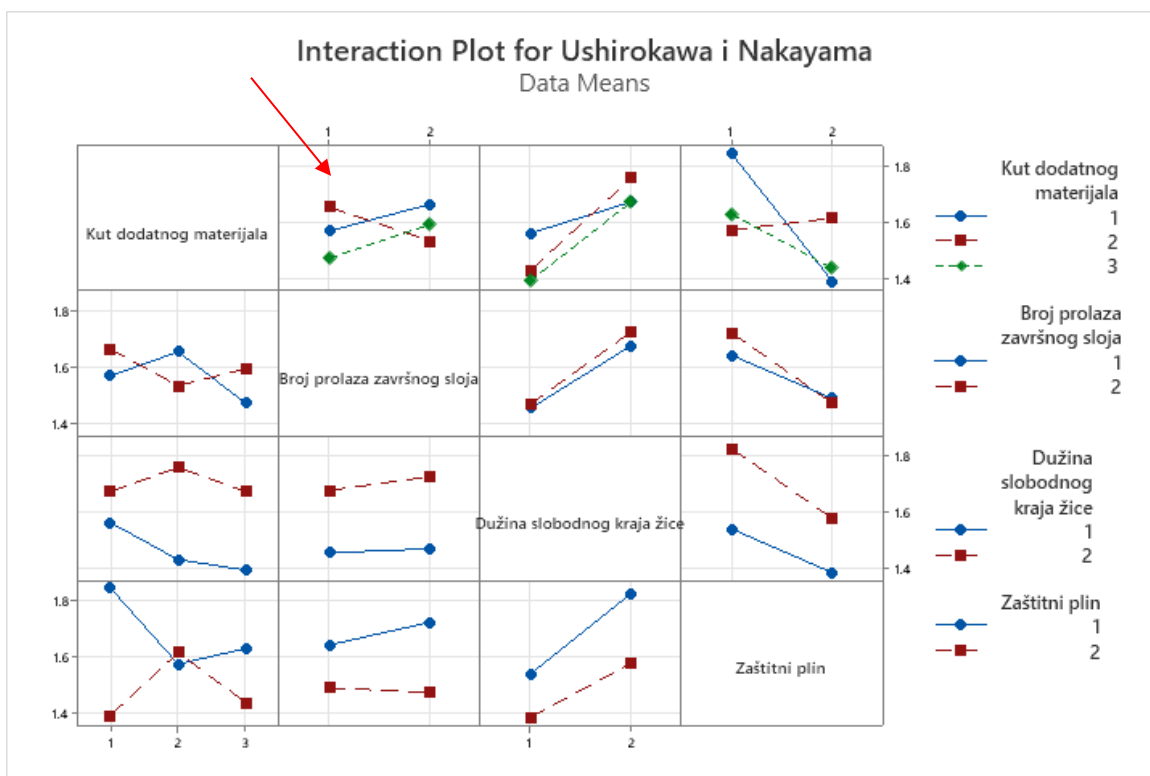
Broj prolaza završnog sloja ima najmanji utjecaj na faktor koncentracije naprezanja, s time da se manja koncentracija naprezanja javlja zavarivanjem s jednim prolazom. Kut dodatnog materijala je ispitan s tri razine, njegov utjecaj je nešto značajniji od broja prolaza završnog sloja. Može se zaključiti da se najveći faktor koncentracije naprezanja javlja prilikom zavarivanja tehnikom prema naprijed. Najmanji faktor koncentracije naprezanja se javlja prilikom zavarivanja tehnikom prema natrag. Faktori koncentracije naprezanja koji se javljaju prilikom zavarivanja okomitom tehnikom su između tehnika zavarivanja naprijed i natrag. Dužina slobodnog kraja žice i zaštitni plin imaju značajan utjecaj. Manja koncentracija naprezanja javlja kod kraćeg slobodnog kraja žice te prilikom zavarivanja sa 100% CO<sub>2</sub>.

### **5.3. Utjecaj međudjelovanja parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije naprezanja**

Na slici 5.2. prikazan je dijagram međudjelovanja parametara zavarivanja, odnosno kako promjena jednog parametra utječe na drugi. Ako su linije paralelne, to znači da nema međudjelovanja jednog parametra na drugi, odnosno čim su linije pod većim kutom međudjelovanje parametara je veće. Može se primijetiti da su linije na dijagramima koji prikazuju međudjelovanja kut dodatnog materijala i broj prolaza završnog sloja, kut dodatnog materijala i

dužina slobodnog kraja žice te kut dodatnog materijala i zaštitni plin pod najvećim kutom, a to znači da su ova međudjelovanja najveća. Linije ostala tri međudjelovanja su gotovo paralelne, a to znači da su njihovi međusobni utjecaju maleni.

Na dijagramu na slici 5.2. prikazano je dvosmjerno međudjelovanje. Međudjelovanje je prikazano za svaki par parametara zavarivanja u oba smjera. Radi detaljnijeg pojašnjenja dijagrama crvenom strelicom je označeno međudjelovanje kuta dodatnog materijala i broja završnog prolaza. Plava linija označava kut dodatnog materijala – zavarivanje tehnikom prema naprijed, ako se broj prolaza završnog sloja poveća s jedan na tri tada će se i faktor koncentracije u zavarenom spoju povećati. Isto se događa prilikom zavarivanja tehnikom prema natrag, ali je u tom slučaju faktor koncentracije naprezanja manji. Prilikom okomitog kuta dodatnog materijala javlja se suprotna situacija, odnosno najveći faktor koncentracije je prilikom jednog prolaza završnog sloja, a najmanji je prilikom tri prolaza završnog sloja.



Slika 5.2. Dijagram međudjelovanja parametara zavarivanja

## 5.4. Određivanje parametara zavarivanja za najmanje faktore koncentracije napreznja

Faktor koncentracije napreznja je analiziran prema šest dostupnih izraza. Zbog toga je određivanje optimalnih parametara zavarivanja u kojima će se pojaviti najmanja koncentracija napreznja rađena prema svih šest izraza.

Na slici 5.3. prikazan je model parametara zavarivanja u kojemu će se javiti najmanja koncentracija napreznja, a samim time i najmanja vjerojatnost površinskih pukotina. Na slici je prikazan model u obliku dijagrama koji je dobiven prema izrazu kojega su predložili Ushirokawa i Nakayama, izraz (2.12). S obzirom da je analiza napravljena prema svih šest izraza, u tablici 5.3 prikazane su očekivane vrijednosti faktora koncentracije napreznja za optimalni model zavarivanja, te područje u kojem će se javiti vrijednost faktora koncentracije napreznja sa sigurnošću od 95%. U posljednjem četvrtom stupcu prikazan je optimalni model parametara zavarivanja. Može se vidjeti da je isti model dobiven prema svih šest izraza za izračun faktora koncentracije napreznja.



Slika 5.3. Parametri zavarivanja u kojima se javljaju najmanje koncentracije napreznja



**Tablica 5.3.** Očekivane vrijednosti  $K_t$  za optimalan model parametra zavarivanja

Izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja	Očekivane vrijednosti za optimalan model	Područje očekivanih vrijednosti za optimalan model	Optimalan model parametara zavarivanja			
			3	1	1	2
Nishida (2.8)	1,0617	1,0073 – 1,1162	3	1	1	2
Ushirokawa i Nakayama (2.12)	1,1798	1,0391 – 1,3206	3	1	1	2
Fujisaki i suradnici (2.18)	1,2521	1,1282 – 1,3760	3	1	1	2
Goo (2.24)	1,0793	1,0000 – 1,1699	3	1	1	2
Kiyak i suradnici (2.25)	1,2742	1,1321 – 1,4164	3	1	1	2
Pachoud i suradnici (2.26)	1,2725	1,1412 – 1,4038	3	1	1	2

U tablici 5.4. prikazan je model parametara zavarivanja u kojem se javljaju najmanje koncentracije naprezanja.

**Tablica 5.4.** Parametri zavarivanja u kojima se javljaju najmanje koncentracije naprezanja

Parametar zavarivanja	Nivo
Kut dodatnog materijala	tehnika prema natrag
Broj prolaza završnog sloja	1 prolaz
Dužina slobodnog kraja žice	5 mm
Zaštitni plin	100% CO <sub>2</sub>

## 6. ZAKLJUČAK

Zavarivanje je najčešće upotrebljavani način spajanja dva komada materijala, na način da se dobije cjelovit komad čija je čvrstoća ista ili veća od osnovnog materijala. Tijekom procesa zavarivanja i tijekom hlađenja nakon zavarivanja, u zavarenom spoju se mogu pojaviti pogreške, koje mogu biti površinske ili pogreške unutar zavarenog spoja. U ovom radu je razmatrana površina zavarenog spoja i pukotine koje se mogu inicirati iz površine zavarenog spoja, smatrajući da nema pogrešaka u unutrašnjosti zavarenog spoja. Zbog promjene geometrijskog oblika površine na mjestu zavarenog spoja dolazi do povećane koncentracije naprezanja, a samim time i do moguće inicijacije površinskih pukotina. Najveća koncentracija naprezanja se javlja u području gdje osnovni materijal prelazi u nadvišenje sljemena zavora, odnosno u području radijusa ruba šava. Prema dosadašnjim istraživanjima pet geometrijskih veličina utječe na faktor koncentracije naprezanja, to su: radijus ruba šava, kut nadvišenja sljemena šava, visina nadvišenja zavarenog spoja, širina zavarenog spoja te debljina osnovnog materijala. U prethodnim istraživanjima utvrđeno je da radijus ruba šava najviše utječe na koncentraciju naprezanja u zavarenom spoju. Nekoliko autora je predložilo izraz za izračun faktora koncentracije naprezanja u zavarenom spoju. U ovom radu analizirano je šest izraza koji su u literaturi najzastupljeniji i najviše citirani. Četiri od tih šest izraza uzimaju u obzir svih pet utjecajnih geometrijskih veličina zavarenog spoja. Ostala dva ne uzimaju u obzir širinu zavarenog spoja.

U ovom radu opisana su istraživanja utjecaja četiri tehnike zavarivanja na koncentraciju naprezanja u zavarenom spoju. Istraživanje je provedeno s četiri tehnike zavarivanja: kut dodatnog materijala, broj prolaza završnog spoja, dužina slobodnog kraja žice te vrsta zaštitnog plina. U istraživanju su korištena dva zaštitna plina mješavina 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>, te 100% CO<sub>2</sub>. Ove tehnike su odabrane za analizu zato jer u prethodnim dostupnim istraživanjima nisu sistematski istražena, a utvrđeno je da imaju velik utjecaj na geometriju površine zavarenog spoja.

Kao osnovni materijal u ovom istraživanju odabran je čelik povišene čvrstoće za rad pri niskim temperaturama. Razlog zbog čega je upotrijebljen ovaj materijal je taj što se u posljednje vrijeme otvara sjeverni plovni put kojim se brže dolazi iz Europe u Kinu, a taj put vodi kroz područja gdje vladaju niske temperature te brodovi koji plovo u tim područjima moraju biti građeni

od posebnih vrsta čelika povišene čvrstoće za rad pri niskim temperaturama. Također, u arktičkom području pronađene su velike količine sirove nafte i plina te se u skoroj budućnosti očekuje gradnja odobalnih platformi radi istraživanja i eksploatacije nafte i plina. Čelici povišene čvrstoće za rad pri niskim temperaturama se sve više upotrebljavaju u brodograđevnoj industriji, a posebno se često upotrebljavaju prilikom gradnji odobalnih objekata za istraživanje podmorja.

Analizom prethodnih istraživanja utvrđeno je da geometrija žlijeba, a to se odnosi na kut otvora žljeba i zračnost u korijenu žljeba, ima utjecaj na širinu zavarenog spoja. Osim toga u Proizvođačevoj radnoj uputi za zavarivanje preporučuje se žlijeb „V“ oblika, kut otvora žljeba od  $50^\circ$ , te zračnost u korijenu žljeba 5,8 mm, za debljinu osnovnog materijala od 10 mm. S obzirom da je zavarivanje rađeno s punim provarom u ovom istraživanju je korišten spomenuti oblik žljeba. Drugi oblici žljeba kao što je „I“ oblik ne omogućuju puni provar, dok oblici kao što je „Y“ ili „K“ nisu primjenjivi za limove debljine 10 mm.

Tijekom dugogodišnje prakse prilikom redovnih inspekcija brodova u službi, autor je zamijetio pojavu pukotina na rubu šava zavora, u području radijusa ruba šava, koje se javljaju nakon desetak i više godina eksploatacije. Utvrđeno je da su se te pukotine inicirale zbog povećane koncentracije naprezanja na površini zavarenog spoja, posebno u području radijusa ruba šava. Zbog toga je napravljena analiza parametara zavarivanja, s ciljem optimizacije postupka zavarivanja, odnosno radi utvrđivanja utjecaja parametara zavarivanja na koncentraciju naprezanja u zavarenom spoju. Rezultati dobiveni u ovom istraživanju bi trebali pomoći tehničkoj praksi da se zavarivanje, posebno zavora na glavnoj palubi optimizira na način da se smanji rizik od pojave područja povećane koncentracije naprezanja, a samim time i da se smanji rizik od nastanka pukotina na glavnoj palubi na brodu.

Iz prakse je poznato te je u znanstvenoj literaturi opisano nekoliko slučajeva iniciranja pukotina u zavarenom spoju, koje su u konačnici dovele do fatalnih slučajeva pucanja brodske konstrukcije, pa i do potonuća brodova zbog toga. Pukotine se uglavnom iniciraju na glavnoj palubi jer je ona najudaljenija od neutralne osi broskog trupa te je i najopterećenija prilikom eksploatacije broda. Ovo istraživanje je rađeno s vodoravnim položajem zavarivanja zbog toga jer se poprečni montažni spojevi na glavnoj palubi rade u vodoravnom položaju zavarivanja.

Tri tehnike zavarivanja su analizirane u dvije razine, dok je kut dodatnog materijala analiziran u tri razine. Na taj način je potpunim planom pokusa napravljeno 24 pokusa. Da bi se smanjila snaga nekontroliranih vanjskih utjecaja, zavarivanje je provedeno u kontroliranim uvjetima u laboratoriju na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Zavarivanje je rađeno pomoću uređaja za zavarivanje koji tijekom procesa zavarivanja bilježi parametre zavarivanja: jakost struje zavarivanja, napon zavarivanja te brzinu žice zavarivanja. Uzorci su imali dužinu 150 mm. Analizom bilježenih parametara zavarivanja utvrđeno je da su parametri zavarivanja stabilizirani prije 20 mm od početka zavarivanja te da su bili stabilni do iza 130 mm od početka zavarivanja, odnosno 20 mm od kraja zavarivanja.

Površine zavarenog spoja na svakom uzorku su snimljene skenerom za trodimenzionalno snimanje. U dostupnoj literaturi nije pronađeno točno i detaljno mjerenje geometrije površine zavarenog spoja usporedivo s provedenim mjerenjima u ovom istraživanju. Nakon toga su na svakom presjeku u tri pojasa, svaki širine 10 mm s razmakom od 1 mm, izmjerene četiri geometrijske veličine površine zavara, peta geometrijska veličina, debljina osnovnog materijala je konstantna za sve uzorke 10 mm. Na svakom uzorku su odabrana tri pojasa za mjerenje geometrijskih veličina. Prvi pojas u području od 20 mm do 30 mm od početka zavarivanja, jedan pojas u području od 120 mm do 130 mm od početka zavarivanja te je mjerenje vršeno na još jednom pojasu u sredini od 70 mm do 80 mm od početka zavarivanja. Za svaki presjek (lijevo i desno) izračunat je faktor koncentracije naprezanja, prema šest dostupnih izraza.

Točno mjerenje geometrijskih veličina zavarenog spoja od velikog je značaja za točno određivanje geometrijskog faktora koncentracije naprezanja, a samim time i kritičnog mjesta gdje može doći do pojave površinskih pukotina. Mjerenje svake geometrijske veličine se može izvršiti na nekoliko načina. To se posebno odnosi na radijus ruba šava koji je najutjecajnija geometrijska veličina za faktor koncentracije naprezanja. Zbog toga se određivanju vrijednosti radijusa ruba šava mora pristupiti s posebnom pažnjom.

U ovom radu su prikazane tri metode kojima je određena vrijednost radijusa ruba šava te jedna metoda određivanja ostalih geometrijskih veličina. Prva metoda kojom je dobivena vrijednost radijusa ruba šava je direktno mjerenje pomoću lisnatog mjerila. Druga i treća metoda se sastoje od dvije faze: prva faza je skeniranje površine, dok je druga faza mjerenje radijusa ruba

šava. Druga metoda se, u ovom radu, naziva „*GOM inspect*“, dok se treća metoda naziva „*Wolfram mathematica*“. Prva faza je ista za obje metode. U ovom istraživanju je površina zavarenog spoja skenirana skenerom za trodimenzionalno snimanje, što se može smatrati prvom fazom određivanja geometrijskih vrijednosti. Druga faza mjerenja radijusa je odrađena s dvije metode. U metodi „*GOM inspect*“, skenirana površina je učitana u računalni program „*GOM inspect*“. Ovo je računalni program koji se koristi samo za mjerenje raznih geometrijskih veličina te je pomoću ovog programa izmjerena veličina radijusa ruba šava. Nakon što je skenirana geometrija učitana u „*GOM inspect*“, na svakom uzorku su određena tri pojasa, na mjestima kako je prije objašnjeno. U svakom pojasu je na svakih 1 mm određen poprečni presjek zavarenog spoja. Na svakom presjeku su određene točke na površini zavarenog spoja pomoću kojih je određen najmanji radijus ruba šava. Na minimalni radijus ruba šava, koji se dobije pomoću „*GOM inspect*“-a utječe razmak između točaka. U ovom istraživanju je usvojen razmak od 0,125 mm, jer je u prethodnim istraživanjima utvrđeno da se najveća koncentracija naprezanja javlja na području od 0,125 mm. Zbog toga je razmak između koordinata točaka na površini zavarenog spoja je 0,125 mm. Određivanje najmanjeg radijusa je rađeno na način da je konstruirana kružnica između svake od tri točke na površini presjeka zavarenog spoja, te je za daljnju analizu usvojena vrijednost kružnice s najmanjim radijusom, zbog toga jer je koncentracija naprezanja najveća na mjestu najvećeg radijusa. U trećoj metodi koja se zove „*Wolfram mathematica*“ koordinate točaka površine zavarenog spoja su očitane iz „*GOM inspect*“-a te su unesene u računalni program „*Wolfram mathematica*“, te je najmanji radijus ruba šava izračunat pomoću ovog računalnog programa. Ove tri metode su dale rezultate koji su kvalitativno usporedivi uz činjenicu da se direktnim očitanjem dobivaju rezultati koji su oko 50% veći od rezultata dobivenih s ostale dvije metode. Dakle, s obzirom da je radijus ruba šava najutjecajnija geometrijska veličina, prikazane su tri metode određivanja radijusa ruba šava dok su ostale geometrijske veličine određene jednom metodom.

Može se zaključiti da se direktnom metodom mogu dobiti podaci koji su dovoljno točni za svakodnevnu upotrebu, na mjestima gdje snimanje zavara zbog nedostupnosti nije moguće. Snimanje, te poslije toga mjerenje radijusa ruba šava „*GOM inspect*“-om je moguće u uvjetima gdje je zavar dostupan i gdje postoje dobri uvjeti, to se posebno odnosi na radionice i laboratorijske uvjete. Snimanje zavara na brodu, gdje su zavari teško dostupni, nije moguće skenerom koji je

velik i nepraktičan za transport, zbog toga se preporučuje mjerenje direktnim metodama. Računalnim programom „*Wolfram Mathematica*“ izračunate su nešto manje vrijednosti radijusa ruba šava. Za ovo istraživanje korištena je metoda mjerenja radijusa ruba šava s „*GOM inspect*“-om, zbog toga jer ona omogućava mjerenje sve četiri geometrijske veličine površine zavarenog spoja. Tako da su sve geometrijske veličine dobivene pomoću „*GOM inspect*“-a.

Ovo istraživanje je rađeno s velikim brojem podataka. Na svakom uzorku su određena 3 presjeka 10 mm širine, prema tome na svakom uzorku je radijus ruba šava i kut nadvišenja sljemena šava izmjeren na 66 mjesta (svaki presjek lijevo i desno). Širina šava i visina nadvišenja sljemena šava su izmjerene na 33 presjeka. S obzirom da je zavarivanje provedeno na 24 uzorka, ukupno je napravljeno 792 presjeka na kojima su izmjerene geometrijske veličine.

Nakon što su izmjerene sve geometrijske veličine pristupilo se izračunu faktora koncentracije naprezanja u svakom presjeku. S obzirom da svaki presjek zavarenog spoja ima dva radijusa (lijevo i desno) faktor koncentracije naprezanja je izračunat za lijevi i desni dio. Faktor koncentracije naprezanja je računat prema svakom od šest izraza. Analiza optimizacije postupka zavarivanja je rađena s najmanjim faktorima koncentracije naprezanja u svakom pojasu. Zbog toga je na svakom pojasu određen presjek u kojima se pojavio najmanji faktor koncentracije naprezanja. Na taj način su za svaki uzorak dobivena po tri mjesta s najmanjim faktorom koncentracije naprezanja. S tim vrijednostima faktora koncentracije naprezanja je rađena analiza optimizacije postupka zavarivanja. Optimizacija je rađena pomoću računalnog programa „*MINITAB 20.3*“. Ulazni podaci su bili najmanji faktori koncentracije te je optimizacija rađena prema svakom od šest izraza. Dobiveni rezultati po svakom od šest izraza su slični.

Analiza najmanjih faktora koncentracije naprezanja je pokazala da postoje parametri zavarivanja u kojima je faktor koncentracije naprezanja blizu nominalnom naprezanju. To su sljedeći parametri zavarivanja: tehnika zavarivanja prema natrag, jedan prolaz završnog sloja, 5 mm slobodnog kraja žice te zavarivanje sa 100% CO<sub>2</sub>. Na taj način je potvrđena prva hipoteza. Očekivani faktor koncentracije naprezanja se za ove parametre zavarivanja kreće od 1,061 do 1,274, u ovisnosti po kojem se izrazu računa. Ovo su parametri zavarivanja koji se preporučuju koristiti u tehničkoj praksi da bi se smanjio rizik od stvaranja površinskih pukotina tijekom eksploatacije zavarenog spoja.

Dobiveni rezultati sugeriraju da postoje parametri zavarivanja kojima je moguće postići optimalnu površinu zavarenog spoja u kojoj se neće pojaviti povećana koncentracija naprezanja, i u kojoj je rizik pojave površinskih pukotina zanemariv, uz uvjet da su konstantni kontrolirani ulazni parametri prema proizvođačevoj radnoj uputi za zavarivanje: osnovni materijal: čelik EH36; dodatni materijal: žica punjena praškom; geometrijski oblik žlijeba: „V“ žlijeb; kut otvora žlijeba: 50°; zračnost u korijenu žlijeba: 6 mm; temperatura okoline: 20°C; jakost struje zavarivanja: 190 A (prvi prolaz) i 250 A (ostali prolazi); napon struje zavarivanja: 27 V; polaritet: istosmjerna struja, elektroda spojena na pozitivan pol (DCEP); brzina zavarivanja: 150 mm/min (prvi prolaz) i 300 mm/min (ostali prolazi); brzina žice zavarivanja: 9,6 m/min. Tijekom procesa zavarivanja pojavljuju se nekontrolirani ulazni faktori koji mogu utjecati na izlaze iz procesa odnosno na rezultate eksperimenta. Nekontrolirani ulazni faktori mogu biti: zavarivač (njegovo iskustvo, raspoloženje i slično), vanjski utjecaji (temperatura okoline, vremenski utjecaji, vjetar, kiša snijeg i slično), stanje u kojoj se nalazi oprema za zavarivanje. Tijekom eksperimenta ovi utjecaji su držani konstantnim, tim više da je zavarivanje vršeno u laboratorijskim uvjetima, gdje se većina ovih utjecaja uspješno drži pod kontrolom. Zavarivanje je vršio zavarivač s dugogodišnjim iskustvom koji ima položen ispit i izdanu Potvrdu o atestiranju zavarivača prema ISO 9609-1. Zavarivanje završnog sloja je vršeno u jednom danu da bi se smanjio utjecaj zavarivača. Zavarivanje je vršeno modernim uređajem za zavarivanje koji bilježi struju i napon zavarivanja te brzinu žice zavarivanja. U tehničkoj praksi kada se zavarivanje vrši u raznim vremenskim uvjetima i u raznom okruženju nekontrolirane ulazne faktore je teško držati pod kontrolom. Zbog toga, da bi se postigli uvjeti slični kao u laboratoriju, potrebno je planirati proces proizvodnje, odnosno zavarivanja na način da se čim je više moguće zavara radi u vodoravnom položaju, da se zavarivanje vrši tijekom ljetnih mjeseci kada su temperature okoline oko 20°C, da zavarivanje, posebno zavari palube i vanjske oplata koji su tijekom eksploatacije najviše opterećeni, vrše atestirani i iskusni zavarivači.

Istraživanja su provedena na sučeljno zavarenim spojevima, u vodoravnom položaju MAG postupkom zavarivanja s dvije vrste zaštitnih plinova (mješavina 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub> odnosno 100% CO<sub>2</sub>). Istraživanja su rađena s osnovnim materijalom, koji je bio brodograđevni čelik povišene čvrstoće otporan na niske temperature (čelik oznake EH36) debljine 10 mm. Kao dodatni

materijal je korištena praškom punjena žica. Rezultati ovih istraživanja se mogu koristiti za ostale vrste brodograđevne čelike zavarene MAG postupkom zavarivanja u vodoravnom položaju. Međutim ne preporučuje se koristiti rezultate ovih istraživanja za ostale položaje zavarivanja, kao što je okomito zavarivanje, a posebno se ne preporučuje koristiti za nadglavno zavarivanje bez prethodno provedenih sustavnih istraživanja. S obzirom da su istraživanja rađena MAG postupkom zavarivanja, ove rezultate se ne preporučuje koristiti za druge postupke zavarivanja.

Dobiveni rezultati se ne preporučaju upotrebljavati na drugim materijalima, kao što je aluminij. Tijekom istraživanja radijus ruba šava se kretao od 0,2 mm do 2 mm, te se za ostale radijuse ovi rezultati ne preporučuju upotrijebiti. Također rezultati se mogu upotrijebiti za kutove nadvišenja od 10° do 50°.

Posebno treba istaknuti da je zavarivanje završnog sloja uzoraka rađeno u laboratorijskim uvjetima te se prilikom zavarivanja koje se ne vrši u laboratorijskim uvjetima mogu pojaviti razlike u rezultatima uslijed utjecaja nekontroliranih faktora.

### **Potvrđivanje hipoteze**

Na početku istraživanja postavljena je jedna hipoteza koja je tijekom pokusa te tijekom analize rezultata dobivenih pokusima potvrđena.

#### Opća hipoteza

Pravilnim odabirom geometrije žlijeba te pravilnim odabirom parametara zavarivanja čelika pojačane čvrstoće otpornih na niske temperature moguće je postići povoljan oblik površine zavarenog spoja sa stajališta otpornosti na pojavu inicijacije površinskih pukotina.

#### Komentar

Analizom rezultata dobivenih pokusima utvrđeni su parametri zavarivanja kojima je moguće postići povoljnu geometriju površine zavarenog spoja sa stajališta otpornosti na pojavu površinskih pukotina. Usporedbom rezultata može se zaključiti da postoji razlika parametara zavarivanja koji generiraju povećanu koncentraciju naprezanja, od onih parametara zavarivanja u



kojima je koncentracija naprezanja znatno manja, čak se približila nominalnom napreznju. Može se utvrditi da je ova hipoteza potpuno potvrđena.

Određene su dvije pretpostavke koje su tijekom istraživanja potvrđene.

a) Parametri zavarivanja utječu na oblik površine zavarenog spoja, a ona utječe na otpornost zavarenog spoja na inicijaciju površinskih pukotina i na zamor zavarenog spoja.

b) Promjenom oblika površine zavarenog spoja može se produljiti vijek zavarenog spoja.

### **Daljnja istraživanja**

Nastavak ovih istraživanja može voditi u nekoliko pravaca. Istraživanje se može proširiti na još nekoliko parametara zavarivanja, koji su već istraženi, ali međudjelovanja s parametrima istraživanja u ovom radu mogu biti korisna. To se odnosi na parametre zavarivanja koji su vezani uz struju zavarivanja (jakost struje i napon struje zavarivanja). Ova istraživanja su rađena žicom punjenom praškom, istraživanja se mogu provesti žicom punog profila. Istraživanja se mogu provesti na drugim vrstama materijala, kao što je aluminij i neke druge vrste čelika. S obzirom da se zavarivanje često ne može organizirati u vodoravnom položaju u kojemu su vršena ova istraživanja, daljnja istraživanja se mogu proširiti na ostale položaje zavarivanja, a posebno može biti zanimljiv zidni položaj zavarivanja, vertikalno prema gore, koji se često upotrebljava prilikom zavarivanja montažnih zavara na vanjskoj oplati i koji se ne može izbjeći promjenom tehnologije gradnje broskog trupa.

Istraživanje se može proširiti na veće debljine osnovnog materijala te se može proširiti i za ostale oblike žljeba „K“ i „Y“. Ako se u istraživanje uključe tanji limovi može se raditi i s „I“ oblikom žljeba.

U ovom istraživanju koncentracija naprezanja je dobivena pomoću poznatih izraza. Međutim, koncentracija naprezanja se može dobiti pomoću FEM metoda te se mogu usporediti rezultati dobiveni u ovom radu s rezultatima dobivenim pomoću FEM metode. Nastavak istraživanja može ići u smjeru izrade FEM modela zavarenih uzoraka na osnovi prije skenirane površine zavarenog spoja te na taj način utvrditi koncentraciju naprezanja u pojedinom uzorku.

Zanimljivo bi bilo usporediti rezultate dobivene u ovom istraživanju s rezultatima uzoraka na kojima bi se površina tretirala nekom metodom smanjenja koncentracije naprezanja nakon zavarivanja. S obzirom da je za proces tretiranja ruba šava zavara radi smanjenja koncentracije naprezanja potrebno vrijeme, a postoji i određeni utrošak energije može se napraviti analiza isplativosti tretiranja ruba šava.

Istraživanja opisana u ovom radu se mogu smatrati kao početak istraživanja s ciljem dobivanja korisnih podataka o utjecaju tehnika zavarivanja na smanjenje koncentracije naprezanja na površini zavarenog spoja. Nastavak istraživanja može ići u raznim smjerovima, u svakom slučaju ima dosta prostora da se ova istraživanja prošire te da se dobiju korisni podaci koji se mogu primijeniti u tehničkoj praksi.

## LITERATURA

- [1] Albert, W. A. J.: "**Über Treibseile am Harz**", Archive für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde, Vol. 10, 1838. str. 215–234. (<https://books.google.hr>), na njemačkom
- [2] American Welding Society, „**Structural Welding Code**“, AWS D1.1-2010, Miami, 2010. str. 5–31.
- [3] Bass, I.: „**Six Sigma Statistics with Excel and Minitab**“, The McGraw-Hill Co. Inc, New York, 2007.
- [4] Baumgartner, J.: „**Review and Considerations on the Fatigue Assessment of Welded Joints Using Reference Radii**“, International Journal of Fatigue, Vol. 101, 2017 stranica 459 - 468
- [5] Berge, S.: „**On the Effect of Plate Thickness in Fatigue of Welds**“, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, no. 2, 1985. str. 423–435.
- [6] Brennan, F. P., Peleties, P., Hellier, A. K.: „**Predicting Weld Toe Stress Concentration Factors for T and Skewed T-joint Plate Connections**“, International Journal of Fatigue, vol. 22, 2000, str. 573–584.
- [7] British Standards Institution, „**Code of practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures**“, BS 7608:1993, London 1993. str. 13–14.
- [8] British Standards Institution, „**Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures**“, BS 7910:2013, London 2013.
- [9] Bytyqi, B., Osmani, H., Idrizi, F.: „**Influence of Welding Parameters on Seam Welded Quality With MAG Welding**“, 4. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem, “KVALITET 2005”, Fojnica, B&H, Novembar 2005.
- [10] Cerit, M., Kokumer, O., Genel, K.: „**Stress Concentration Effects of Undercut Defect and Reinforcement Metal in Butt Welded Joint**“, Engineering Failure Analysis 17 (2010), str. 571–578.
- [11] Chattopadhyay, A., Glinka, G., El-Zein, M., Qian, J., Formas, R.: „**Stress Analysis and Fatigue of Welded Structures**“, Welding in the World, Vol. 55, no 07 / 08, 2011.

- [12] Clegg, R. E., McLeod, A. J. and Ruddell, W.: „**Effect of toe treatments on the fatigue resistance of structural steel welds**“, Bureau Veritas, 2013.
- [13] Cozzolino, L. D., Coules, H. E., Colegrove, P. A., Wen, S.: „**Investigation of Post-weld Rolling Methods to Reduce Residual Stress and Distortion**“, Journal of Materials Processing Technology, Vol 247 (2017), str.. 243–256.
- [14] Det Norske Veritas: Classification notes 30.7, „**Fatigue Assessment of Ship Structures**“, Høvik, 2014.
- [15] Dvornik, J., Dvornik, S.: „**Konstrukcija broda**“, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2013.
- [16] European Creep Collaborative Committee: „**Terms and Terminology for Welding Processes and Weld Configurations**“, Volume 2, Part IIa, issue 2, Ashtead, Velika britanija 2001.
- [17] Evans, M.: „**MINITAB Manual**“, University of Toronto, Toronto, 2009.
- [18] Ferretti, F., Saltelli, A., Tarantola, S.: „**Trends in Sensitivity Analysis Practice in the Last Decade**“, Science of the Total Environment, Vol. 568 (2016), str. 666–670.
- [19] Fofi, D., Sliwa, T., Voisin, Y.: „**A Comparative Survey on Invisible Structured Light**“, Machine Vision Applications in Industrial Inspection XII, 90 (2004.)
- [20] Fricke, W. F.: „**Fatigue analysis of welded joints: state of development**“, Marine Structures 16 (2003), str. 185–200.
- [21] Fujisaki, W., Noda, N., Tanaka, H., Nisitani, H.: „**Effects of Reinforcement Geometry and Welding Condition on Stress Concentration Factor of Butt Welded Joint**“, 1990. str. 1533–1538. (na japanskom)
- [22] Ghazvinloo, H. R., Honarbakhsh-Raouf, A., Shadfar, N.: „**The Effect of the Electrode to Work Angle, Filler Diameter and Shielding Gas Type on Weld Geometry of HQ130 Steel Joints Produced by Robotic GMAW**“, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 3, issue 1, January 2010.

- [23] Ghazvinloo, H. R., Honarbakhsh-Raouf, A., Shadfar, N.: „**The Effect of Arc Voltage, Welding Current and Welding Speed on Fatigue Life, Impact Energy and Bead Penetration of AA6061 Joints Produced by Robotic MIG Welding**“, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 3, issue 2, February 2010.
- [24] Goo, B. C.: „**An Estimation Formula of the Stress Concentration Factor on the Butt Welded Joint**“, Key Engineering Materials Vols 353-358 (2007), str 1995 – 1998.
- [25] Griffith, A. A.: „**The Phenomena of Rupture and Flow in Solids**“, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Vol. 221 (1921), str 163 – 198.
- [26] Groš, J., Medić, S., Brozović, M.: „**Metode trodimenzionalnog optičkog mjerenja i kontrole geometrije oblika**“, Zbornik Veleučilišta u Karlovcu, godina II, Broj 1, (2012), str. 43–48.
- [27] Grubić, K.: „**Fizikalna ovisnost stabilnosti procesa o zaštitnom plinu kod MAG zavarivanja**“, Zavarivanje 40, broj 4, Zagreb, 1997., str. 149.–154.
- [28] Haagenzen, P. J., Maddox, S. J.: „**IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structures**“, XIII-1815-00, The International Institute of Welding, 2001.
- [29] Haagenzen, P. J., Maddox, S. J.: „**IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints**“, IIW-2142-110, International Institute of Welding, Philadelphia, 2013.
- [30] Hadjoui, F., Benachour, M., Benguediab, M.: „**Fatigue Crack Growth on Double Butt Weld with Toe Crack of Pipelines Steel**“, Materials Sciences and Applications, Vol. 3, 2012, str. 596–599.
- [31] Harati, E., Svensson, L.-E., Karlsson, L.: „**The Measurement of Weld Toe Radius Using Three Non-destructive Techniques**“, 6th International Swedish Production Symposium, 2014.
- [32] He, B., Zhang, X.: „**Finite element calculation about stress concentration coefficient of welded butt joints based on the ABAQUS**“, Applied Mechanics and Materials Vols 80-81 (2011), str. 807–811.

- [33] Henn, A. E.: „**Fatigue Technology Assessment and Strategies for Fatigue Avoidance in Marine Structures**“, Ship Structure Committee, U.S. Coast Guard, Washington, USA, 1993.
- [34] Hinkelmann, K., Kempthorne, O.: „**Design and Analyses of Experiments**“, Volume I, Second edition, Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- [35] Hobbacher, A. F.: „**Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**“, International Institute of Welding, Paris, srpanj 2016.
- [36] Hrvatski registar brodova, „**Rules For the Classification of Ships**“, Part 2 – Hull, Split 2013.
- [37] Hrvatski registar brodova, „**Rules For the classification of Ships**“, Part 25 – Metallic Materials, Split 2019.
- [38] Hrvatski registar brodova, „**Rules For the Classification of Ships**“, Part 26 – Welding, Split 2019.
- [39] Hrvatski zavod za norme, „**Zavarivanje i srodni postupci – Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – 1. dio**“, HRN EN ISO 6520-1:2007, Zagreb, 2007.
- [40] Hrvatski zavod za norme, „**Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke**“, HRN EN ISO 14175:2008, Zagreb, 2008.
- [41] Hrvatski zavod za norme, „**Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupaka i referentni brojevi**“, HRN EN ISO 4063:2010, Zagreb, 2010.
- [42] Hrvatski zavod za norme, „**Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike**“, HRN EN ISO 14341:2012, Zagreb, 2012.

- [43] Hrvatski zavod za norme, „**Provjera osposobljenosti zavarivača – Zavarivanje taljenjem – 1. dio: Čelici**“, HRN EN ISO 9606-1:2013, Zagreb, 2013.
- [44] Hrvatski zavod za norme, „**Welding consumables - Tubular cored electrodes for gas shielded and non-gas shielded metal arc welding of nonalloy and fine grain steels – Classification**“, ISO 17632:2015, Brisel, 2015.
- [45] Hrvatski zavod za norme, „**Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale; Specifikacija postupka zavarivanja, dio 1: elektrolučno zavarivanje**“, HRN EN ISO 15609-1:2019, Brisel, 2019.
- [46] Hyundai Welding, „**Consumables**“, str. 298–299, 2021.
- [47] Iida, K., Uemura, T.: „**Stress Concentration Factor Formulae Widely Used in Japan**“, Fatigue Fract. Engng Mater Struct., Vol. 19, no. 6, 1996. str. 779–786.
- [48] International Association of Classification Societies: „**Fatigue Assessment of Ship Structures**“, Recommendation no. 56, London, 1999.
- [49] International Association of Classification Societies: „**Welding Procedure Qualification Tests of Steels for Hull Construction and Marine Structures**“, Unified Requirements no. 28, London, 2012.
- [50] International Association of Classification Societies: „**Use of Steel Grades for Various Hull Members – Ships of 90 m in Length and Above**“, Recommendation no. URS 6, Rev. 7, London, 2013.
- [51] International Association of Classification Societies: „**Shipbuilding and Repair Quality Standard**“, Recommendation no. 47, London, 2017.
- [52] Jang, G. B., Kim, H. K. i Kang, S. S.: „**The Effects of Root Opening on Mechanical Properties, Deformation and Residual Stress of Weldments**“, Welding Research Supplement, ožujak 2001, str. 80–89.
- [53] Jeffus, L.: „**Welding Principles and Applications**“, sedamnaesto izdanje, Delmar, New York, 2012.

- [54] Jonsson, B., Dobmann, G., Hobbacher, A. F., Kassner, M., Marquis, G.: „**IIW Guidelines on Well Quality in Relationship to Fatigue Strength**“, International Institute of Welding, Paris, 2016.
- [55] Kamble, A.G., Rao, R.V., Kale, A.V.: „**Development of Mathematical Models for Prediction of Weld Bead Geometry for AISI 430 Grade of Steel for GMAW Welding Process**“, International Journal of Manufacturing Technology and Industrial Engineering, Volume 1, No. 1, January – June 2011., str. 1–6.
- [56] Karaoğlu, S., Seçgin, A.: „**Sensitivity Analysis of Submerged Arc Welding Process Parameters**“, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 202 (2008), str. 500–507.
- [57] Kasuya, T., Yurioka, N.: „**Effects of Ambient Temperature on Steel Weldability**“, Welding International, 1992, Volume 6, Issue 2, str. 145–150.
- [58] Kim, I. S., Kwon, W. H., Park, C. E.: „**The Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Width in GMAW Processes**“, Journal of KWS, Vol. 14, No. 4, 1996, str. 204–213.
- [59] Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I., Ma, K. –T.: „**Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques, Part 1: Review**“, Marine Structures, Vol. 12 (1999) str. 447–474.
- [60] Kiyak, Y., Madia, M., Zerbst, U.; „**Extended Parametric Equations for Weld Toe Stress Concentration Factors and Through-thickness Stress Distributions in Buttwelded Plates Subject to Tensile and Bending Loading**“, Weld World, Vol, 60, (2016), str. 1247–1259, DOI 10.1007/s40194-016-0377
- [61] Kobayashi, H., Onoue, H.: „**Brittle Fracture of Liberty Ships**“, Failure Knowledge Database, Oregon State, ožujak 1943.
- [62] Kozak, J., Górski, Z.: „**Fatigue Strength Determination of Ship Structural Joints, Part I, Analytical Methods for Determining Fatigue Strength of Ship Structures**“, Polish Maritime Research Vol 18, (2011). str. 28–36.



- [63] Kumar, R., Chattopadhyaya, S., Kumar, S.: „**Prediction of Bead Reinforcement Height and Width of Gas Tungsten Arc Welded Bead-on Plate Joints Using Artificial Neural Network**“, 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th – 14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India, str. 596-1–596-6.
- [64] Lawrence, F. V.: „**Estimation of Fatigue-Crack Propagation Life in Butt Welds**“, Welding Research Supplement, svibanj 1973. str. 212–220.
- [65] Lawrence, F. V., Mattos, R.J., Higashida, Y., Burk, J. D.: „**Estimating the Fatigue Crack Initiation Life of Welds**“, American Society for Testing and Materials, 1978. str.134 –158.
- [66] Lawrence, F. V., Ho, N., Mazumdar, P. K.: „**Predicting the Fatigue Resistance of Welds**“, Ann. Rev. Mater. Sci., Vol. 11, 1981. str. 401–425.
- [67] Lechner, C., Bleicher, F., Habersohn, C., Bauer, C., Goessinger, S.: “**The Use of Machine Hammer Peening Technology for Smoothing and Structuring of Surfaces**”, 23<sup>rd</sup> DAAAM Symposium, Volume 23, No. 1, Beč, Austria, 2012.
- [68] Lehrke, H. P.: „**Berechnung von Formzahlen für Schweißverbindungen**“, Konstruktion, Vol. 51, 1/2, 1999. str. 47–52. (na njemačkom)
- [69] Lincoln Electronics, „**Welding Consumables Product Catalogue**“, str. 427–428, 2021.
- [70] Lindgren, E., Stenberg, T.: „**Quality Inspection and Fatigue Assessment of Welded Structures**“, Stockholm, Švedska, 2011.
- [71] Lončar, Đ., Bezjak, V., Damjanović, Z., Gordić, M., Rahle, Z.: „**Priručnik za zavarivanje**“, XI izdanje, Elektroda, Zagreb 1897.
- [72] Løseth, R., Sekkesæter, G., Valsgård, S.: „**Economics of High-Tensile Steel in Ship Hulls**“, Marine Structures 7 (1994) str 31 – 50.

- [73] Luo, Y., Ma, R., Tsutsumi, S.: „**Parametric Formulae for Elastic Stress Concentration Factor at the Weld Toe of Distorted Butt-Welded Joints**”, *Materials*, Vol. 13, Issue 169, 2020. doi:10.3390/ma13010169
- [74] Mahmoud, H. N., Dexter, R. J.: „**Propagation Rate of Large Cracks in Stiffened Panels Under Tension Loading**“, *Marine Structures* 18 (2005), str. 265–288.
- [75] Malin, V.: „**Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: Part 2 – Effect of Joint Geometry**“, *Welding Research Supplement*, rujun 2001, str. 227–237.
- [76] Mathews, P.: „**Design of Experiments with MINITAB**“, American Society for Quality, Milwaukee, 2005.
- [77] Meden, G., Pavelić, A., Pavletić, D.: „**Osnove zavarivanja**“, Tehnički fakultet, Rijeka 2000.
- [78] Milićević, R. M.: „**Zavarivanje**“, AGM knjiga, Beograd, 2011.
- [79] Mistry, P. J.: „**Effect of Process Parameters on Bead Geometry and Shape Relationship of Gas Metal Arc Weldments**“, *International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering & Technology*, Vol. 2, issue 2, 2016. str. 24–27.
- [80] Montgomery, D. C.: „**Design and Analysis of Experiments**“, 5th edition, John Wiley & Sons, inc., Arizona State University, 2001.
- [81] Montgomery, D. C., Runger, G. C.: „**Applied Statistic and Probability for Engineers**“, 3rd edition, John Wiley & Sons, inc., Arizona State University, 2003.
- [82] Moore, H. F., Kommers J. B.: „**The Fatigue of Metals**“, McGraw-Hill, New York, USA, 1927.
- [83] Moore, P. L.: „**The Importance of Welding Quality in Ship Construction**“, *Analysis and Design of Marine Structures*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Marine Structures (MARSTRUCT 2009), March 16 – 18, 2009., Lisbon, Portugal.

- [84] Mostafa, N. B., Khajavi, M. N.: „**Optimisation of Welding Parameters for Weld Penetration in FCAW**“, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 16, Issue 1-2, svibanj – lipanj 2006., str. 132–138.
- [85] Mukhopadhyay, P., Chattopadhyaya, S., Bhatia, S., Singh, N. K., Mukhopadhyay, A. K.: „**Prediction of Weld Parameters in Gas Metal Arc Welding Process Using Curve Fitting Techniques and Graphical Methods**“, Advanced Materials Research, Vols. 652-654, 2013, str. 2352–2356.
- [86] Murugan, N., Gunaraj, V.: „**Prediction and Control of Weld Bead Geometry and Shape Relationship in Submerged Arc Welding of Pipes**“, Journal of Materials Processing Technology, Volume 168, (2005), str. 478–487.
- [87] Nabendu, G., Pradip Kumar, P., Goutam, N.: „**Ensuring Weld Quality in Metal Inert Gas Welding of AISI 409 Ferritic Stainless Steel**“, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, Issue 5, Volume 1, January – February 2015., str. 109–114.
- [88] Newmark, N. M.: „**Bibliography of Fatigue Data References for Steel Structures**“, Illinois Cooperative Highway Research program, University of Illinois, lipanj 1973.
- [89] Nguyen, T. N., Wahab, M. A.: „**The Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on The Fatigue of Welded Joints Under Combined Loading**“, Journal of Materials Processing Technology (77), 1998, str. 201–208.
- [90] Niemi, E.: „**Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components**“, Abington Publishing, Cambridge, 1995.
- [91] Niemi, E., Fricke, W., Maddox, S. J.: „**Fatigue Analysis of Welded Components**“, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2006.
- [92] North, R. C.: „**Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques**“, Ship Structure Committee, Washington 1997.
- [93] Ohta, A., Mawari, T., Suzuki, N.: „**Evolution of Effect of Plate Thickness on Fatigue Strength of Butt Welded Joints by a Test Maintaining Maximum Stress at Yield Strength**“, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 37, no. 5, 1990. str. 987–993.

- [94] den Ouden, G., Hermans, M.: **“Welding Technology”**, VSSD, Delft, The Netherlands, 2009.
- [95] Pachoud, A. J., Manso, P. A., Schleiss, A. J.: **„New Parametric Equations to Estimate Notch Stress Concentration Factors at Butt Welded Joints Modeling the Weld Profile With Splines“**, Engineering Failure Analysis, Vol. 72, 2017. str. 11–24., doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.11.006
- [96] Papračanin, E.: **“Local and Global Sensitivity Analysis of Model Parameters for Composting Process“**, Technologica Acta, Vol. 11 (2019), no. 2, str. 9–16.
- [97] Pang, H. L. J.: **„Analysis of weld toe radius effects on fatigue weld toe cracks“**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, (58), 1994, str. 171–177.
- [98] Peng, T.: **„Algorithms and Models for 3-D Shape Measurement Using Digital Fringe Projections“**, Maryland, 2006.
- [99] Perović, D. Z.: **„The Weld Profile Effect on Stress Concentration Factors in Weldments“**, 15th International Research / Expert Conference ”Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, Prague, 2011.
- [100] Pilkey, W. D., Pilkey, D. F.: **„Peterson's Stress Concentration Factors“**, John Wiley & sons, Inc, treće izdanje, New Jersey, 2007.
- [101] Pollard, B., Cover, J.: **„Fatigue of Steel Weldments“**, Canadian Welding Metalworking Exposition and Conference, Toronto, studeni, 1972.
- [102] Potter, J. M.: **„A General Fatigue Prediction Method Based on Neuer Notch Stresses and Strains“**, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Ohio, 1972.
- [103] Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, W.: **„Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches“**, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2006.
- [104] Randić, M., Pavletić, D., Turkalj, G.: **„The Measurement of Weld Surface Geometry“**, XVII simpozij International Maritime Association of the Mediteranean, Lisabon, 2017.

- [105] Randić, M., Pavletić, D., Turkalj, G.: „**Multiparametric investigation of welding techniques on toe radius of high strength steel at low-temperature levels using 3D-scanning techniques**“, Metals, Volume 9, Issue 12, Basel. Švicarska, prosinac 2019.
- [106] Rankine, W. J. M.: „**On the Causes of the Unexpected Breakage of the Journals of Railway Axles, and on the Means of Preventing Such Accidents by Observing the Law of Continuity in Their Construction**“, Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 2 (1843), str. 105–107. doi:10.1680/imotp.1843.24600
- [107] Rowlands, H., Antony, J.: “**Application of Design of Experiments to a Spot Welding Process**“, Assembly Automation – The International Journal of Assembly Technology and management, Volume 23, Number 3 (2003), str. 273–279.
- [108] Smith, R. A., Hillmansén, S.: „**A Brief Historical Overview of the Fatigue of Railway Axles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F**“, Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 218, Issue. 4, 2004, str 267–277, doi:10.1243/0954409043125932
- [109] Stenberg, T., Lindgren, E., Barsoum, Z.: „**Development of an Algorithm for Quality Inspection of Welded Structures**“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 226, 2012, str. 1033–1041
- [110] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O.: „**Metal Fatigue in Engineering**“, second edition, Canada 2001. str. 402.
- [111] Sudhakaran, R., VeL Murugan V., Senthil Kumar, K. M., Jayaram R., Pushparaj, A., Praveen, C., Venkat Prabhu N.: „**Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Geometry and Optimization of Process Parameters to Maximize Depth to Width Ratio for Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welded Plates Using Genetic Algorithm**“, European Journal of Scientific Research, Vol. 62, No.1 (2011), str. 76–94.

- [112] Teng, T-L., Fung, C-P., Chang, P-H.: „**Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on Fatigue in Butt Welded Joints**“, International Journal of Pressure Vessels and Piping, (79), 2002, str. 467–482.
- [113] Timoshenko, S. P.: „**History of Strength of Materials**“, McGraw-Hill, New York, USA, 1953.
- [114] Ushirokawa O, Nakayama E (1983) „**Stress Concentration Factor at Welded Joints**“. Ishikawajima-Harima Gihou (Technical Report) 23(4) (in Japanese).
- [115] Vukšić, J., Grbin, M.: „**Priprema krajeva limova i cijevi prije zavarivanja elektrolučnim postupkom**“, 8. seminar Suvremene tehnike zavarivanja i rezanja pri izradi metalnih konstrukcija, Pula 2012.
- [116] Wu, C. S., Zhang, M. X., Li, K. H., Zhang, Y. M.: „**Numerical Analysis of Double-electrode Gas Metal Arc Welding Process**“, Computational Materials science 39 (2007), str. 416–423.
- [117] Xuewei, H., Suning, B., Jing, W.: „**An Optimization Design for Coefficient of Weld Reinforcement in Rapid Prototyping based on Robotic Pulse MAG Forming**“, Applied Mechanics and Materials, Vols. 217 – 219, 2012., str. 2148–2153.
- [118] Young, W. C., Budynas, R. G.: „**Roark’s Formulas for Stress and Strain**“, sedmo izdanje, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2002.
- [119] Yung, J., Lawrence, F. V.: „**Analytical and Graphical Aids for the Fatigue Design of Weldments**“, Fatigue Fract. Engng Mater Struct., Vol. 8, no. 3, 1985. str. 223–241.
- [120] Yurioka, N., Kasuya, T.: „**A Chat Method to Determine Necessary Preheat Temperature in Steel Welding**“, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol 13, No. 3 (1995), str. 347–357.
- [121] Zhu, Z., Li, Y., Zhang, M., Hui, C.: „**Effects of Stress Concentration on the Fatigue Strength of 7003-T5 Aluminum Alloy Butt Joints with Weld Reinforcement**“, International Journal of Modern Physics B, Vol. 29, Nos. 10 & 11, 2015.
- [122] Žiha, K., Kodvanj, J., Ljubenković, B., Bakić, A.: „Značaj eksperimentalne mehanike u brodogradnji“, XX Symposium SORTA, Zagreb 2012

- [123] Živčić, M.: „**MIG/MAG zavarivanje**“, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb, 1986.
- [124] ... Acquisition Basic, GOM Software, Braunschweig, Njemačka, 2016.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

### Oznake

$A$	neto površina poprečnog presjeka, $\text{mm}^2$
$a$	dubina zareza u osnovni materijal, mm
Adj SS	zbroj kvadrata odstupanja vrijednosti varijable od prosjeka
Adj MS	sredina zbroja kvadrata pogreške pokusa
$a_i$	udaljenost lokalnog naprezanja od površine materijala, mm
Ar	argon
$a_1$	koeficijent za izračun faktora koncentracije naprezanja prema Goou
C	koeficijent za izračun faktora korekcije naprezanja prema Fujisakiju i suradnicima
c	koeficijent za izračun faktora koncentracije naprezanja prema Goou
C(a/t)	korekcijski faktor za nedostatak provara prema Ushirokawi i Nakayami
$C_{eq}$	ekvivalent ugljika, %
DF	stupnjevi slobode u statističkoj analizi (engl. <i>degrees of freedom</i> )
$d_z$	promjer žice dodatnog materijala, mm
$F$	sila, N
F-Value	omjer objašnjene varijance i neobjašnjene varijance
$f(\theta)$	korekcijski faktor za kut nadvišenja sljemena šava prema Ushirokawi i Nakayami
$G$	zračnost u korijenu zavara, mm
$g(\varphi)$	korekcijski faktor za radijus ruba šava prema Ushirokawi i Nakayami
$h$	visina nadvišenja sljemena šava, mm
$I$	jakost struje zavarivanja, A
$K_t$	faktor koncentracije naprezanja
m	koeficijent koji ovisi o kutu nadvišenja sljemena šava



$p$	poluparametar parabole, mm
PA	vodoravni položaj zavarivanja
PB	kutni vodoravni položaj zavarivanja
PC	zidni vodoravni položaj
PD	kutni nadglavni položaj zavarivanja
PE	nadglavni položaj zavarivanja
PF	zidni položaj zavarivanja prema gore
PG	zidni položaj zavarivanja prema dolje
F-Value	empirijska razina značajnosti varijable na izlazni parametar
$Q$	količina protoka zaštitnog plina, lit / min
R	koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja
R-sq	odstupanja dobivenih podataka od modela
R-sq(adj)	prilagođen R-sq
R-sq(pred)	predviđeni R-sq
S	standardna devijacija ulaznih podataka od očekivane vrijednosti
$t$	debljina osnovnog materijala, mm
$t_m$	vrijeme, s
$T_{pred}$	temperatura predgrijavanja, °C
$U$	napon struje zavarivanja, V
Uh	utjecaj visine nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja
Ut	utjecaj debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije naprezanja
UW	utjecaj širine šava na faktor koncentracije naprezanja
$U_\phi$	utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja
$U_\theta$	utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja

$v_z$	brzina prolaza zavarivanja, mm / min
$W$	širina šava, mm
$W_{\text{zarež}}$	širina zareza u rubu šava, mm
$\alpha$	koeficijent koji ovisi o vrsti naprezanja i geometriji zavarenog spoja
$\beta$	koeficijent koji ovisi o obliku zavarenog spoja
$\beta_1$	koeficijent za izračun faktora koncentracije naprezanja prema Goou
$\Delta$	koeficijent za izračun faktora koncentracije naprezanja prema Goou
$\partial F$	parcijalna derivacija funkcije
$\sigma$	naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_a$	amplituda ciklusa naprezanja, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e$	granica razvlačenja, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{lok}}$	lokalno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_m$	vlačna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{max}}$	maksimalno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{min}}$	minimalno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{nom}}$	nominalno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$	srednje naprezanje ciklusa, N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	produljenje, %
$\lambda$	eksponent koji ovisi o obliku zavarenog spoja
$\varphi$	radijus ruba šava, mm
$\varphi_{\text{zarež}}$	radijus zareza u osnovnom materijalu, mm
$\theta$	kut nadvišenja sljemena šava, °
$\phi$	kut otvora žlijeba, °

## Kratice

BW	sučeljni spoj
CO <sub>2</sub>	ugljični dioksid
DOE	metoda planiranja pokusa (engl. <i>Design of Experiments</i> )
ECCC	Europsko udruženje za puzanje materijala (engl. <i>European Creep Collaborative Committee</i> )
FEM	metoda konačnih elemenata (engl. <i>Finite Elements Method</i> )
FSL	filtrirano strukturirano svjetlo (engl. <i>Filtered Structured Light</i> )
HRB	Hrvatski registar brodova
IACS	Međunarodno udruženje klasifikacijskih društava (engl. <i>International Association of Classification Societies</i> )
IRSL	infracrveno strukturirano svjetlo (engl. <i>InfraRed Structured Light</i> )
ISL	neprijetno strukturirano svjetlo (engl. <i>Imperceptible Structured Light</i> )
LCD	projekcija pomoću tekućih kristala (engl. <i>Liquid Crystal Display</i> )
LSP	snimanje zavara laserom (engl. <i>Laser Scanning Profiling</i> )
m/t	motorni tanker
MAG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (engl. <i>Metal Active Gas</i> )
MIG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (engl. <i>Metal Inert Gas</i> )
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
SLP	snimanje zavara pomoću projekcije strukturiranog svjetla (engl. <i>Structured Light Projection</i> )
TIG	netaljiva elektroda u zaštiti inertnog plina (engl. <i>Tungsten Inert Gas</i> )

- ULCC      veoma veliki brodovi za prijevoz sirove nafte nosivosti preko 400.000t (engl. *Ultra Large Crude Carriers*)
- VLCC      jako veliki brodovi za prijevoz sirove nafte nosivosti preko 300.000t (engl. *Very Large Crude Carriers*)
- WIA      metoda snimanja otiska zavara (engl. *Weld Impression Analyses*)
- WPS      proizvođačeva radna uputa za zavarivanje (engl. *Welding Procedure*)

## POPIS SLIKA

	Stranica
1.1. Pukotina na tankeru „CASTOR“ . . . . .	2
1.2. Pukotina na radijusu ruba šava na glavnoj palubi tankera . . . . .	3
1.3. Pukotina na radijusu ruba šava na vanjskoj oplati na brodu namjenenom za prijevoz asfalta tankeru . . . . .	3
1.4. Ciklusi naprezanja . . . . .	6
1.5. Dijagram toka plana istraživanja . . . . .	14
2.1. Čvrstoća nekoliko vrsta zavarenih spojeva u odnosu na lim bez zavara . . . . .	17
2.2. Elementi „V“ žlijeba . . . . .	18
2.3. Elementi šava sučeljno zavarenog spoja . . . . .	19
2.4. Utjecajne geometrijske veličine sučeljno zavarenog spoja . . . . .	20
2.5. Konturni dijagram koncentracije naprezanja u rubu šava zavara . . . . .	24
2.6. Maksimalno i nominalno naprezanje . . . . .	25
2.7. Vrijednosti faktora koncentracije naprezanja ovisno o obliku sučeljno zavarenog spoja . . . . .	27
2.8. Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja . . . . .	32
2.9. Utjecaj omjera širine šava i debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije . . . . .	32
2.10. Utjecaj omjera visine nadvišenja sljemena šava i debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije naprezanja . . . . .	33
2.11. Utjecaj omjera debljine osnovnog materijala i radijusa na rubu šava na faktor koncentracije naprezanja . . . . .	33
2.12. Usporedba rezultata dobivenih pomoću izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja . . . . .	36
2.13. Geometrijski model utjecaja debljine osnovnog materijala . . . . .	37

---

2.14.	Faktor koncentracije naprezanja za kutove nadvišenja sljemena zavara . . . . .	38
2.15.	Dijagram utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja s obzirom na omjer radijusa na rubu šava i debljine osnovnog materijala . . . . .	39
2.16.	Dijagram utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja s obzirom na radijus ruba šava i debljinu osnovnog materijala . . . . .	40
2.17.	Koncentracija naprezanja u zavarenom spoju . . . . .	42
2.18.	Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja . . . . .	43
2.19.	Utjecaj protoka zaštitnog plina, jakosti struje zavarivanja, brzine zavarivanja te napona zavarivanja na širinu šava zavarenog spoja s obzirom na dijametar dodatnog materijala . . . . .	45
3.1.	Model procesa eksperimenta . . . . .	50
3.2.	Gantogram provedbe istraživanja . . . . .	53
3.3.	Temperature predgrijavanja prema debljini osnovnog materijala . . . . .	57
3.4.	Oblici poprečnog presjeka praškom punjene žice . . . . .	59
3.5.	Princip zavarivanja MIG / MAG . . . . .	62
3.6.	Utjecaj kuta otvora žljeba na izdržljivost prilikom dinamičkih ispitivanja . . . . .	64
3.7.	Kut dodatnog materijala . . . . .	68
3.8.	Kretanje elektrode u završnom sloju . . . . .	69
3.9.	Duljina slobodnog kraja žice . . . . .	70
3.10.	Geometrijski izgled poprečnog presjeka zavarenog spoja s obzirom na vrstu zaštitnog plina . . . . .	71
3.11.	Poprečni presjek sučelnog zavarenog spoja s prikazanim zarezom na rubu šava	74

---

4.1.	Zavareni uzorci . . . . .	75
4.2.	Gantogram analize geometrijskih veličina zavarenog spoja . . . . .	76
4.3.	Lisnato mjerilo za mjerenje radijusa . . . . .	82
4.4.	Skeniranje uzoraka 3D skenerom . . . . .	84
4.5.	Grafički prikaz uzorka B3 nakon učitavanja u računalni program „ <i>GOM inspect</i> “	85
4.6.	Uzorak B3 s označenim pojasevima . . . . .	86
4.7.	Grafički prikaz presjeka X=20,00 mm, za uzorak B3 . . . . .	86
4.8.	Grafički prikaz kuta osnovnog materijala na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 . . . . .	88
4.9.	Direktno mjerenje na uzorku B3 za presjek X=20,00 mm lijevo . . . . .	89
4.10.	Radijus ruba šava zavara u „ <i>GOM inspect-u</i> “ . . . . .	90
4.11.	Usporedba tri metode mjerenja radijusa ruba šava za uzorak B3 . . . . .	93
4.12.	Određivanje kuta nadvišenja sljemena šava na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 s lijeve strane . . . . .	94
4.13.	Grafički prikaz kuta nadvišenja sljemena šava na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 s lijeve strane . . . . .	95
4.14.	Grafički prikaz visine nadvišenja sljemena šava na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 . . . . .	96
4.15.	Grafički prikaz širine šava zavarenog spoja na presjeku X=20,00 mm, za uzorak B3 . . . . .	97
4.16.	Dijagrami promjene geometrijskih faktora koncentracije naprezanja po dužini zavarenog spoja uzorka B3 . . . . .	99
5.1.	Utjecaj parametara zavarivanja na faktor koncentracije naprezanja . . . . .	108
5.2.	Dijagram međudjelovanja parametara zavarivanja . . . . .	111

---

5.3.	Parametri zavarivanja u kojima se javljaju najmanje koncentracije naprezanja . .	112
P1.1.	Utjecaj debljine osnovnog materijala . . . . .	P-3
P1.2.	Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava . . . . .	P-4
P1.3.	Utjecaj radijusa ruba šava . . . . .	P-5
P1.4.	Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava . . . . .	P-6
P1.5.	Dijagram utjecaja širine šava . . . . .	P-7
P2.1.	Utjecaj debljine osnovnog materijala na geometrijski faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici . . . . .	P-11
P2.2.	Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama . . . . .	P-12
P2.3.	Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici . . . . .	P-13
P2.4.	Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo . . . . .	P-14
P2.5.	Utjecaj radijusa rubu šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama . . . . .	P-15
P2.6.	Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici . . . . .	P-16
P2.7.	Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo . . . . .	P-17
P2.8.	Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo . . . . .	P-18
P2.9.	Utjecaj širine šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo . . . . .	P-19



## POPIS TABLICA

	Stranica
3.1. Ulazni faktori u procesu zavarivanja te izlazi iz procesa . . . . .	54
3.2. Obični brodograđevni čelici i čelici povišene čvrstoće . . . . .	56
3.3. Kemijski sastav osnovnog materijala korištenog u istraživanju . . . . .	56
3.4. Karakteristike dodatnih materijala . . . . .	60
3.5. Korišteni postupci zavarivanja . . . . .	60
3.6. Korišteni način zavarivanja . . . . .	61
3.7. Promjenjivi kontrolirani ulazni faktori . . . . .	66
3.8. Plan pokusa . . . . .	67
3.9. Podjela zaštitnih plinova . . . . .	72
4.1. Usporedba rezultata mjerenja radijusa ruba šava za uzorak B3 . . . . .	92
4.2. Analiza geometrijskih parametara zavarenog spoja za uzorak B3 . . . . .	98
4.3. Izračunati faktori koncentracije naprezanja za uzorak B3 . . . . .	101
4.4. Najveći faktori koncentracije naprezanja za svaki pojas na svakom uzorku . . . . .	102
5.1. Usporedba oznake razine prilikom pokusa i u „ <i>MINITAB 20.3</i> “ . . . . .	105
5.2. Oznake parametara zavarivanja u „ <i>MINITAB 20.3</i> “ . . . . .	106
5.3. Očekivane vrijednosti $K_t$ za optimalan model parametra zavarivanja . . . . .	113
5.4. Parametri zavarivanja u kojima se javljaju najmanje koncentracije naprezanja . . . . .	113
P1.1. Područje analize osjetljivosti funkcija . . . . .	P-1

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Kristić, A., Randić, M.; „**Prijevoz krutih rasutih tereta morem koji su skloni likvifikaciji**“, „Naše more“ 60(1-2)/2013., str. 16–20. – stručni članak
2. Randić, M.: „**Razvoj pravila za sredstva za suho spašavanje od „Titanica“ do „Costa Concordie“, te vizija za budućnost**“, XXI. simpozij Teorija i praksa brodogradnje Sorta 2014, Baška, 2014.
3. Randić, M., Pavletić, D., Sedmak, F.: „**Analiza pogrešaka u zavarenim spojevima na novogradnjama s gledišta postupka zavarivanja i vrste pogreške**“, XXI. simpozij Teorija i praksa brodogradnje Sorta 2014, Baška, 2014.
4. Randić, M., Matika, D., Možnik, D.: „**SWOT Analysis of Deficiencies on Ship Components Identified by Port State Control Inspections with the Aim to Improve the Safety of Maritime Navigation**“, „Brodogradnja“, Volume 66, Number 3, Zagreb 2015. – review article
5. Randić, M., Pavletić, D., Sedmak, F.: „**Primjena metode potpunog faktorijalnog eksperimenta u analizi rezultata dobivenih prilikom ispitivanja zavarenih spojevima na novogradnjama**“, XXII. simpozij Teorija i praksa brodogradnje Sorta 2016, Trogir, 2016.
6. Randić, M., Pavletić, D., Turkalj, G.: „**The Measurement of Weld Surface Geometry**“, XVII. simpozij International Maritime Association of the Mediterranean, Lisbon, 2017.
7. Randić, M., Pavletić, D., Turkalj, G., Vidolin, T., Šuper, M.: „**Measurement of Weld Surface Geometrical Properties**“, 9. International Scientific Professional Conference Simposium, Slavonski Brod, 2017.
8. Randić, M., Pavletić, D., Bevandić, I., Jerčić, D.: „**Impact of Welding Methods on Toe Radius in Welded Joint**“, XXIII. simpozij Teorija i praksa brodogradnje Sorta 2018, Split, 2018.
9. Pavletić, D., Randić, M.: „**Effect of Welding Parameters on Weld Quality for High-Strength Steel Used at Low Temperature (EH36)**“, The 4th International Symposium of Maritime Sciences, Kobe, Japan, 2019.

10. Randić, M., Pavletić, D., Turkalj, G.: „**Multiparametric investigation of welding techniques on toe radius of high strength steel at low-temperature levels using 3D-scanning techniques**“, Metals, Volume 9, Issue 12, Basel. Švicarska, prosinac 2019. scientific article
11. Randić, M., Pavletić, D., Bevandić, I., Jerčić, D.: „**Impact of Welding Parameters on Weld Quality for High-Strength Steel Used at Low Temperature (EH36)**“, XXIV simpozij Teorija i praksa brodogradnje Sorta 2020, Malinska, listopad 2020. (online simpozij)
12. Randić, M., Pavletić, D., Fabić, M.: „**Evaluation of the Stress Concentration Factor in Butt Welded Joints: A Comparative Study**“, Metals, Volume 11, Issue 3, Basel. Švicarska, ožujak 2021. scientific article
13. Randić, M., Pavletić, D.: „**Measuring of the Weld Toe Radius by Nondestructive Techniques**“, My First Conference, Rijeka, 23. rujna 2021. (video prezentacija)
14. Randić, M., Pavletić, D., Potkonjak, Ž.: „**The Influence of Heat Input on the Formation of Fatigue Cracks for High-Strength Steels Resistant to Low Temperatures**“, Metals, Volume 12, 929, Basel. Švicarska, svibanj 2022. scientific article

## POPIS PRIVITAKA

- Privitak 1** Analiza osjetljivosti izraza za izračun faktora koncentracije naprežanja
- Privitak 2** Analiza utjecajnih geometrijskih veličina pomoću računalnog programa „*Wolfram Mathematica 10.3*“
- Privitak 3** Potvrda za osnovni materijal brodograđevni čelik oznake EH36 korišten u istraživanju
- Privitak 4a** Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje br. D014, „Dalmont“, d.o.o.
- Privitak 4b** Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje br. D015, „Dalmont“, d.o.o.
- Privitak 5a** Potvrda za dodatni materijal „Lincoln“, Outershield 71E-H
- Privitak 5b** Potvrda za dodatni materijal „Hyundai“, Supercored 71
- Privitak 6** Ispis iz računalnog programa „*Wolfram Mathematica*“ za izračun faktora koncentracije naprežanja za uzorak B3 na presjeku 20 mm
- Privitak 7** Ispis iz računalnog programa „*MINITAB 20.3*“ – analiza tehnika zavarivanja, prema izrazu kojega su predložili Ushirokawa i Nakayama

### **Privitak 1** Analiza osjetljivosti izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja

U poglavlju 2.6 prikazano je šest izraza koji su dostupni u literaturi, a pomoću kojih se može izračunati faktor koncentracije naprezanja u sučeljno zavarenim spojevima. Četiri izraza uzimaju u obzir svih pet utjecajnih geometrijskih veličina, dok dva uzimaju samo četiri utjecajne geometrijske veličine. Izrazi koje su predložili Kiyak i suradnici te Pachoud i suradnici ne uzimaju u obzir širinu zavarenog spoja.

Kao što je navedeno u poglavlju 2.8, sve geometrijske veličine ne utječu jednako na faktor koncentracije naprezanja. Zbog toga je napravljena analiza osjetljivosti izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja s ciljem utvrđivanja koja utjecajna geometrijska veličina više, a koja manje utječe na faktor koncentracije naprezanja. Na taj način će se geometrijskim veličinama koje više utječu na faktor koncentracije naprezanja posvetiti više pažnje prilikom izvođenja pokusa [18, 56, 96].

Analiza osjetljivosti daje informaciju kako ulazni parametri utječu na izlaze iz procesa. U ovom slučaju, za analizu osjetljivosti izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja definiran je model ulaznih geometrijskih veličina prema tablici P1.1.

**Tablica P1.1.** Područje analize osjetljivosti funkcija

Geometrijska veličina	Područje uobičajenih vrijednosti	Točka u kojima je analizirana osjetljivost
Debljina osnovnog materijala	od 4 mm do 30 mm	6 mm i 20 mm
Kut nadvišenja sljemena šava	od 0° do 60°	10° i 50°
Radijus ruba šava	od 0 mm do 4 mm	0,5 mm i 3 mm
Visina nadvišenja sljemena šava	od 0 mm do 3 mm	1 mm i 2 mm
Širina šava	od 10 mm do 30 mm	15 mm i 25 mm

U provedenoj analizi osjetljivosti varirani su ulazni parametri modela unutar područja koje je prikazano u tablici P1.1. Analiza osjetljivosti nastoji utvrditi kako geometrijske veličine utječu na izlaz iz procesa, odnosno na faktor koncentracije naprežanja.

Osjetljivost se može interpretirati pomoću definicije derivacije. Odnosno, analiza osjetljivosti može definirati koliko nezavisna varijabla u modelu utječe na izlaze iz procesa. Derivacija opisuje brzinu promjene funkcije u odnosu na promjenu nezavisne varijable. Pozitivna vrijednost derivacije izražava pozitivnu osjetljivost nezavisne varijable na konačni rezultat, a negativna vrijednost izražava negativnu osjetljivost.

Uz pomoć računalnog programa „*Wolfram Mathematica 10.3*“ određena je parcijalna derivacija svakog od šest izraza za izračun faktora koncentracije naprežanja, po svakoj geometrijskoj veličini. Rezultati su prikazani u obliku dijagrama, koji se nalaze u svakom poglavlju, za svaku geometrijsku veličinu. Prikazani su rezultati za po dvije točke za svaku geometrijsku veličinu. Analizirane su vrijednosti u dvije točke u području uobičajenih vrijednosti za svaku geometrijsku veličinu. Uzeta je po jedna točka na početku i jedna na kraju područja u kojemu se očekuju vrijednosti geometrijskih veličina, tablica P1.1.

#### A Debljina osnovnog materijala

Utjecaj debljine osnovnog materijala dobiven je prema izrazu (P1.1), a prikazan je na slici P1.1.

$$Ut = \left( \frac{\partial F_{\text{(Nishida, Ushirokawa i Nakayama, Fujisaki i sur., Goo, Kijak i sur., Pachourd i sur.)}}}{\partial t} \right)_{\text{za } t=6 \text{ i } 20 \text{ mm}} \quad (P1.1)$$

D mm	h mm	W mm	t mm	Pachoud i suradnici		Kiyak i suradnici		Goo		Fujisaki i suradnici		Ushirokawa i Nakayama		Nishida		
				↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	
0,5	1	15	25	1	2	0,0206	0,0277	0,0211	0,0240	0,0423	0,0045					
				2	2	0,0223	0,0284	0,0030	0,0319	0,0487	0,0085					
		6	25	1	2	0,0206	0,0277	0,0045	0,0240	0,0364	0,0080					
				2	2	0,0223	0,0284	0,0066	0,0319	0,0428	0,0127					
		10	25	1	2	0,0088	0,0084	-0,0008	-0,0010	0,0273	-0,0010					
				2	2	0,0095	0,0087	-0,0010	0,0035	0,0326	-0,0001					
	0,5	15	25	1	2	0,0088	0,0084	-0,0010	0,0020	0,0245	-0,0012					
				2	2	0,0095	0,0087	-0,0013	0,0073	0,0295	-0,0002					
		6	25	1	2	0,0554	0,0692	0,0108	0,0620	0,0895	0,0014					
				2	2	0,0598	0,0785	0,0168	0,0797	0,1230	0,0134					
		10	25	1	2	0,0553	0,0692	0,0203	0,0620	0,0733	0,0101					
				2	2	0,0598	0,0785	0,0309	0,0797	0,1034	0,0254					
	3	1	15	25	1	2	0,0236	0,0241	-0,0031	0,0012	0,0405	-0,0058				
					2	2	0,0254	0,0273	-0,0035	0,0125	0,0612	-0,0054				
			6	25	1	2	0,0236	0,0241	-0,0037	0,0084	0,0369	-0,0070				
					2	2	0,0254	0,0273	-0,0044	0,0215	0,0554	-0,0066				
			10	25	1	2	0,0101	0,0148	0,0021	0,0112	0,0132	0,0019				
					2	2	0,0109	0,0152	0,0028	0,0148	0,0152	0,0032				
		3	15	25	1	2	0,0101	0,0148	0,0022	0,0112	0,0114	0,0028				
					2	2	0,0109	0,0152	0,0031	0,0148	0,0134	0,0043				
			6	25	1	2	0,0043	0,0068	0,0001	-0,0005	0,0085	-0,0001				
					2	2	0,0046	0,0070	0,0001	0,0016	0,0102	0,0002				
			10	25	1	2	0,0043	0,0068	0,0002	0,0010	0,0076	-0,0002				
					2	2	0,0046	0,0070	0,0002	0,0034	0,0092	0,0002				
3		15	25	1	2	0,0270	0,0250	0,0092	0,0262	0,0279	0,0016					
				2	2	0,0292	0,0284	0,0126	0,0336	0,0384	0,0058					
		6	25	1	2	0,0270	0,0250	0,0097	0,0262	0,0229	0,0039					
				2	2	0,0292	0,0284	0,0139	0,0336	0,0323	0,0090					
		10	25	1	2	0,0115	0,0125	0,0004	0,0006	0,0126	-0,0018					
				2	2	0,0124	0,0141	0,0007	0,0054	0,0191	-0,0015					
3		15	25	1	2	0,0115	0,0125	0,0007	0,0037	0,0115	-0,0020					
				2	2	0,0124	0,0141	0,0011	0,0092	0,0173	-0,0017					

Slika P1.1. Utjecaj debljine osnovnog materijala

Iz slike P1.1. se može zaključiti da debljina osnovnog materijala malo utječe na geometrijski faktor koncentracije naprezanja. Manji utjecaj je zamijećen kod malih radijusa na rubu šava. Za manje debljine osnovnog materijala utjecaj je pozitivan, što znači da se povećanjem debljine osnovnog materijala povećava i geometrijski faktor koncentracije naprezanja. Izraz koji je predložio Nishida je pokazao malu osjetljivost u cijelom promatranom području.

### B Kut nadvišenja sljemena šava

Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava dobiven je prema izrazu (P1.2), a prikazan je na slici P1.2.

$$U_{\theta} = \left( \frac{\partial F_{(\text{Nishida, Ushirokawa i Nakayama, Fujisaki i sur., Goo, Kiyak i sur., Pachourd i sur.})}}{\partial \theta} \right)_{za \theta = 10^{\circ} i 50^{\circ}} \quad (P1.2)$$

D	t	h	Pachoud i suradnici		Kiyak i suradnici		Goo		Fujijsaki i suradnici		Ushirokawa i Nakayama		Nishida	
			↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
0.5	6	15	1	1,4504	2,1610	0,7316	1,9491	1,6643	0,6334					
			2	1,5653	2,2830	0,9160	2,0383	2,0550	0,7801					
		25	1	1,4504	2,1610	0,7709	1,9491	1,3861	0,6913					
			2	1,5633	2,2830	0,9754	2,0383	1,7637	0,8492					
	10	15	1	2,0565	3,2283	0,6940	2,4953	3,4610	0,5558					
			2	2,2194	3,4084	0,8823	3,0254	4,4111	0,8267					
		25	1	2,0565	3,2283	0,7819	2,5642	2,9210	0,6596					
			2	2,2194	3,4084	1,0177	3,1089	3,8282	0,9781					
	50	15	1	0,8824	-0,1507	0,4380	0,2091	0,2665	0,1518					
			2	0,9523	-0,0123	0,5161	0,2186	0,5225	0,2159					
		25	1	0,8824	-0,1507	0,4615	0,2091	0,4646	0,1667					
			2	0,9523	-0,0123	0,5496	0,2186	0,3666	0,2379					
3	6	15	1	1,2512	-0,0772	0,4355	0,3448	0,2917	0,0502					
			2	1,3503	0,1618	0,5423	0,4180	0,7257	0,1066					
	25	1	1,2512	-0,0772	0,4907	0,3543	0,1958	0,0604						
		2	1,3503	0,1618	0,6255	1,4295	0,4295	0,5382						
10	15	1	0,7083	0,8618	0,2552	0,8496	0,5193	0,2051						
		2	0,7644	0,9138	0,3194	0,8885	0,6412	0,2526						
	25	1	0,7083	0,8618	0,2501	0,8496	0,4325	0,2185						
		2	0,7644	0,9138	0,3164	0,8885	0,5503	0,2684						
50	6	15	1	1,0043	1,4705	0,3028	1,0983	1,0800	0,1939					
			2	1,0839	1,5580	0,3849	1,3316	1,3764	0,2884					
	25	1	1,0043	1,4705	0,3116	1,1286	0,9114	0,2233						
		2	1,0839	1,5580	0,4055	1,3684	1,1945	0,3311						
3	6	15	1	0,4309	-0,2057	0,1528	0,0588	0,0831	0,0491					
			2	0,4651	-0,1841	0,1800	0,0615	0,1630	0,0699					
	25	1	0,4309	-0,2057	0,1497	0,0588	0,0514	0,0527						
		2	0,4651	-0,1841	0,1783	0,0615	0,1144	0,0752						
50	6	15	1	0,6110	-0,3120	0,1900	0,1029	0,0910	0,0175					
			2	0,6594	-0,2658	0,2366	0,1284	0,2265	0,0372					
	25	1	0,6110	-0,3120	0,1955	0,1057	0,0611	0,0205						
		2	0,6594	-0,2658	0,2493	0,1282	0,1679	0,0437						

Slika P1.2. Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava

Kut nadvišenja sljemena šava ima velik utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Ovaj utjecaj je pozitivan u cijelom promatranom području, a to znači da se povećanjem kuta nadvišenja sljemena šava povećava i geometrijski faktor koncentracije naprezanja. Utjecaj je velik kod manjih kutova nadvišenja sljemena šava, dok je kod većih kutova utjecaj umjeren. Utjecaj je posebno izražen za male radijuse na rubu šava. Povećanjem kuta nadvišenja i povećanjem radijusa na rubu šava geometrijski faktor koncentracije naprezanja se smanjuje.

### C Radijus ruba šava

Utjecaj radijusa ruba šava dobiven je prema izrazu (P1.3), a prikazan je na slici P1.3.



$$U\varphi = \left( \frac{\partial F_{(\text{Nishida, Ushirokawa i Nakayama, Fujisaki i sur., Goo, Kiyak i sur., Pachourd i sur.})}}{\partial \varphi} \right)_{za \varphi=0,5 \text{ i } 3 \text{ mm}} \quad (P1.3)$$

φ mm	h mm	W mm	Pachoud i suradnici		Kiyak i suradnici		Goo		Fujisaki i suradnici		Ushirokawa i Nakayama		Nishida	
			↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
0,5	10	15	1	-0,3415		-0,3657		-0,1602		-0,3905		-0,4789		0,1673
			2	-0,3686		-0,3750		0,2021		-0,4084		-0,5560		0,2021
		25	1	-0,3415		-0,3657		-0,1804		-0,3906		-0,4153		0,1863
			2	-0,3686		-0,3750		-0,2300		-0,4084		-0,4901		0,2243
	20	15	1	-0,4842		-0,3855		-0,1189		-0,4823		-1,0870		0,1563
			2	-0,5226		-0,3953		-0,1516		-0,5847		-1,2648		0,2215
		25	1	-0,4842		-0,3855		-0,1484		-0,4956		-0,9469		0,1904
			2	-0,5226		-0,3953		-0,1940		-0,6009		-1,1211		0,2687
	50	15	1	-0,9166		-1,1830		-0,6300		-0,9699		-1,1714		0,4645
			2	-0,9892		-1,3416		-0,7743		-1,0142		-1,5715		0,5880
		25	1	-0,9166		-1,1830		-0,7094		-0,9699		-0,9356		0,5173
			2	-0,9892		-1,3416		-0,8811		-1,0142		-1,2974		0,6555
3	10	15	1	-1,2996		-1,5170		-0,4775		-1,2757		-2,2498		0,3289
			2	-1,4025		-1,7204		-0,6032		-1,5467		-3,1182		0,5099
	25	1	-1,2996		-1,5170		-0,5968		-1,3109		-1,8620		0,4020	
		2	-1,4025		-1,7204		-0,7717		-1,5894		-2,6431		0,6226	
3	10	15	1	-0,0280		-0,0321		-0,0093		-0,0303		-0,0249		0,0090
			2	-0,0300		-0,0330		-0,0117		-0,0317		-0,0289		0,0109
		25	1	-0,0278		-0,0321		-0,0098		-0,0303		-0,0216		0,0098
			2	-0,0300		-0,0330		-0,0124		-0,0317		-0,0255		0,0118
	20	15	1	-1,0394		-0,0494		-0,0086		-0,0374		-0,0565		0,0091
			2	-1,0425		-0,0507		-0,0110		-0,0454		-0,0658		0,0129
		25	1	-1,0394		-0,0494		-0,0099		-0,0385		-0,0492		0,0107
			2	-1,0425		-0,0507		-0,0129		-0,0466		-0,0583		0,0152
	50	15	1	-0,0746		-0,0683		-0,0366		-0,0681		-0,0609		0,0250
			2	-0,0805		-0,0774		-0,0450		-0,0712		-0,0817		0,0317
		25	1	-0,0746		-0,0683		-0,0384		-0,0681		-0,0487		0,0273
			2	-0,0805		-0,0774		-0,0476		-0,0712		-0,0675		0,0345
20	15	1	-0,1058		-0,1157		-0,0347		-0,0900		-0,1170		0,0191	
		2	-0,1142		-0,1313		-0,0439		-0,1091		-0,1622		0,0297	
	25	1	-0,1058		-0,1157		-0,0396		-0,0952		-0,0968		0,0227	
		2	-0,1142		-0,1313		-0,0513		-0,1121		-0,1375		0,0351	

**Slika P1.3.** Utjecaj radijusa ruba šava

Na slici P1.3. se može vidjeti da je utjecaj radijusa ruba šava negativan u cijelom promatranom području, a to znači da povećanjem radijusa ruba šava faktor koncentracije napreznja opada. Također se može vidjeti da mali radijusi ruba šava imaju puno veći utjecaj od velikih radijusa. Posebno velik utjecaj na faktor koncentracije napreznja ima mali radijus ruba šava i velik kut nadvišenja sljemena šava. Utjecaj radijusa ruba šava se može smatrati značajnim posebno za male radijuse, dakle kod malih radijusa za malu promjenu radijusa ruba šava javlja se velika promjena faktora koncentracije napreznja.

### D Visina nadvišenja sljemena šava

Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava dobiven je prema izrazu (P1.4), a prikazan je na slici P1.4.

$$U_h = \left( \frac{\partial F_{(Nishida, Ushirokawa \text{ i } Nakayama, Fujisaki \text{ i } sur., Goo, Kiyak \text{ i } sur., Pachoud \text{ i } sur.)}}{\partial h} \right)_{za \ h=1 \text{ i } 2 \text{ mm}} \quad (P1.4)$$

D mm	h mm	W mm	t mm	Pachoud i suradnici		Kiyak i suradnici		Goo		Fujisaki i suradnici		Ushirokawa i Nakayama		Nishida								
				-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+							
0,5	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0470	0,0164	0,0486	0,0513	0,0847	0,0437	
																						0,0253
	6	25	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0470	0,0164	0,0539	0,0513	0,0809	0,047
	10	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0666	0,024	0,0478	-0,1947	0,2043	0,0752
	6	20	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0666	0,024	0,0593	0,2001	0,1954	0,0881
	50	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,1260	0,176	0,1761	0,1126	0,418	0,1542
	6	25	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,1260	0,176	0,1961	0,1126	0,3654	0,1679
50	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,1787	0,2769	0,1873	0,4569	0,8885	0,1981	
																						0,0964
6	20	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,1787	0,2769	0,2327	0,4695	0,7777	0,2349	
																						0,0964
3	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0299	0,0074	0,0169	0,0238	0,0264	0,0142	
																						0,0124
	6	25	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0299	0,0074	0,0175	0,0238	0,0252	0,0149
	10	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0325	0,0123	0,0209	0,0904	0,0637	0,0262
	6	20	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0325	0,0123	0,0236	0,0929	0,061	0,0298
	50	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0615	0,0546	0,0614	0,0471	0,1304	0,0499
	6	25	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0615	0,0546	0,0636	0,0471	0,0471	0,1140
50	15	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0873	0,0978	0,0817	0,1918	0,2773	0,0691	
																						0,0471
6	20	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0,0873	0,0978	0,0927	0,1971	0,2427	0,0795	
																						0,0471

Slika P1.4. Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava

Na slici P1.4. se može vidjeti da je utjecaj visine nadvišenja sljemena šava mali, tek se nešto veći utjecaj pojavljuje za male visine nadvišenja sljemena šava kod malih radijusa na rubu šava i velikih kutova nadvišenja. Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava u ostalim područjima se može smatrati beznačajnim.

## E Širina šava

Utjecaj širine šava dobiven je prema izrazu (P1.5), a prikazan je na slici P1.5.

$$UW = \left( \frac{\partial F_{(\text{Nishida, Ushirokawa i Nakayama, Fujisaki i sur., Goo, Kijak i sur., Pachourd i sur.})}}{\partial W} \right)_{za W=15 i 25 mm} \quad (P1.5)$$

D mm	h mm	W mm	t mm	Pachoud i suradnici		Kiyak i suradnici		Goo		Fujisaki i suradnici		Ushirokawa i Nakayama		Nishida								
				↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓									
0,5	10	15	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0000	0,0000	0,0013	0,0000	-0,0066	0,0020	
																0,0019	0,0000	-0,0067	0,0023			
		25	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0004	0,0000	-0,0037	0,0007	
																		0,0006	0,0000	-0,0039	0,0008	
		20	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0019	0,0044	-0,0138	0,0028	
																		0,0028	0,0054	-0,0139	0,0038	
	25	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0014	0,0003	-0,0085	0,0021		
																	0,0022	0,0004	-0,0088	0,0029		
	50	6	15	1 2	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0049	0,0000	-0,0246	0,0056		
																	0,0072	0,0000	-0,0277	0,0071		
		25	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0015	0,0000	-0,0135	0,0019	
																		0,0023	0,0000	-0,0162	0,0023	
		20	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0076	0,0104	-0,0383	0,0059	
																		0,0113	0,0126	-0,0456	0,0091	
	25	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0056	0,0007	-0,0243	0,0046		
																	0,0087	0,0008	-0,0293	0,0071		
	3	10	15	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	-0,0001	0,0000	-0,0021	0,0005		
																	-0,0000	0,0000	-0,0021	0,0005		
			25	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	-0,0001	0,0000	-0,0011	0,0001	
																		-0,0001	0,0000	-0,0012	0,0002	
			20	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0002	0,0021	-0,0043	0,0008
																			0,0005	0,0025	-0,0043	0,0011
		25	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0001	0,0001	-0,0026	0,0006	
																		0,0003	0,0002	-0,0028	0,0008	
50		6	15	1 2	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	-0,0005	0,0000	-0,0077	0,0014		
																	-0,0002	0,0000	-0,0086	0,0017		
		25	1 2	6	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	-0,0003	0,0000	-0,0042	0,0004	
																		-0,0002	0,0000	-0,0051	0,0005	
	20	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0009	0,0044	-0,0119	0,0017		
																	0,0019	0,0053	-0,0143	0,0027		
25	1 2	15	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	0,0004	0,0003	-0,0073	0,0013			
																0,0018	0,0004	-0,0091	0,0020			

Slika P1.5. Dijagram utjecaja širine šava

Utjecaj širine šava je beznačajan u cijelom promatranom području, a u dva izraza za izračun koncentracije naprezanja ovaj geometrijski parametar nije ni uzet u razmatranje.

## F Zaključak analize osjetljivosti

Analizom osjetljivosti šest izraza kojima se može izračunati faktor koncentracije naprezanja utvrđeno je koliko koja geometrijska veličina utječe na faktor koncentracije naprezanja. Također

se može zaključiti koliko su izrazi osjetljivi na promjenu geometrijskih veličina. Izraz koji je predložio Nishida je najmanje osjetljiv na promjenu geometrijskih veličina u cijelom promatranom području.

U izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama promjena geometrijskih veličina se značajno manifestira na promjenu faktora koncentracije naprezanja. Promjene su u ovom izrazu značajnije nego u drugim izrazima zato se može reći da je ovaj izraz najosjetljiviji.

Izraz koji su predložili Fujisaki i suradnici te izraz koji je predložio Goo pokazuju nešto manju osjetljivost od izraza koji su predložili Ushirokawa i Nakayama.

Izraz koji su predložili Fujisaki i suradnici pokazuje značajniju osjetljivost kod promjene kuta nadvišenja sljemena šava kod malih radijusa ruba šava pri malim kutovima nadvišenja sljemena šava. Izraz koji je predložio Goo pokazuje značajniju osjetljivost u istom području.

Analizom osjetljivost se mogu izdvojiti dva područja gdje se javlja posebno velika osjetljivost:

- kod promjene radijusa ruba šava i to za male radijuse pri velikim kutovima nadvišenja sljemena šava,

- kod promjene kuta nadvišenja sljemena šava kod malih radijusa ruba šava pri malim kutovima nadvišenja sljemena šava.

Također se mogu izdvojiti tri područja u kojima se javlja značajna osjetljivost i to su:

- kod promjene radijusa ruba šava kod malih radijusa ruba šava pri malim kutovima nadvišenja sljemena šava,

- kod promjene kuta nadvišenja sljemena šava kod velikih radijusa ruba šava pri malim kutovima nadvišenja sljemena šava, te

- kod promjene kuta nadvišenja sljemena šava kod malih radijusa ruba šava pri velikim kutovima nadvišenja sljemena šava.

Može se zaključiti da promjena širine šava ima mali, gotovo beznačajan, utjecaj na faktor koncentracije naprezanja. Mali utjecaj ima promjena debljine osnovnog materijala, promjena

visine nadvišenja sljemena šava ima nešto veći utjecaj. Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava se javlja u području malih radijusa ruba šava pri velikim kutovima nadvišenja sljemena šava i pri malim visinama nadvišenja sljemena šava.

Ostala dva utjecaja kuta nadvišenja sljemena šava i radijus ruba šava imaju velik utjecaj. Posebno velik utjecaj se javlja pri malim radijusima ruba šava te će se prilikom provedbe pokusa posebno radijusu ruba šava i pritom izbjegavati male radijuse ruba šava.

## **Privitak 2** Analiza utjecajnih geometrijskih veličina pomoću računalnog programa „*Wolfram Mathematica 10.3*“

Ova analiza je rađena na način da je promatran utjecaj svake geometrijske veličine na faktor koncentracije naprezanja. Analiza je rađena prema izrazima za izračun faktora koncentracije naprezanja koje su predložili Nishida (2.8.), Ushirokawa i Nakayama (2.12.), Fujisaki i suradnici (2.18.) te Goo (2.24.). U dijagramima je prikazano kako se mijenja faktor koncentracije naprezanja s obzirom na promjenu svake geometrijske veličine u rasponu za koji se smatra da može poprimiti vrijednosti tijekom vršenja pokusa, odnosno vrijednosti koje može poprimiti tijekom svakodnevnog procesa zavarivanja u tehničkoj praksi. Ostale četiri geometrijske veličine su držane fiksnima, odnosno ostale četiri su prikazane za sedam vrijednosti u rasponu za koji se smatra da mogu poprimiti vrijednosti.

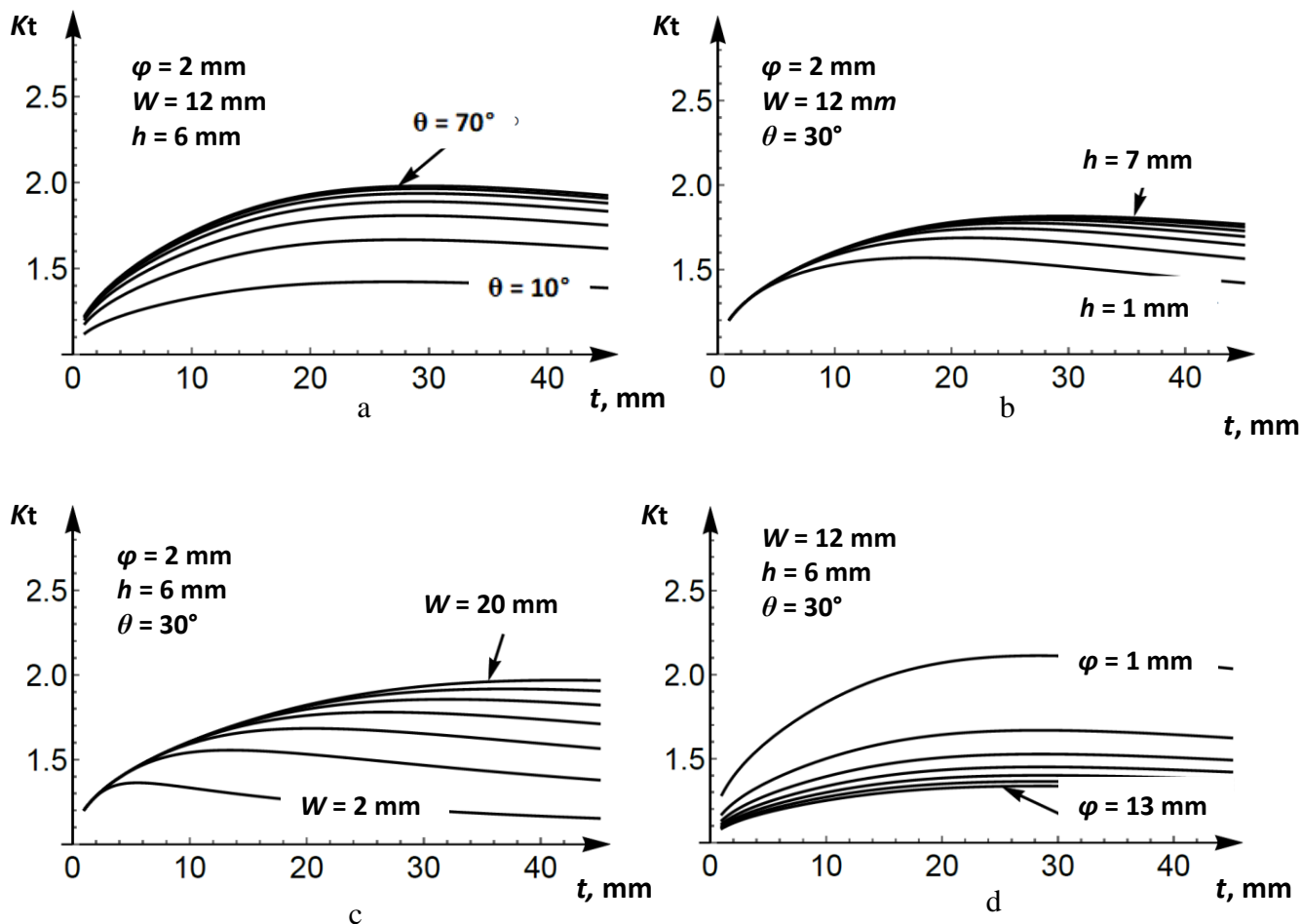
Analiza je napravljena za sedam vrijednosti geometrijskih veličina, i to:

- debljinu osnovnog materijala (6, 10, 14, 18, 22, 26 i 30 mm),
- kut nadvišenja sljemena šava ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $70^\circ$ ),
- visinu nadvišenja sljemena šava (1, 2, 3, 4, 5, 6 i 7 mm),
- širinu šava (2, 5, 8, 11, 14, 17 i 20 mm) te
- radijus ruba šava (1, 3, 5, 7, 9, 11 i 13 mm).

### A Utjecaj debljine osnovnog materijala

Na slici P2.1. su prikazana četiri dijagrama koji prikazuju utjecaj debljine osnovnog materijala na faktor koncentracije naprezanja, a s obzirom na svaku od preostale četiri geometrijske veličine. Za izradu ovih dijagrama korišten je izraz kojega su predložili Fujisaki i suradnici (2.18.).

U dijagramu P2.1a. osim debljine osnovnog materijala mijenjan je kut nadvišenja sljemena šava za sedam vrijednosti, dok su ostale tri geometrijske veličine držane fiksnima s vrijednostima koje pišu na dijagramu. Na dijagramu b mijenjana je visina nadvišenja sljemena šava, na dijagramu c širina šava, dok je na dijagramu d mijenjan radijus ruba šava.



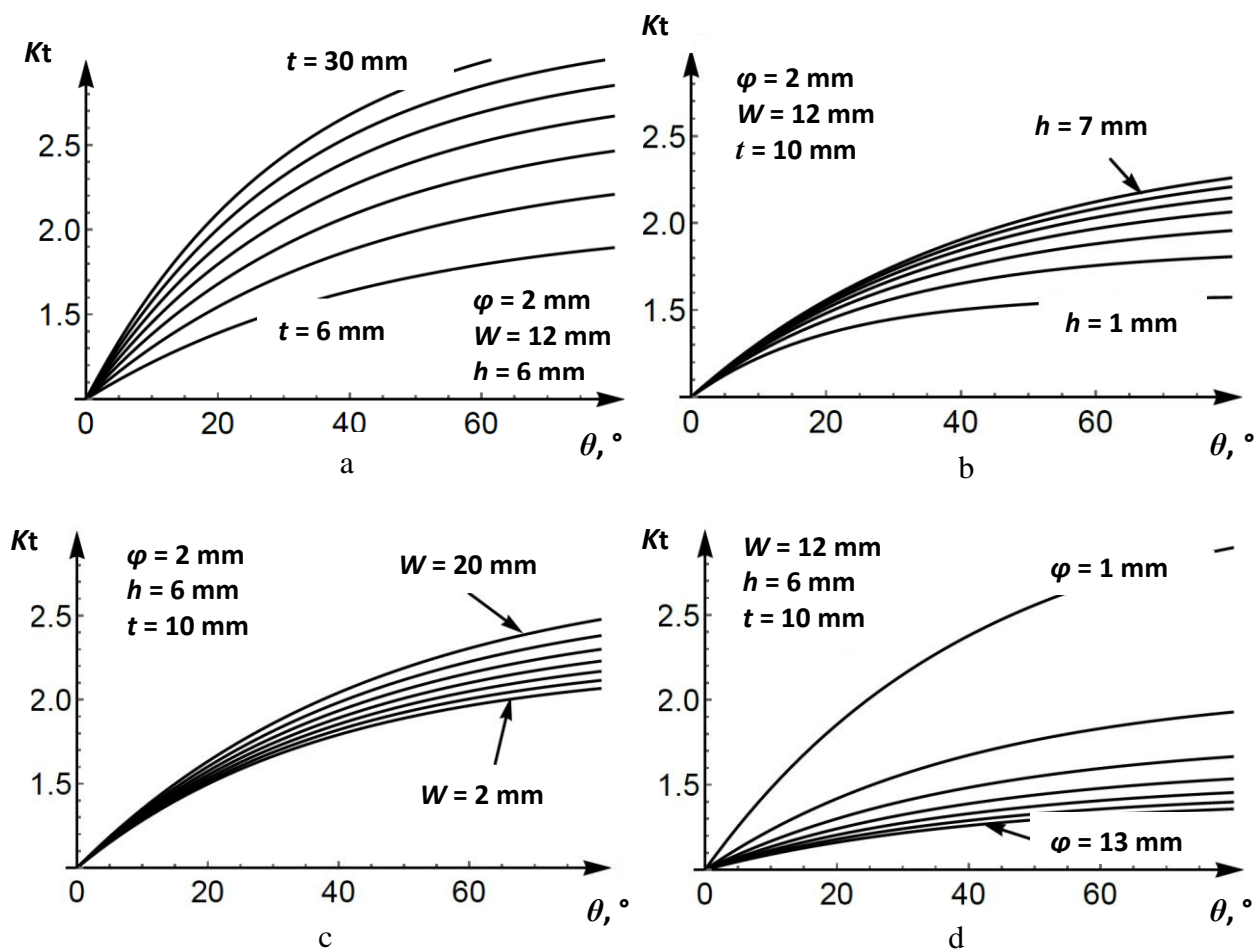
**Slika P2.1.** Utjecaj debljine osnovnog materijala na geometrijski faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici

Iz ovih dijagrama se može zaključiti na koji način debljina osnovnog materijala utječe na faktor koncentracije naprezanja, ako se mijenjaju ostale geometrijske veličine. Geometrijski faktor koncentracije naprezanja raste s povećanjem debljine osnovnog materijala. To posebno vrijedi za manje debljine osnovnog materijala.

## B Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava

Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava je uz radijus ruba šava jedna od dvije najutjecajnije geometrijske veličine koje najviše utječu na faktor koncentracije naprezanja, zbog toga je napravljena analiza utjecaja prema tri izraza koji su predloženi od tri razna autora za izračun faktora koncentracije naprezanja.

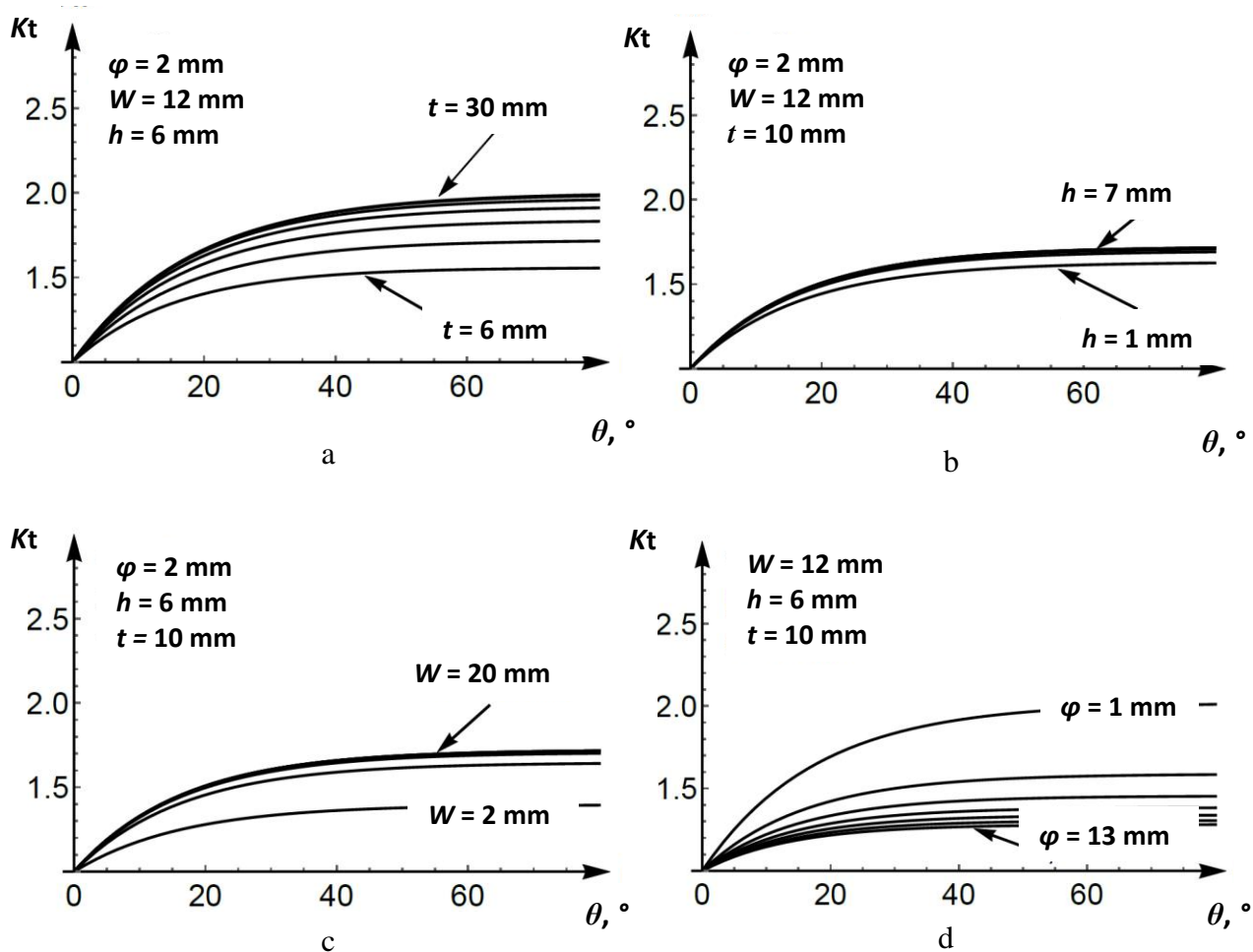
Analizom izraza za izračun geometrijskog faktora koncentracije naprezanja kojega su predložili Ushirokawa i Nakayama (2.12.) dobivena su četiri dijagrama prikazana na slici P2.2. Također su dobivena po četiri dijagrama na slikama P2.3. i P2.4. prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici (2.18.) te prema izrazu kojega je predložio Goo (2.24.).



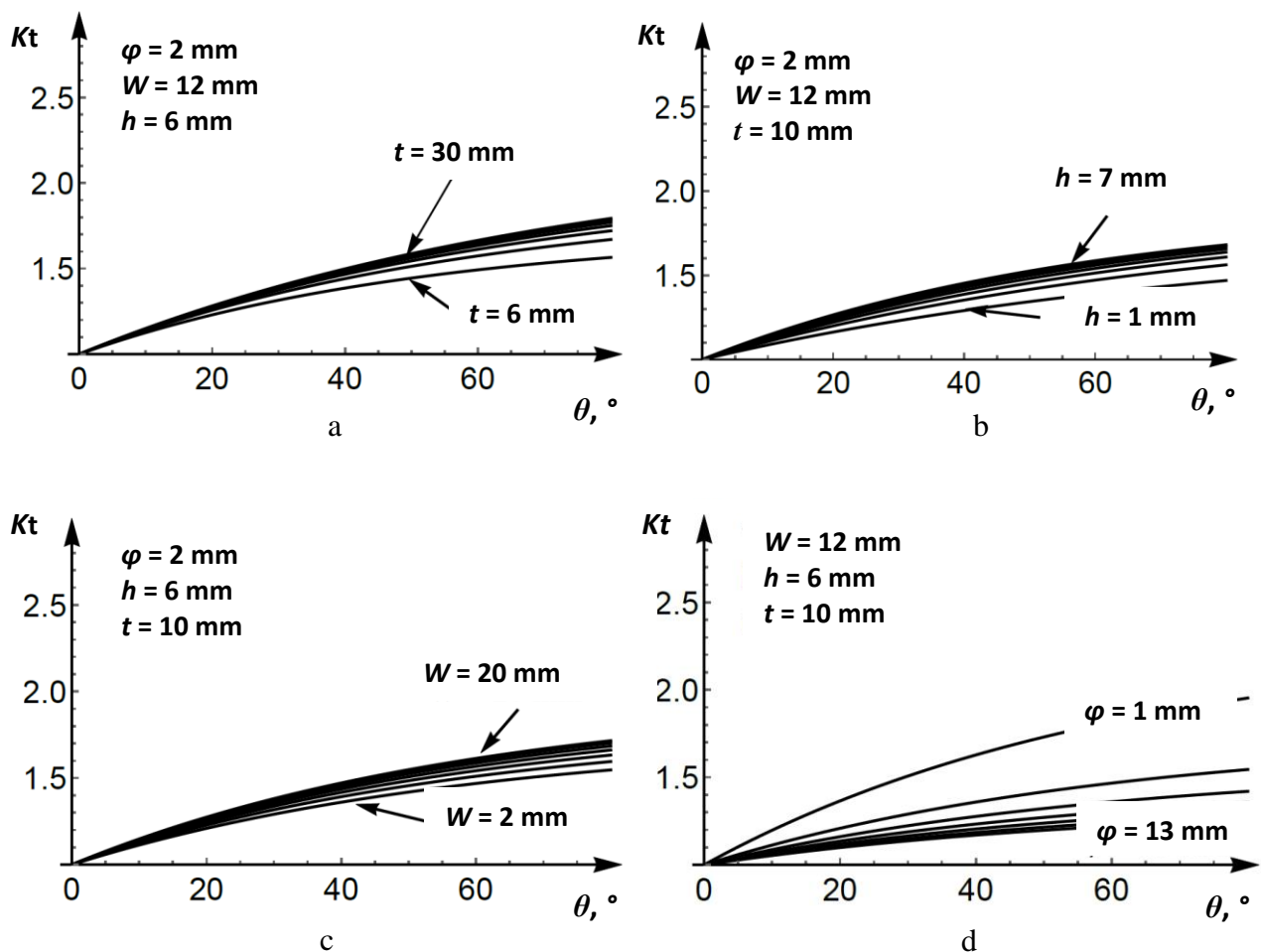
**Slika P2.2.** Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama



U dijagramu P2.2a. osim kuta nadvišenja sljemena šava mijenjana je debljina osnovnog materijala, dok su ostale tri geometrijske veličine držane fiksnima s vrijednostima koje pišu na dijagramu. Na dijagramu b mijenjana je visina nadvišenja sljemena šava, na dijagramu c širina šava, dok je na dijagramu d mijenjan radijus ruba šava.



**Slika P2.3.** Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici



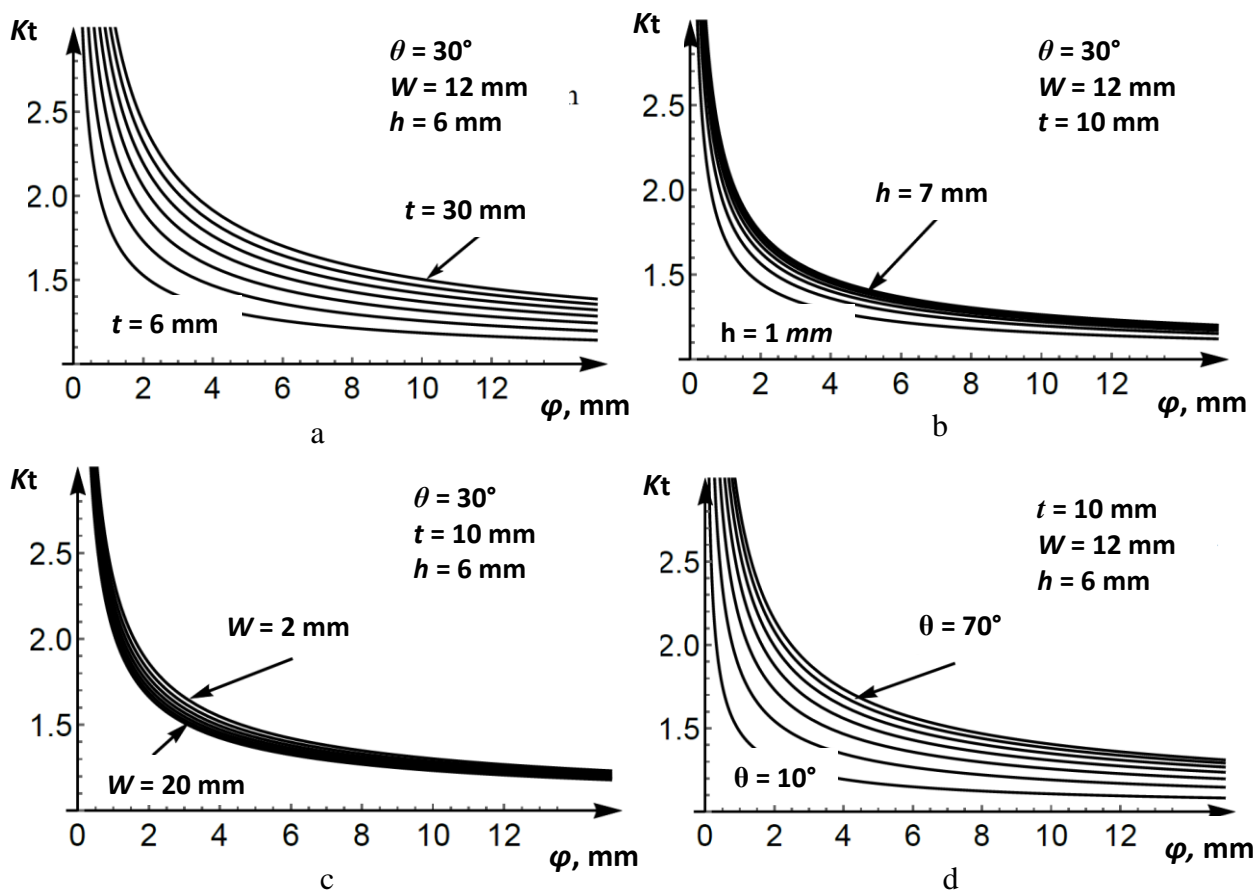
**Slika P2.4** Utjecaj kuta nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo

Iz prethodnih dijagrama se može zaključiti da se najmanja koncentracija naprezanja pojavljuje ako je kut nadvišenja sljemena šava  $0^\circ$ , međutim ako je kut negativan tada je zavareni spoj defektan.

Uspoređujući ova tri dijagrama može se doći do zaključka da izraz koju su predložili Ushirokawa i Nakayama daje najveće brojčane vrijednosti, dok izraz koji je predložio Goo daje najmanje vrijednosti faktora koncentracije naprezanja. Razlika u vrijednosti se povećava s povećanjem vrijednosti faktora koncentracije naprezanja.

### C Utjecaj radijusa ruba šava

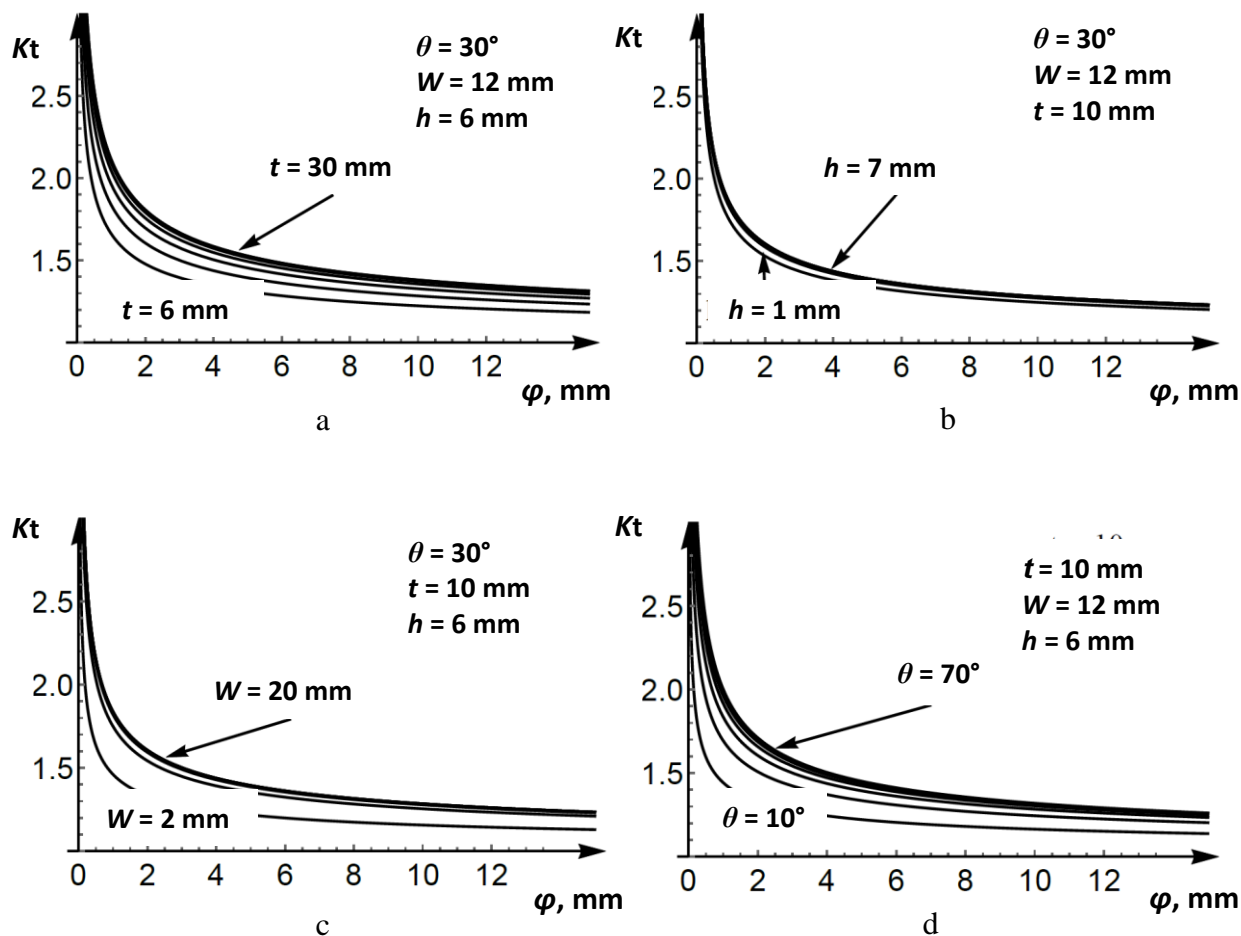
Utjecaj radijusa ruba šava je jedna od dvije najutjecajnije geometrijske veličine koja najviše utječe na faktor koncentracije naprezanja, zbog toga je napravljena analiza utjecaja radijusa ruba šava prema tri izraza koji su predloženi od tri razna autora za izračun faktora koncentracije naprezanja. Na dijagramima na slici P2.5. prikazan je utjecaj radijusa ruba šava dobiven prema izrazu koju su predložili Ushirokawa i Nakayama (2.12.), na slici P2.6. prema izrazu koju su predložili Fujisaki i suradnici (2.18.) te na slici P2.7. prema izrazu koju je predložio Goo (2.24.).



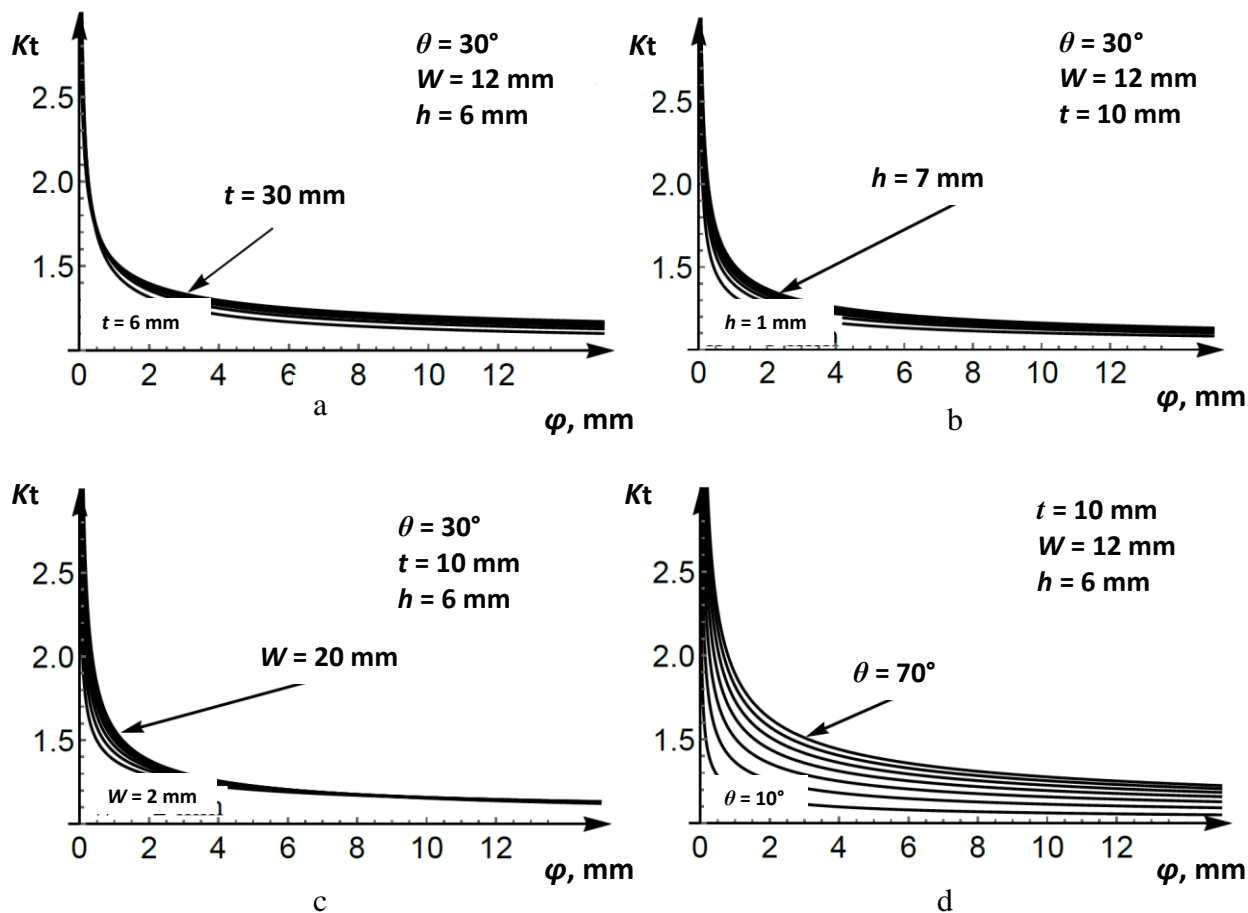
**Slika P2.5.** Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Ushirokawa i Nakayama

U dijagramu P2.5a. osim kuta nadvišenja sljemena šava mijenjana je debljina osnovnog materijala, dok su ostale tri geometrijske veličine držane fiksnima s vrijednostima koje pišu na dijagramu. Na dijagramu b mijenjana je visina nadvišenja sljemena šava, na dijagramu c širina šava, dok je na dijagramu d mijenjan kut nadvišenja sljemena šava zavora.

U dijagramima na slikama P2.6. i P2.7. prikazana je ista analiza samo po drugim izrazima za izračun faktora koncentracije naprezanja kako je prije navedeno.



**Slika P2.6.** Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji su predložili Fujisaki i suradnici

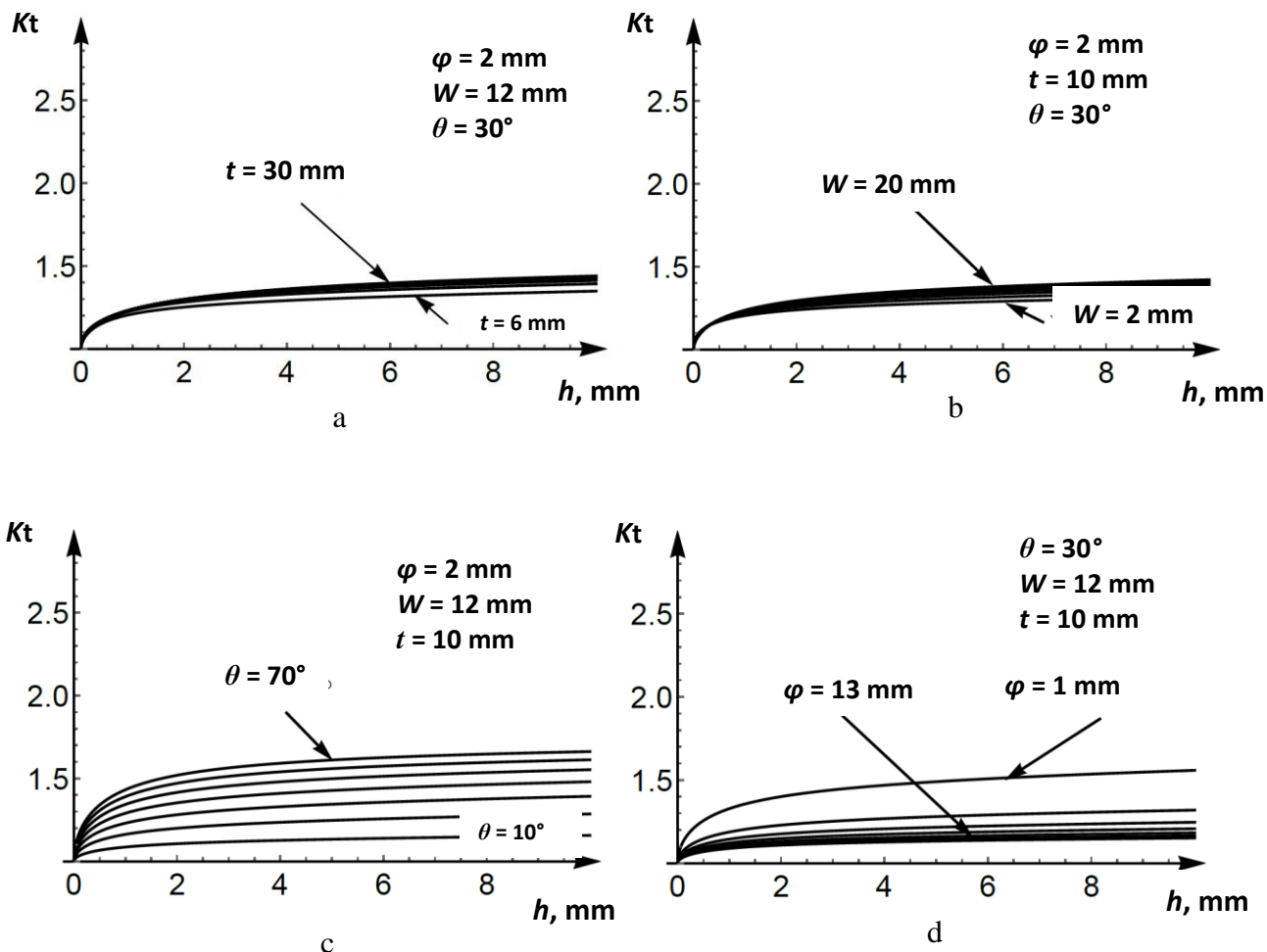


**Slika P2.7.** Utjecaj radijusa ruba šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo

Radijus ruba šava je prema provedenim istraživanjima najutjecajnija geometrijska veličina. Iz dijagrama se može zaključiti ako je radijus ruba šava 0 mm, tada je faktor koncentracije naprezanja teoretski beskonačna vrijednost. Povećanjem radijusa smanjuje se faktor koncentracije naprezanja, tako da teoretski za beskonačan radijus ruba šava faktor koncentracije naprezanja je jedan.

## D Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava

Analizom izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja kojega je predložio Goo (2.24.) dobivena su četiri dijagrama na slici P2.8. koji prikazuju utjecaj visine nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja, a s obzirom na ostale četiri geometrijske veličine.



**Slika P2.8.** Utjecaj visine nadvišenja sljemena šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo

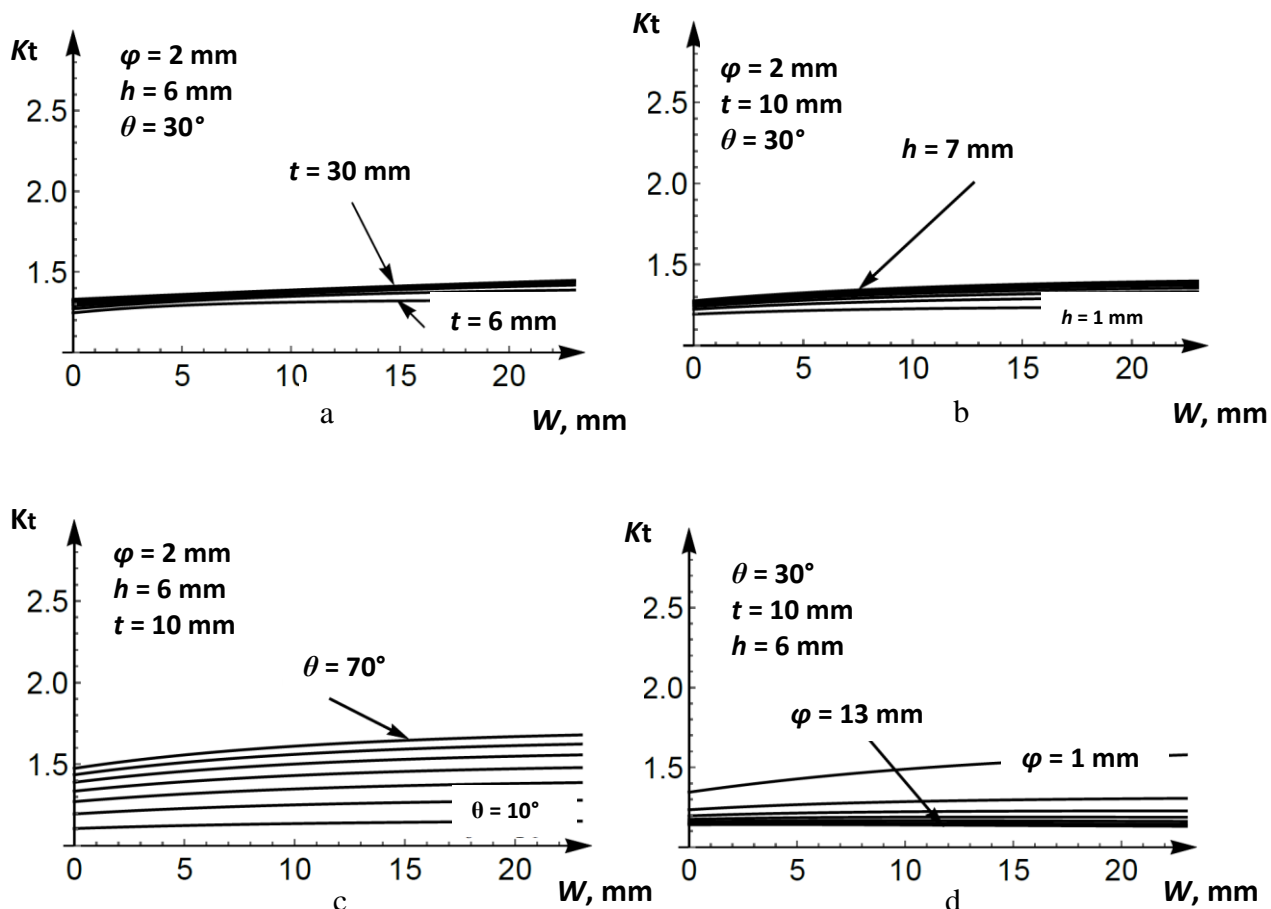
U dijagramu P2.8a. osim visine nadvišenja sljemena šava mijenjana je debljina osnovnog materijala, dok su ostale tri geometrijske veličine držane fiksnima s vrijednostima koje pišu na

dijagramu. Na dijagramu b mijenjana je širina šava, na dijagramu c kut nadvišenja sljemena šava, dok je na dijagramu d mijenjan kut nadvišenja sljemena šava zavara.

S obzirom da kut nadvišenja sljemena šava mora biti pozitivan i težiti nuli, zbog geometrijske zavisnosti i visina nadvišenja sljemena šava mora biti pozitivna i težiti nuli.

### E Utjecaj širine šava

Utjecaj širine šava prikazan je analizom izraza za izračun faktora koncentracije naprezanja kojega je predložio Goo (2.24.). Dobivena su četiri dijagrama na slici P2.9. koji prikazuju utjecaj širine šava na faktor koncentracije naprezanja, a s obzirom na ostale četiri geometrijske veličine.



Slika P2.9. Utjecaj širine šava na faktor koncentracije naprezanja prema izrazu koji je predložio Goo

Iz prethodnih dijagrama se može zaključiti da širina šava ima mali utjecaj na promjenu faktora koncentracije naprezanja.





EH-032 2/2

Certificate No.: OST-11-0100/21

**INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.2 EN 10204:2004**  
INSPECTION CERTIFICATE, ABNAHMEPRÜFZEUGNIS, CERTIFICAT DE RÉCEPTION A02

**EVRAZ** | EVRAZ VÍTKOVICE STEEL  
A01/A05/ EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, s.r.o.  
Ostrava-Hulvásky Blombenská 2871/47, PSČ 700 00  
ČESKÁ REPUBLIKA

A01/ Číslo dokumentu, No. Nr. 207/ Datum, Date Strana, Page, Seite  
24076/2011 27.04.2011 2/ 2

A08/ Číslo zápisů výrobce, Manufacturer's work order No., Werkauftrag/Nr., Num. de la commande de l'usine productrice

EN ISO 9001 : TÜV NORD: 04100930144  
EN ISO 14001 : TÜV NORD: 04104030144

B14/ Třeba ž. Heat No. Schmelze Nr. No. de la coulée	B06/ Počet ks. No. of pieces C70	C00/ Identifik. Identifizierung No. de pièces	Zkouška tahem, Tensile test, Zugversuch/teht, Essai de traction										Zkouška rázem v ohybu (1) Impact test (1) Kerbschlagversuchteil (1) Essai de résilience (2)		
			C01	C02	C03 [°C]	C10	C11 Type	C13 Type	C11 (MPa)	C12 (N)	C13 (N)	C02, C03, C10, C11	C12	C13	

C71-C92/ Chemical composition (%)

heat	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	N	Nb
20273	0.172	1.410	0.370	0.017	0.003	0.070	0.030	0.070	0.006	0.004	0.003	0.042	0.007	0.016
28086	0.173	1.420	0.340	0.014	0.001	0.020	0.010	0.050	0.002	0.004	0.003	0.026	0.005	0.023
28087	0.176	1.420	0.340	0.014	0.001	0.020	0.020	0.050	0.003	0.005	0.003	0.024	0.005	0.026

B07/ Identification of the product

heat	dimension	order	pcs.	kg	test	plates					
20273	8.00 - 3000 - 16000	124386 /2011	2	6 028	261696	633048 001					
					261697	633049 001					
					28087	9.00 - 2000 - 12000	124387 /2011	9	15 264	261957	633890 001
					261958					633889 001	
					261959					633888 001	
					261960					633887 001	
261961	633883 001										
261962	633884 001										
28086	10.00 - 2000 - 16000	124388 /2011	2	5 024	261753	633673 001					
					261754	633672 001					
					28087	10.00 - 2000 - 16000	124388 /2011	8	20 096	261949	633903 001
										261950	633902 001
										261951	633897 001
										261952	633895 001
261953	633901 001										
261954	633900 001										
20273	10.00 - 2500 - 16000	124389 /2011	2	6 280	261717	633488 001					
					261718	633491 001					
28086	12.00 - 2000 - 16000	124391 /2011	1	3 014	261751	633628 001					
28087	12.00 - 2000 - 16000	124391 /2011	1	3 014	261948	633904 001					

Radioisotope activity of the material did not exceed the value 100 Bq/kg.

This is to certify that material described above has been made by an approved process and has been satisfactorily tested in accordance with DNV Rules for Classification. This certificate is issued in accordance with the survey arrangement authorised by DNV in MSA No. R-2023, which is controlled by regular auditing.

B06/ Značení výrobku, Marking of the product Kennzeichnung des Erzeugnisses, Marquage du produit:  
Vývalek, Plech, Tavba, Jákost, Zkouška / Rolled product No., Plate No., Heat No., Quality, Test No. /  
Walzstück, Blech, Schmelze, Qualität, Probe

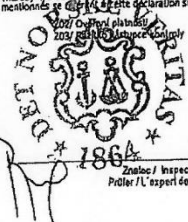


Z01/ Tímto prohlašujeme na svou výhradní odpovědnost, že uvedené výrobky nebyly ve výrobě (nebo při prohlášení) žou ve shodě s předpisy, které jsou specificky kupní smlouvou a je za výrobky vydáno prohlášení o shodě podle rákosu č. 24/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o zvláštních ustanoveních, ve zvláštních případech a nalíbení vlády č. 150/2002 Sb. Es wird hiermit auf ausschließliche Verantwortung erklärt, dass die hier angeführten Erzeugnisse auf die sich diese Erklärung bezieht, entsprechen den im Kaufvertrag spezifizierten Vorschriften. Hierbei we dachung in der ausschließlichen Verantwortung für die mitgeteilten Produkte zu welcher diese Erklärung in accordance with regulations, which are specified by the contract. Nous déclarons à notre responsabilité exclusive que les produits mentionnés se conformes aux prescriptions spécifiées par le contrat d'achat.

A04/ Značka výrobce:  
Symbol of the manufacturer's:  
Herstellerzeichen:  
Sigle de l'usine:



C01/ Umístění výrobku, Místce: A - hřívá, Top, Kopf, tête; Z - patá, Bottom, Fuss, pied  
C02/ Směr zkušebního vortku: 1 - podélný, longitudinal, längs; T - příčná, transverse, quer, transversal  
2 - vertikální, vertical, senkrecht  
C03/ Zkušební teplota, Test temperature, Prüftemperatur, Température d'essai  
C10/ Typ zkušebního výrobku: P - pátá, pátá, pátá, pátá, C - válcová, cylindric, zylinder  
C11/ Všechné údaje směřují k tomu, Test for proof (proof), Sirefo oder Dehngrenze, Limite d'élasticité  
C12/ Mez poměru v tahu, Tensile strength, Zugfestigkeit, Résistance à la traction  
C13/ Tloušťka, Dimension after fracture, Bruchstärke, Abmessung après rupture  
C04/ Typ zkušebního tělesa, C41/ Síla zkušebního tělesa, C42/ Relativní hodnoty, C43/ Sílní hodnota  
C07/ Způsob výroby oceli, Steelmaking process, Stahherstellungverfahren, Mode d'élaboration de l'acier, BC-Y

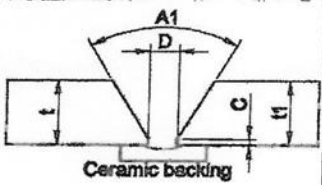
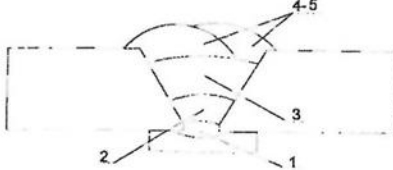


**EVRAZ** | EVRAZ VÍTKOVICE STEEL

Miloš PODGRABINSKI  
Independent authorized agent  
unabhängiger berechtiger Vertreter  
nezávislý oprávněný zástupce



**Privitak 4a** Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje br. D014, „Dalmont“, d.o.o.

Lokacija/Location:		DALMONT d.o.o.	Nadzor/Supervision:		CRS			
Proizvođačeva oznaka/WPS:		D014	Priprema i čišćenje/Preparation and cleaning:		rezano plazmon, brušeno/plasma cutting, grinding			
Atest postupka/for PQR:		136 / BW / PA	Specifikacija materijala koji se zavaruju/ Material Specification:		GRADE EH 36			
Proizvođač/Producer:		DALMONT d.o.o.	Grupa/Group & Tip/Type:		Gr. 2			
Ime i prezime zavarivača/Welder's name			Debljina materijala/Thickness, (mm):		10 mm			
Postupak zavarivanja/Weld.Proc.		136 / BW / PA	Vanjski diameter/Outside dia. (mm):					
Vrsta spoja/Type of joint		BW "V"	Položaj zavarivanja/Welding Position:		PA			
<b>Detalj pripreme/Joint Detail</b> A1=50°-50° A2= D=5-8 mm C=0-1 mm t=10 mm t1=10 mm X1= X2= a= b= dt= d1= d2= 			<b>Sekvence zavarivanja/Welding Sequence</b> 					
Parametri zavarivanja/Welding parameters								
Prolaz Pass Br./N°	Oznaka Postupka Proc.ID	Debljina dodatnog mat. Filler.Mat.Thk. mm	Struja zavarivanja Amperage A	Napon zavarivanja Voltage V	Vrsta i tip struje Current type AC/DC, +/-	Brzina žice Wire speed mm/min	Brzina zavarivanja Weld.Speed mm/min	Unos topline Heat input KJ/mm
1	136	1.2 mm	180-200	26-28	DC,+	N/A	150-170	1.32-1.79
2	136	1.2 mm	240-250	28-30	DC,+	N/A	290-330	0.97-1.24
3	136	1.2 mm	240-250	28-30	DC,+	N/A	290-330	0.97-1.24
4	136	1,2 mm	240-260	23-25	DC,+	N/A	290-330	0.8-1.07
5	136	1,2 mm	240-260	23-25	DC,+	N/A	290-330	0.8-1.07
Klasifikacija i trgovački naziv dodatnog materijala/ Tested Filler Metal classification and Trade Name				AWS/ASME SFA A5.20: E71T-1...III slična/or equivalent				
Sušenje dodatnog materijala/Drying of Filler mat.:				Ostale informacije/Other information*:				
nema/no				Max.Njihanje/Max.Weaving: do/up 16 mm				
Zaštita plin/Protection: ferroline C18				Oscilacije: amplituda, frekvencija, zadržavanje/ Oscillations: amplitudes, frekv., dwell time:				
Protok plina/Gas flow: 12-18 lit/min				nema/no				
Vrsta i dia. Wolfram elektrode: nema/no				Detalji impulsnog zavarivanja/Pulse Weld Detail: nema/no				
Type of Tungsten electrode: nema/no				Detalji kod zavarivanja plazmom/PAW Weld Detail: nema/no				
Detalj žljebljenja/podloge/Gouging Det.: nema/no				Ostalo/Other: nema/no				
/punch-trough technique				Unos topline/heat input max. 3.5KJ/mm				
Temperatura predgrijavanja/Preheating temp.: Tp=100 °C				*ako je potrebno/if needed				
Međuprolazna temperatura/Interpass temp.: Min: T=100 °C				Datum odobrenja/ Date of approval		Odobrište Klas.Društvo/ Approved by Cert.Authority		
Max: T1=250°C				10.05.2016		CROATIAN REGISTER OF WELDERS		
Izradio/Made by: IGOR BEVANDIĆ ing. -L.W.E, E.W.E. Welding Engineer		Kontrolirao/Controlled by: IGOR BEVANDIĆ EWE HR 0307 EUROPEAN WELDING ENGINEER						

**Privitak 4b** Proizvođačeva radna uputa za zavarivanje br. D015, „Dalmont“, d.o.o.

EN 15614-1		DALMONT d.o.o.		WPS: 136+135 / BW / PA		Obr.Br./Form No		1	
		Proizvođačeva/Producer's		Br./N°: D015					
<b>Radna uputa za zavarivanje</b> Welding Procedure Specification (WPS)									
Lokacija/Location: DALMONT d.o.o.		Proizvođačeva oznaka/WPS: D015		Nadzor/Supervision: CRS					
Atest postupka/for PQR: PQR015		Proizvođač/Producer: DALMONT d.o.o.		Priprema i čišćenje/Preparation and cleaning: rezano plazmon,brušeno/plasma cutting,grinding					
Ime i prezime zavarivača/Welder's name		Postupak zavarivanja/Weld.Proc. 136+ 135 / BW / PA		Specifikacija materijala koji se zavaruju/ Material Specification: GRADE EH 36					
Vrsta spoja/Type of joint BW "V"				Grupa/Group & Tip/Type: Gr. 2					
				Debljina materijala/Thickness, (mm): 10 mm					
				Vanjski diameter/Outside dia. (mm):					
				Položaj zavarivanja/Welding Position: PA					
Detalj pripreme/Joint Detail					Sekvence zavarivanja/Welding Sequence				
A1=50-60 A2= D=5-8 mm C=0-1 mm t=10 mm t1=10 mm X1= X2= a= b= d1= d2=									
Parametri zavarivanja/Welding parameters									
Prolaz Pass Br./N°	Oznaka Postupka Proc.ID	Debljina dodatnog mat. Filler.Mat.Thk. mm	Struja zavarivanja Amperage A	Napon zavarivanja Voltage V	Vrsta i tip struje Current type AC/DC, +/-	Brzina žice Wire speed mm/min	Brzina zavarivanja Weld.Speed mm/min	Unos topline Heat input KJ/mm	
1	136	1,2 mm	180-200	26-28	DC,+	N/A	150-170	1.87-1.97	
2	136	1,2 mm	240-250	28-30	DC,+	N/A	290-330	1.36-1.39	
3	136	1,2 mm	240-250	28-30	DC,+	N/A	290-330	1.36-1.39	
4	135	1,2 mm	240-250	27-29	DC,+	N/A	290-330	0,94-1.2	
5	135	1,2 mm	240-250	27-29	DC,+	N/A	290-330	0.94-1.2	
Klasifikacija i trgovački naziv dodatnog materijala/ Tested Filler Metal classification and Trade Name				AWS/ASME SFA A5.20: E71T-1/A5.18/ER70S-6....ili slična/or equivalent					
Sušenje dodatnog materijala/Drying of Filler mat.: nema/no				Ostale informacije/Other information*:					
Zaštita plin/Protection.: CO2				Max.Njihanje/Max.Weaving: do/up 16 mm					
Protok plina/Gas flow: 12-18 lit/min				Oscilacije: amplituda, frekvencija, zadržavanje/ Oscillations: amplitudes, frekv., dwell time:					
Vrsta i dia. Wolfram elektrode: nema/no				nema/no					
Type of Tungsten electrode: nema/no				nema/no					
Detalj žljebljenja/podloge/Gouging Det.: nema/no /punch-trough technique				Detalji impulsnog zavarivanja/Pulse Weld Detail: nema/no					
Temperatura predgrijavanja/Preheating temp.: Tp=100°C				Detalji kod zavarivanja plazmom/PAW Weld Detail: nema/no					
Međuprolazna temperatura/Interpass temp.: Min: T=100°C Max: T1=250°C				Ostalo/Other:					
Toplinska obrada i/ili normalizacija/Heat Treatment: nema/no				Unos topline/heat input max. 3.5KJ/mm					
Izradio/Made by: Igor Bevandić ing. - I.W.E., E.W.E. Welding Engineer				Kontrolirao za QCD/ Controlled by QCD: Igor Bevandić EWE HR 0307 EUROPEAN WELDING ENGINEERS		Datum odobrenja/ Date of approval 10.05.2016		Odobri/klas.Društvo/ Approved by cert.Authority CRS REGIJE SHPPIKO	



**Privitak 5a** Potvrda za dodatni materijal „Lincoln“, Outershield 71E-H

**PRODUCT CONFORMANCE REPORT**

Product Class	OUTERSHIELD 71E-H AWS A5.20:E71T-1M-JH4 EN 758: T 46 3 P M 1 H5	Item No. Lot/batch Size(s) mm	900156 P1FC090129 1,2 X
Customer	TREA TRADE D.O.O. Blazici 2a 51216 Viskovo CROATIA	Customer ref. Our reference: Quantity	102301/2009 SIB14458 840,0 KG

*Ch.5/152 1/1*

Chemical analysis (%)											According to EN10204:2004 2.2		
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	V	Ti	B	
0,05	0,47	1,4	0,014	0,011	0,04	0,05	0,0	0,01	0,1	0,01	0,04	0,0031	
N													
0,004													

Mechanical tests, all weld metal							According to EN10204:2004 2.2				
Tensile testing							Impact testing				
Conditions	Temp. °C	ReL N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 %	Temp.2 °C	Av2 J	Temp.3 °C	Av3 J			
AW	RT	544	577	26	-30	51	-40	43			

Additional information According to EN10204:2004 2.2

Other tests

Diffusible Hydrogen HDM before packing  
3 ml/100g

Remarks

The product identified above has been manufactured, tested and supplied in compliance with a certified ISO 9001:2000 Quality Assurance Programme.

Company LINCOLN ELECTRIC ITALIA S.p.A.	Quality Manager <i>Marzena Tabaka</i>	Printed by S. Lucchi	Function DGE	Date 10/11/2009	Cert. No. 9955116
Registered office: VIA F.LLI CANEPA 8 15010 SERRA RICCO' GE Italy		Telephone: 010/754111	Fax: 010/7541150		

**Privitak 5b** Potvrda za dodatni materijal „Hyundai“, Supercored 71

**CERTIFIED MATERIAL REPORT**

CMR No. : 1603083700006 Date of Issue : 2016-03-06

Customer	BRODOMETALURGIJA									
Trade Name	Supercored 71	Size	1.2mm*15kg							
Lot No	MF6734C71	Purchaser's Order No.	-							
Specification	AWS A5.36 E71T1-C1A0-CS1 * According to EN 10204-2004 : 3.1									
Welding Current	DCEP	Shielding Gas	CO <sub>2</sub>							
			Post Weld Heat Treatment (°C × hr.)							
			AS WELDED							
Mechanical Properties	Tensile Test			Impact Test (CVN - Joule)						
	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	Temp.(°C)	X1	X2	X3	Avg.		
	480	567	27.0	-20	56	56	59	57		
AWS Spec.	≥ 400	490-660	≥ 22	≥ 27						
Chemical Composition (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
(Weld Metal)	0.04	0.61	1.26	0.014	0.006	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02
AWS Spec	≤ 0.12	≤ 0.90	≤ 1.75	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.50	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.35
Others										
We hereby certify that the material covered by this report has been inspected in accordance with and been found to meet the applicable requirements of specification and customer's requirements.										
Approved by										
<i>K.W. Park</i>										
QA Manager Park K.W.										



**HYUNDAI HYUNDAI WELDING CO., LTD.**

Head Office #507, Teraero-ro, Ganghwa-gu, Seoul, Republic of Korea  
Pohang Plant #100, Daesong-ro, Namgu, Pohang, Republic of Korea

**Privitak 6** Ispis iz računalnog progurana „Wolfram Mathematica“ za izračun faktora koncentracije naprezanja za uzorak B3 na presjeku 20 mm

NISHIDA; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi + 180); \varphi = 0.43;$$

$$\left( 1 + \left( \left( 1 - 0.48 \cdot e^{-\frac{0.74 \cdot W}{t}} \right) \left( 1 - e^{-0.7184685477209849 \cdot \sqrt{e^{0.06931471805599453} \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} \cdot h^{-0.65} + 0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} (2h+t)}} \right) \theta \right) h \right. \\ \left. \left( \frac{t}{\varphi} \right)^{0.65} \cdot e^{-0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}}} \right) / \left( \left( 1 - e^{-1.1285677556777869 \cdot \sqrt{e^{0.06931471805599453} \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} \cdot h^{-0.65} + 0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} (2h+t)}} \right) \right. \\ \left. \left. (5.6 \cdot h + 0.7999999999999998 \cdot t) \right) \right)$$

1.44198

NISHIDA; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi + 180); \varphi = 0.39;$$

$$\left( 1 + \left( \left( 1 - 0.48 \cdot e^{-\frac{0.74 \cdot W}{t}} \right) \left( 1 - e^{-0.7184685477209849 \cdot \sqrt{e^{0.06931471805599453} \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} \cdot h^{-0.65} + 0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} (2h+t)}} \right) \theta \right) h \right. \\ \left. \left( \frac{t}{\varphi} \right)^{0.65} \cdot e^{-0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}}} \right) / \left( \left( 1 - e^{-1.1285677556777869 \cdot \sqrt{e^{0.06931471805599453} \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} \cdot h^{-0.65} + 0.1 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}} (2h+t)}} \right) \right. \\ \left. \left. (5.6 \cdot h + 0.7999999999999998 \cdot t) \right) \right)$$

1.47416

USHIROKAWA i NAKAYAMA; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi + 180); \varphi = 0.43;$$

$$\left( 1 + \left( \frac{1 - e^{\left( \frac{-0.90 \times \theta \times \sqrt{\frac{t+2h+0.6W}{2h}}}{(2h)} \right)}}{1 - e^{\left( \frac{-0.45 \times \pi \times \sqrt{\frac{t+2h+0.6W}{2h}}}{(2h)} \right)}} \right) \times 2 \times \left( \left( \frac{1}{2.8 \times \frac{t+2h+0.6W}{t} - 2} \right) \times \left( \frac{h}{\varphi} \right) \right)^{0.65} \right)$$

2.28083

USHIROKAWA i NAKAYAMA; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi + 180); \varphi = 0.39;$$

$$\left( 1 + \left( \frac{1 - e^{\left( \frac{-0.90 \times \theta \times \sqrt{\frac{t+2h+0.6W}{2h}}}{(2h)} \right)}}{1 - e^{\left( \frac{-0.45 \times \pi \times \sqrt{\frac{t+2h+0.6W}{2h}}}{(2h)} \right)}} \right) \times 2 \times \left( \left( \frac{1}{2.8 \times \frac{t+2h+0.6W}{t} - 2} \right) \times \left( \frac{h}{\varphi} \right) \right)^{0.65} \right)$$

2.37676

2 | Presjek 20 mm.nb

FUJISAKI i suradnici; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi + 180); \varphi = 0.43;$$

$$1 + \left( 0.322 \cdot \left( 1 - e^{-10.4 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0.7}} \right) \left( 1 - e^{-4.92 \cdot \left(\frac{W}{t}\right)^{1.13}} \right) \left( 1 - e^{-4.1 \cdot \theta \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0.1}} \right) \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \right) /$$

$$\left( 1 - e^{-6.440264939859075 \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0.1}} \right)$$

2.22059

FUJISAKI i suradnici; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi + 180); \varphi = 0.39;$$

$$1 + \left( 0.322 \cdot \left( 1 - e^{-10.4 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{0.7}} \right) \left( 1 - e^{-4.92 \cdot \left(\frac{W}{t}\right)^{1.13}} \right) \left( 1 - e^{-4.1 \cdot \theta \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0.1}} \right) \sqrt{\frac{t}{\varphi}} \right) /$$

$$\left( 1 - e^{-6.440264939859075 \cdot \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{0.1}} \right)$$

2.28729

GOO; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi + 180); \varphi = 0.43;$$

$$1 + \left( \left( 1 - 0.4 \cdot e^{-\frac{0.74 \cdot W}{t}} \right) \left( 1 - e^{-0.6363961030678927 \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{t}} \cdot \theta} \right) \left( \frac{h}{\left( -2 + \frac{2.8 \cdot (2h+t)}{t} \right) \varphi} \right)^{0.65 - 0.3 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}}} \right) /$$

$$\left( 1 - e^{-0.9996486610856323 \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{t}}} \right)$$

1.71565

GOO; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi + 180); \varphi = 0.39;$$

$$1 + \left( \left( 1 - 0.4 \cdot e^{-\frac{0.74 \cdot W}{t}} \right) \left( 1 - e^{-0.6363961030678927 \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{t}} \cdot \theta} \right) \left( \frac{h}{\left( -2 + \frac{2.8 \cdot (2h+t)}{t} \right) \varphi} \right)^{0.65 - 0.3 \cdot e^{-\frac{0.63 \cdot W}{t}}} \right) /$$

$$\left( 1 - e^{-0.9996486610856323 \cdot \sqrt{\frac{2h+t}{t}}} \right)$$

1.76872

KIYAK i suradnici; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi + 180); \varphi = 0.43;$$

$$\left( 1 + 1.3905 \times \left(\frac{h}{t}\right)^{0.2080 \times \theta} \times e^{1.0756} \times e^{-1.7483 \times \theta} \times \left(\frac{\varphi}{t}\right)^{-0.295 \times \theta} \times \left(0.021 + \frac{\varphi}{t}\right)^{-0.4413} \right)$$

2.29927



KIYAK i suradnici; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi \div 180); \varphi = 0.39;$$

$$\left( 1 + 1.3905 \times \left( \frac{h}{t} \right)^{0.2080 \times \theta} \times e^{1.0756} \times e^{-1.7483 \times \theta} \times \left( \frac{\varphi}{t} \right)^{-0.295 \times \theta} \times \left( 0.021 + \frac{\varphi}{t} \right)^{-0.4413} \right)$$

2.37023

PACHOUD i suradnici; lijevo;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 33.88 \times (\pi \div 180); \varphi = 0.43;$$

$$\left( 1 + 0.81 \times \left( \frac{h}{t} \right)^{0.11} \times \left( \frac{\varphi}{t} \right)^{-0.4} \times \tan \left[ \frac{\theta}{2} \right]^{0.59} \right)$$

2.15028

PACHOUD i suradnici; desno;

$$t = 10; h = 1.53; W = 19.66; \theta = 34.59 \times (\pi \div 180); \varphi = 0.39;$$

$$\left( 1 + 0.81 \times \left( \frac{h}{t} \right)^{0.11} \times \left( \frac{\varphi}{t} \right)^{-0.4} \times \tan \left[ \frac{\theta}{2} \right]^{0.59} \right)$$

2.21174

**Privitak 7** Ispis iz računalnog programa „*MINITAB 20.3*“ – analiza tehnika zavarivanja, prema izrazu kojega su predložili Ushirokawa i Nakayama

WORKSHEET 1

**General Factorial Regression: Ushirokawa i Nakayama versus Kut dodatnog materijala, Broj prolaza završnog sloja, Dužina slobodnog kraja žice, Zaštitni plin**

**DIO A**

**Factor Information**

Factor	Levels Values
Kut dodatnog materijala	3 1, 2, 3
Broj prolaza završnog sloja	2 1, 2
Dužina slobodnog kraja žice	2 1, 2
Zaštitni plin	2 1, 2

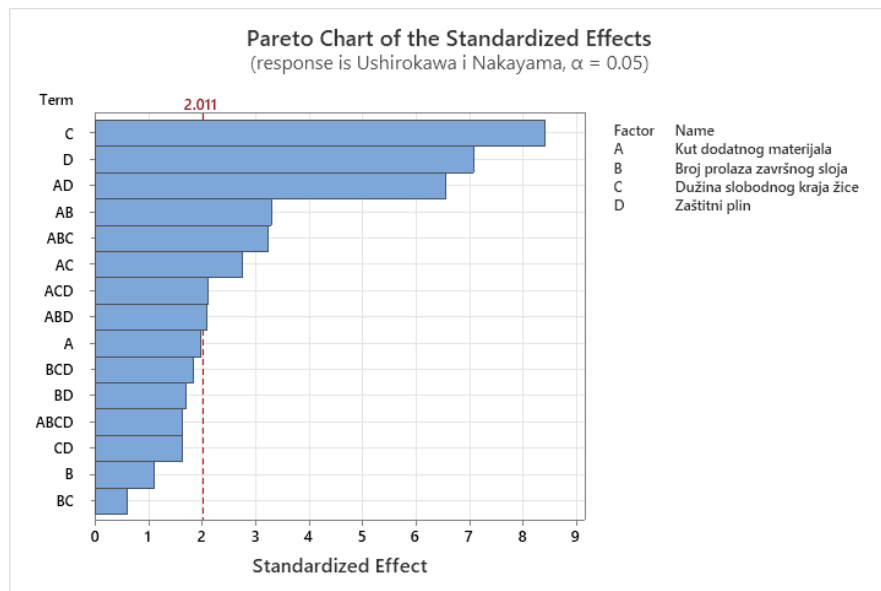
**DIO B**

**Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	3.59775	0.15642	10.65	0.000
Linear	5	1.88082	0.37616	25.60	0.000
Kut dodatnog materijala	2	0.09159	0.04579	3.12	0.053
Broj prolaza završnog sloja	1	0.01837	0.01837	1.25	0.269
Dužina slobodnog kraja žice	1	1.03614	1.03614	70.52	0.000
Zaštitni plin	1	0.73471	0.73471	50.01	0.000
2-Way Interactions	9	1.19184	0.13243	9.01	0.000
Kut dodatnog materijala*Broj prolaza završnog sloja	2	0.21181	0.10590	7.21	0.002
Kut dodatnog materijala*Dužina slobodnog kraja žice	2	0.15615	0.07808	5.31	0.008
Kut dodatnog materijala*Zaštitni plin	2	0.73618	0.36809	25.05	0.000
Broj prolaza završnog sloja*Dužina slobodnog kraja žice	1	0.00543	0.00543	0.37	0.546
Broj prolaza završnog sloja*Zaštitni plin	1	0.04291	0.04291	2.92	0.094
Dužina slobodnog kraja žice*Zaštitni plin	1	0.03936	0.03936	2.68	0.108
3-Way Interactions	7	0.45649	0.06521	4.44	0.001
Kut dodatnog materijala*Broj prolaza završnog sloja*Dužina slobodnog kraja žice	2	0.20536	0.10268	6.99	0.002
Kut dodatnog materijala*Broj prolaza završnog sloja*Zaštitni plin	2	0.09977	0.04989	3.40	0.042
Kut dodatnog materijala*Dužina slobodnog kraja žice*Zaštitni plin	2	0.10178	0.05089	3.46	0.039
Broj prolaza završnog sloja*Dužina slobodnog kraja žice*Zaštitni plin	1	0.04958	0.04958	3.37	0.072
4-Way Interactions	2	0.06860	0.03430	2.33	0.108
Kut dodatnog materijala*Broj prolaza završnog sloja*Dužina slobodnog kraja žice*Zaštitni plin	2	0.06860	0.03430	2.33	0.108
Error	48	0.70523	0.01469		
Total	71	4.30298			

## DIO C

### Pareto Chart of the Standard Effects



## DIO D

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.121212	83.61%	75.76%	63.12%

## DIO E

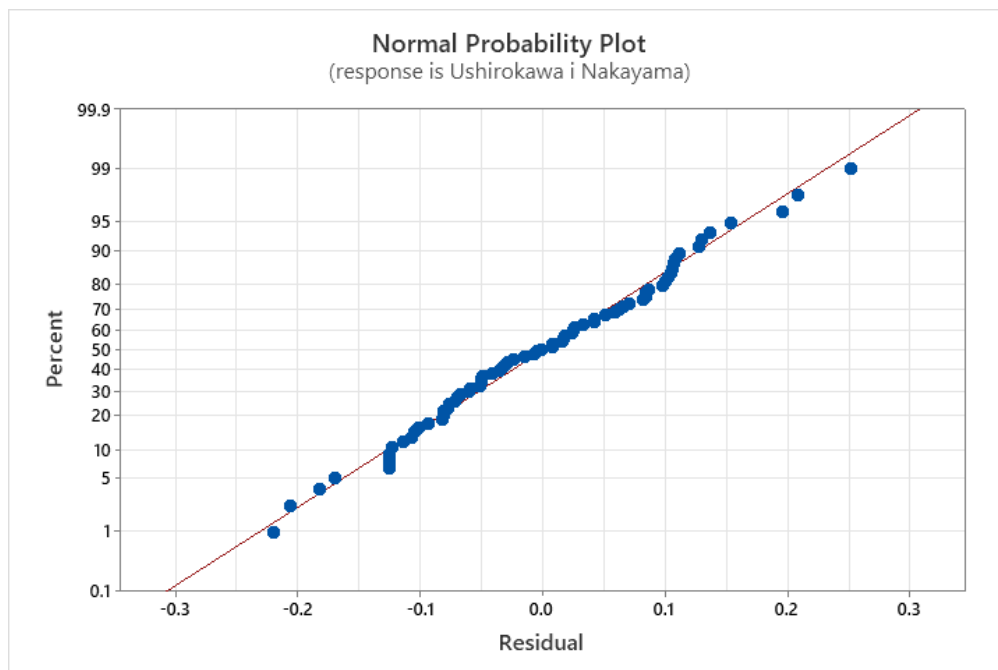
### Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Ushirokawa i Nakayama} = & 1.5800 + 0.0359 \text{ Kut dodatnog materijala}_1 \\
 & + 0.0127 \text{ Kut dodatnog materijala}_2 - 0.0486 \text{ Kut dodatnog materijala}_3 \\
 & - 0.0160 \text{ Broj prolaza završnog sloja}_1 \\
 & + 0.0160 \text{ Broj prolaza završnog sloja}_2 \\
 & - 0.1200 \text{ Dužina slobodnog kraja žice}_1 \\
 & + 0.1200 \text{ Dužina slobodnog kraja žice}_2 + 0.1010 \text{ Zaštitni plin}_1 \\
 & - 0.1010 \text{ Zaštitni plin}_2 \\
 & - 0.0318 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_1 \text{ 1} \\
 & + 0.0318 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_1 \text{ 2} \\
 & + 0.0763 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_2 \text{ 1} \\
 & - 0.0763 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_2 \text{ 2} \\
 & - 0.0446 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_3 \text{ 1} \\
 & + 0.0446 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Broj prolaza završnog sloja}_3 \text{ 2} \\
 & + 0.0644 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_1 \text{ 1} \\
 & - 0.0644 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_1 \text{ 2} \\
 & - 0.0441 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_2 \text{ 1} \\
 & + 0.0441 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_2 \text{ 2} \\
 & - 0.0203 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_3 \text{ 1} \\
 & + 0.0203 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Dužina slobodnog kraja žice}_3 \text{ 2} \\
 & + 0.1260 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_1 \text{ 1} \\
 & - 0.1260 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_1 \text{ 2} \\
 & - 0.1215 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_2 \text{ 1} \\
 & + 0.1215 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_2 \text{ 2} \\
 & - 0.0045 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_3 \text{ 1} \\
 & + 0.0045 \text{ Kut dodatnog materijala} * \text{Zaštitni plin}_3 \text{ 2}
 \end{aligned}$$

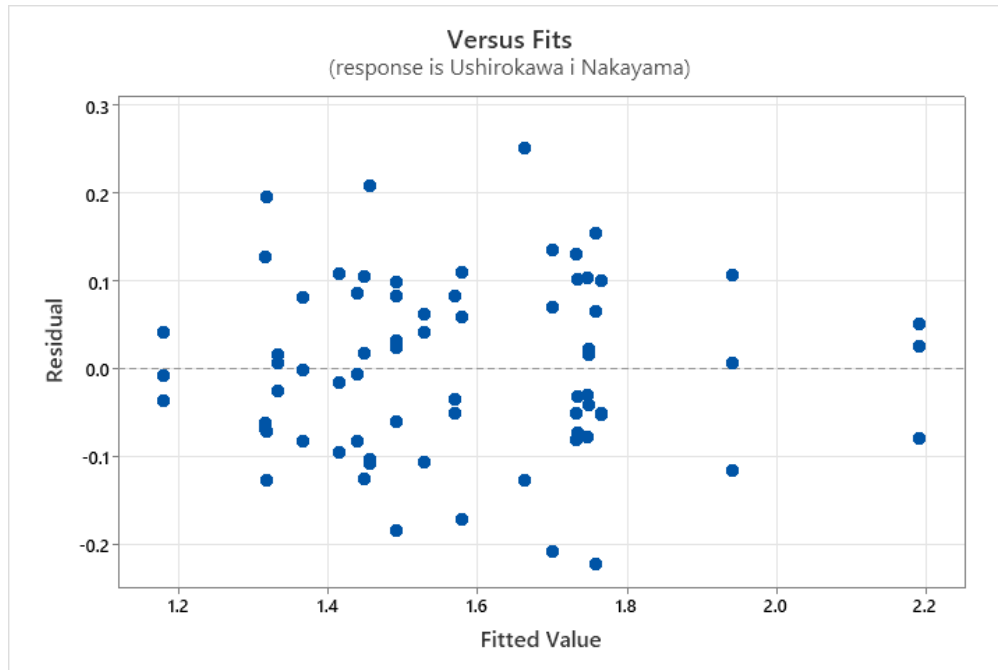


- 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
1 1 2  
- 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
1 2 1  
+ 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
1 2 2  
- 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
2 1 1  
+ 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
2 1 2  
+ 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
2 2 1  
- 0.0406 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_2  
2 2 2  
- 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
1 1 1  
+ 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
1 1 2  
+ 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
1 2 1  
- 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
1 2 2  
+ 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
2 1 1  
- 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
2 1 2  
- 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
2 2 1  
+ 0.0341 Kut dodatnog materijala\*Broj prolaza završnog sloja\*Dužina slobodnog kraja žice\*Zaštitni plin\_3  
2 2 2

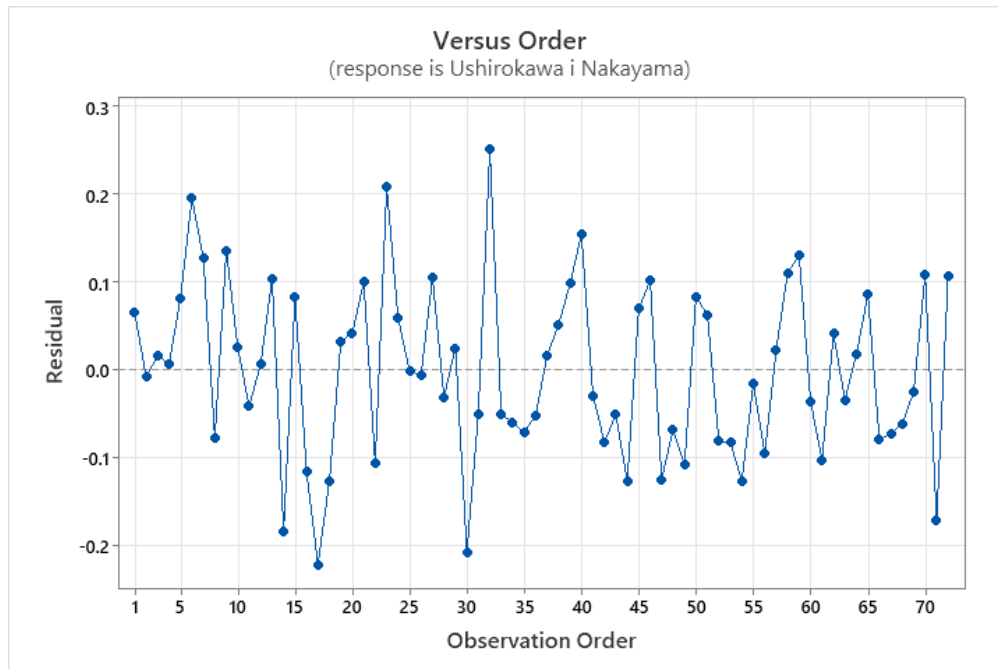
**DIO F**



**DIO G**



**DIO H**



## DIO I

### Fits and Diagnostics for Unusual Observations

	Ushirokawa			
<b>Obs</b>	<b>i Nakayama</b>	<b>Fit</b>	<b>Resid</b>	<b>Std Resid</b>
<hr/>				
No any unusual observations				

## **ŽIVOTOPIS**

Miroslav Randić rođen je u Rijeci 5. srpnja 1965. U Rijeci je završio osnovnu školu „Vladimir Gortan“, te CUO za kadrove u pomorstvu u Bakru, brodstrojarski smjer. Diplomski studij brodogradnje upisuje na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci 1985. godine te završava 1991. godine.

Od kolovoza 1991. do lipnja 1994. radi u „Brodogradilištu Kraljevica“ u projektnom uredu, na poslovima projektiranja brodova. U lipnju 1994. godine zapošljava se u Hrvatskom registru brodova, na radnom mjestu inspektora za trup i opremu broda. Od 1994. godine do danas je u Hrvatskom registru brodova promijenio nekoliko funkcija te je trenutno pomoćnik ravnatelja za marketinške i komercijalne poslove te voditelj predstavništva HRB-a u Dubaiju.

Tijekom radnog staža pohađao je nekoliko tečajeva, te je stekao nekoliko certifikata, među kojima su najznačajniji:

- vodeći auditor za normu ISO 9001:1996, lipanj 1996.
- vodeći auditor za ISM normu, Upravljanje i siguran rad brodova i sprečavanje onečišćenja, lipanj 1996.
- vodeći auditor za normu ISO 9001:2000, siječanj 2001.
- vodeći auditor za normu ISO 9001:2008, siječanj 2008.
- instruktor za MLC konvenciju, konvencija o radu pomoraca, rujanj 2009.
- vodeći auditor za ISPS konvenciju, kodeks za sigurni zaštitu brodova i luka, studeni 2013.
- vodeći auditor za normu ISO 9001:2015, studeni 2019.
- vodeći auditor za normu ISO 14001:2015.

Autor je ili koautor nekoliko stručnih i znanstvenih radova u domaćim ili stranim znanstvenim i stručnim časopisima te je sudjelovao kao izlagač na nekoliko znanstvenih skupova.

Aktivno se služi engleskim jezikom. Oženjen je suprugom Terezijom te ima sina Adrijana.

---