

## MJERENJE GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKI POVRŠINE ZAVARENOG SPOJA

### Measurement of weld surface geometrical properties

Miroslav Randić<sup>1</sup>, Duško Pavletić<sup>2</sup>, Goran Turkalj<sup>2</sup>, Toni Vidolin<sup>3</sup>, Mladen Šuper<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hrvatski registar brodova, Područni ured Rijeka, Rijeka

<sup>2</sup> Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka

<sup>3</sup> 3. MAJ Brodogradilište d.d., ULJANIK Grupa, Rijeka

**Ključne riječi:** 3D mjerenje, geometrija zavarenog spoja, zamor materijala.

#### Sažetak

Oblik površine zavarenog spoja značajno utječe na otpornost zavarenog spoja na dinamička naprezanja. Relevantni matematički izrazi, korišteni za izračun vrijednosti faktora koncentracije naprezanja, u obzir uzimaju pet osnovnih geometrijskih značajki površine zavarenog spoja, i to debljinu osnovnog materijala, radijus ruba šava, kut i visinu nadvišenja sljemena šava, te širinu šava. Stoga je, za što točnije određivanje vrijednosti faktora koncentracije naprezanja potrebno točno izmjeriti spomenute geometrijske značajke zavarenog spoja, a za što se može primijeniti više metoda mjerenja. U radu je prikazana primjena beskontaktna 3D optičke metode mjerenja primjenom strukturiranog svjetla, te analitički postupak određivanja geometrijskih značajki površine zavarenog spoja.

**Key words:** 3D measurement, geometry of weld surface, fatigue

#### Abstract

The weld surface geometry significantly influences the resistance of the weld to the dynamic stresses. The relevant mathematical expressions used to calculate the fatigue stress concentration factors take into account five geometrical features of the weld surface: the thickness of the base material, the weld toe radius, the weld toe angle, the weld face reinforcement and the weld width. Therefore, for accurate determination of the stress concentration factor value, it is necessary to accurately measure the geometrical features of the weld. For that purpose several measurement methods can be used. The paper presents the application of contactless 3D optical measurement method and an analytical procedure for determining the geometrical properties of the weld.

#### 1. Uvod

Povećana koncentracija naprezanja javlja se na mjestima naglih promjena geometrije površine zavarenog spoja [1], koja su, stoga, posebno osjetljiva na iniciranje površinskih pukotina [2]. Mjesta povećane koncentracije naprezanja na površini zavarenog spoja, odnosno mjesta potencijalne inicijacije površinskih pukotina tijekom eksploatacije zavarenog spoja moguće je odrediti primjenom geometrijskog faktora koncentracije naprezanja. Da bi se izračunao faktor koncentracije naprezanja potrebno je poznavati utjecajne geometrijske značajke površine zavarenog spoja.

Prema rezultatima provedenih istraživanja, radijus ruba šava zavara i kut nadvišenja sljemena šava imaju najveći utjecaj na veličinu faktora koncentracije naprezanja [3, 4]. Nadalje, još tri geometrijske značajke površine zavarenog spoja utječu na veličinu faktora koncentracije naprezanja: debljina osnovnog materijala, širina šava zavara i visina nadvišenja sljemena šava [5, 6, 7].

## 2. Mjerenje geometrijskih značajki zavarenog spoja

Kod mjerenja geometrijskih značajki zavarenog spoja mogu se primijeniti dvije osnovne metode i to metoda razaranjem te metode bez razaranja.

### 2.1 Metode mjerenja razaranjem

Ova metoda podrazumijeva rezanje zavarenog spoja, najčešće poprečno, kako bi se omogućilo točno mjerenje. Prilikom rezanja ne smije se lokano promijeniti oblik površine zavarenog spoja pa se rezanje vrši postupcima hladnog rezanja, primjerice rezanje pilom. Mjerenje geometrijskih značajki moguće je samo na presjeku zavarenog spoja, pa to predstavlja ograničenje u slučaju da se želi pratiti promjena geometrijskih veličina uzduž zavarenog spoja. Nakon rezanja zavarenog spoja geometrijske značajke se mjere direktnom metodom, primjerice pomičnom mjerkom, ili uz primjenu mjernih mikroskopa.

### 2.2 Metode mjerenje bez razaranja

Metode mjerenja bez razaranja se, ovisno o opremi s kojom se ispitivanje radi, mogu upotrijebiti i na zavarenim spojevima koji su u eksploataciji, jer samo ispitivanje ne mijenja svojstva zavarenog spoja. Metode mjerenja geometrijskih značajki zavarenog spoja bez razaranja obuhvaćaju metodu mjerenja na otisku zavara, (engl. Weld Impression Analyses, skr. WIA), te metode mjerenja površine zavara.

#### *Metoda mjerenja na otisku zavara*

Ova metoda je jednostavna i ne zahtijeva skupu opremu, a dobiveni podaci su zadovoljavajuće točnosti [8]. Primjena ove metode započinje čišćenjem zavarenog spoja, na koji se nanosi dvokomponentna smjesa za izradu otiska spoja. Nakon perioda otvrdnjavanja smjesa se odvoji od zavarenog spoja, te je otisak spreman za analizu. Prednost ove metode je da se otisak zavarenog spoja može napraviti na mjestu gdje nije moguće pristupiti sa uređajima za bezkontaktno snimanje zavarenih spojeva, a sama analiza se može provesti u laboratorijskim uvjetima.

#### *Metode mjerenja površine zavara*

Metode mjerenja površine zavara mogu biti kontaktne i bezkontaktne [9].

Kontaktne metode mjerenja površine zavarenog spoja su metode kod kojih je mjerni instrument u dodiru s površinom spoja, primjerice metoda snimanja kontaktnim skenerom, kod koje se ostvaruje kontakt površine spoja i glave skenera, pričvršćene na koordinatnom mjernom stroju. Mjerenje je dugotrajno, potrebna je posebna mjerna oprema, te se rijetko upotrebljava za snimanje zavarenih spojeva.

Najpoznatije dvije bezkontaktne metode su metoda mjerenja laserom, (engl. Laser Scanning Profiling, skr. LSP) i metoda mjerenja pomoću projekcije strukturiranog svjetla (engl. Structured Light Projection, skr. SLP). [8].

Metoda mjerenja laserom upotrebljava princip optičke triangulacije. Laserska zraka projicira se na površinu zavarenog spoja, od koje se odbija i vraća u senzor. Na temelju tako prikupljenih informacija konstruira se trodimenzionalni model zavarenog spoja pogodan za daljnju obradu nekom od računalnih metoda mjerenja geometrijskih veličina [8].

Kod mjerenja pomoću strukturiranog svjetla poznati svjetlosni uzorak projicira se na objekt mjerenja. Strukturirano svjetlo se može projicirati pomoću LCD (engl. Liquid Crystal Display) projektora ili bilo kojeg drugog stabilnog izvora svjetlosti. Projekcija svjetla na objekt se snima kamerom te se metodom triangulacije stvara trodimenzionalna slika snimanog objekta, pogodna za daljnju računalnu obradu. Za postizanje potrebne točnosti objekt se snima iz više kutova (obično 8 kutova) [8]. Strukturirano svjetlo se može primijeniti u vidljivom ili u nevidljivom svjetlosnom spektru. Prilikom rada u vidljivom spektru može doći do interferiranja strukturiranog svjetla sa svjetlom okoline, što se može izbjeći primjenom izvora strukturiranog svjetla koji rade u nevidljivom svjetlosnom spektru. Prema valnoj dužini svjetla, postoje tri vrste nevidljivog strukturiranog svjetla [10]:

- 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).

### 3. Metode mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja

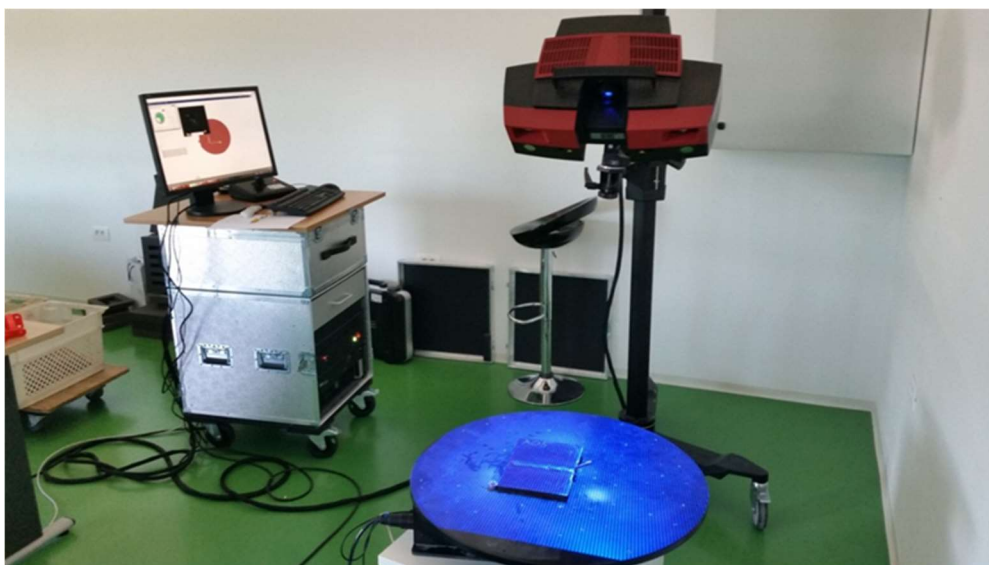
Geometrijske veličine zavarenog spoja u osnovi se mogu mjeriti direktnom metodom te računalnim metodama za analizu površine.

Direktna metoda je najjednostavnija i najbrža, te se lako može primijeniti tijekom svakodnevnog rada. Rezultati koji se dobiju ovom metodom su nepouzdana i subjektivni jer ovise o mjeritelju koji vrši očitavanja mjerenja [11]. Ovo se posebno odnosi na radijus ruba šava i kut nadvišenja sljemena šava. Debljina osnovnog materijala, širina zavara, te visina nadvišenja zavara se, primjerice, mjere pomičnom mjerkom, kut nadvišenja sljemena šava kutomjerom, a radijus ruba šava setom lisnatih mjerki, od kojih svaka na vrhu ima različit predefiničan radijus.

Razvijeno je nekoliko računalnih metoda uz pomoć kojih se slika snimljenog zavara obrađuje na način da se izmjere geometrijske veličine zavarenog spoja. Te metode se mogu podijeliti na grafičke i računske metode odnosno programe za obradu snimaka. Grafičke metode baziraju se na programima za obradu snimaka zavarenog spoja. Trodimenzionalna reprezentacija zavarenog spoja se, u takvom programu, presijeca na mjestima gdje se želi provesti analiza površine. Na dobivenom poprečnom presjeku provode se mjerenja geometrijskih značajki površine zavarenog spoja. Način mjerenja ovisi o programu koji se koristi. Neki od programa koji se češće koriste za ovu namjenu su GOM inspekt, Calypso, Catia, te Solidworks. Računske metode provode se primjenom odgovarajućih računalnih programa namijenjenih za izračun geometrijskih značajki površine zavarenog spoja na temelju podataka dobivenih snimanjem zavarenog spoja odnosno trodimenzionalne reprezentacije površine spoja [12]. Za ovu namjenu mogu se koristiti, primjerice, Matlab i Wolfram Mathematica.

### 4. Primjer snimanja i mjerenja geometrijskih veličina zavarenog spoja

U odabranom primjeru snimanje uzoraka zavarenih spojava provedeno je skenerom za trodimenzionalno snimanje u Centru za napredno računanje i modeliranje, Sveučilišta u Rijeci, Slika 1.



Slika 1 Skeniranje uzoraka 3D skenerom.

Za snimanje je korišten sustav ATOS II Triple Scan, a koji se sastoji od:

- projektora,
- dvije kamere te
- kontrolne jedinice.

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

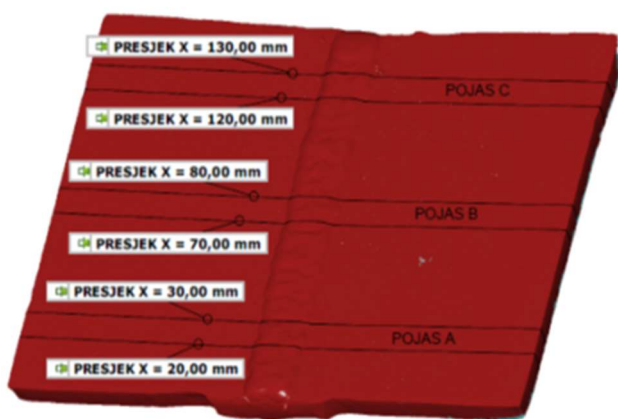
Projektor koji je smješten u sredini glave uređaja služi za emitiranje plavog svjetla uske valne duljine koje omogućuje precizno mjerenje i digitalizaciju potpuno neovisno o uvjetima osvjetljenja okoline. Projecirano svjetlo se odbija od predmeta koji se mjeri, u dvije kamere koje imaju rezoluciju  $5 \times 106$  pixelsa, svaka. Minimalni razmak između točaka na mjernom uzorku je 0,02 mm [13].

#### 4.1 Mjerenje geometrijskih veličina zavarenog spoja

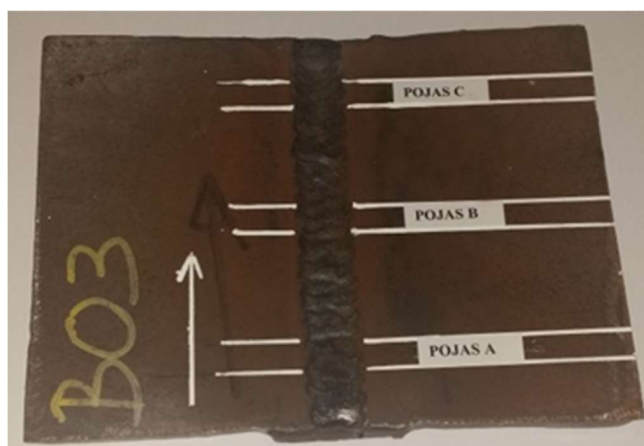
Očitavanje geometrijskih veličina zavarenog spoja rađeno je pomoću računalnog programa GOM inspect. To je računalni program koji je razvijen za analizu podataka dobivenih trodimenzionalnim skeniranjem. U program se učitavaju STL datoteke skeniranih uzoraka, pri čemu je X-os postavljena uzduž zavarenog spoja s ihođištem na mjestu početka zavarivanja.

Na uzorku su mjerenja geometrijskih veličina 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. Obzirom da je tijekom zavarivanja vršeno automatsko očitavanje parametara zavarivanja (jakost struje zavarivanja, snaga struje zavarivanja i brzina prolaza žice), utvrđeno je da su se parametri zavarivanja stabilizirali prije početnog pojasa u kojem se mjere geometrijske veličine zavarenog spoja.

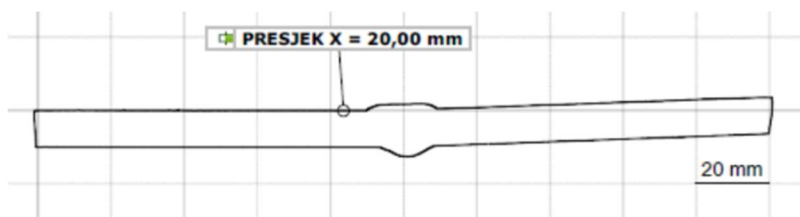
Svaki pojas je širok 10 mm, a razmak između presjeka je 1 mm. Na taj način je u svakom pojasu dobiveno 11 presjeka u kojima su se mjerile geometrijske veličine zavarenog spoja. Na Slici 2 prikazan je uzorak generiran u GOM inspect-u sa pojasevima na kojima je vršeno mjerenje geometrijskih veličina presjeka, dok je na Slici 3 prikazan pravi uzorak sa označenim pojasevima. Na Slici 4 prikazan je poprečni izled jednog presjeka, u ovom slučaju to je presjek na udaljenosti 20 mm od početka zavarivanja.



Slika 2 Uzorak sa označenim pojasevima generiran u GOM inspect-u



Slika 3 Stvarni uzorak sa označenim pojasevima



Slika 4 Grafički prikaz presjeka X = 20,00 mm

Svaki presjek je posebno geometrijski obrađen, te je na svakom presjeku napravljeno mjerenje slijedećih geometrijskih veličina:

- radijus ruba šava,
- kut nadvišenja sljemena šava,

- visina nadvišenja sljemena šava, te
- širina šava.

#### 4.2. Radijus ruba šava

Radijus ruba šava je mjereno za svaki presjek sa lijeve i desne strane. U radijusu ruba šava se javlja najveća koncentracija napreznja, a to je ujedno i geometrijska veličina koja najviše utječe na koncentraciju napreznja [14, 15]. Stoga je napravljena usporedba tri metode kojima je dobivena veličina radijusa ruba šava, i to:

- a) direktno mjerenje radijusa ruba šava pomoću lisnatog mjerila za mjerenje radijusa,
- b) grafičko očitavanje radijusa ruba šava pomoću programa GOM inspect, te
- c) izračun radijusa ruba šava zavara pomoću programa Wolfram Mathematica.

##### *Direktno mjerenje radijusa ruba šava pomoću mjerila za mjerenje radijusa*

Na uzorku su označeni pojasevi i presjeci, te je mjereći od početka zavara, na mjestu svakog poprečnog presjeka (s lijeve i desne strane zavara) izvršeno mjerenje radijusa pomoću lisnatog mjerila, Slika 5. Lisnato mjerilo sa kojim je vršeno mjerenje je imalo najmanji radijus 0,5 mm, te su nakon toga radijusi povećavani svakih 0,125 mm. Dobivene vrijednosti su prikazane na dijagramima na Slici 7. Na Slici 5 prikazano je direktno mjerenje na uzorku, presjek 20 mm lijevo.



Slika 5 Direktno mjerenje na uzorku, za presjek X=20,00 mm lijevo

##### *Grafičko očitavanje radijusa ruba šava pomoću „GOM inspekt-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 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.

U radu je odabran razmak između točaka od 0,125 mm slijedom istraživanja Lawrence & Mazumdar (1981) gdje je utvrđeno da se najveća koncentracija napreznja javlja upravo u području od 0,125 mm uzduž zavarenog spoja [16].

Obzirom da je površina zavarenog spoja nepravilnog oblika, ne postoje dva presjeka sa istim oblicima površine, stoga je za svaki presjek očitano proizvoljan broj (n) točaka.

Prilikom mjerenja radijusa ruba šava zavara, primjenom programskog paketa GOM inspect, konstruirane su kružnice kroz svaku od tri označene točke na površini zavara. Kako je koncentracija napreznja najveća u području najmanjeg radijusa ruba šava, za daljnju analizu se promatra kružnica sa najmanjim radijusom. U slučaju prikazanom na Slici 6 to su „TOČKA LIJEVO 02“, „TOČKA LIJEVO 03“ i „TOČKA LIJEVO 04“, a kružnica koja prolazi kroz te tri točke je označena crvenom bojom.



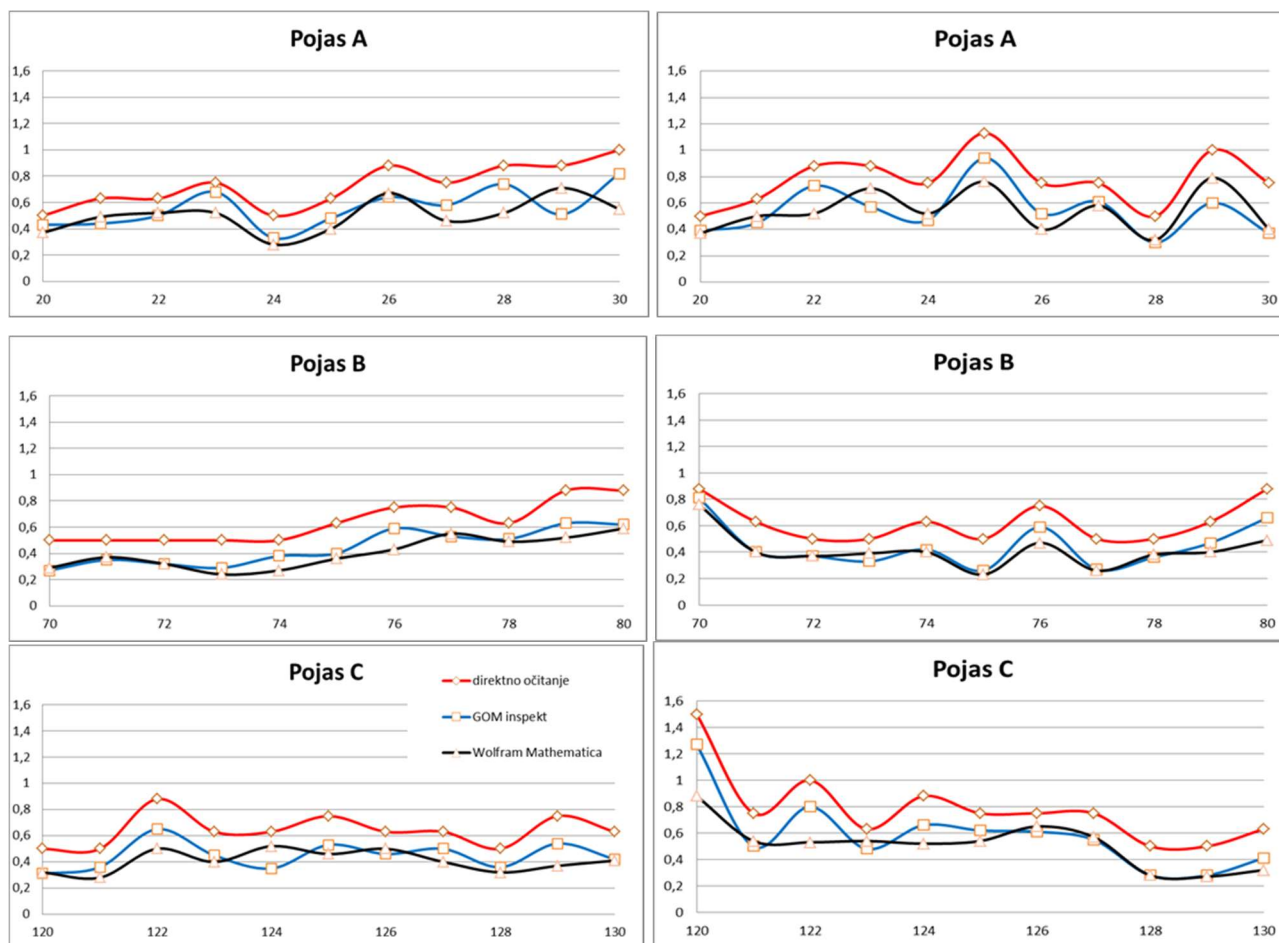
### 4.3. Kut nadvišenja sljemena šava

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

Ovaj kut je izmjeren pomoću računalnog programa GOM inspect. Kut je izmjeren pomoću točaka koje su označene na površini zavarenog spoja kako je opisano u 4.2. Mjesto infleksije je točka u kojoj krivulja površine zavarenog spoja prelazi iz konkavnog oblika u konveksni oblik. Ta točka je određena crtajući kružnice kroz tri točke koje su označene na površini zavarenog spoja. Na Slici 8 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 8 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“.

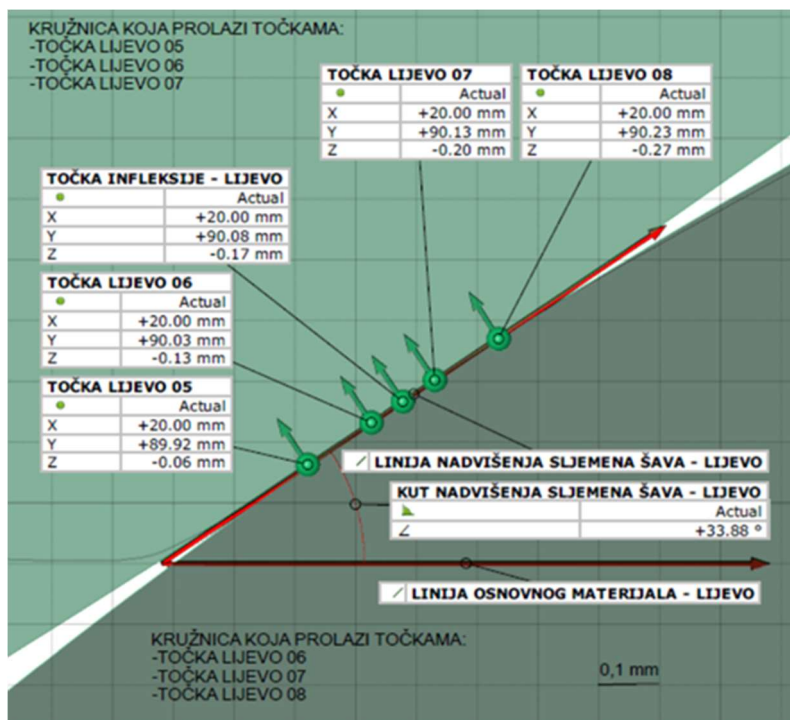
Teoretski je ovo najveći kut koje je nadvišenje sljemena šava poprimilo za svaki presjek.



lijevo

desno

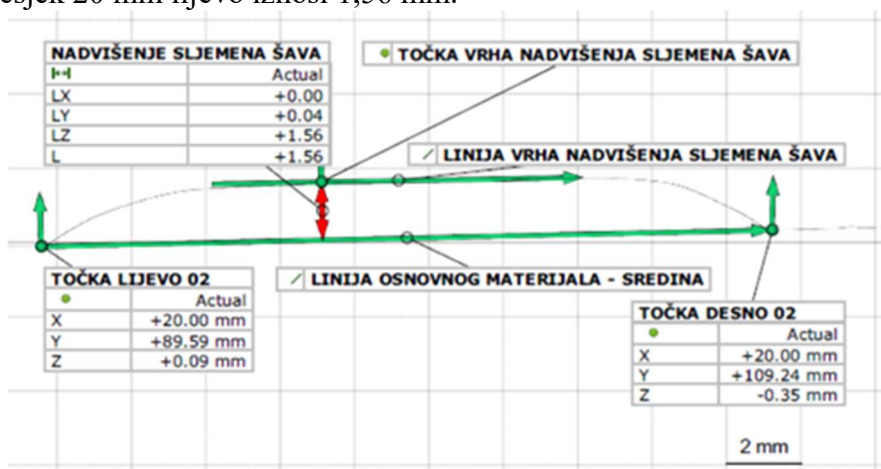
Slika 7 Usporedba tri metode mjerenja radijusa ruba šava



Slika 8 Grafički prikaz kuta nadvišenja sljemena šava

#### 4.4. 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 9 označena sa „LINIJA OSNOVNOG MATERIJALA – SREDINA“. „LINIJA VRHA NADVIŠENJA SLJEMENA ŠAVA“ je linija koja je paralelna sa „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 9 ta geometrijska veličina je označena sa „NADVIŠENJE SLJEMENA ŠAVA“ i za presjek 20 mm lijevo iznosi 1,56 mm.

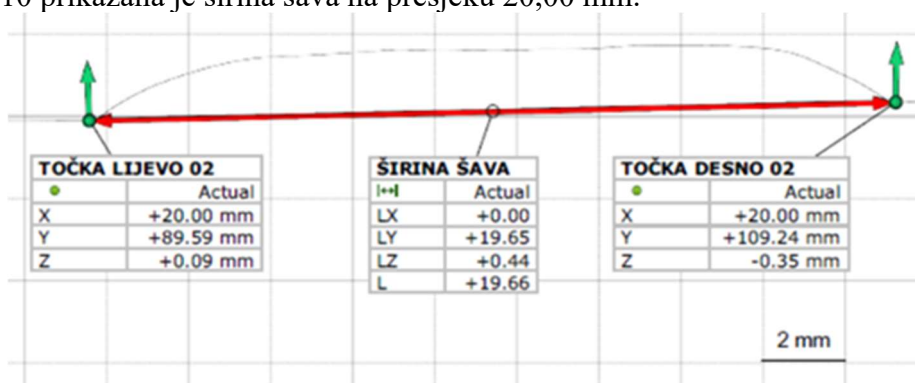


Slika 9 Grafički prikaz visine nadvišenja sljemena šava



#### 4.5. Širina šava

Širina šava je izmjerena udaljenost između točaka „TOČKA LIJEVO 02“ i „TOČKA DESNO 02“. Na Slici 10 prikazana je širina šava na presjeku 20,00 mm.



Slika 10 Grafički prikaz širine šava zavarenog spoja

#### 5. Zaključak

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. To se posebno odnosi na radijus ruba šava. Zbog toga se mjerenju radijusa ruba šava mora pristupiti sa posebnom pažnjom.

Tri metode sa kojima je mjereno radijus ruba šava daju rezultate koji su kvalitativno usporedivi uz činjenicu da se direktnim očitavanjem dobivaju rezultati koji su oko 50% veći od rezultata dobivenih sa ostale dvije metode. Na rezultate koji se dobiju sa GOM inspect-om utječe razmak između točaka na površini zavarenog spoja sa kojima se očitava radijus ruba šava. U ovom istraživanju je usvojen razmak od 0,125 mm.

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

#### 6. Literatura:

- [1] Perović, D. Z. 2011: „The Weld Profile Effect on Stress Concentration Factors in Weldments“, 15th International Research / Expert Conference ”Trends in the Development of Machinery and As-sociated Technology”, Prague.
- [2] Pilkey, W. D., Pilkey, D. F. 2007: „Peterson's Stress Concentration Factors“, John Wiley & sons, Inc, treće izdanje, New Jersey.
- [3] Fujisaki, W., Noda, N., Tanaka, H., Nisitani, H. 1990: „Effects of Reinforcement Geometry and Welding Condition on Stress Concentration Factor of Butt Welded Joint“, pages 1533 – 1538. (na japanskom)
- [4] Ohta, A., Mawari, T., Suzuki, N 1990.: „Evaluation 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, pages 987 – 993.
- [5] Berge, S. (1985): „On the Effect of Plate Thickness in Fatigue of Welds“, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, no. 2, pages 423 – 435.
- [6] Kim, I. S., Kwon, W. H., Park, C. E. 1996: „The Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Width in GMAW Processes“, Journal of KWS, Vol. 14, No. 4, pages 204 – 213.
- [7] Fricke, W. F. 2003: Fatigue analysis of welded joints: state of development, Marine Structures 16, pages 185 – 200.

- [8] Harati, E., Svensson, L.-E., Karlsson, L. 2014: The Measurement of Weld Toe Radius Using Three Nondestructive Techniques, 6th International Swedish Production Symposium.
- [9] Groš, J., Medić, S., Brozović, M. 2012: Metode trodimenzionalnog optičkog mjerenja i kontrole geometrije oblika, Zbornik Veleučilišta u Karlovcu, godina II, Broj 1, pages 43 – 48. (na hrvatskom)
- [10] Fofi, D., Sliwa, T., Voisin, Y. 2004: „A Comparative Survey on Invisible Structured Light“, Machine Vision Applications in Industrial Inspection XII, 90
- [11] Lindgren, E., Stenberg, T. 2011: „Quality Inspection and Fatigue Assessment of Welded Structures“, Stockholm, Švedska.
- [12]. Stenberg, T., Lindgren, E., Barsoum, Z. 2012: „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, pages 1033 – 1041.
- [13] ... Acquisition Basic 2016, GOM Software, Braunschweig, Njemačka.
- [14] Cerit, M., Kokumer, O., Genel, K. 2010: „Stress Concentration Effects of Undercut Defect and Reinforcement Metal in Butt Welded Joint“, Engineering Failure Analysis 17, pages 571 – 578.
- [15] Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, W. 2006: „Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches“, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- [16] Lawrence, F. V., Ho, N., Mazumdar, P. K. 1981: Predicting the Fatigue Resistance of Welds, Ann. Rev. Mater. Sci., Vol. 11, page 401 – 425.

#### ACKNOWLEDGEMENT:

This work was supported by the Croatian Science Foundation - project 8722 and the University of Rijeka (contract no. 13.09.1.1.05).