

Analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na svojstva zupčanika s ravnim zubima izrađenih aditivnim tehnologijama

Jagarčec, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:005187>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Valentina Jagarčec

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Dragan Žeželj, dipl. ing.

Student:

Valentina Jagarčec

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija, navedenu literaturu te informacije dobivene od tvrtke Topomatika d.o.o.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Draganu Žeželju na ukazanom povjerenju, vremenu, strpljenju, korisnim savjetima i uputama pruženim pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se docentu dr. sc. Zoranu Domitranu, dipl. ing. na ustupljenoj literaturi.

Zahvaljujem se laborantima Laboratorija za elemente strojeva i konstrukcija na pomoći pri mjerenju.

Zahvaljujem se asistentu dr.sc. Branku Katani na provedenom mjerenju hrapavosti.

Zahvaljujem se tvrtki Topomatika d.o.o. gdje mi je bilo omogućeno korištenje opreme. Hvala direktoru tvrtke Topomatika d.o.o. g. Hercigonji te zaposlenicima na pomoći oko izrade rada.

Zahvaljujem se kolegi Tomislavu Breškom na pomoći oko rada u programu GOM Inspect.

Najveće zahvale idu mojoj obitelji.

Valentina Jagarčec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Valentina Jagarčec** Mat. br.: 0035185905

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na svojstva zupčanika s ravnim zubima izrađenih aditivnim tehnologijama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of printing direction impact on the properties of spur gears made with additive technologies**

Opis zadatka:

Aditivnim se tehnologijama nalazi sve veći broj mogućih primjena kod kojih, na zadovoljavajući način, mogu zamijeniti tradicionalne tehnologije proizvodnje odnosno ih i nadmašiti. No, kako je riječ o relativno mladoj tehnologiji, neki njezini aspekti još uvijek nisu dovoljno istraženi ili barem nisu za određene primjene.

U radu je potrebno provesti analizu utjecaja smjera dodavanja materijala na dimenzijska svojstva zupčanika s ravnim zubima, poglavito toleranciju boka zuba, odstupanje od evolvente, mjeru preko nekoliko zuba, odstupanje koraka na zahvatnoj crti i odstupanje uzdužne linije boka te iz njih izvedenih međuzavisnosti. Radom je potrebno obuhvatiti sljedeće:

- pregled literature u području primjene aditivnih tehnologija s naglaskom na dimenzije odnosno mehanička svojstva proizvoda.
- usporedbu dimenzijskih svojstava zupčanika proizvedenih s najmanje dvije različite aditivne tehnologije za po dva različita smjera dodavanja materijala.
- usporedbu rezultata mjerenja dobivenih s najmanje dvije mjerne metode od kojih je jedna mjerna metoda s optičkim mjernim uređajem.
- određivanje najvećih grešaka i analizu grešaka u funkciji smjera dodavanja materijala i tehnologije izrade.

U skladu s mogućnostima treba težiti i probnom radu zupčanika na postojećem ispitnom postolju s time da je referentni zupčanik već definiran. Može bitna ispitivanja provesti u Laboratoriju za elemente strojeva i konstrukcija odnosno, prema potrebi, u drugim laboratorijima. Sve potrebne podatke odrediti u dogovoru s mentorom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Dragan Žeželj

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. PREGLED LITERATURE.....	3
3. IZRADA ZUPČANIKA	10
4. MJERENJA PROVEDENA KONTAKTNIM MJERNIM UREĐAJIMA.....	13
4.1. Hrapavost	18
4.2. Uzubina	21
4.3. Točnost vrtnje u radijalnom smjeru	23
4.4. Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru	24
4.5. Mjera preko nekoliko zuba	26
5. POSTUPAK SKENIRANJA	29
6. MJERENJE U GOM INSPECTU	36
6.1. Učitavanje i poravnavanje nominalnog i stvarnog zupčanika.....	36
6.1.1. Konstruiranje elemenata za glavno poravnanje	38
6.2. Uzdužna linija boka	41
6.3. Debljina zuba	48
6.4. Korak na zahvatnoj crti	53
6.5. Evolventa	56
6.6. Uzubina	64
6.7. Točnost vrtnje u radijalnom smjeru	70
6.8. Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru	75
6.9. Mjera preko nekoliko zuba	81
7. USPOREDBA REZULTATA DOBIVENIH KONTAKTNIM MJERENJEM I MJERENJEM U GOM INSPECTU	85
8. ZAKLJUČAK.....	89
LITERATURA.....	91
PRILOZI.....	93

POPIS SLIKA

Slika 1 Princip dodavanja slojeva materijala kod aditivnih postupaka proizvodnje [6]	1
Slika 2 3D digitalizator ATOS Core [9].....	2
Slika 3 Epruvete izrađene FDM postupkom [4].....	4
Slika 4 Prikaz površine epruveta [11]	4
Slika 5 Dijagram sila - produljenje za materijal Z-ABS white [13].....	5
Slika 6 Položaj zupčanika Z1.1 pri izradi	10
Slika 7 Položaj zupčanika Z1.2 i Z1.3 pri izradi.....	10
Slika 8 Zupčanik Z1.1	10
Slika 9 Zupčanik Z1.2	11
Slika 10 Zupčanik Z1.3	11
Slika 11 Razlika u debljini zupčanika Z1.3.....	12
Slika 12 Djelomično raslojavanje zupčanika Z1.3	12
Slika 13 Mjerenje odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru	13
Slika 14 Oznake broja zubi	13
Slika 15 Princip označavanja bokova zubi.....	14
Slika 16 Mikrometar za mjerenje mjere preko zubi.....	14
Slika 17 Smjerovi ispitivanja hrapavosti.....	19
Slika 18 Prikaz položaja slojeva izrade kod zupčanika Z1.1	20
Slika 19 Prikaz različitih položaja slojeva na zubima zupčanika Z1.2	20
Slika 20 „Ravna" strana zupčanika	24
Slika 21 Korisničko sučelje upravljačkog programa tijekom postupka kalibracije	29
Slika 22 Referentne točke na podlozi i zupčanicu Z1.1	30
Slika 23 Zupčanik 1.2 sa slojem titanovog oksida	30
Slika 24 Prepoznate referentne točke	31
Slika 25 Uzorci paralelnih linija.....	31
Slika 26 Rezultat prvog skeniranja.....	32
Slika 27 Poznate i nove referentne točke	32
Slika 28 Povezivanje mjernih serija	33
Slika 29 Detalj poligonalne mreže trokuta	34
Slika 30 Poligonizirani zupčanik Z1.1	34
Slika 31 Poligonizirani zupčanik Z1.2	34
Slika 32 Poligonizirani zupčanik Z1.3	35
Slika 33 Početni položaj nominalnog i stvarnog zupčanika.....	36
Slika 34 <i>Prealignment</i>	37
Slika 35 Poravnanje po geometrijskim elementima (<i>Alignment by Geometric Elements</i>).....	37
Slika 36 <i>I-Inspect</i> i <i>Measuring Principle</i>	38
Slika 37 <i>Measuring Principle: Fitting Element</i> - metode.....	39
Slika 38 Ravnina kreirana na stvarnom zupčanicu	39
Slika 39 Ravnine konstruirane kod utora za pero na nominalnom elementu.....	40
Slika 40 Prikaz bočne linije na utoru za pero	40
Slika 41 Glavno poravnanje zupčanika Z1.3	41
Slika 42 Postupak kreiranja presjeka cilindra i cijelog zupčanika	42
Slika 43 Prikaz uzdužnih linija boka na nominalnom zupčanicu	42
Slika 44 Prikaz nekoliko uzdužnih linija boka na presjeku	43
Slika 45 Odstupanje uzdužne linije boka (<i>Check Straightness</i>) zupčanika Z1.2	43

Slika 46 Odstupanje uzdužnih linija boka zuba 11 zupčanika Z1.2.....	44
Slika 47 Prikaz odstupanja jedne uzdužne linije boka 11 zupčanika Z1.2	44
Slika 48 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.1 prikazana bojom	47
Slika 49 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.2 prikazana bojom	47
Slika 50 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.3 prikazana bojom	48
Slika 51 Konstruiranje krivulje <i>Presjek_translatirano</i>	49
Slika 52 Konstruiranje nominalne lučne debljine	49
Slika 53 Razlika između nominalne (plava) i stvarne (crvena) krivulje	50
Slika 54 Konstruiranje stvarne lučne debljine zuba 10 zupčanika Z1.1	50
Slika 55 Debljina zuba 2 zupčanika Z1.1	50
Slika 56 Nominalni presjek temeljnog cilindra i zupčanika	53
Slika 57 Temeljni koraci zupčanika Z1.1	54
Slika 58 Inspection Section On CAD.....	57
Slika 59 Odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.1	57
Slika 60 Odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.2	58
Slika 61 Odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.3	58
Slika 62 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 10_2 zupčanika Z1.1	63
Slika 63 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 13_1 zupčanika Z1.1	63
Slika 64 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 13_2 zupčanika Z1.1	63
Slika 65 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 4_1 zupčanika Z1.2.....	63
Slika 66 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 4_2 zupčanika Z1.2.....	64
Slika 67 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 9_1 zupčanika Z1.3.....	64
Slika 68 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 9_2 zupčanika Z1.3.....	64
Slika 69 Konstruiranje presjeka	65
Slika 70 Konstruiranje linije na presjeku zuba.....	66
Slika 71 Konstruiranje simetrale uzubine	66
Slika 72 Konstruiranje točke (središte kružnice)	66
Slika 73 Measuring Principle - Touch Circle.....	67
Slika 74 Konstruiranje tjemena cilindra.....	70
Slika 75 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.1	71
Slika 76 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.2	71
Slika 77 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.3	72
Slika 78 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru na zubu 3 (zupčanik Z1.1).....	72
Slika 79 Odstupanja točnosti vrtnje u radijalnom smjeru na zubu 20 zupčanika Z1.3	74
Slika 80 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.1	75
Slika 81 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.1	76
Slika 82 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.2.....	76
Slika 83 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.2.....	77
Slika 84 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na zupčaniku Z1.3.....	77
Slika 85 Konstruiranje zajedničke okomice krajnjih obuhvaćenih bokova	81
Slika 86 Konstruiranje mjere preko nekoliko zuba.....	82

POPIS TABLICA

Tablica 1	Rezultati statičkog vlačnog pokusa [11]	3
Tablica 2	Pregled nekih proizvođača SLA uređaja [14], [15].....	6
Tablica 3	Pregled nekih proizvođača SLS (selektivno lasersko srašćivanje) uređaja [14], [18]	6
Tablica 4	Pregled nekih proizvođača FDM (Taložno očvršćivanje) uređaja [16], [19].....	6
Tablica 5	Pregled nekih proizvođača PolyJet uređaja [19]	7
Tablica 6	Pregled nekih proizvođača 3DP (3D tiskanje) uređaja [17].....	7
Tablica 7	Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.1.....	15
Tablica 8	Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.2.....	16
Tablica 9	Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.3.....	17
Tablica 10	Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.1	26
Tablica 11	Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.2	27
Tablica 12	Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka – zupčanik Z1.1	44
Tablica 13	Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka - zupčanik Z1.2	45
Tablica 14	Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka – zupčanik Z1.3	45
Tablica 15	Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.1	51
Tablica 16	Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.2.....	51
Tablica 17	Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.3.....	51
Tablica 18	Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.1	54
Tablica 19	Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.2	54
Tablica 20	Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.3	55
Tablica 21	Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.1	59
Tablica 22	Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.2.....	60
Tablica 23	Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.3.....	61
Tablica 24	Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.1	67
Tablica 25	Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.2	68
Tablica 26	Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.3	68
Tablica 27	Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.1	72
Tablica 28	Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.2	73
Tablica 29	Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.3	73
Tablica 30	Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.1.....	77
Tablica 31	Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.1.....	78
Tablica 32	Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.2.....	78
Tablica 33	Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.2.....	79
Tablica 34	Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru zupčanika Z1.3	79
Tablica 35	Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.1	82
Tablica 36	Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.2.....	83
Tablica 37	Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.3.....	83
Tablica 38	Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.1	86
Tablica 39	Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.2.....	87
Tablica 40	Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.3.....	88

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

123789-01 Zupčanik Z1.1/Z1.2/Z1.3

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_{i,1.1.1}$	mm	Odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru
$a_{i,1.1.2}$	mm	Odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru
$a_{i,1.2.1}$	mm	Odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru
$a_{i,1.2.2}$	mm	Odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru
$a_{i,1.3.1}$	mm	Odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru
$\bar{a}_{1.1.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$\bar{a}_{1.1.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$\bar{a}_{1.2.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$\bar{a}_{1.2.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom
$\bar{a}_{1.3.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$\bar{A}_{a,ev,1.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja od evolvente
$\bar{A}_{a,ev,1.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja od evolvente
$\bar{A}_{a,ev,1.3}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.1,max,i}$	mm	Gornja vrijednost odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.1,min,i}$	mm	Donja vrijednost odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.2,max,i}$	mm	Gornja vrijednost odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.2,min,i}$	mm	Donja vrijednost odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.3,max,i}$	mm	Gornja vrijednost odstupanja od evolvente
$A_{ev,1.3,min,i}$	mm	Donja vrijednost odstupanja od evolvente
$\bar{A}_{\beta,1.1}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja uzdužne linije boka
$\bar{A}_{\beta,1.2}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja uzdužne linije boka
$\bar{A}_{\beta,1.3}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja uzdužne linije boka
$A_{\beta,1.1,i}$	mm	Odstupanje uzdužne linije
$A_{\beta,1.2,i}$	mm	Odstupanje uzdužne linije
$A_{\beta,1.3,i}$	mm	Odstupanje uzdužne linije
d_k	mm	Promjer kružnice <i>Kuglica_i</i>
f_s	mm	Faktor uvećanja dimenzija
l	mm	Udaljenost središta kružnice <i>Kuglica_i</i> i središta zupčanika
m	-	Broj točaka u kojima se provodi mjerenje točnosti vrtnje u aksijalnom smjeru
$m_{a1.1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$m_{a1.1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u

		aksijalnom smjeru
$m_{a1.2.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$m_{a1.2.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$m_{a1.3.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru
$m_{aks,1.1}$	μm	Standardno odstupanje aksijalne hrapavosti
$m_{aks,1.2}$	μm	Standardno odstupanje aksijalne hrapavosti
$m_{aks,1.3}$	μm	Standardno odstupanje aksijalne hrapavosti
$m_{ev,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja od evolvente
$m_{ev,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja od evolvente
$m_{ev,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja od evolvente
$m_{p,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanje temeljnog koraka
$m_{p,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanje temeljnog koraka
$m_{p,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanje temeljnog koraka
$m_{r,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
$m_{r,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
$m_{r,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
$m_{rad,1.1}$	μm	Standardno odstupanje radijalne hrapavosti
$m_{rad,1.2}$	μm	Standardno odstupanje radijalne hrapavosti
$m_{rad,1.3}$	μm	Standardno odstupanje radijalne hrapavosti
$m_{s,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja lučne debljine
$m_{s,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja lučne debljine
$m_{s,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja lučne debljine
$m_{u,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine
$m_{u,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine
$m_{u,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine
$m_{W,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjere preko zuba
$m_{W,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjere preko zuba
$m_{\beta,1.1}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja uzdužne linije
$m_{\beta,1.2}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja uzdužne linije
$m_{\beta,1.3}$	mm	Standardno odstupanje mjerenja odstupanja uzdužne linije
n	-	Broj bokova zubi na kojima je mjerena hrapavost
$\bar{p}_{a,1.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka
$\bar{p}_{a,1.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka
$\bar{p}_{a,1.3}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka
$p_{1.1,i}$	mm	Odstupanje temeljnog koraka

$p_{1.2,i}$	mm	Odstupanje temeljnog koraka
$p_{1.3,i}$	mm	Odstupanje temeljnog koraka
r	mm	Polumjer diobenog cilindra
$\bar{r}_{a_1.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
$\bar{r}_{a_1.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
$\bar{r}_{a_1.3}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru
r_b	mm	Polumjer temeljnog cilindra
$r_{i,1.1}$	mm	Odstupanje vrtnje u radijalnom smjeru
$r_{i,1.2}$	mm	Odstupanje vrtnje u radijalnom smjeru
$r_{i,1.3}$	mm	Odstupanje vrtnje u radijalnom smjeru
$r_{48,32}$	mm	Polumjer kružnice na kojoj se nalazi središte kružnice <i>Kuglica_i</i>
$\overline{Ra}_{aks,1.1}$	μm	Srednja vrijednost aksijalne hrapavosti
$\overline{Ra}_{aks,1.2}$	μm	Srednja vrijednost aksijalne hrapavosti
$\overline{Ra}_{aks,1.3}$	μm	Srednja vrijednost aksijalne hrapavosti
$Ra_{i,aks,1.1}$	μm	Aksijalna hrapavost
$Ra_{i,aks,1.2}$	μm	Aksijalna hrapavost
$Ra_{i,aks,1.3}$	μm	Aksijalna hrapavost
$Ra_{i,rad,1.1}$	μm	Radijalna hrapavost
$Ra_{i,rad,1.2}$	μm	Radijalna hrapavost
$Ra_{i,rad,1.3}$	μm	Radijalna hrapavost
$\overline{Ra}_{rad,1.1}$	μm	Srednja vrijednost radijalne hrapavosti
$\overline{Ra}_{rad,1.2}$	μm	Srednja vrijednost radijalne hrapavosti
$\overline{Ra}_{rad,1.3}$	μm	Srednja vrijednost radijalne hrapavosti
s_{nom}	mm	Nominalna debljina zuba
$\bar{s}_{1.1}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja lučne debljine
$\bar{s}_{1.2}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja lučne debljine
$\bar{s}_{1.3}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja lučne debljine
$s_{1.1,i}$	mm	Odstupanje lučne debljine
$s_{1.2,i}$	mm	Odstupanje lučne debljine
$s_{1.3,i}$	mm	Odstupanje lučne debljine
$T_{aks_1.1.1}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{aks_1.1.2}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{aks_1.2.1}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{aks_1.2.2}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{aks_1.3}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{rad_1.1}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{rad_1.2}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje
$T_{rad_1.3}$	mm	Tolerancija ravnosti i kružnosti vrtnje

$\bar{u}_{a_1.1}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba
$\bar{u}_{a_1.2}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba
$\bar{u}_{a_1.3}$	mm	Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba
$u_{i_1.1}$	mm	Odstupanje širine zuba
$u_{i_1.2}$	mm	Odstupanje širine zuba
$u_{i_1.3}$	mm	Odstupanje širine zuba
$\bar{u}_{1.1}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja širine uzubine
$\bar{u}_{1.2}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja širine uzubine
$\bar{u}_{1.3}$	mm	Srednja vrijednost odstupanja širine uzubine
$W_{i_1.1}$	mm	Mjera preko zuba
$W_{i_1.2}$	mm	Mjera preko zuba
$\bar{W}_{1.1}$	mm	Srednja vrijednost mjere preko zuba
$\bar{W}_{1.2}$	mm	Srednja vrijednost mjere preko zuba
x_i	mm	Relativna vrijednost odstupanja određene veličine
x_{i_G}	mm	Relativna vrijednost odstupanja određene veličine dobivena mjerenjem u GOM Inspectu na zubu (boku zuba, uzubini) <i>i</i>
x_{i_k}	mm	Relativna vrijednost odstupanja određene veličine dobivena kontaktnim mjerenjem na zubu (boku zuba, uzubini) <i>i</i>
z_w	-	Mjerni broj zubi

SAŽETAK

U ovom radu napravljena je analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na dimenzijska svojstva zupčanika s ravnim zubima izrađenih aditivnom tehnologijom.

Na početku je napravljen pregled literature u području aditivnih tehnologija s naglaskom na dimenzije i mehanička svojstva. Zupčanici su izrađeni postupkom taložnog očvršćivanja (FDM postupak) tako da se zupčanik Z1.1 pri izradi nalazio u okomitom položaju, dok su zupčanici Z1.2 i Z1.3 bili u vodoravnom položaju. Materijal zupčanika Z1.1 i Z1.2 je *EasyFil™ ABS* (akrilonitril butadien stiren), a materijal zupčanika Z1.3 je *Longchain PA* (poliamid). Nakon izrade zupčanika provedena su mjerenja kontaktnim mjernim uređajima te optičkim mjernim uređajem ATOS Core 135. Opisan je postupak skeniranja. Mjerenje na skeniranim zupčanicima provedeno je u programu GOM Inspect. Pri analizi rezultata mjerenja određene su srednje vrijednosti rezultata i standardna odstupanja na temelju kojih su donjeti zaključci o utjecaju smjera dodavanja materijala na svojstva zupčanika. Na kraju je napravljena usporedba rezultata dobivenih kontaktnim mjerenjima i mjerenjem u programu GOM Inspect.

Ključne riječi: aditivne tehnologije, smjer dodavanja materijala, FDM postupak, zupčanici, kontaktni mjerni uređaji, optički mjerni uređaj ATOS Core 135, GOM Inspect

SUMMARY

Analysis of printing direction impact on the dimensional properties of spur gears manufactured using an additive technology is the main focus of this thesis. It begins with a literature review on additive technologies with an emphasis on dimensions and mechanical properties.

Gears are manufactured using additive FDM (Fused Deposition Modeling) method – gear Z1.1. is vertically, whereas gears Z1.2 and Z1.3 are horizontally oriented while 3D printed.

In a case of materials, gears Z1.1 and Z1.2 are made of *EasyFil™ ABS* (Acrylonitrile butadiene styrene), whereas the gear Z1.3 is made of *Long-chain PA* (polyamide).

After manufacturing, gears were measured with contact measuring devices and with optical measuring device AOTS Core 135. Description of the scanning process can be found in the thesis. The next step is a measuring process of gears carried out using the GOM Inspect software thus enabling making calculations of average values of standard deviations. Those results are significant for drawing a conclusion about an influence on a printing direction to mechanical properties of gears. Above all, comparison of results obtained from contact measurements and measurements using the GOM Inspect is made and results are enclosed in the thesis.

Key words: additive technologies, printing direction, FDM method, spur gears, contact measuring devices, optical measuring device ATOS Core 135, GOM Inspect

1. UVOD

Aditivni postupci proizvodnje (AM, e. *Additive Manufacturing*, aditivna proizvodnja) počeli su se razvijati već 1980-ih godina. Ti postupci se temelje na dodavanju materijala, najčešće sloj po sloj što je slikovito prikazano na Slika 1. Na taj način je omogućeno dobivanje vrlo složenih geometrija koje bi „klasičnim“, suptraktivnim postupcima proizvodnje bilo vrlo teško ili nemoguće postići. Konačna tvorevina dobiva se na temelju 3D računalnog modela te nisu potrebni još međukoraci između 3D modeliranja i konačne izrade [4].



Slika 1 Princip dodavanja slojeva materijala kod aditivnih postupaka proizvodnje [6]

Aditivnim postupcima proizvodnje uspješno se mogu izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu. No brzina izrade, izbor materijala i dimenzije modela zasad su ograničeni [6].

Iako se tvorevine nastale aditivnim postupcima koriste u različite svrhe, njihova se svojstva (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije, itd.) još uvijek dosta razlikuju od tvorevina načinjenih nekim klasičnim postupcima prerade polimera (npr. injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem). Stoga se nameće potreba za poboljšanjem materijala i strojeva, ali i za mijenjanjem raznih parametara koji mogu poboljšati ta svojstva [2].

U ovom radu napravljena je analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na svojstva zupčanika. Zupčanici su važni i kompleksni strojni elementi kod kojih o točnosti izrade ovise njihova svojstva i način rada. Analiza je napravljena na tri zupčanika s različitim smjerovima dodavanja materijala koji su izrađeni FDM postupkom. Materijal dvaju zupčanika je *EasyFil™ ABS* (akrilonitril butadien stiren) tvrtke Formfutura, a jedan zupčanik izrađen je

od materijala *Longchain PA* (poliamid) tvrtke TREED. Napravljena je analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na dimenzijska svojstva zupčanika, poglavito na toleranciju boka zuba, odstupanje od evolvente, mjeru preko nekoliko zuba, odstupanje koraka na zahvatnoj crti i odstupanje uzdužne linije boka. Mjerenje zupčanika provedeno je tradicionalnim putem (mjerenje komparatorom, mikrometrom za mjeru preko nekoliko zuba) te 3D digitalizatorom *ATOS Core 135*.

3D digitalizatori ATOS Core tvrtke GOM GmbH su optički beskontaktni mjerni uređaji. Temelje se na principu triangulacije. 3D digitalizator projicira na mjerni objekt uzorke paralelnih linija i snima ih pomoću dvije digitalne kamere. Za svaki se snimljeni piksel određuju trodimenzionalne koordinate pripadajuće točke s površine mjernog objekta. Na taj način se stvara poligonizirana mreža koja opisuje oblik mjernog objekta [7].



Slika 2 3D digitalizator ATOS Core [9]

Fundamentalna razlika između kontaktnih i beskontaktnih aktivnih mjernih metoda je u brzini i količini mjernih točaka koje su u stanju digitalizirati u jednom procesu mjerenja. Stoga se i definicija jednog procesa mjerenja razlikuje utoliko, što se kod kontaktnih mjerenja po jednom kontaktu mjernog senzora s površinom mjernog objekta izmjeri samo položaj jedne mjerne točke, dok će broj izmjerenih položaja točaka prilikom korištenja optičkih projekcijskih mjernih senzora ovisiti o načinu definicije mjerne točke te fizičkoj rezoluciji korištenih mjernih kamera i varirati od jedne do nekoliko stotina tisuća mjernih točaka [8].

Još jedna od prednosti mjerenja uređajem ATOS Core je to što su se tim putem mogle izmjeriti neke dimenzije na zupčaniku koje tradicionalnim putem nije bilo moguće praktično izmjeriti (npr. lučna debljina).

2. PREGLED LITERATURE

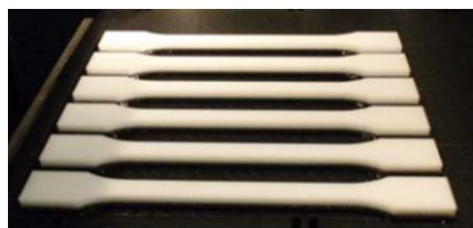
Na početku ovog rada napravljen je pregled literature. Istražena je literatura u području aditivnih tehnologija. Naglasak pri pretraživanju bio je na dimenzijama i mehaničkim svojstvima proizvoda. Pregledana su neka već postojeća istraživanja na tom području. Neke informacije o postupcima proizvodnje i materijalima pružaju i sami proizvođači pa je i to navedeno.

Autori članka „Usporedba različitih metoda brze izrade prototipa“ (e. *Comparison of Different Rapid Prototyping Methods*) proveli su ispitivanje uspoređujući mehanička svojstva te kvalitetu površine epruveta nastalih injekcijskim prešanjem, FDM postupkom (taložno očvršćivanje, e. *Fused Deposition Modeling*) te PolyJet postupkom. FDM postupkom su izrađene epruvete printanjem u tri smjera – vodoravnom, okomitom te longitudinalnom (Slika 3). Materijal izrade pri svakom postupku je ABS (akrilonitril butadien stiren). FDM postupak je proveden na uređaju Stratasys Dimension SST 768, dok je PolyJet postupak proveden na uređaju Objet Eden 250. Mehanička svojstva su dobivena statičkim vlačnim ispitivanjem. Najbolja mehanička svojstva imaju epruvete izrađene PolyJet postupkom. Najlošija mehanička svojstva imaju epruvete nastale FDM postupkom (Tablica 1). Uspoređujući samo epruvete izrađene FDM postupkom tada najbolja mehanička svojstva ima epruveta printana u vodoravnom položaju. Na temelju rezultata zaključuje se da epruvete proizvedene FDM postupkom iz istog materijala imaju različita mehanička svojstva u ovisnosti o usmjerenosti slojeva pri izradi (anizotropnost). U članku je uspoređena i kvaliteta površine epruveta izrađenih PolyJet i FDM postupkom te je zaključeno da epruvete izrađene PolyJet postupkom imaju puno bolju kvalitetu površine što je posljedica manje debljine slojeva. Debljina sloja kod PolyJet postupka je 0,016 mm, dok kod FDM postupka iznosi 0,254 mm [11]. No, cijena konačnog proizvoda je viša za PolyJet postupak [25].

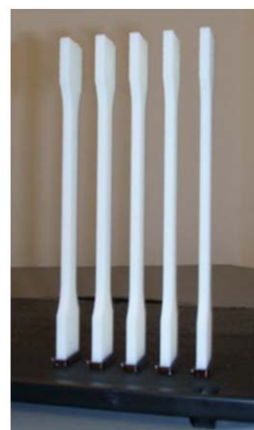
Tablica 1 Rezultati statičkog vlačnog pokusa [11]

Metoda izrade	σ, Mpa	A, %	E, Mpa
PolyJet	1,37	5,75	1836
Injekcijsko prešanje	0,64	2,75	2302
FDM – vodoravno	0,40	2,98	1774
FDM – longitudinalno	0,49	2,71	1271

FDM – okomito	0,21	1,53	1631
---------------	------	------	------



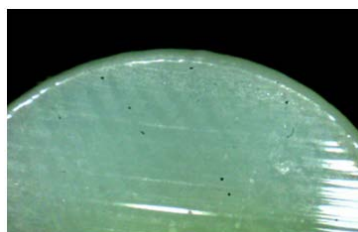
a) FDM – vodoravni smjer printanja



b) FDM – okomiti smjer printanja



c) FDM – longitudinalni smjer printanja

Slika 3 Epruvete izrađene FDM postupkom [4]

a) PolyJet



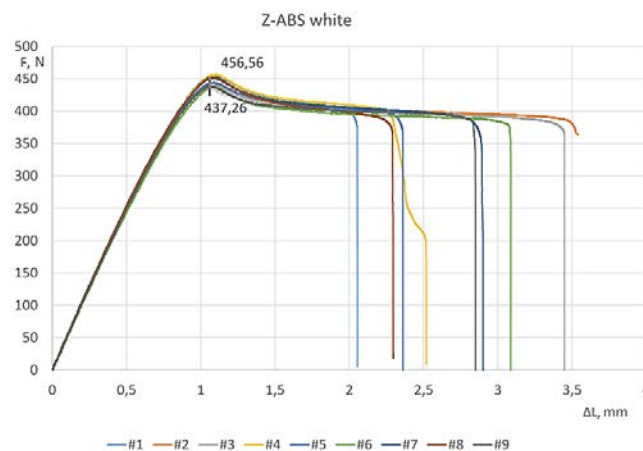
b) FDM

Slika 4 Prikaz površine epruveta [11]

Jedan od zaključaka članka „Usporedba geometrijske preciznosti plastičnih komponenata izrađenih subtraktivnim i aditivnim metodama“ (e. *Comparison of Geometric Precision of Plastic Components Made By Subtractive and Additive Methods*) jest da su pogreške u geometriji proizvoda nastalog nekom aditivnom tehnologijom uvelike posljedica debljine sloja materijala [10].

U članku „Mehanička svojstva niskobudžetnih tvorevina nastalih FDM i SLA postupcima“ (e. *Mechanical Properties of FDM and SLA Low-Cost 3-D Prints*) mjerenja također pokazuju veliku anizotropnost tvorevina nastalih FDM postupkom. Osim toga, istaknuto je da mehanička svojstva ovise o parametrima izrade, a pogotovo o smjeru izrade i postotku ispune. Pri ispitivanju su dobiveni rezultati gdje se vidi da ispitni uzorci pucaju pri različitim

produljenjima (Slika 5). Proizvođači vjeruju da su mogući razlozi tome nepravilnosti kod printanja i pojava zarezova [13].



Slika 5 Dijagram sila - produljenje za materijal Z-ABS white [13]

U članku „Eksperimentalna analiza svojstava materijala za brzu izradu prototipa“ (e. *Experimental analysis od properties of materials for rapid prototyping*) eksperimentalno su dobivene vrijednosti nekih mehaničkih svojstava. Neke vrijednosti nisu u skladu s vrijednostima koje je objavio proizvođač. Za *Vero* materijal proizvođač je napisao da bi *VeroBlack* trebao imati najviši modul savijanja dok je ispitivanje pokazalo da ima najmanji [5].



Ono što navodi tvrtka Formlabs jest da više temperature kod SLA (stereolitografija) postupka dovode do boljih mehaničkih svojstava [21].

Tvrtka 3D Systems objavila je „Vodič za kupce uređaja za aditivnu proizvodnju za profesionalnu i primjenu u proizvodnji“ (e. *3D Printer Buyer's Guide for Professional and Production Applications*). U njemu su navedene prednosti nekih tehnologija aditivne proizvodnje, karakteristike tih tehnologija, a u nastavku su navedene neke od njih. Kod postupaka koji koriste praškasti materijal s vezivom (npr. SLS – selektivno lasersko srašćivanje) obično se javlja najmanje distorzija pri stezanju kao posljedica procesa izrade i generalno su jako točni. Postupci koji koriste polimerne materijale obično koriste toplinu i/ili UV zračenje čime se unose dodatne varijable koje mogu utjecati na točnost. Ostali čimbenici koji mogu utjecati na točnost tvorevine su i veličina i geometrija tvorevine. Najveći volumen izrade imaju uređaji koji primjenjuju postupak stereolitografije [20].



Podatke o svojstvima materijala te dimenzijama pružaju i sami proizvođači. U nastavku su podaci koje su objavili proizvođači uređaja.

U Tablica 2, Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5 i Tablica 6 navedeni su neki od najčešćih postupaka aditivne proizvodnje, proizvođači, modeli uređaja te dostupne vrijednosti volumena izrade, točnosti te debljine sloja.


Tablica 2 Pregled nekih proizvođača SLA uređaja [14], [15]

SLA				
Proizvođač	Model	Volumen izrade, mm ³	Točnost, mm	Debljina sloja, mm
 3D SYSTEMS	<i>ProJet 6000 HD</i>	250x250x250	0,025 – 0,05 / 25,4 mm	-
	<i>ProJet 7000 HD</i>	380x380x250		-
	<i>Pro X 800</i>	650x750x550		-
	<i>Pro X 950</i>	1500x750x550		-
 formlabs	<i>Form 1+</i>	125x125x165	-	0,02, 0,05, 0,1, 0,2
	<i>Form 2</i>	145x145x175	-	0,025, 0,05, 0,1

Tablica 3 Pregled nekih proizvođača SLS (selektivno lasersko srašćivanje) uređaja [14], [18]


SLS				
Proizvođač	Model	Volumen izrade, mm ³	Točnost, mm	Debljina sloja, mm
 3D SYSTEMS	<i>Pro X SLS 500</i>	381x330x460	-	0,08 – 0,15
	<i>sPro 60 HD-HS</i>	381x330x460	-	
	<i>sPro 140</i>	550x550x1460	-	
	<i>sPro 230</i>	550x550x750	-	
 eos	<i>Formiga P110</i>	200x250x330	-	0,06, 0,1, 0,12
	<i>EOS P396</i>	340x340x600	-	0,06, 0,1, 0,12, 0,15, 0,18
	<i>EOSINT P 800</i>	700x380x560	-	0,12
	<i>EOS P 770</i>	700x380x580	-	0,06, 0,1, 0,12, 0,15, 0,18

Tablica 4 Pregled nekih proizvođača FDM (Taložno očvršćivanje) uređaja [16], [19]


FDM				
Proizvođač	Model	Volumen izrade, mm ³	Točnost, mm	Debljina sloja, mm
 stratasys	<i>Fortus 380 mc</i>	355x305x305	0,127 ili	0,33, 0,254, 0,178, 0,127
	<i>Fortus 450 mc</i>	406x355x406	0,0015 mm/mm	

	<i>Fortus 900 mc</i>	914,4x609,6x914,4	0,089 ili 0,0015 mm/mm	0,508, 0,33, 0,254, 0,178
zortrax zortrax	<i>M300</i>	300x300x300	-	0,8
	<i>M200</i>	200x200x200	-	
	<i>Inventure</i>	140x140x140	-	

Tablica 5 Pregled nekih proizvođača PolyJet uređaja [19]

PolyJet				
Proizvođač	Model	Volumen izrade, mm ³	Točnost, mm	Debljina sloja, mm
stratasys 	<i>Stratasys J750</i>	490x390x200	0,2	0,014
	<i>Objet 1000 Plus</i>	1000x800x500	0,6	0,016
	<i>Objet Eden 260 VS</i>	255x252x200	0,02-0,085 za dimenzije <50 mm, ostalo – 0,2	0,016

Tablica 6 Pregled nekih proizvođača 3DP (3D tiskanje) uređaja [17]

3DP				
Proizvođač	Model	Volumen izrade, mm ³	Točnost, mm	Debljina sloja, mm
voxeljet 	<i>VX 200</i>	300x200x150	-	0,15
	<i>VX 500</i>	500x400x300	-	
	<i>VX 1000</i>	1000x600x500	-	

Najveći volumen izrade među navedenim modelima ima uređaj *Pro X 950* tvrtke 3D Systems s SLA tehnologijom (1500 mm x 800 mm x 500 mm). Najmanji volumen izrade imaju Formlabs-ovi modeli (SLA tehnologija) te Zortrax-ovi modeli (FDM tehnologija).

Informacije o točnosti dimenzija ne objavljuju svi proizvođači. Točnost tvorevina manjih od 25 mm za SLA postupak iznosi 0,025 mm – 0,05 mm (3D Systems), za FDM postupak iznosi 0,038 mm (0,0015 mm/mm·25 mm) (Stratasys) , a za PolyJet postupak iznosi 0,02 mm – 0,085 mm. Točnost tvorevina većih od 50 mm se smanjuje pa za FDM postupak iznosi 0,127 mm ili 0,089 mm, a za PolyJet postupak iznosi 0,2 mm ili 0,6 mm (Stratasys). Točnost za dimenzije do 25 mm je najbolja kod SLA i PolyJet postupka, dok je prema ovim informacijama proizvođača najveća točnost proizvoda većih dimenzija kod FDM postupka (0,089 mm, 0,127 mm).

Najmanja debljina sloja materijala (0,014 mm – 0,016 mm) je kod PolyJet postupka (Stratasys), zatim slijedi SLA postupak (Formlabs) pa SLS postupak (Eos; 3D Systems) i 3DP postupak (0,15 mm). Najveća debljina sloja materijala je kod FDM postupka. Manja je kod uređaja tvrtke Stratasys (0,127 mm – 0,508 mm), a najveća je kod uređaja tvrtke Zortrax (0,8 mm).

Proizvođači nude različite materijale čime se jednom tehnologijom izrade postižu tvorevine različitih svojstava. Vrijednosti mehaničkih svojstva dobivene su različitim ispitivanjima po različitim normama. Ista svojstva dobivena ispitivanjima po različitim normama ne mogu se uspoređivati tako da su ovdje navedeni samo rezultati ispitivanja po normi ASTM D 648 kako bi se mogla napraviti usporedba. Većina proizvođača navodi vrijednosti vlačne čvrstoće i istežljivosti pa su one istaknute u nastavku.

Materijal ABS često se koristi kao i materijali slični njemu (e. *ABS-Like Class*). ABS kod SLA postupka ima malo naknadno skupljanje i izvrsnu završnu površinu. Gotovi proizvodi imaju visoku točnost s malim vitoperenjem [2]. Materijali slični ABS-u (*Accura 55, VisiJet SL Black, ...*) kod SLA postupka (tvrtka 3D Systems) imaju vlačnu čvrstoću u rasponu 45 MPa – 68 MPa, dok im je istežljivost u rasponu 5% – 14%. Materijal *ABSPlus* kod FDM postupka (tvrtka Stratasys) ima vlačnu čvrstoću jednaku 33 MPa, a istežljivost je jednaka 6%. Materijal *Digital ABS* kod PolyJet postupka (tvrtka Stratasys) ima vlačnu čvrstoću u rasponu 55 MPa – 60 MPa, a istežljivost 25% – 40% [14], [19].

Proizvode se i materijali svojstava sličnih PP-u (polipropilen). Polipropilen kod SLA postupka ima veliku savitljivost uz zadržavanje početnog oblika, dobre rezolucije i točnosti [2]. Materijali slični PP-u tvrtke 3D Systems kod SLA postupka (*VisiJet SL Flex, Accura 25*) imaju vlačnu čvrstoću u rasponu 33 MPa – 50 MPa, a istežljivost je u rasponu 7% - 22%. Kod SLS postupka (tvrtka 3D Systems) materijali slični polipropilenu imaju vrijednosti vlačne čvrstoće u istom rasponu, dok je maksimalna vrijednost istežljivosti 47% [14].

Slične vrijednosti navedenih svojstava za materijale slične ABS-u i PP-u imaju i materijali drugih proizvođača.

Osim tih materijala postoje i materijali postojani pri visokim temperaturama, npr. *High Temp* (tvrtka Formlabs) ima vlačnu čvrstoću jednaku 51,1 MPa, a istežljivost je jednaka 2%. Materijal sličan gumi (*TangoPlus FLX930*; tvrtka Stratasys) ima u odnosu na prije navedene materijale malu vlačnu vrstoću (0,8 MPa – 1,5 MPa), no zato mu je istežljivost puno veća (170% - 220%). Postoji još niz materijala i proizvođači u mnogo slučajeva objavljuju informacije o njihovim svojstvima. No, ti rezultati ne moraju biti točni i ovisе o mnogo

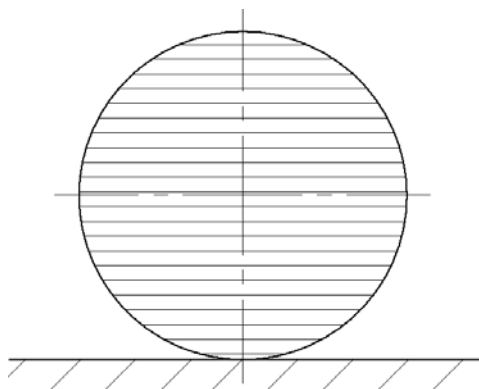
čimbenika, što ističe i sam proizvođač. Konačna mehanička svojstva ovise o geometriji tvorevine, o veličini tvorevine, o orijentaciji tvorevine pri izradi, o parametrima izrade (postotak ispune, temperatura, brzina izrade, ...), temperaturi, uvjetima gdje se tvorevina koristi, o uvjetima ispitivanja [14], [15], [16], [17], [18], [19]. To znači da ove vrijednosti mogu poslužiti u svrhu usporedbe, ali ne i kao točna vrijednost.

Na temelju pregledane literature zaključeno je kako svojstva konačne tvorevine ovise o mnogo čimbenika. Jedna od važnih činjenica je pojava anizotropnosti svojstava koja je posljedica načina izrade.

U radu će biti pokazano kako se dimenzije tvorevine mijenjaju u ovisnosti o orijentaciji tvorevine pri izradi.

3. IZRADA ZUPČANIKA

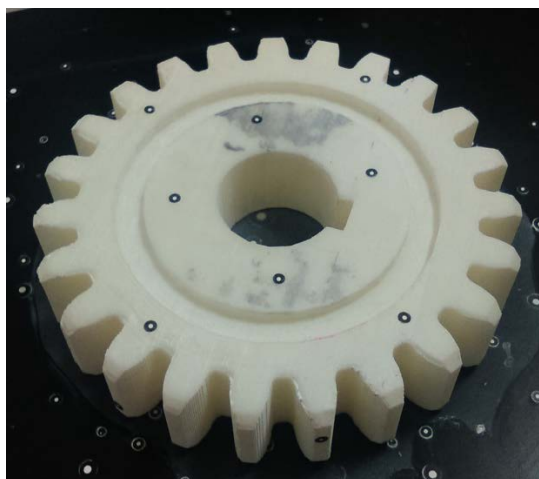
Zupčanici Z1.1, Z1.2 i Z1.3 (Slika 8, Slika 9 i Slika 10) izrađeni su na uređaju Dimension SST 768 (FDM tehnologija) tvrtke Stratasys. Materijal zupčanika Z1.1 i Z1.2 je *EasyFilTM ABS* (akrilonitril butadien stiren) tvrtke Formfutura. Proizvođač je objavio tehničke karakteristike materijala. Materijal se ne može uspoređivati s običnim ABS-om zahvaljujući izvrsnim svojstvima. *EasyFilTM ABS* je trajan i lagan, otporan je na udarce, „lagano“ se printa zahvaljujući ograničenom vitoperenju. Vlačna čvrstoća iznosi 38 MPa, istezljivost 9% [22]. Debljina sloja izrade je 0,254 mm. Zupčanici Z1.1 i Z1.2 se razlikuju po smjeru izrade. Z1.1 je printan u okomitom položaju (Slika 6), a Z1.2 printan je u vodoravnom položaju (Slika 7).



Slika 6 Položaj zupčanika Z1.1 pri izradi



Slika 7 Položaj zupčanika Z1.2 i Z1.3 pri izradi



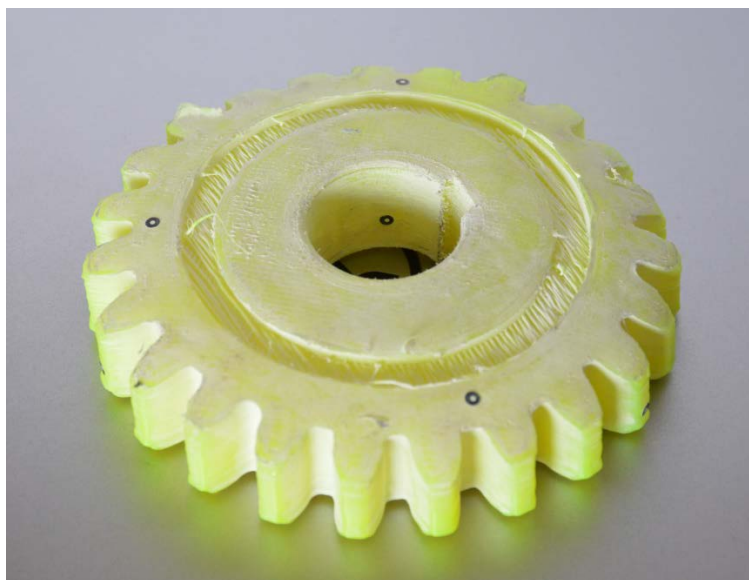
Slika 8 Zupčanik Z1.1



Slika 9 Zupčanik Z1.2

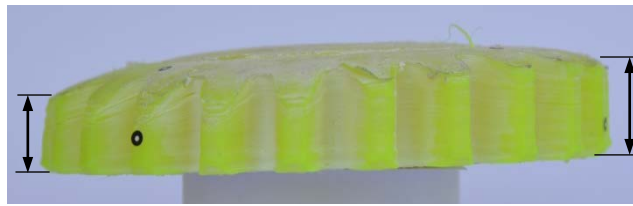
Zupčanik Z1.3 je izrađen od materijala *Longchain PA* (poliamid) tvrtke TREED. Printan je u vodoravnom položaju. Proizvođač ističe veliku krutost materijala te da je idealan kao zamjena za metal. Idealan je za industrijsku i tehničku primjenu [22].

Ono što se vidi bez ikakvih mjerenja je izrazito loša izvedba zupčanika Z1.3 (Slika 10). Bočna strana zupčanika koja je bila na podlozi pri izradi nakon kompletne izrade zupčanika se vidno iskrivila. Uzrok tomu je nedovoljno zagrijana komora zbog koje se donji dio zupčanika hladio prebrzo što je dovelo do skupljanja i iskrivljenja te strane.



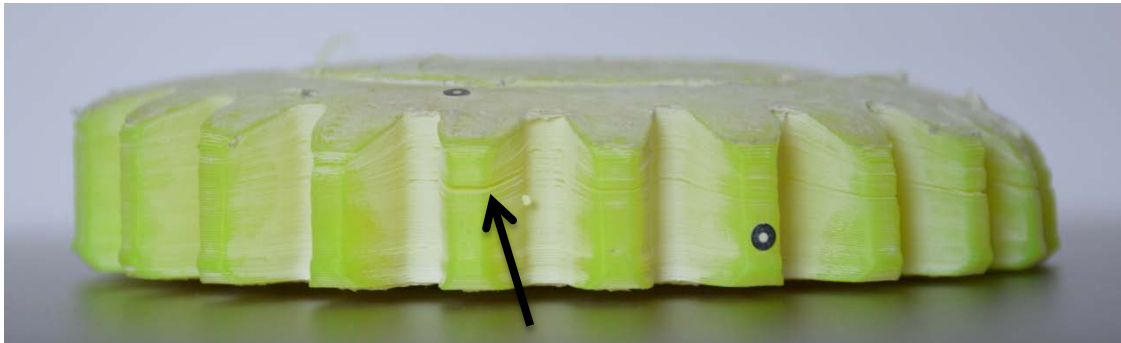
Slika 10 Zupčanik Z1.3

Na dijelu zupčanika koji je bio okrenut vratima uređaja debljina zupčanika je manja nego na ostalom dijelu što je posljedica pojačanog hlađenja. (Slika 11)



Slika 11 Razlika u debljini zupčanika Z1.3

Na dijelu zupčanika došlo je i do raslojavanja. (Slika 12)



Slika 12 Djelomično raslojavanje zupčanika Z1.3

Uzroci loše izvedbe mogu biti i loše odabrani drugi parametri izrade (brzina izrade, postotak ispune, ...), a možda i neodgovarajući materijal za taj uređaj.

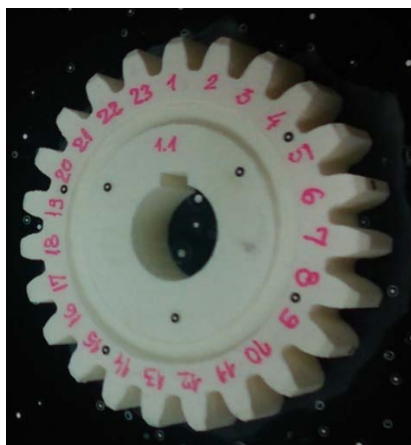
Zupčanik od materijala *Longchain PA* nije bilo moguće izraditi u okomitom položaju.

4. MJERENJA PROVEDENA KONTAKTNIM MJERNIM UREĐAJIMA

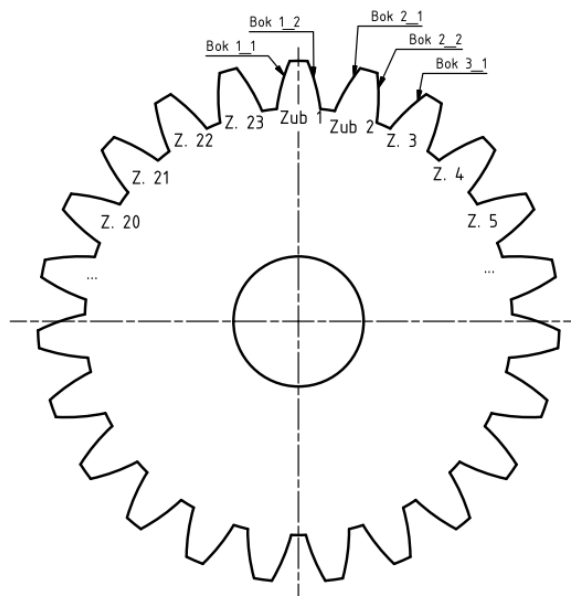
Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za elemente strojeva i konstrukcija su provedena mjerenja na zupčanicima Z1.1, Z1.2 i Z1.3. Zupčanci su postavljeni na postolje (Slika 13). Utvrđena je točnost vrtnje u radijalnom smjeru nosive osovine te je ona iznosila manje od 0,005 mm na (približno) sredini osovine. Komparatorom razlučivosti 0,01 mm je mjerena točnost vrtnje u radijalnom smjeru na tjemnim promjerima zupčanika (Slika 13). Točnost vrtnje u radijalnom smjeru nulirana je na zubi 1 te su na drugim zubima mjerena odstupanja u odnosu na njega. Princip označavanja zubi i bokova zubi prikazan je na Slika 14 i Slika 15.



Slika 13 Mjerenje odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru



Slika 14 Oznake broja zubi



Slika 15 Princip označavanja bokova zubi

Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru mjerena je u četiri točke kod zubiju 1, 7, 13 i 19 s lijeve i simetrično s desne strane zupčanika na promjeru $\varnothing 91$ mm. Nulirana je kod zuba broj 1 te su u odnosu na njega mjerena odstupanja na ostala tri mjesta. Komparatorom su mjerena i odstupanja širine uzubine zupčanika. Ticalo komparatora pozicionirano je u uzubinu između zuba 1 i 2 i na tom mjestu je mjera uzubine nulirana. U svakoj dalje uzubini komparator pokazuje odstupanja širine uzubine u odnosu na prvu uzubinu. Na prvih 10 bokova zubi izmjerena je hrapavost u radijalnom i aksijalnom smjeru uređajem za mjerenje hrapavosti SURFTEST-SJ-210, Mitutoyo. Mjera preko nekoliko zubi mjerena je posebnim mikrometrom (Slika 16).

Rezultati mjerenja prikazani su u Tablica 7 – Tablica 11.



Slika 16 Mikrometar za mjerenje mjere preko zubi

Tablica 7 Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.1

Zupčanik Z1.1					Hrapavost	
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm	Radijalna, μm	Aksijalna, μm
1	0	0	0	0	4,85	1,14
2	0	-0,06	-	-	7,96	5,59
3	-0,065	-0,08	-	-	5,09	2,22
4	-0,09	-0,1	-	-	6,07	2,83
5	-0,18	-0,09	-	-	6,72	4,75
6	-0,19	-0,01	-	-	5,16	5,15
7	-0,2	-0,05	0,05	-0,07	7,00	2,41
8	-0,18	0,04	-	-	5,12	9,30
9	-0,05	0,02	-	-	4,56	12,06
10	-0,04	0,1	-	-	8,80	5,74
11	0,1	0,11	-	-	-	-
12	0,18	0,1	-	-	-	-
13	0,18	0,08	0,14	-0,12	-	-
14	0,16	0,03	-	-	-	-
15	-0,13	0,1	-	-	-	-
16	-0,08	0,03	-	-	-	-
17	-0,03	0,07	-	-	-	-
18	-0,03	0,09	-	-	-	-
19	-0,09	0,08	0,08	-0,12	-	-
20	-0,04	-0,03	-	-	-	-
21	-0,01	-0,02	-	-	-	-
22	0,05	0,01	-	-	-	-
23	0,03	-0,1	-	-	-	-

Tablica 8 Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.2

Zupčanik Z1.2					Hrapavost	
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm	Radijalna, μm	Aksijalna, μm
1	0	0	0	0	0,35	7,15
2	0,01	-0,01	-	-	0,58	7,30
3	0,03	0,02	-	-	0,23	7,15
4	0,06	0,02	-	-	0,26	7,57
5	0,06	0,05	-	-	0,40	7,94
6	0,06	0,05	-	-	0,42	8,71
7	0,06	0,02	-0,02	-0,06	0,46	7,16
8	0,06	0,03	-	-	0,20	8,55
9	0,06	0,04	-	-	0,61	7,17
10	0,04	0,12	-	-	0,38	7,00
11	0,05	0,01	-	-	-	-
12	0,07	0,05	-	-	-	-
13	0,1	0,07	-0,04	-0,09	-	-
14	0,1	0,1	-	-	-	-
15	0,17	0,17	-	-	-	-
16	0,17	0,12	-	-	-	-
17	0,15	0,09	-	-	-	-
18	0,12	0,05	-	-	-	-
19	0,07	0	0	0,05	-	-
20	0,02	-0,02	-	-	-	-
21	0,04	0,02	-	-	-	-
22	0,02	0	-	-	-	-
23	0,01	-0,01	-	-	-	-

Tablica 9 Vrijednosti dobivene mjerenjem zupčanika Z1.3

Zupčanik Z1.3					Hrapavost	
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm	Radijalna, μm	Aksijalna, μm
1	0	0	0	-	8,65	8,74
2	0,04	-0,23	-	-	2,73	8,89
3	0	-0,23	-	-	8,17	8,09
4	-0,05	-0,25	-	-	9,30	8,65
5	-0,07	-0,33	-	-	9,35	8,32
6	-0,11	-0,24	-	-	9,07	8,56
7	-0,23	-0,18	0,10	-	8,25	8,35
8	-0,15	-0,03	-	-	10,90	8,66
9	-0,12	0,03	-	-	8,85	8,55
10	-0,06	-0,12	-	-	9,40	8,40
11	0	-0,16	-	-	11,09	8,32
12	0,05	0,08	-	-	-	-
13	0,11	0,17	0,38	-	-	-
14	0,19	-0,19	-	-	-	-
15	0,30	0,47	-	-	-	-
16	0,37	0,05	-	-	-	-
17	0,35	0,14	-	-	-	-
18	0,11	0,26	-	-	-	-
19	0,12	0,40	0,41	-	-	-
20	0,15	0,32	-	-	-	-
21	0,16	0,27	-	-	-	-
22	0,05	-0,05	-	-	-	-
23	0,03	0,13	-	-	-	-

Na temelju dobivenih rezultata donjeti su određeni zaključci.

4.1. Hrapavost

Radijalna hrapavost zupčanika Z1.2 manja je od aksijalne hrapavosti. Srednja vrijednost radijalne hrapavosti prema (4.1) iznosi $\overline{Ra}_{\text{rad},1.2} = 0,39 \mu\text{m}$, a srednja vrijednost aksijalne hrapavosti prema (4.2) iznosi $\overline{Ra}_{\text{aks},1.2} = 7,57 \mu\text{m}$.

$$\overline{Ra}_{\text{rad},1.2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_{i,\text{rad},1.2} = 0,39 \mu\text{m}, \quad (4.1)$$

$$\overline{Ra}_{\text{aks},1.2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_{i,\text{aks},1.2} = 7,57 \mu\text{m}, \quad (4.2)$$

pri čemu je $Ra_{i,\text{rad},1.2}$ rezultat mjerenja radijalne hrapavosti za bok zuba i zupčanika Z1.1, $Ra_{i,\text{aks},1.2}$ je rezultat mjerenja aksijalne hrapavosti za bok zuba i zupčanika Z1.2, n je ukupni broj bokova zubi na kojima je mjerena hrapavost i iznosi $n = 10$.

Jedan od razloga toga što je radijalna hrapavost manja od aksijalne je položaj slojeva izrade. Pri mjerenju aksijalne hrapavosti ticalo prolazi poprečno preko slojeva i time zapravo bilježi izbočenja (slojeve), odnosno nepravilnosti koje utječu na veći rezultat. Budući da se pri mjerenju radijalne hrapavosti ticalo kreće paralelno sa slojevima, na tom putu ne nailazi na toliko nepravilnosti pa je i radijalna hrapavost manja od aksijalne hrapavosti (Slika 17). Standardna odstupanja mjerenja iznose

$$m_{\text{rad},1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{rad},1.2} - \overline{Ra}_{\text{rad},1.2})^2}{n-1}} = 0,14 \mu\text{m}, \quad (4.3)$$

$$m_{\text{aks},1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{aks},1.2} - \overline{Ra}_{\text{aks},1.2})^2}{n-1}} = 0,62 \mu\text{m}, \quad (4.4)$$

pri čemu je $m_{\text{rad},1.2}$ standardno odstupanje mjerenja radijalne hrapavosti zupčanika Z1.2, a $m_{\text{aks},1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja aksijalne hrapavosti zupčanika Z1.2.



Slika 17 Smjerovi ispitivanja hrapavosti

Kod zubčanika Z1.1 nije toliko izražena razlika između radijalne i aksijalne hrapavosti. Srednje vrijednosti hrapavosti iznose

$$\overline{Ra}_{\text{rad},1.1} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_{i,\text{rad},1.1} = 6,13 \mu\text{m}, \quad (4.5)$$

$$\overline{Ra}_{\text{aks},1.1} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_{i,\text{aks},1.1} = 5,12 \mu\text{m}. \quad (4.6)$$

Oznake iz jednadžbi (4.5) i (4.6) sukladne su onima iz jednadžbi (4.1) i (4.2). Ovdje bi se moglo krenuti od pretpostavke da će aksijalna hrapavost biti znatno manja od radijalne hrapavosti zbog položaja slojeva (ticalo se pri ispitivanju aksijalne hrapavosti kreće paralelno sa slojevima), no rezultati to nisu pokazali. Rezultati za aksijalnu hrapavost više odskaku od srednje vrijednosti, odnosno standardno odstupanje rezultata aksijalne hrapavosti prema (4.8) iznosi $m_{\text{aks},1.1} = 3,39 \mu\text{m}$, dok za radijalnu hrapavost prema (4.7) iznosi $m_{\text{rad},1.1} = 1,44 \mu\text{m}$. Standardna odstupanja mjerenja iznose

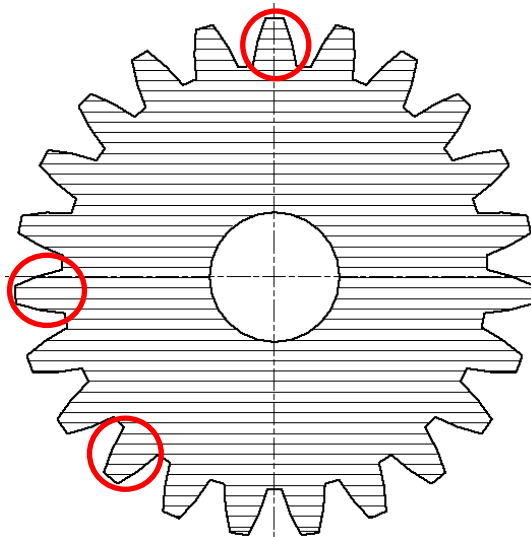
$$m_{\text{rad},1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{rad},1.1} - \overline{Ra}_{\text{rad},1.1})^2}{n-1}} = 1,44 \mu\text{m}, \quad (4.7)$$

$$m_{\text{aks},1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{aks},1.1} - \overline{Ra}_{\text{aks},1.1})^2}{n-1}} = 3,39 \mu\text{m}, \quad (4.8)$$

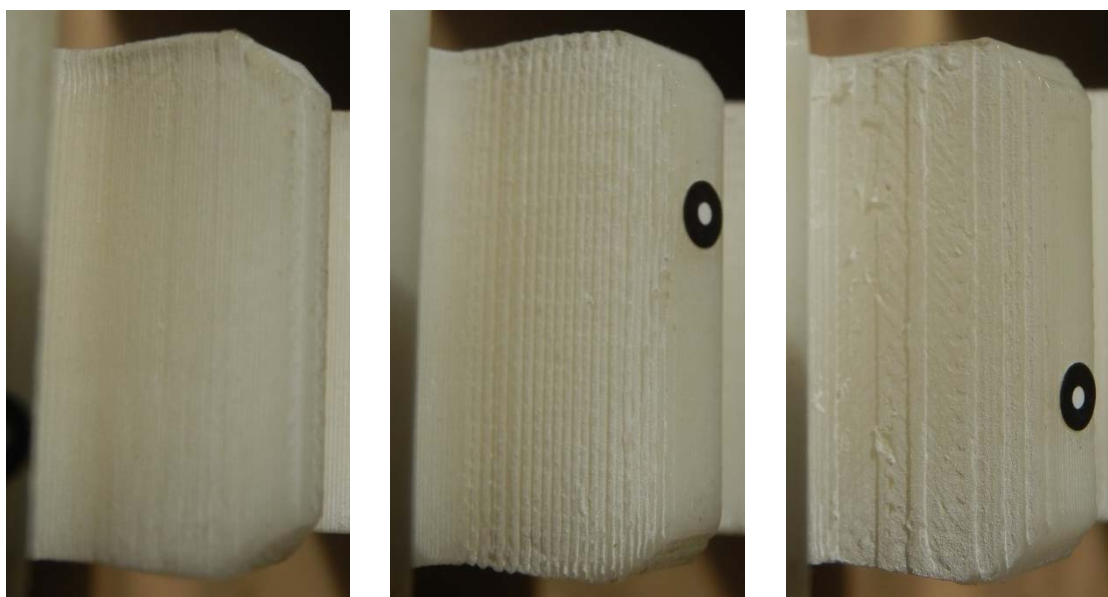
pri čemu su oznake iz jednadžbi (4.7) i (4.8) sukladne su onima iz jednadžbi (4.3) i (4.4).

Potencijalni razlog takvih rezultata može biti pogreška u mjerenju. No, jedan od razloga takvih neujednačenih rezultata aksijalne hrapavosti je zasigurno položaj slojeva pri izradi. Kod zubčanika Z1.1, za razliku od zubčanika Z1.2, slojevi se ne nalaze u istom položaju na

svakom zubu, odnosno gustoća slojeva na površini boka zuba je različita za različite zube što je prikazano na Slika 18 i Slika 19. Zbog toga ticalo ne nailazi na istu količinu izbočenja/nepravilnosti (slojeva) na različitim zubima.



Slika 18 Prikaz položaja slojeva izrade kod zupčanika Z1.1



Slika 19 Prikaz različitih položaja slojeva na zubima zupčanika Z1.2

Može se zaključiti da zupčanik Z1.2 ima „bolju“ hrapavost od zupčanika Z1.1. Srednja vrijednost radijalne hrapavosti zupčanika Z1.2 puno je manja nego od zupčanika Z1.1 ($\overline{Ra}_{rad,1.2} = 0,39 \mu\text{m} < \overline{Ra}_{rad,1.1} = 6,13 \mu\text{m}$). Iako je srednja vrijednost aksijalne hrapavosti zupčanika Z1.2 malo veća nego od zupčanika Z1.1, ukupni rezultati za Z1.2 su jednoličniji, odnosno standardno odstupanje mjerenja aksijalne hrapavosti zupčanika Z1.2 je puno manje nego kod zupčanika Z1.1 ($m_{aks,1.1} = 3,39 \mu\text{m} > m_{aks,1.2} = 0,62 \mu\text{m}$).

Rezultati pokazuju da zupčanik Z1.3 ima najveću i radijalnu i aksijalnu hrapavost. Srednje vrijednosti radijalne i aksijalne hrapavosti iznose

$$\overline{Ra}_{\text{rad},1.3} = \frac{1}{n_{1.3}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{1.3}} Ra_{i,\text{rad},1.3} = 8,71 \mu\text{m}, \quad (4.9)$$

$$\overline{Ra}_{\text{aks},1.3} = \frac{1}{n_{1.3}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{1.3}} Ra_{i,\text{aks},1.3} = 8,50 \mu\text{m}, \quad (4.10)$$

pri čemu su oznake iz jednadžbi (4.9) i (4.10) sukladne onima iz jednadžbi (4.1) i (4.2), dok je $n_{1.3}$ ukupni broj bokova zubi na kojima je mjerena hrapavost na zupčaniku Z1.3 i iznosi $n_{1.3} = 11$. Ovdje nema velike razlike između radijalne i aksijalne hrapavosti kao kod zupčanika Z1.2 koji je također printan u vodoravnom smjeru pa su i slojevi jednako usmjereni. Standardna odstupanja mjerenja radijalne i aksijalne hrapavosti iznose

$$m_{\text{rad},1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{rad},1.3} - \overline{Ra}_{\text{rad},1.3})^2}{n-1}} = 2,19 \mu\text{m}, \quad (4.11)$$

$$m_{\text{aks},1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_{i,\text{aks},1.3} - \overline{Ra}_{\text{aks},1.3})^2}{n-1}} = 0,23 \mu\text{m}, \quad (4.12)$$

pri čemu su oznake iz jednadžbi (4.11) i (4.12) sukladne onima iz jednadžbi (4.3) i (4.4). Standardno odstupanje mjerenja $m_{\text{rad},1.3}$ višestruko je veće od $m_{\text{aks},1.3}$ što znači da je rasipanje rezultata za radijalnu hrapavost relativno velika, dok je vrijednost standardnog odstupanja mjerenja aksijalne hrapavosti $m_{\text{aks},1.3}$ manje čak i od $m_{\text{aks},1.2}$ što znači da u aksijalnom smjeru kod zupčanika Z1.3 nema puno dodatnih nepravilnosti na površini (uz sama izbočenja slojeva).

4.2. Uzubina

Mjera uzubine nulirana je na prvoj uzubini između zuba 1 i 2. Na ostalim uzubinama je, dakle, mjereno odstupanje širine uzubine u odnosu na prvu uzubinu. Rezultati mjerenja na zupčanicima Z1.1, Z1.2 i Z1.3 prikazani su u Tablica 7, Tablica 8 i Tablica 9.

Budući da postoje i pozitivne i negativne vrijednosti odstupanja širine uzubine računanjem srednje vrijednosti odstupanja ne dobiva se rezultat koji nam govori koji zupčanik ima najviše odstupanja zato jer se pozitivne i negativne vrijednosti „poništavaju“. Iz tog su razloga izračunate srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja

$$\bar{u}_{a-1.1} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.1,i}| = 0,06 \text{ mm}, \quad (4.13)$$

$$\bar{u}_{a,1.2} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.2,i}| = 0,05 \text{ mm}, \quad (4.14)$$

$$\bar{u}_{a,1.3} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.3,i}| = 0,19 \text{ mm}. \quad (4.15)$$

pri čemu je $\bar{u}_{a,1.1}$ srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba zupčanika Z1.1, $\bar{u}_{a,1.2}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba zupčanika Z1.2, $\bar{u}_{a,1.3}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine zuba zupčanika Z1.3, z je broj zubi zupčanika i iznosi $z = 23$.

Iz ovih vrijednosti može se zaključiti kod kojeg zupčanika se javljaju najveća odstupanja širine uzubine, a to je kod zupčanika Z1.3. Ako se uspoređuju samo zupčanici Z1.1 i Z.2, tada zupčanik Z1.2 ima manju srednju vrijednost apsolutnih odstupanja širine uzubine, ali i manje standardno odstupanje. No te razlike nisu značajne pa se ne može izdvojiti jedan zupčanik kao puno bolji što se toga tiče. Standardna odstupanja mjerenja zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose

$$m_{u,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (u_{i,1.1} - \bar{u}_{1.1})^2}{z-1}} = 0,07 \text{ mm}, \quad (4.16)$$

$$m_{u,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (u_{i,1.2} - \bar{u}_{1.2})^2}{z-1}} = 0,05 \text{ mm}, \quad (4.17)$$

$$m_{u,1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (u_{i,1.3} - \bar{u}_{1.3})^2}{z-1}} = 0,23 \text{ mm}, \quad (4.18)$$

pri čemu je $m_{u,1.1}$ standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine zupčanika Z1.1, $m_{u,1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine zupčanika Z1.2, $m_{u,1.3}$ je standardno odstupanje mjerenja odstupanja širine zupčanika Z1.3.

Srednja vrijednost apsolutnih odstupanja i vrijednost standardnog odstupanja najveća je za zupčanik Z1.3 i razlika u odnosu na zupčanike Z1.1 i Z1.2 je zamjetna.

Kod zupčanika Z1.1 (printan u okomitom položaju) u „donjoj“ polovici zupčanika (zubi 19 – 7; polovica zupčanika bliža podlozi pri izradi) vrijednosti odstupanja su većinom negativne što znači da su ti zubi tanji od zubiju „gornje“ polovice zupčanika. Kod zupčanika Z1.2 (printan u vodoravnom položaju) vrijednosti odstupanja su većinom pozitivne, a kod zupčanika Z1.3 (printan vodoravno) vrijednosti odstupanja s jedne strane zupčanika (zubi 1 – 11) su negativne, dok su s druge strane većinom pozitivne. No, to su sve relativne vrijednosti

širine uzubine, odnosno to su vrijednosti odstupanja u odnosu na prvu uzubinu, a ne apsolutne vrijednosti pa se ne može zaključiti kakvi su zupčanici u odnosu na nominalne vrijednosti.

4.3. Točnost vrtnje u radijalnom smjeru

Mjera točnosti vrtnje u radijalnom smjeru nulirana je na zubu 1. Na ostalim zubima mjereno je odstupanje u odnosu na prvi zub. Rezultati mjerenja na zupčanicima Z1.1, Z1.2 i Z1.3 prikazani su u Tablica 7, Tablica 8 i Tablica 9.

Kao i u slučaju odstupanja širine uzubine, i ovdje se u rezultatima javljaju i pozitivna i negativna odstupanja pa da bi se dobio rezultat koji pokazuje kod kojeg zupčanika se javlja najviše odstupanja potrebno je izračunati srednju vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru. Srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose

$$\bar{r}_{a_{1.1}} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |r_{i,1.1}| = 0,09 \text{ mm}, \quad (4.19)$$

$$\bar{r}_{a_{1.2}} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |r_{i,1.2}| = 0,07 \text{ mm}, \quad (4.20)$$

$$\bar{r}_{a_{1.3}} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |r_{i,1.3}| = 0,12 \text{ mm}, \quad (4.21)$$

pri čemu je $\bar{r}_{a_{1.1}}$ srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.1, $\bar{r}_{a_{1.2}}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.2, $\bar{r}_{a_{1.3}}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.3, $r_{i,1.1}$ je odstupanje vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.1, $r_{i,1.2}$ je odstupanje vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.2, $r_{i,1.3}$ je odstupanje točnosti vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.3.

Najveću srednju vrijednost apsolutnih odstupanja ima zupčanik Z1.3, iako nije višestruko veća od srednjih vrijednosti apsolutnih odstupanja zupčanika Z1.1 i Z1.2 kao kod rezultata za odstupanje širine uzubine. Najmanju srednju vrijednost apsolutnih odstupanja ima zupčanik Z1.2. Standardna odstupanja mjerenja iznose

$$m_{r1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (r_{i,1.1} - \bar{r}_{1.1})^2}{z-1}} = 0,11 \text{ mm}, \quad (4.22)$$

$$m_{r1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (r_{i,1.2} - \bar{r}_{1.2})^2}{z-1}} = 0,05 \text{ mm}, \quad (4.23)$$

$$m_{r1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (r_{i1.3} - \bar{r}_{1.3})^2}{z-1}} = 0,15 \text{ mm}, \quad (4.24)$$

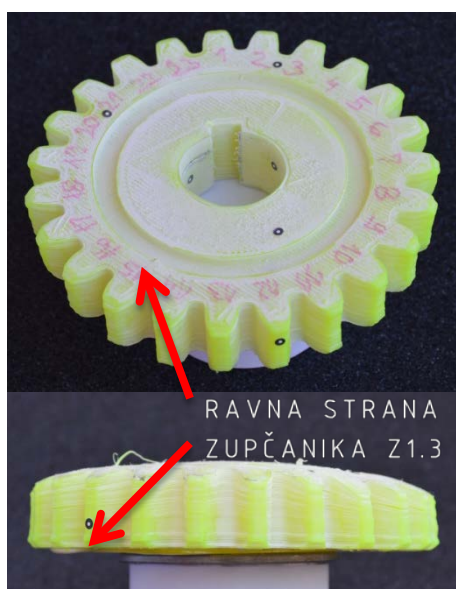
pri čemu je $m_{r1.1}$ standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.1, $m_{r1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.2, $m_{r1.3}$ je standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zupčanika Z1.3.

Najveće standardno odstupanje mjerenja ima zupčanik Z1.3, odnosno kod njega su najveća odstupanja od srednje vrijednosti, dok je najmanje standardno odstupanje kod zupčanika Z1.2.

Kod ovih rezultata je pitanje koliko na rezultate odstupanja točnosti vrtnje u radijalnom smjeru utječu nepravilnosti na površini tjemena zuba, a koliko sama ekscentričnost zupčanika.

4.4. Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru

Mjera točnosti vrtnje u aksijalnom smjeru mjerena je u četiri točke (kod zuba 1, 7, 13, 19) simetrično s obje strane zupčanika. Nulirana je kod zuba 1 pa je na ostalim zubima mjereno odstupanje u odnosu na prvi zub. Strana 1 zupčanika je strana na kojoj su napisani brojevi zubiju. Strana 2 je suprotna strana. Na zupčaniku Z1.3 izmjerena su odstupanja samo na strani 1 („ravnoj“ strani) zupčanika (Slika 20). Rezultati mjerenja na zupčanicima Z1.1, Z1.2 i Z1.3 prikazani su u Tablica 7, Tablica 8 i Tablica 9.



Slika 20 „Ravna“ strana zupčanika

Ovdje su također izračunate srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru koje iznose

$$\bar{a}_{1.1.1} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |a_{i,1.1.1}| = 0,068 \text{ mm}, \quad (4.25)$$

$$\bar{a}_{1.1.2} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |a_{i,1.1.2}| = 0,078 \text{ mm}, \quad (4.26)$$

$$\bar{a}_{1.2.1} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |a_{i,1.2.1}| = 0,015 \text{ mm}, \quad (4.27)$$

$$\bar{a}_{1.2.2} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |a_{i,1.2.2}| = 0,05 \text{ mm}, \quad (4.28)$$

$$\bar{a}_{1.3.1} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |a_{i,1.3.1}| = 0,223 \text{ mm}, \quad (4.29)$$

pri čemu su $\bar{a}_{1.1.1}$ i $\bar{a}_{1.1.2}$ srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1, odnosno na strani 2 zupčanika Z1.1, $\bar{a}_{1.2.1}$ i $\bar{a}_{1.2.2}$ su srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1, odnosno na strani 2 zupčanika Z1.2, $\bar{a}_{1.3.1}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.3, $a_{i,1.1.1}$ i $a_{i,1.1.2}$ su odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru mjereno kod zuba i zupčanika Z1.1, $a_{i,1.2.1}$ i $a_{i,1.2.2}$ su odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru mjereno u točki i zupčanika Z1.2, $a_{i,1.3.1}$ je odstupanje vrtnje u aksijalnom smjeru mjereno u točki i zupčanika Z1.3, a m je broj točaka u kojima se provodi mjerenje na određenoj strani zupčanika.

Uspoređujući rezultate za zupčanike Z1.1 i Z1.2 zaključuje se da je veća srednja vrijednost apsolutnih odstupanja zupčanika Z1.1, dok je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja zupčanika Z1.3 ukupno najveća.

Ako se analiziraju rezultati odstupanja za zupčanik Z1.1 lako je zaključiti kako su na strani 1 vrijednosti pozitivne, dok su s druge strane negativne. To može biti posljedica toga da je zupčanik „nagnut“ u jednu stranu. No, razlog tome mogu biti i lokalne nepravilnosti koje utječu onda na rezultate odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru. Takva pravilnost se ne javlja kod zupčanika Z1.2 i Z1.3.

Standardna odstupanja mjerenja iznose

$$m_{a1.1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_{i,1.1.1} - \bar{a}_{1.1.1})^2}{m-1}} = 0,06 \text{ mm}, \quad (4.30)$$

$$m_{a1.1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_{i,1.1.2} - \bar{a}_{1.1.2})^2}{m-1}} = 0,06 \text{ mm}, \quad (4.31)$$

$$m_{a1.2_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (a_{i,1.2_1} - \bar{a}_{1.2_1})^2}{m-1}} = 0,02 \text{ mm}, \quad (4.32)$$

$$m_{a1.2_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (a_{i,1.2_2} - \bar{a}_{1.2_2})^2}{m-1}} = 0,06 \text{ mm}, \quad (4.33)$$

$$m_{a1.3_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (a_{i,1.3_1} - \bar{a}_{1.3_1})^2}{m-1}} = 0,2 \text{ mm}, \quad (4.34)$$

pri čemu su $m_{a1.1_1}$ i $m_{a1.1_2}$ standardna odstupanja mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1, odnosno na strani 2 zupčanika Z1.1, $m_{a1.2_1}$ i $m_{a1.2_2}$ su standardna odstupanja mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1, odnosno na strani 2 zupčanika Z1.2, $m_{a1.3_1}$ je standardno odstupanje mjerenja odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.3.

Najveće rasipanje rezultata od srednje vrijednosti javlja se kod zupčanika Z1.3. Kod zupčanika Z1.1 i Z1.2 standardna odstupanja su približno ista. Najmanje standardno odstupanje i najmanja srednja vrijednost odstupanja je kod zupčanika Z1.2 na strani 1, odnosno na strani koja se nalazila na podlozi pri izradi.

4.5. Mjera preko nekoliko zuba

Mjerni broj zubi pri mjerenju je $z_w = 2$. Ovim putem nije bilo moguće provesti ovo mjerenje na zupčaniku Z1.3. Rezultati mjerenja na zupčanicima Z1.1 i Z1.2 su u Tablica 10 i Tablica 11.

Tablica 10 Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm
1-2	18,779	9-10	19,027	17-18	19,127
2-3	18,941	10-11	18,936	18-19	19,045
3-4	18,984	11-12	18,850	19-20	18,981
4-5	18,861	12-13	18,857	20-21	19,055
5-6	18,938	13-14	18,992	21-22	19,049
6-7	18,980	14-15	19,035	22-23	18,84
7-8	19,015	15-16	18,954	23-1	18,837
8-9	19,018	16-17	19,05	-	-

Tablica 11 Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm
1-2	18,755	9-10	18,825	17-18	18,769
2-3	18,775	10-11	18,855	18-19	18,775
3-4	18,787	11-12	18,800	19-20	18,719
4-5	18,773	12-13	18,82	20-21	18,775
5-6	18,779	13-14	18,795	21-22	18,759
6-7	18,750	14-15	18,805	22-23	18,785
7-8	18,795	15-16	18,79	23-1	18,782
8-9	18,879	16-17	18,758	-	-

Srednje vrijednosti mjere preko zuba $\bar{W}_{1.1}$ i $\bar{W}_{1.2}$ zupčanika Z1.1 i Z1.2 iznose

$$\bar{W}_{1.1} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z W_{i,1.1} = 18,96 \text{ mm}, \quad (4.35)$$

$$\bar{W}_{1.2} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z W_{i,1.2} = 18,78 \text{ mm}, \quad (4.36)$$

pri čemu je $W_{i,1.1}$ mjera preko zuba $i - i+1$ zupčanika Z1.1, $W_{i,1.2}$ je mjera preko zuba $i - i+1$ zupčanika Z1.2.

Srednja vrijednost mjere preko zuba $\bar{W}_{1.2}$ je jednaka nominalnoj vrijednosti mjere preko zuba koja iznosi $W = 18,78$ mm. Standardno odstupanje mjerenja je veće kod zupčanika Z1.1, što znači da je rasipanje rezultata od srednje vrijednosti veće:

$$m_{W,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (W_{i,1.1} - \bar{W}_{1.1})^2}{z-1}} = 0,09 \text{ mm}, \quad (4.37)$$

$$m_{W,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (W_{i,1.2} - \bar{W}_{1.2})^2}{z-1}} = 0,03 \text{ mm}, \quad (4.38)$$

pri čemu je $m_{W,1.1}$ standardno odstupanje mjere preko zuba zupčanika Z1.1, $m_{W,1.2}$ je standardno odstupanje mjere preko zuba zupčanika Z1.2.

Na temelju svih dobivenih rezultata mjerenja zaključuje se kako se najveća odstupanja od srednjih vrijednosti javljaju kod zupčanika Z1.3 što je i očekivano s obzirom na lošu izvedbu. No, ako se analiziraju samo rezultati zupčanika Z1.1 i Z1.2 tada su veća odstupanja od

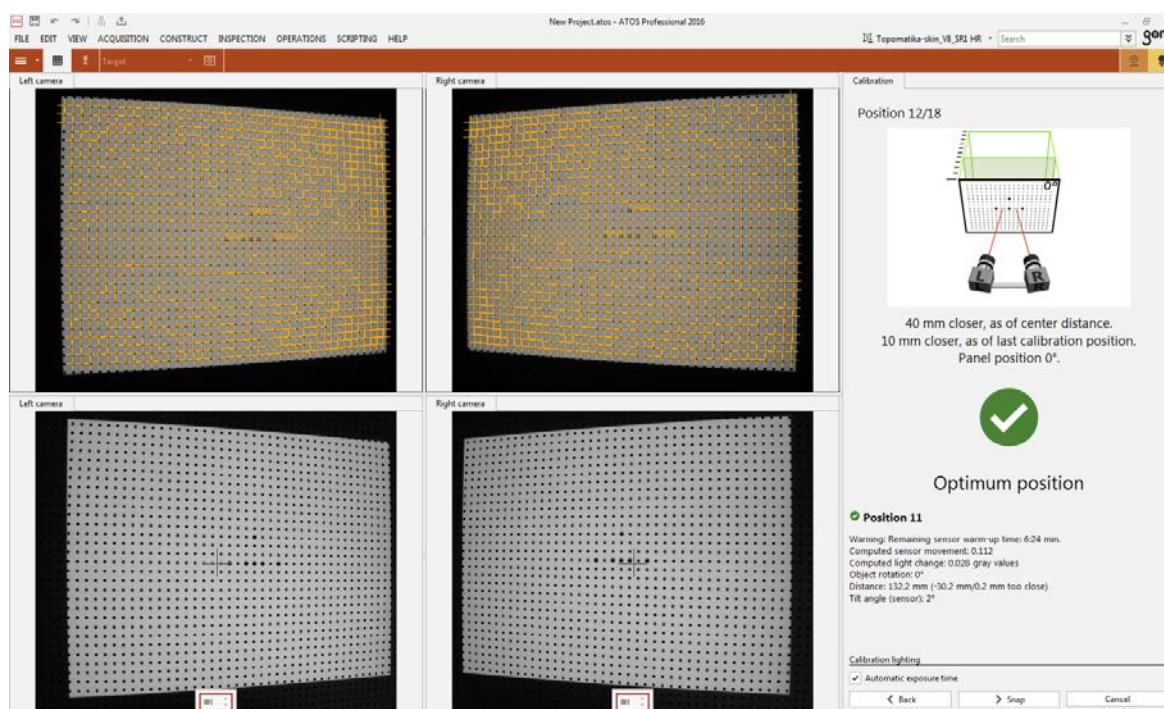
srednjih vrijednosti i standardna odstupanja kod zupčanika Z1.1 što bi zasigurno mogla biti posljedica položaja zupčanika kod izrade (okomit položaj). Na temelju toga može se zaključiti kako bi zupčanici printani u vodoravnom položaju trebali biti dimenzijski točniji.

5. POSTUPAK SKENIRANJA

Ispitivani zupčanici su osim kontaktnim metodama mjereni i beskontaktnim mjernim uređajem. Mjerenje je provedeno optičkim mjernim uređajem ATOS Core 135 njemačke tvrtke GOM GmbH.

3D digitalizator ATOS tvrtke GOM GmbH optički je mjerni uređaj. Princip rada ATOS uređaja temelji se na kombinaciji triangulacije i projiciranja rasterskog uzorka linija pri čemu se koristi nekoherentni izvor svjetla. Projektor se nalazi u centru, između dvije kamere. On projicira rastersku strukturu na površinu mjernog objekta. Ona će omogućiti prostornu rekonstrukciju površine mjernog objekta na temelju analiza snimaka obje kamere. Određivanje objektnih koordinata provodi se principom triangulacije. Jedan vrh trokuta je objektna mjerna točka, a ostala dva vrha trokuta su položaji slikovnih osjeta objektne mjerne točke u svakoj kameri [8].

Nakon uključivanja uređaja ATOS Core 135 potrebno je određeno vrijeme (15 minuta) da se uređaj zagrije i postigne radnu temperaturu. Nakon toga provodi se kalibracija sustava pomoću kalibracijske ploče unaprijed poznatih karakteristika. Kalibracijom se definiraju nepoznati parametri koji opisuju kamere, njihov relativan položaj u prostoru, orijentacija i utjecaj koji optika objektiva ima na svojstvo koje kroz njih prolazi [24].



Slika 21 Korisničko sučelje upravljačkog programa tijekom postupka kalibracije

Prije samog početka skeniranja potrebno je pripremiti zupčanike. Zupčanike se postavlja na podlogu te se pomoću gline pričvršćuje na nju kako ne bi došlo do pomaka tijekom skeniranja. Na zupčanike i na podlogu lijepe se referentne točke veličine 0,8 mm (Slika 22). Pomoću referentnih točaka skener se referencira u prostoru.



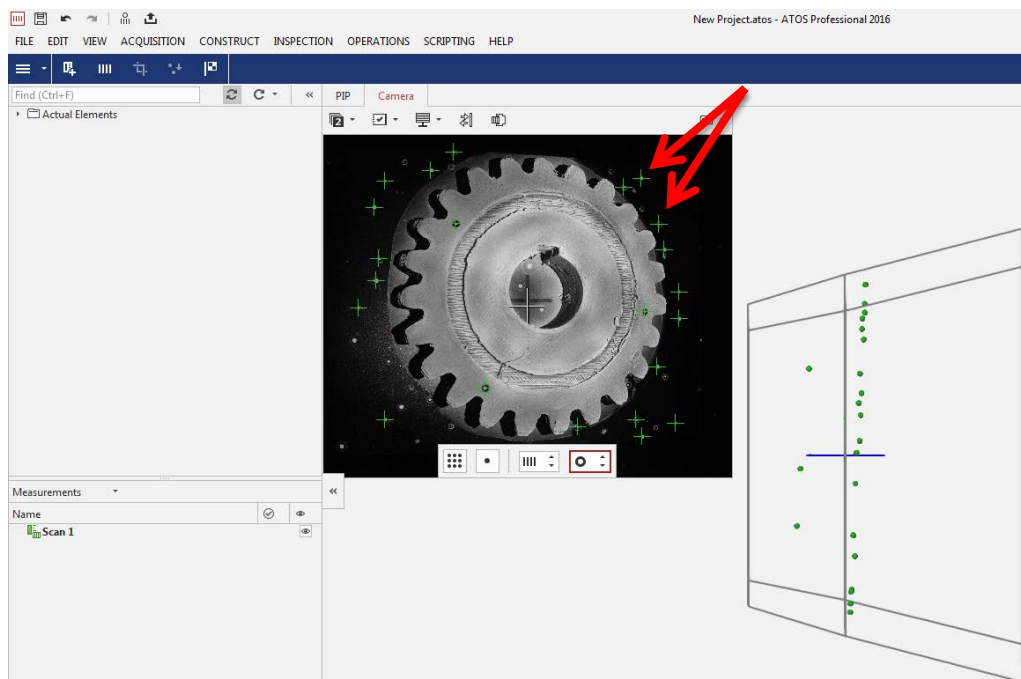
Slika 22 Referentne točke na podlozi i zupčaniku Z1.1

Zupčanic Z1.1 i Z1.2 nisu potpuno netransparentni što nije pogodno za rad optičkih mjernih uređaja. Svjetlost djelomično prolazi kroz zupčanike i nema potpuno povatne refleksije. Taj problem rješava se nanašanjem otopine titanovog oksida u alkoholu na zupčanic (Slika 23). Nakon toga potrebno je pažljivo (bez skidanja okolno nanesenog sloja) očistiti točke kako bi ih skener prepoznao.



Slika 23 Zupčanic 1.2 sa slojem titanovog oksida

Nakon faze pripreme i kalibracije skenera odvija se sam postupak skeniranja. Prilikom skeniranja pažnju je potrebno usmjeriti na nekoliko stvari. Mjerni objekt, odnosno zupčanik u ovom slučaju treba se nalaziti unutar mjernog volumena koji za ATOS Core 135 iznosi 135 mm x 100 mm x 170 mm. Zupčanik se skeniralo iz različitih položaja kako bi se dobila cijela geometrija površine. Mjerenje se odvija u programu ATOS Professional čiji je proizvođač također tvrtka GOM GmbH. Nakon postavljanja zupčanika u mjerni volumen senzora, program automatski prepoznaje referentne točke (Slika 24).



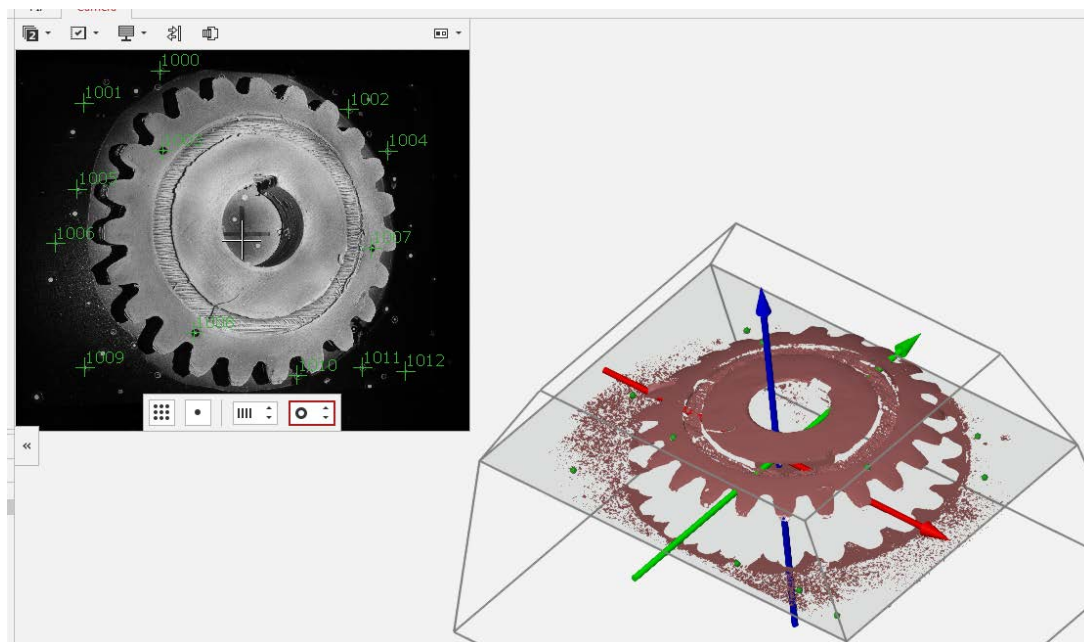
Slika 24 Prepoznate referentne točke

Tijekom skeniranja projektor projicira uzorke paralelnih linija na površinu zupčanika (Slika 25).



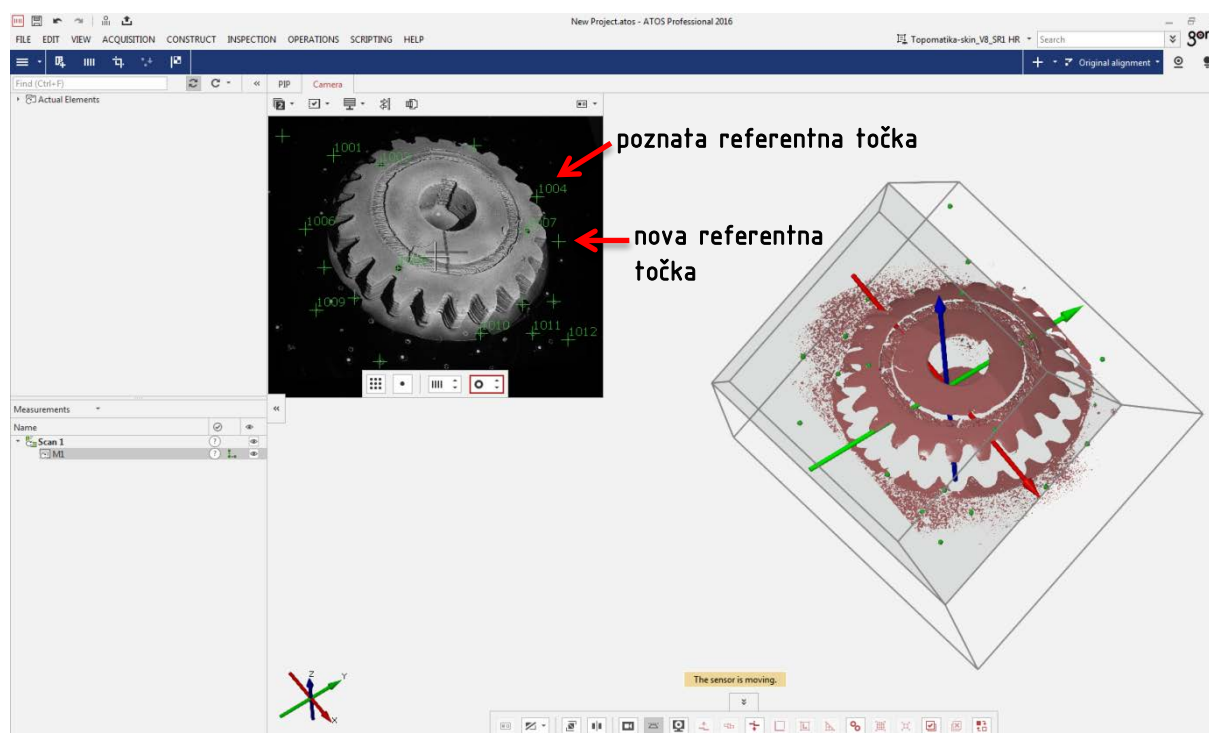
Slika 25 Uzorci paralelnih linija

Za svaki se snimljeni piksel u kamerama određuju trodimenzionalne koordinate točke s površine zupčanika. Na taj način dobiva se cijela površina zupčanika. Skeniranjem prve pozicije zupčanika vidljive referentne točke dobivaju svoj kod te svoje pripadajuće prostorne koordinate (Slika 26).



Slika 26 Rezultat prvog skeniranja

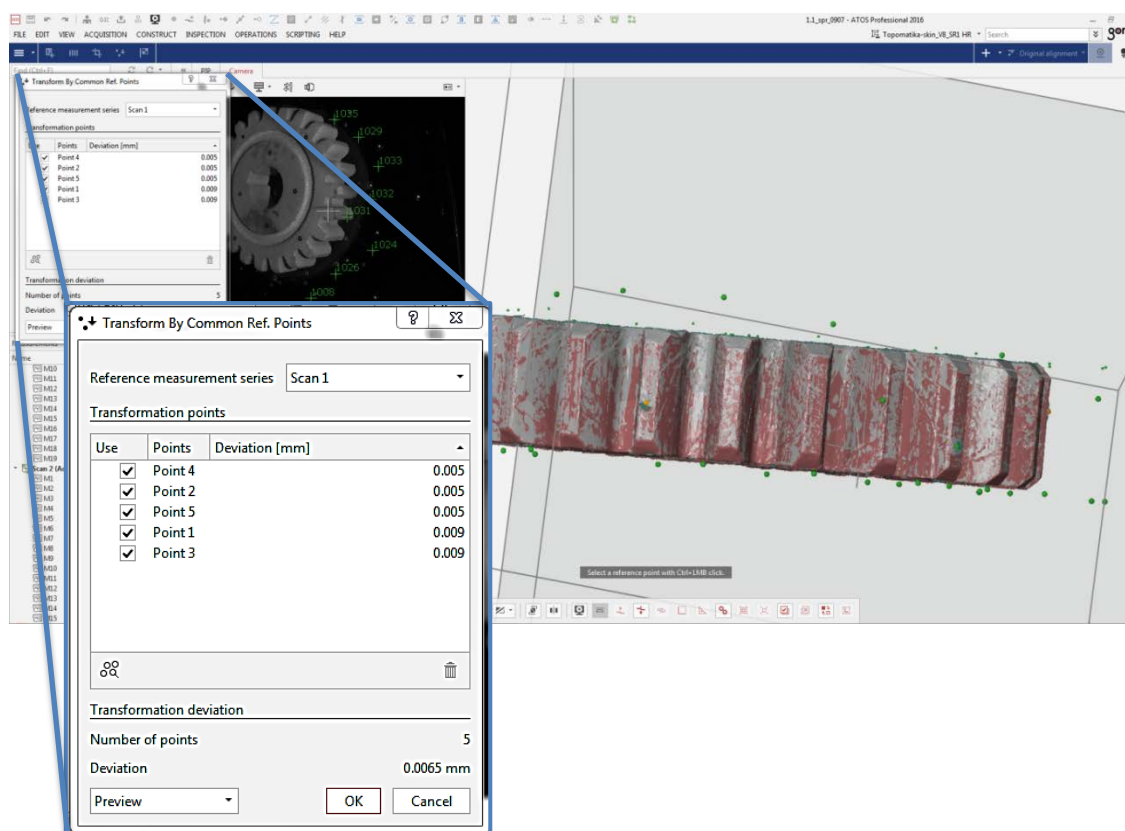
Prilikom skeniranja druge (i svake dalje) pozicije potrebno je imati nekoliko već poznatih referentnih točkaka pomoću kojih se preklapaju skenovi (Slika 27).



Slika 27 Poznate i nove referentne točke

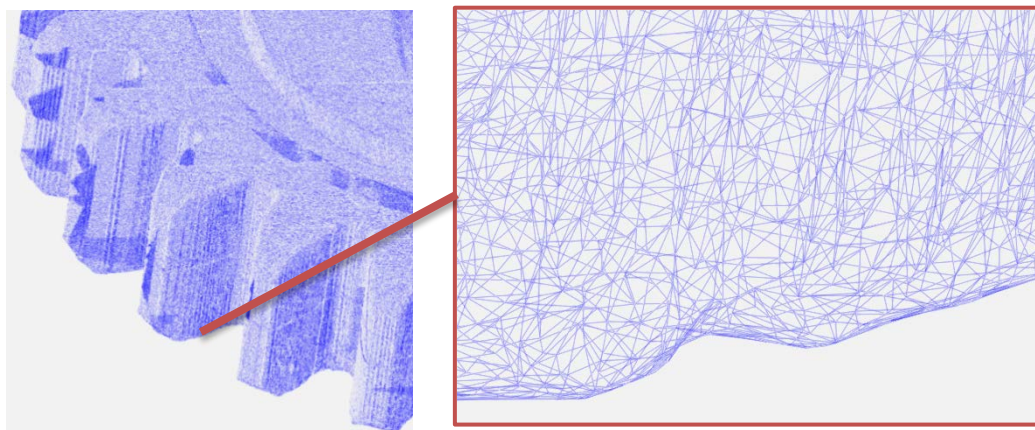
Skeniranje se ponavlja dok se ne dobije cjelokupna površina prve strane zupčanika. Pri skeniranju se osim geometrije zupčanika dobiva i površina podloge koja se nalazi u mjernom volumenu. Ta podloga briše se funkcijom *Cut Out Points* na način da se definira ravninu ispod koje se brišu sve točke.

Nakon dobivanja prve strane zupčanika, zupčanik se okreće i ponavlja se postupak nanašanja otopine titanovog oksida i čišćenja točaka na drugoj strani. Druga strana skenira se u drugoj mjernoj seriji. Nakon što se dobije cjelokupna druga strana zupčanika briše se podloga. Nakon toga se spajaju prva i druga mjerna serija, odnosno prva i druga strana zupčanika. Za to je potrebno imati minimalno tri zajedničke referentne točke iz prve i druge mjerne serije, no teži se većem broju točaka. Na zupčanicima su to točke postavljene po obodu zupčanika. Funkcija u softveru koja to radi je *Transform by Common Ref. Points* (Slika 28).



Slika 28 Povezivanje mjernih serija

Nakon spajanja mjernih serija slijedi poligonizacija. Iz oblaka točaka stvara se poligonalna mreža trokuta (STL datoteka) (Slika 29, Slika 30, Slika 31, Slika 32).



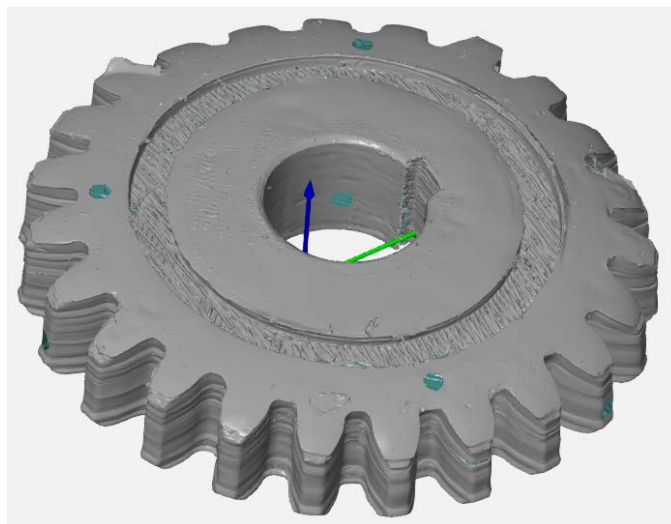
Slika 29 Detalj poligonalne mreže trokuta



Slika 30 Poligonizirani zupčanik Z1.1



Slika 31 Poligonizirani zupčanik Z1.2



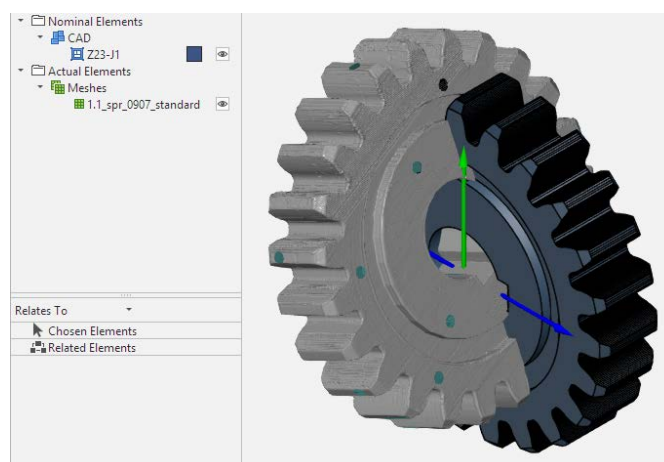
Slika 32 Poligonizirani zupčanik Z1.3

6. MJERENJE U GOM INSPECTU

Rezultati mjerenja osim kontaktnim mjerenjem u Laboratoriju za elemente strojeva i konstrukcija dobiveni su i mjerenjem u besplatnom programu GOM Inspect. Izmjerena su odstupanja uzdužne linije boka, odstupanja lučne debljine zuba, odstupanja koraka na zahvatnoj crti, odstupanja od evolvente, odstupanje širine uzubine, odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru, odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru, odstupanje mjere preko nekoliko zuba. Mjerenje se u GOM Inspectu provelo uz CAD model radi usporedbe s nominalnim vrijednostima. Mjerenje je moguće provesti i bez CAD modela.

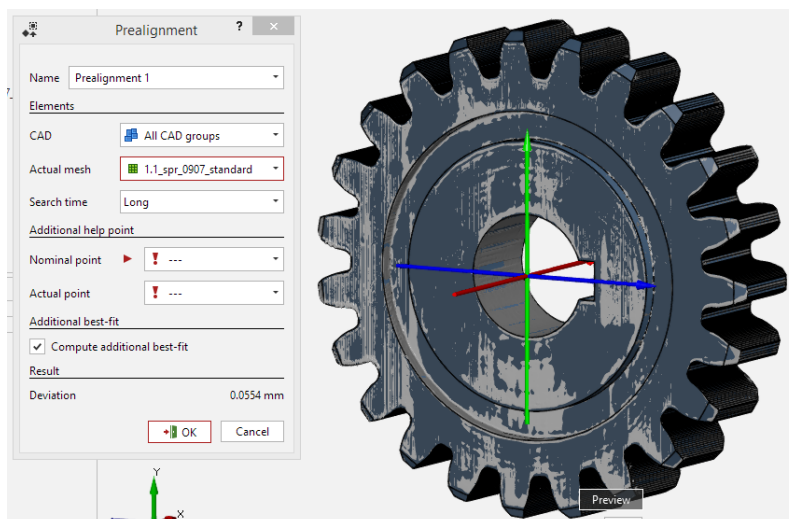
6.1. Učitavanje i poravnavanje nominalnog i stvarnog zupčanika

U program su na početku učitani podaci skeniranog zupčanika u STL formatu te CAD model u STP formatu. Te datoteke moguće je učitati funkcijom *Import* ili ih je moguće samo dovući u prozor programa (e. *Drag and drop*). Nominalni zupčanik (CAD model) program pretvara u mrežu trokuta. Stvarni zupčanik (skenirani zupčanik) prikazan je sivom bojom, dok je nominalni zupčanik (CAD model) prikazan plavom bojom (Slika 33).



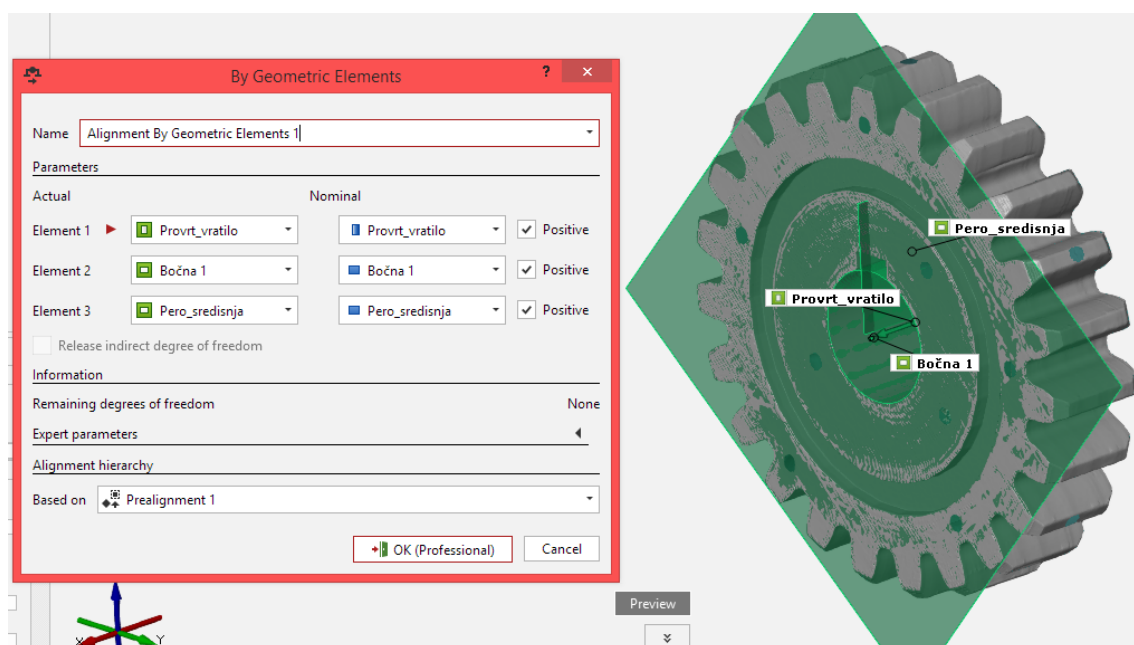
Slika 33 Početni položaj nominalnog i stvarnog zupčanika

Koordinatni sustav postavljen je u odnosu na nominalni zupčanik, a nominalni i stvarni se ne poklapaju te je potrebno napraviti *Prealignment*, odnosno pred-poravnanje kako bi ih doveli u neki odnos (Slika 34).



Slika 34 Prealignment

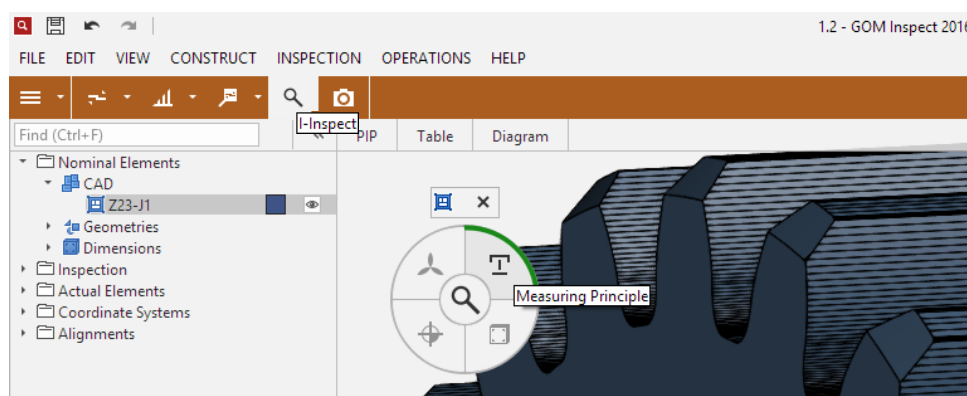
Prealignment poklapa CAD model i stvarni element Best-Fit metodom (metoda najmanjeg odstupanja). Nakon *Prealignmenta* napravljeno je glavno poravnanje. Postoji nekoliko mogućnosti kako napraviti glavno poravnanje (*RPS*, *Local Best Fit*, *By Geometric Elements*, *By Coordinate Systems*). U ovom radu napravljeno je poravnanje *By Geometric Elements*, odnosno poravnanje se vrši u odnosu na neke geometrijske elemente. Glavno poravnanje ovisi o položaju stvarne komponente u radu pa u odnosu na to treba odrediti i geometrijske elemente za poravnanje. Položaj zupčanika ovisi o osi na kojoj se nalazi, a u ovom slučaju to je os vratila na postolju, odnosno os provrta zupčanika u koje dolazi vratilo. Drugi geometrijski element je središnja ravnina između bočnih strana utora za pero, a treći element je bočna ravnina zupčanika (Slika 35).

Slika 35 Poravnanje po geometrijskim elementima (*Alignment by Geometric Elements*)

Te elemente prvo su konstruirani na nominalnom i stvarnom zupčaniku što je opisano u nastavku.

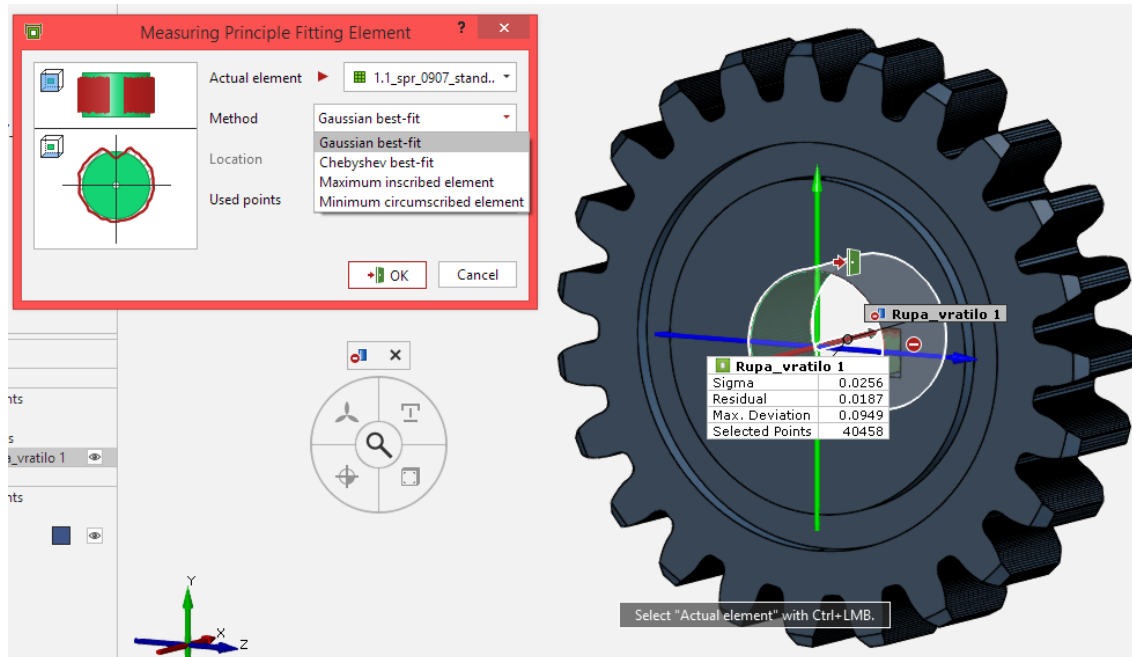
6.1.1. Konstruiranje elemenata za glavno poravnanje

U ovom slučaju, kada pri mjerenju postoji i CAD model, potrebno je pri konstruiranju elemenata na CAD modelu stvoriti iste elemente i na stvarnom zupčaniku. To se postiže funkcijom *Measuring Principle* pomoću koje se stvaraju isti elementi na stvarnom zupčaniku. *Measuring Principle* nalazi se na ikoni *I-Inspect* (Slika 36).



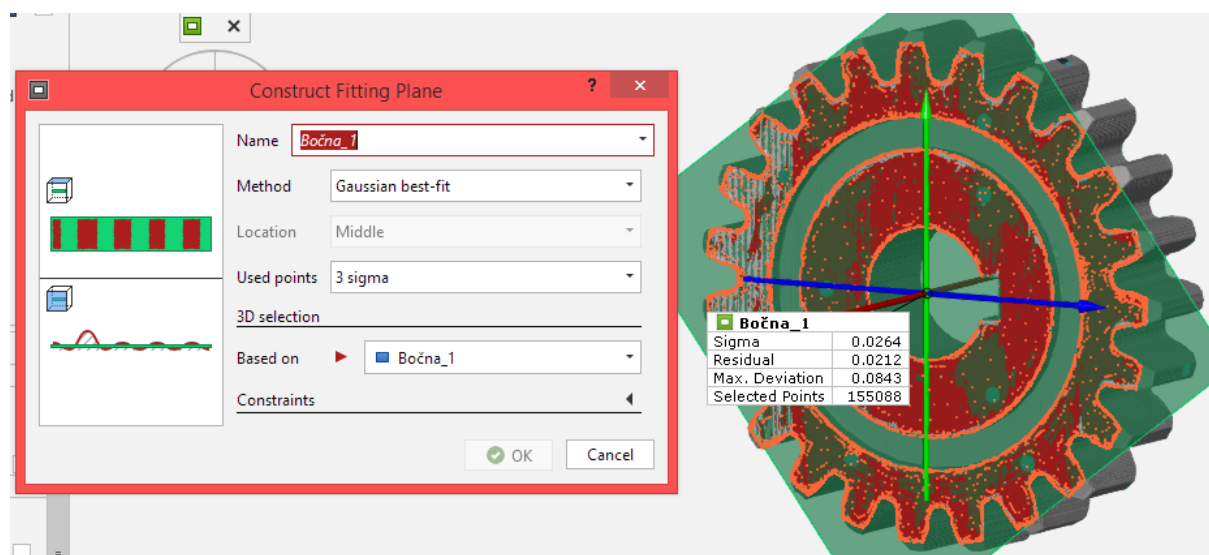
Slika 36 I-Inspect i Measuring Principle

Cilindar provrta za vratilo moguće je konstruirati na više načina (*Construct – Auto Cylinder (Nominal)*, *Point-Direction Cylinder*, *2-Point Cylinder*, *Touch Cylinder*, ...). U ovom radu konstruiran je funkcijom *Construct Auto Cylinder (Nominal)* na način da se klikne lijevom tipkom miša na željenu površinu držeći tipku CTRL. Program prepoznaje geometriju cilindra. Funkcijom *Measuring Principle* kreira se stvarni cilindar temeljen na nominalnom. Moguće je izabrati između nekoliko opcija *Measuring Principle*-a (*No Measuring Principle*, *Fitting Element*, *Touch Cylinder*, *Actual Element From Nominal Element*, *Link to Actual Element*). Stvarni cilindar kreiran je opcijom *Fitting Element*. Prema nominalnom elementu program odabire točke na stvarnom zupčaniku te kreira stvarni cilindar Gaussovom best-fit metodom. Osim Gaussove best-fit metode, moguće je izabrati i Chebyshevljevu best-fit metodu, metodu najvećeg upisanog elementa i metodu najmanjeg opisanog elementa. U nastavku pri svakom odabiru opcije *Fitting Element* uvijek je odabrana Gaussova best-fit metoda.



Slika 37 Measuring Principle: Fitting Element - metode

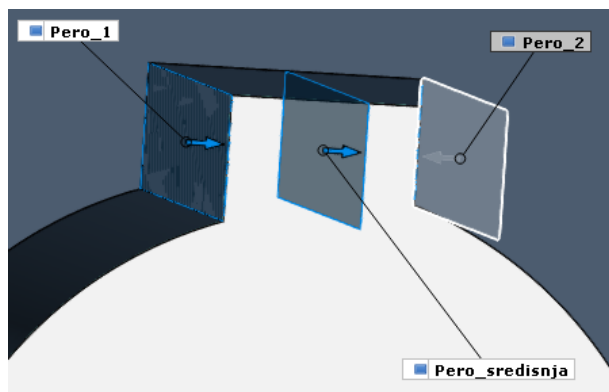
Na sličan način konstruirani su i ostali elementi. Ravnina se također može konstruirati na više načina (*Auto Plane (Nominal)*, *Point-Normal Plane*, *3-Point Plane*, *Parallel Plane*, *Perpendicular Plane*, *Point-Direction Plane*, *Rotated Plane*, ...). Bočna ravnina kreira se funkcijom *Construct Auto Plane (Nominal)*. Kao *Measuring Principle* odabran je *Fitting Element* (Slika 38).



Slika 38 Ravnina kreirana na stvarnom zupčaniku

Za kreiranje središnje ravnine na utoru za pero prvo je potrebno napraviti ravnine na bokovima pera funkcijom *Construct Auto Plane (Nominal)* pri čemu je *Measuring Principle Fitting Element*. Na temelju njih funkcijom *Create Symmetric Plane* konstruiraju se središnja ravnina na utoru za pero pri čemu je *Measuring Principle Referenced Construction* (Slika 39).

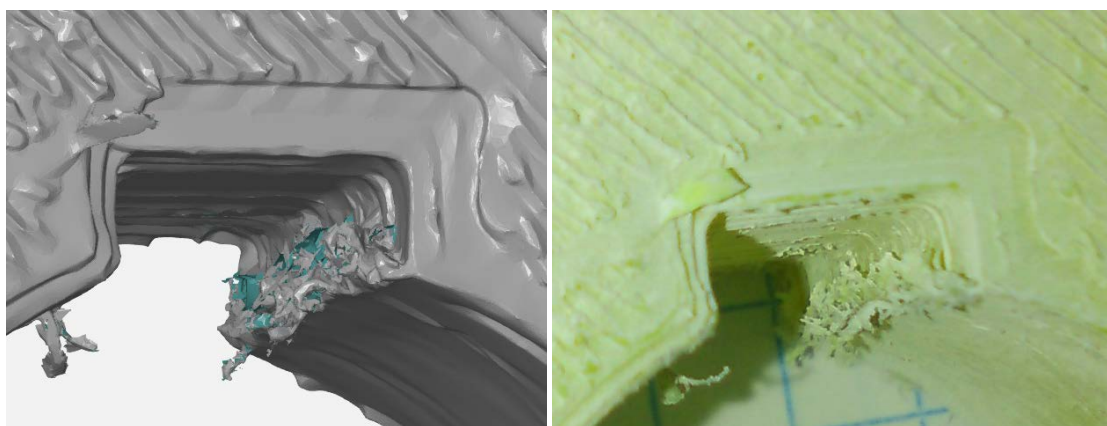
Ta ravnina ne postoji na površini zupčanika pa ne postoji opcija *Fitting Element*. Odabirom opcije *Referenced Construction* program kreira ravninu na stvarnom zupčaniku istim postupkom kao što je kreirana i na nominalnom zupčaniku.



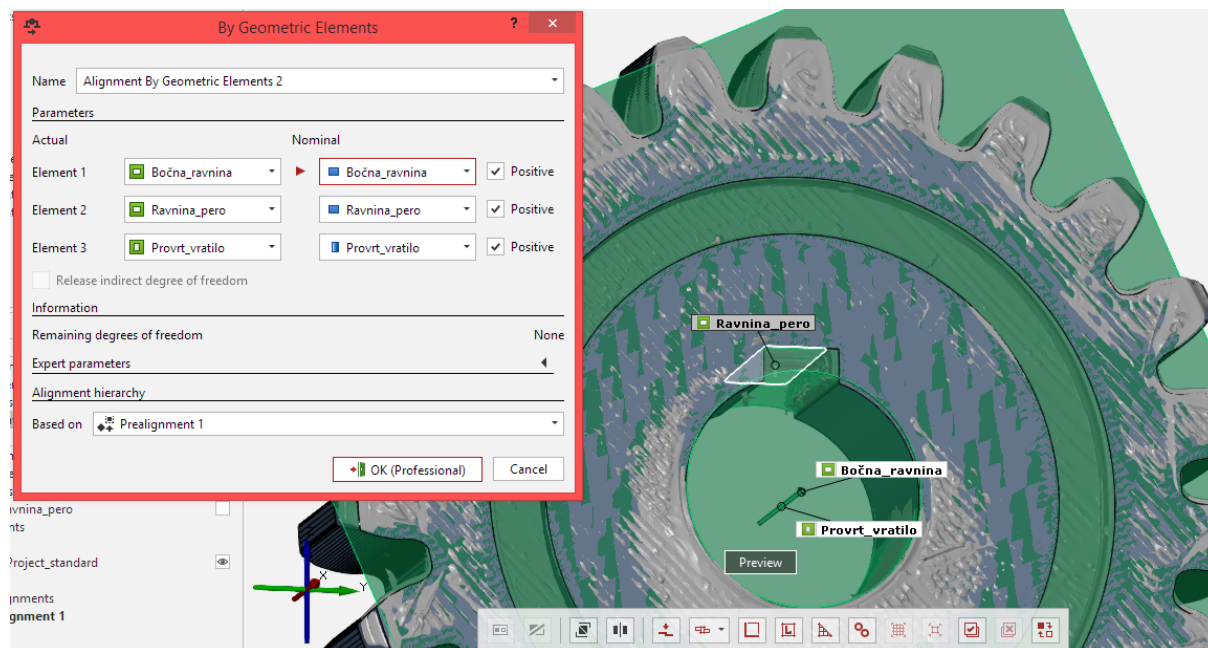
Slika 39 Ravnine konstruirane kod utora za pero na nominalnom elementu

Na temelju konstruiranih elemenata napravljeno je glavno poravnanje koje je već opisano. Nakon kreiranja glavnog poravnanja napravljeno je mjerenje.

Ovakvo poravnanje provedeno je na zupčanicima Z1.1 i Z1.2. Zbog loše izvedbe zupčanika Z1.3 takvo poravnanje s tim elementima nije se moglo napraviti na zupčaniku Z1.3. Bočna ravnina na utoru za pero (Slika 40) ne može biti izabrana kao referentna ravnina zbog loše izvedbe pa je umjesto te ravnine odabrana okomita ravnina na nju (Slika 41).



Slika 40 Prikaz bočne linije na utoru za pero

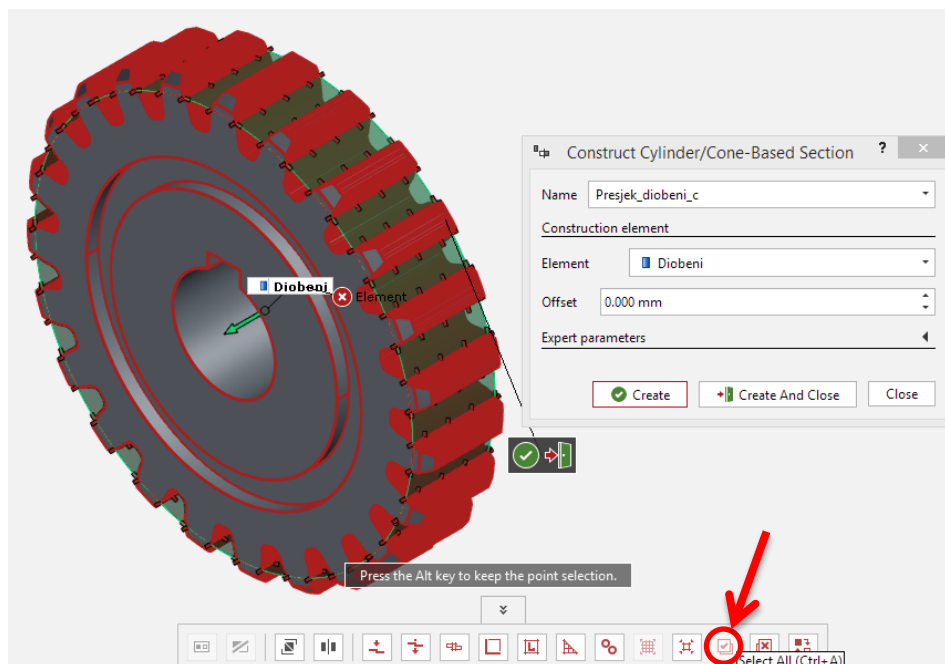


Slika 41 Glavno poravnanje zupčanika Z1.3

6.2. Uzdužna linija boka

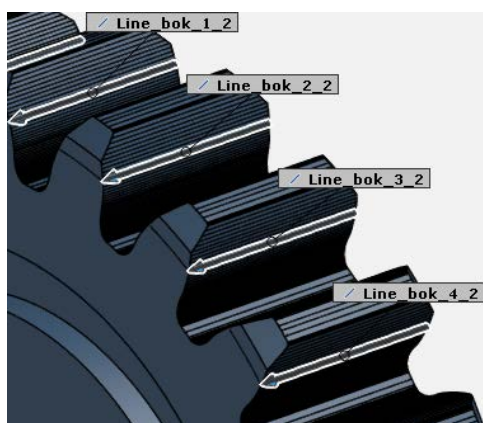
Odstupanje uzdužne linije boka prema [26] je udaljenost između dviju točnih bočnih linija točnog nagiba između kojih leži stvarna bočna linija.

Mjerenje odstupanja napravljeno je na način da se odredila tolerancija pravocrtnosti uzdužne linije boka opcijom *Check Straightness* koja se nalazi na ikoni *I-Inspect - GD&T* (e. *Geometric dimensioning and tolerancing* – tolerancije oblika i položaja). Odstupanje uzdužne linije boka provjereno je na diobenom promjeru. Da bi se konstruirala uzdužna linija boka prvo je kreiran diobeni cilindar. Diobeni cilindar je kreiran funkcijom *Construct Point-Direction Cylinder*. Potrebno je zadati točku osi (središte diobene kružnice; konstruiranje diobene kružnice opisano u poglavlju 6.6) i smjer (smjer *X* osi) te radijus ($r = 46$ mm). Ovdje je kao *Measuring Principle* odabran *Referenced Construction*. Ne može se odabrati *Fitting Element* zato što tog cilindra, odnosno točaka koje ga tvore nema na površini stvarnog zupčanika. Nakon toga konstruiran je presjek diobenog cilindra i zupčanika funkcijom *Construct Cylinder/Cone-Based Section*. Potrebno je odabrati diobeni cilindar na temelju kojeg se radi presjek te odabrati cijeli zupčanik na kojem se radi presjek (naredba *Select All*) (Slika 42). Kao *Measuring Principle* odabran je *Actual Section*. Stvarni presjek prolazi kroz stvarni zupčanik i nastaje na istom mjestu kao i na nominalnom zupčaniku.

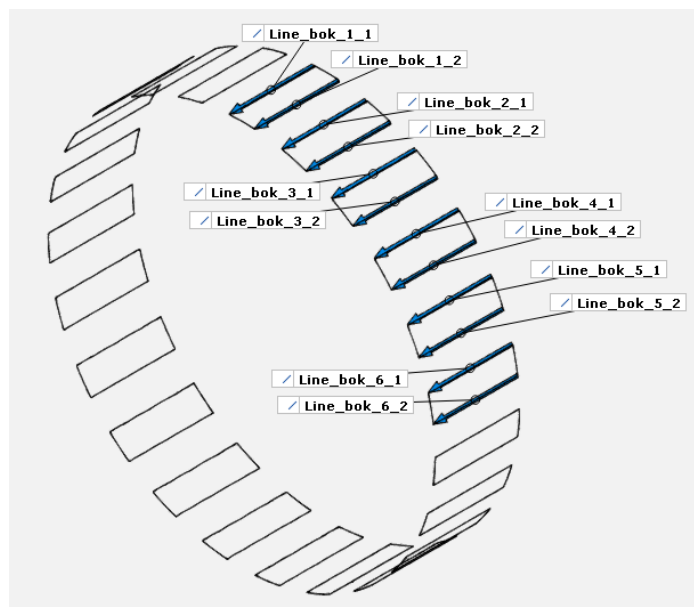


Slika 42 Postupak kreiranja presjeka cilindra i cijelog zupčanika

Na nastalom presjeku konstruirane su linije naredbom *Construct Auto Line (Nominal)* na način da se klikne lijevom tipkom miša na liniju na presjeku držeći CTRL. Konstruiraju se 46 linija koje predstavljaju uzdužne linije boka (Slika 43, Slika 44). Kao *Measuring Principle* odabran je *Fitting Element*.

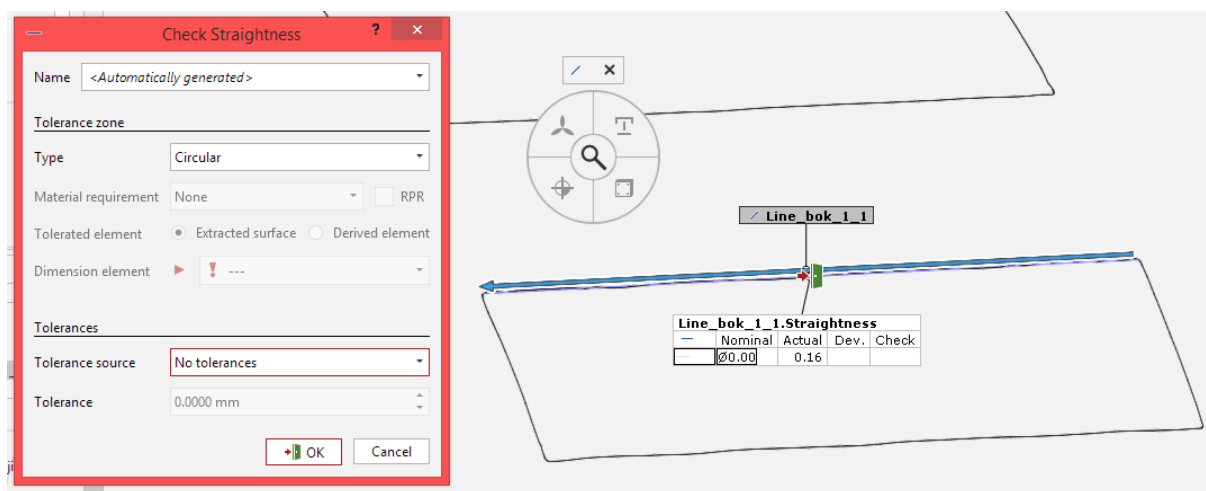


Slika 43 Prikaz uzdužnih linija boka na nominalnom zupčaniku



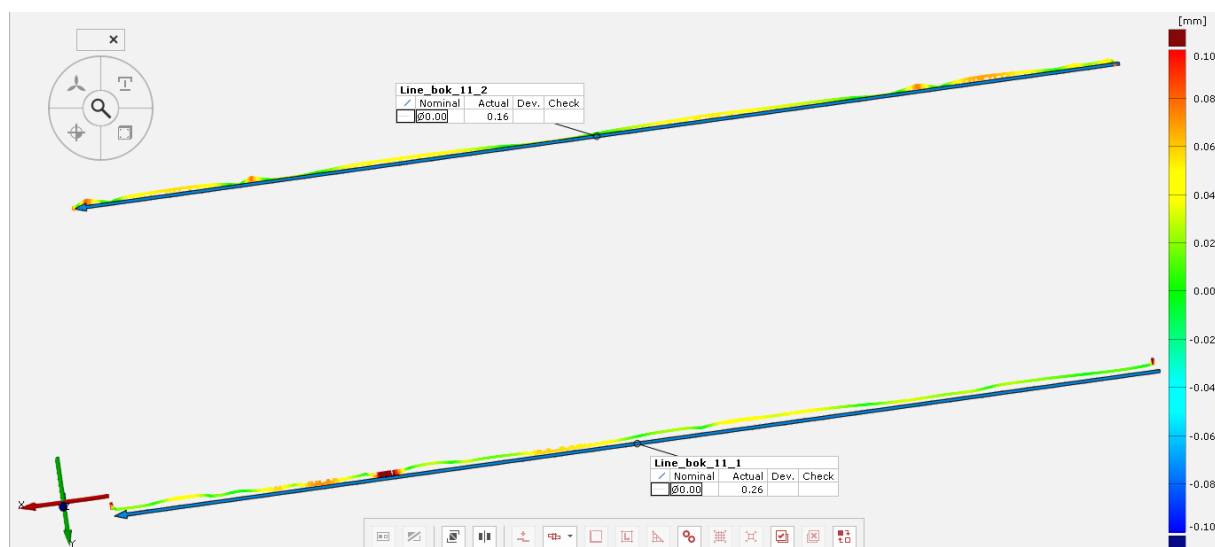
Slika 44 Prikaz nekoliko uzdužnih linija boka na presjeku

Na konstruiranim linijama je izmjereno odstupanje uzdužne linije boka stvarnog zupčanika u odnosu na nominalni. Provjerena je pravocrtnost linije funkcijom *Check Straightness* koja je jedna od opcija *GD&T*-a.

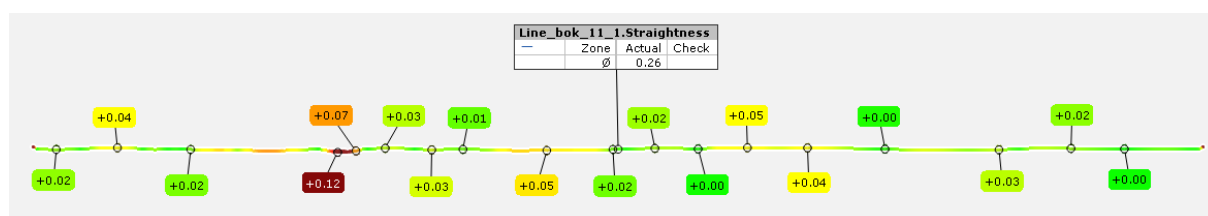


Slika 45 Odstupanje uzdužne linije boka (*Check Straightness*) zupčanika Z1.2

Ova funkcija stvarnu uzdužnu liniju boka smješta u definiranu tolerancijsku zonu. Ta zona definirana je cilindrom određenog promjera (*Type: Circular*). Vrijednost odstupanja definira promjer tog cilindra. Na Slika 46 prikazano je odstupanje uzdužnih linija zuba 11 zupčanika Z1.2 u rasponu boja, a na Slika 47 prikazano je odstupanje samo jedne uzdužne linije boka zuba 11 zupčanika Z1.2 s vrijednostima odstupanja u određenim točkama.



Slika 46 Odstupanje uzdužnih linija boka zuba 11 zupčanika Z1.2



Slika 47 Prikaz odstupanja jedne uzdužne linije boka 11 zupčanika Z1.2

U Tablica 12, Tablica 13 i Tablica 14 su vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3.

Tablica 12 Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka – zupčanik Z1.1

Oznaka boka	$A_{\beta_{1.1,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1.1,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1.1,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1.1,i}}$, mm
1_1	0,09	7_1	0,13	13_1	0,29	19_1	0,09
1_2	0,07	7_2	0,09	13_2	0,06	19_2	0,17
2_1	0,08	8_1	0,16	14_1	0,28	20_1	0,39
2_2	0,05	8_2	0,06	14_2	0,05	20_2	0,21
3_1	0,08	9_1	0,08	15_1	0,13	21_1	0,08
3_2	0,10	9_2	0,04	15_2	0,14	21_2	0,08
4_1	0,12	10_1	0,12	16_1	0,08	22_1	0,04
4_2	0,03	10_2	0,11	16_2	0,12	22_2	0,06
5_1	0,12	11_1	0,27	17_1	0,08	23_1	0,06
5_2	0,08	11_2	0,10	17_2	0,17	23_2	0,12

6_1	0,09	12_1	0,13	18_1	0,18	-	-
6_2	0,15	12_2	0,02	18_2	0,23	-	-

Tablica 13 Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka - zupčanik Z1.2

Oznaka boka	$A_{\beta_{1,2,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,2,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,2,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,2,i}}$, mm
1_1	0,16	7_1	0,05	13_1	0,19	19_1	0,13
1_2	0,10	7_2	0,07	13_2	0,20	19_2	0,13
2_1	0,14	8_1	0,10	14_1	0,18	20_1	0,10
2_2	0,10	8_2	0,09	14_2	0,19	20_2	0,11
3_1	0,14	9_1	0,13	15_1	0,13	21_1	0,13
3_2	0,11	9_2	0,12	15_2	0,18	21_2	0,06
4_1	0,13	10_1	0,14	16_1	0,09	22_1	0,12
4_2	0,13	10_2	0,17	16_2	0,16	22_2	0,04
5_1	0,13	11_1	0,26	17_1	0,05	23_1	0,14
5_2	0,12	11_2	0,16	17_2	0,13	23_2	0,08
6_1	0,07	12_1	0,14	18_1	0,05	-	-
6_2	0,08	12_2	0,19	18_2	0,10	-	-

Tablica 14 Vrijednosti odstupanja uzdužne linije boka – zupčanik Z1.3

Oznaka boka	$A_{\beta_{1,3,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,3,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,3,i}}$, mm	Oznaka boka	$A_{\beta_{1,3,i}}$, mm
1_1	0,43	7_1	0,54	13_1	0,53	19_1	0,41
1_2	0,58	7_2	0,26	13_2	0,59	19_2	0,50
2_1	0,25	8_1	0,79	14_1	0,48	20_1	0,65
2_2	0,42	8_2	0,79	14_2	0,74	20_2	0,39
3_1	0,44	9_1	0,54	15_1	0,57	21_1	0,64
3_2	0,80	9_2	0,37	15_2	0,35	21_2	0,34
4_1	0,13	10_1	1,06	16_1	0,43	22_1	0,58
4_2	0,43	10_2	0,58	16_2	0,50	22_2	0,62

5_1	0,22	11_1	1,07	17_1	0,38	23_1	0,31
5_2	0,25	11_2	0,38	17_2	0,38	23_2	0,64
6_1	0,41	12_1	0,71	18_1	0,33	-	-
6_2	0,40	12_2	0,73	18_2	0,79	-	-

Srednja odstupanja uzdužne linije boka $\bar{A}_{\beta_{1.1}}$, $\bar{A}_{\beta_{1.2}}$ i $\bar{A}_{\beta_{1.3}}$ zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose

$$\bar{A}_{\beta_{1.1}} = \frac{1}{2Z} \cdot \sum_{i=1}^{2Z} A_{\beta_{1.1},i} = 0,12 \text{ mm}, \quad (6.1)$$

$$\bar{A}_{\beta_{1.2}} = \frac{1}{2Z} \cdot \sum_{i=1}^{2Z} A_{\beta_{1.2},i} = 0,12 \text{ mm}, \quad (6.2)$$

$$\bar{A}_{\beta_{1.3}} = \frac{1}{2Z} \cdot \sum_{i=1}^{2Z} A_{\beta_{1.3},i} = 0,52 \text{ mm}, \quad (6.3)$$

pri čemu je $A_{\beta_{1.1},i}$ odstupanje uzdužne linije boka i zupčanika Z1.1, $A_{\beta_{1.2},i}$ je odstupanje uzdužne linije boka i zupčanika Z1.2, $A_{\beta_{1.3},i}$ je odstupanje uzdužne linije boka i zupčanika Z1.3.

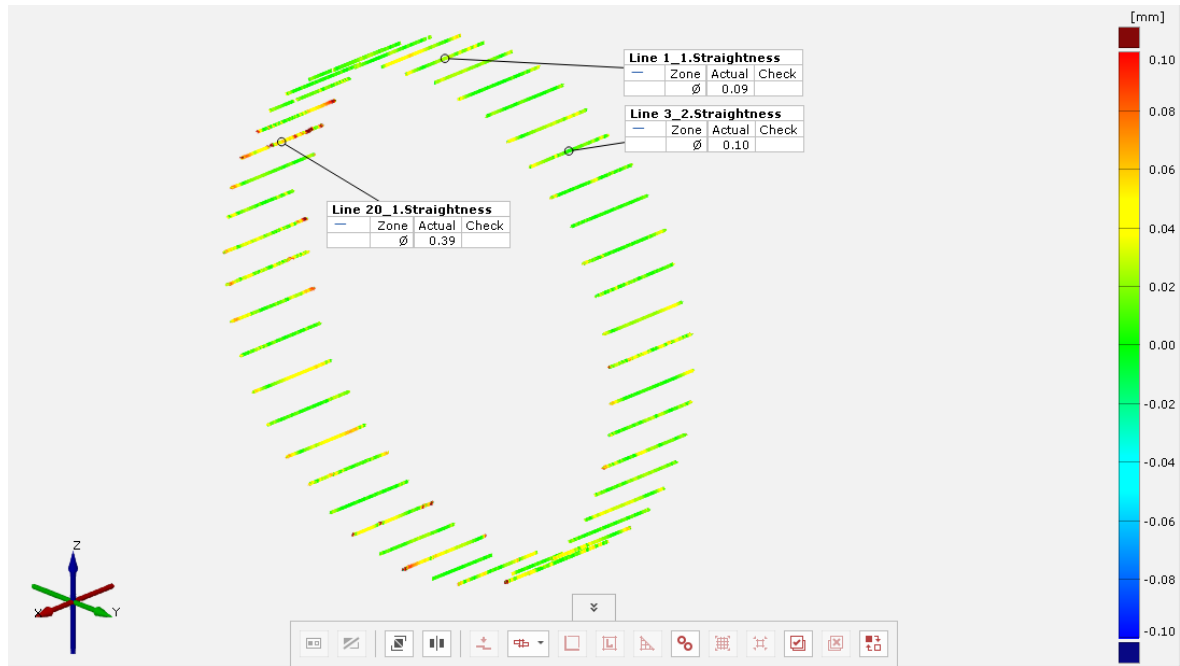
Srednja odstupanja uzdužne linije boka zupčanika Z1.1 i Z1.2 su jednaka. Najveće srednje odstupanje uzdužne linije boka je $\bar{A}_{\beta_{1.3}}$. To se slaže s očekivanjima s obzirom na lošu izvedbu zupčanika Z1.3. Kod zupčanika Z1.3 je najveće i standardno odstupanje $m_{\beta_{1.3}}$. Standardna odstupanja mjerenja $m_{\beta_{1.1}}$, $m_{\beta_{1.2}}$ i $m_{\beta_{1.3}}$ zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose:

$$m_{\beta_{1.1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2Z} (A_{\beta_{1.1},i} - \bar{A}_{\beta_{1.1}})^2}{2Z-1}} = 0,08 \text{ mm}, \quad (6.4)$$

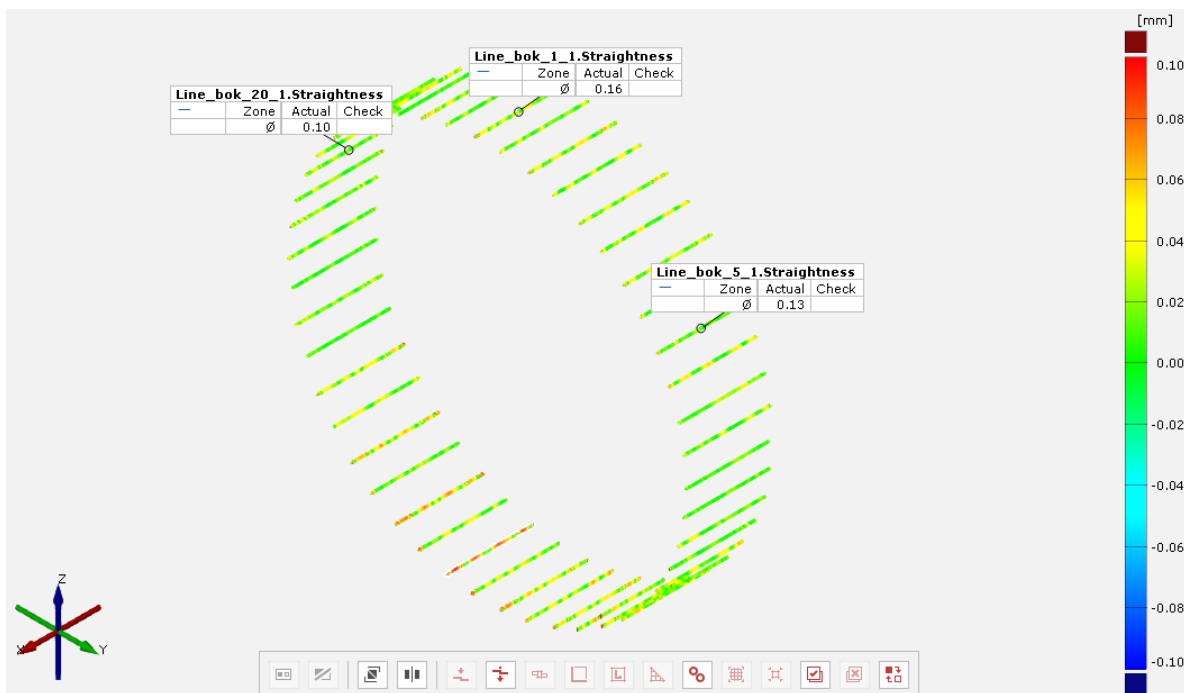
$$m_{\beta_{1.2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2Z} (A_{\beta_{1.2},i} - \bar{A}_{\beta_{1.2}})^2}{2Z-1}} = 0,05 \text{ mm}, \quad (6.5)$$

$$m_{\beta_{1.3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2Z} (A_{\beta_{1.3},i} - \bar{A}_{\beta_{1.3}})^2}{2Z-1}} = 0,20 \text{ mm}. \quad (6.6)$$

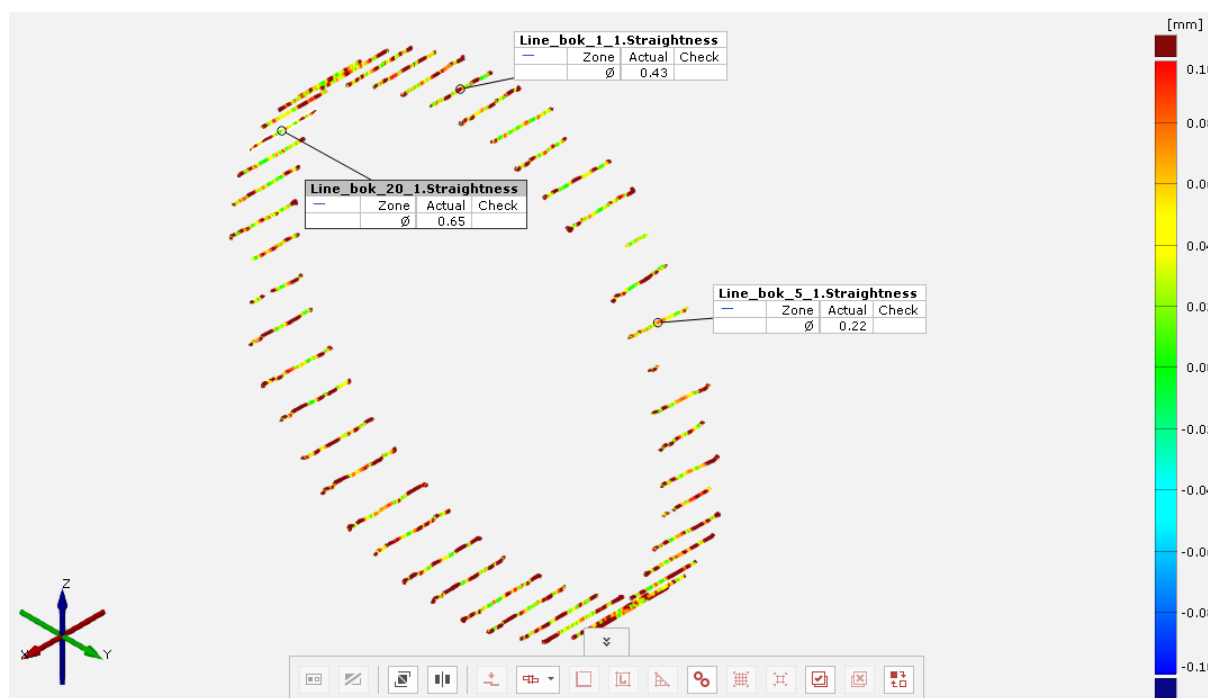
Na Slika 48, Slika 49 i Slika 50 prikazane su sve uzdužne linije bokova, odnosno njihova odstupanja prikazana bojom. Na njima se vide puno veća odstupanja na zupčaniku Z1.3 u odnosu na Z1.1 i Z1.2.



Slika 48 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.1 prikazana bojom



Slika 49 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.2 prikazana bojom

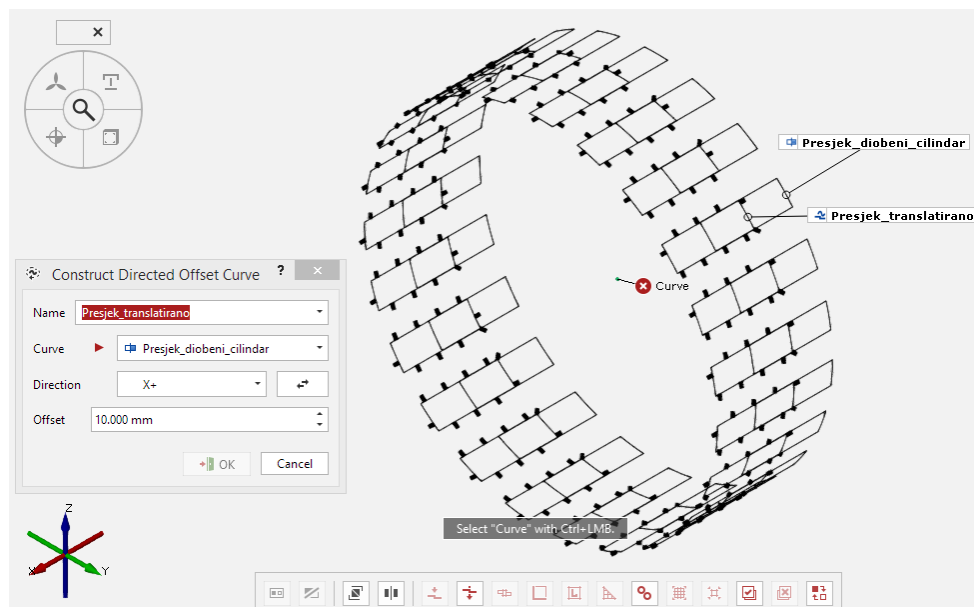


Slika 50 Odstupanja uzdužnih linija bokova zupčanika Z1.3 prikazana bojom

6.3. Debljina zuba

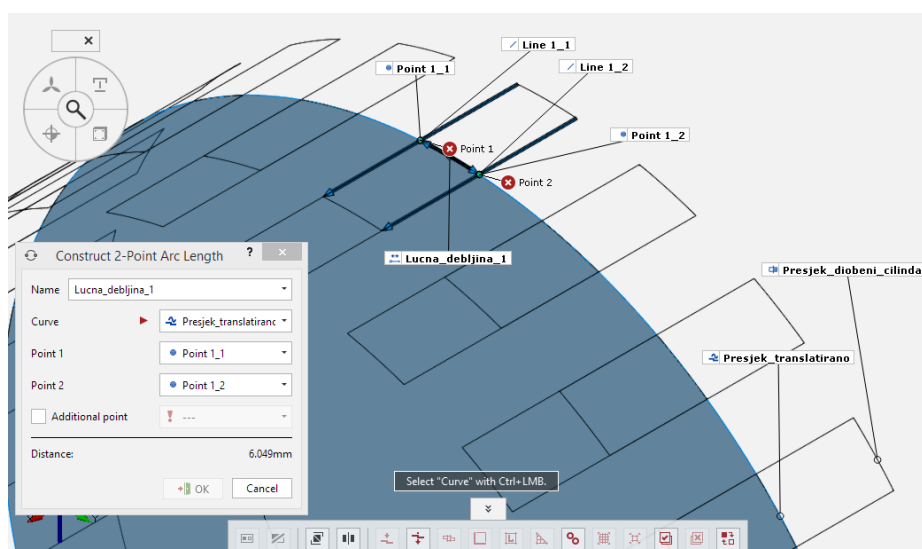
Na presjeku diobenog cilindra sa zupčanikom provedeno je i mjerenje debljine zuba. U stvarnosti je nemoguće praktično izmjeriti lučnu debljinu zuba [26], dok je u GOM Inspectu to omogućeno.

Kako bi se napravio luk, odnosno lučna debljina potrebno je napraviti nekoliko elemenata na temelju kojih se linija konstruira. Da bi se izmjerila lučna duljina potrebno je imati dvije točke između kojih se po krivulji mjeri udaljenost. Krivulju može predstavljati presjek, no već konstruirani *Presjek_diobeni_cilindar* nije pogodan za tu svrhu pa je kreirana nova krivulja, odnosno translirani presjek *Presjek_translatirano* funkcijom *Construct Directed Offset Curve*. Translatiran je u odnosu na *Presjek_diobeni_cilindar* u pozitivnom smjeru osi *X* za 10 mm (Slika 51).

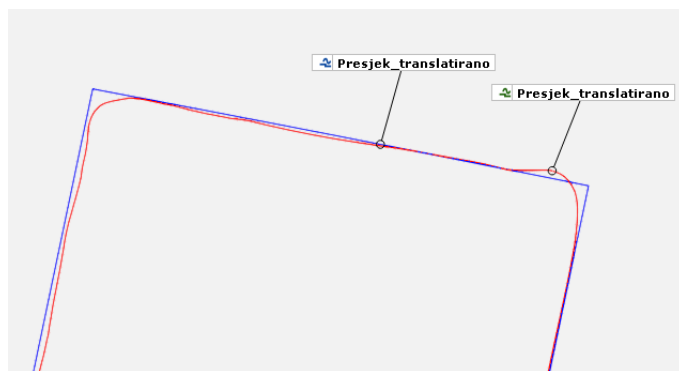


Slika 51 Konstruiranje krivulje *Presjek_translatirano*

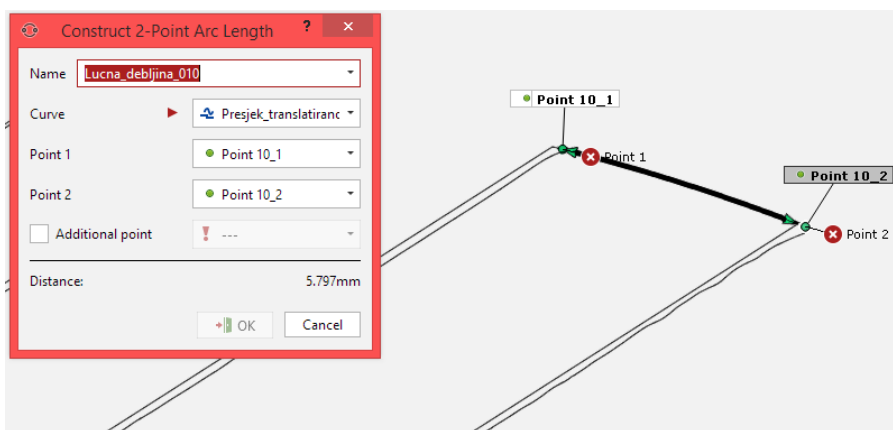
Kao *Measuring Principle* odabrana je opcija *Referenced Construction*. Na sjecištu uzdužnih linija boka i diobene kružnice konstruirane su točke funkcijom *Construct Intersection Point*. Kao *Measuring Principle* za točke je izabrana opcija *Referenced Construction*. Nakon što su kreirane točke moguće je napraviti nominalnu lučnu debljinu funkcijom *Construct 2-Point Arc Length*. Tom funkcijom određuje se udaljenost između dviju točaka duž krivulje (Slika 52). Kod stvarne udaljenosti su kao točke izabrane stvarne točke, a kao krivulja (*Curve*) je izabrana nominalna krivulja (*Presjek_translatirano*) zato što ne bi došao relevantni rezultat da se mjeri duljina uzduž stvarne (nepravilne) krivulje od točke do točke pa zato treba mjeriti duljinu nominalne krivulje između stvarnih točaka (Slika 53).



Slika 52 Konstruiranje nominalne lučne debljine

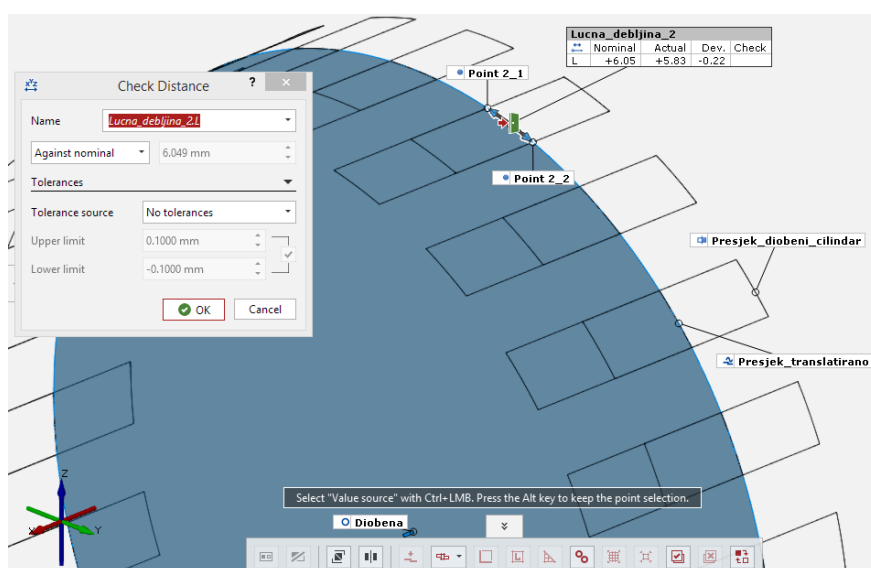


Slika 53 Razlika između nominalne (plava) i stvarne (crvena) krivulje



Slika 54 Konstruiranje stvarne lučne debljine zuba 10 zupčanika Z1.1

Da se provjeri koliki je iznos kreirane dimenzije odabire se naredba *Check Distance* koristeći *I-Inspect*. (Slika 55). *Nominal* na Slika 55 označava lučnu debljinu zuba 2 nominalnog zupčanika Z1.1, *Actual* označava lučnu debljinu zuba 2 stvarnog zupčanika Z1.1, a *Dev.* (*Deviation*) označava njihovu razliku, odnosno odstupanje.



Slika 55 Debljina zuba 2 zupčanika Z1.1

U Tablica 15 i Tablica 16 i Tablica 17 su vrijednosti odstupanja debljine zuba zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3.

Tablica 15 Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$s_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.1,i}$, mm
1	-0,07	9	-0,21	17	-0,09
2	-0,07	10	-0,26	18	-0,12
3	-0,09	11	-0,22	19	-0,04
4	-0,12	12	-0,20	20	-0,07
5	-0,13	13	-0,13	21	-0,12
6	-0,16	14	-0,06	22	-0,10
7	-0,19	15	-0,09	23	-0,09
8	-0,21	16	0,00		

Tablica 16 Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$s_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.2,i}$, mm
1	-0,22	9	-0,16	17	-0,13
2	-0,22	10	-0,16	18	-0,13
3	-0,22	11	-0,14	19	-0,15
4	-0,18	12	-0,20	20	-0,18
5	-0,16	13	-0,20	21	-0,18
6	-0,17	14	-0,18	22	-0,19
7	-0,16	15	-0,15	23	-0,21
8	-0,18	16	-0,12		

Tablica 17 Odstupanja lučne debljine zuba – zupčanik Z1.3

Broj zuba	$s_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$s_{1.3,i}$, mm
1	-0,22	9	-0,44	17	-0,29
2	-0,43	10	-0,39	18	-0,07

3	-0,49	11	-0,30	19	-0,21
4	-0,58	12	-0,33	20	-0,01
5	-0,63	13	-0,30	21	-0,04
6	-0,83	14	-0,35	22	0,00
7	-0,69	15	-0,28	23	-0,24
8	-0,49	16	-0,18		

Srednje vrijednosti odstupanja lučne debljine $\bar{s}_{1,1}$, $\bar{s}_{1,2}$, i $\bar{s}_{1,3}$ zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose

$$\bar{s}_{1,1} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z s_{1,1,i} = -0,12 \text{ mm}, \quad (6.7)$$

$$\bar{s}_{1,2} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z s_{1,2,i} = -0,17 \text{ mm}, \quad (6.8)$$

$$\bar{s}_{1,3} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z s_{1,3,i} = -0,34 \text{ mm}, \quad (6.9)$$

pri čemu je $s_{1,1,i}$ odstupanje lučne debljine zuba i zupčanika Z1.1, $s_{1,2,i}$ je odstupanje lučne debljine zuba i zupčanika Z1.2, $s_{1,3,i}$ je odstupanje lučne debljine zuba i zupčanika Z1.3.

Sve vrijednosti odstupanja lučne debljine zuba su negativne (dva odstupanja imaju vrijednost 0,00 mm) što znači da su na sva tri zupčanika zubi na diobenom promjeru tanji od nominalnog. Rezultati pokazuju da je veća (po apsolutnoj vrijednosti) srednja vrijednost odstupanja lučne debljine zupčanika Z1.2 u odnosu na Z1.1 što znači da su kod vodoravno printanog zupčanika prosječno veća odstupanja lučne debljine, no kod okomito printanog zupčanika javljaju se veća odstupanja od srednje vrijednosti, odnosno standardno odstupanje je veće:

$$m_{s,1,1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_{1,1,i} - \bar{s}_{1,1})^2}{n-1}} = 0,07, \quad (6.10)$$

$$m_{s,1,2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_{1,2,i} - \bar{s}_{1,2})^2}{n-1}} = 0,03, \quad (6.11)$$

$$m_{s,1,3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_{1,3,i} - \bar{s}_{1,3})^2}{n-1}} = 0,22, \quad (6.12)$$

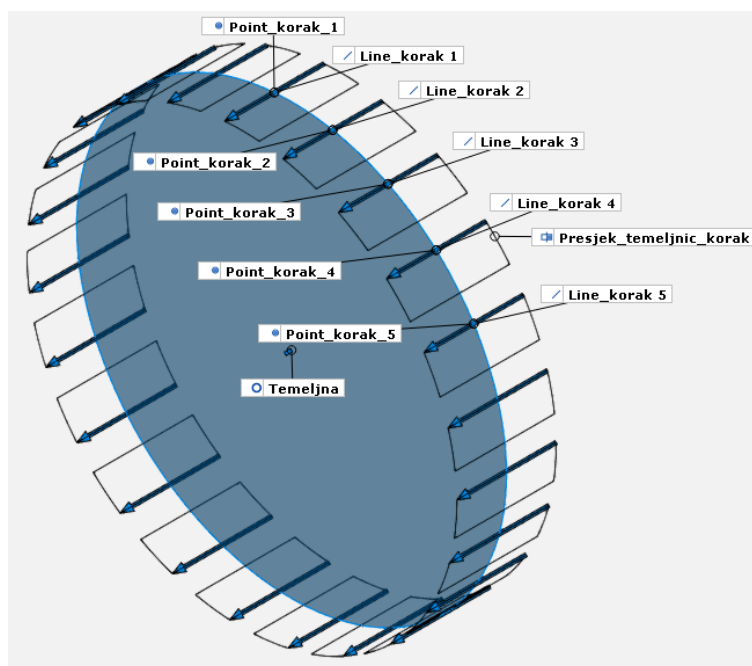
pri čemu je $m_{s,1,1}$ standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.1, $m_{s,1,2}$ standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.2, $m_{s,1,3}$ standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.3.

I u slučaju debljine zuba vrijednosti odstupanja za zupčanik Z1.3 su veće (po apsolutnoj vrijednosti) od ostala dva, a kod njega je i najveće standardno odstupanje.

6.4. Korak na zahvatnoj crti

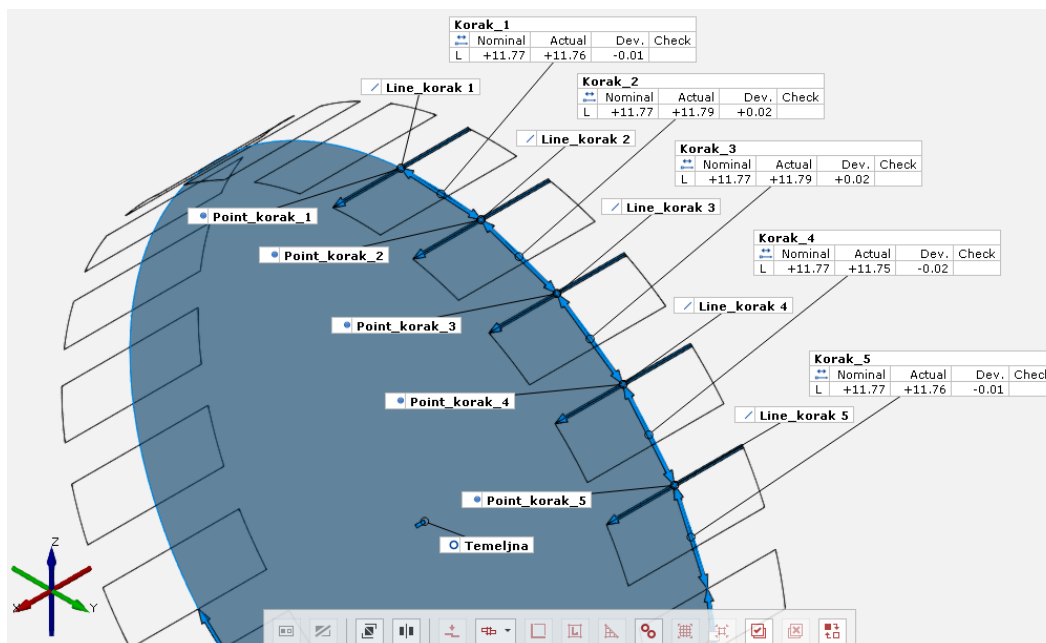
Odstupanje temeljnog koraka je prema [26] algebarska razlika stvarne i nazivne mjere temeljnog koraka u koje je uključeno i odstupanje profila.

Duljina temeljnog koraka mjeri se na presjeku temeljnog cilindra sa zupčanikom. Cilindar temeljnog promjera konstruiran je na jednak način kao i diobeni cilindar (*Construct Point-Direction Cylinder*). Kao točka osi odabrano je središte diobene kružnice, a radijus temeljnog cilindra iznosi $r_b = 43,23$ mm. Kao *Measuring Principle* odabire se *Referenced Construction* iz istog razloga kao i kod kreiranja diobenog cilindra. Zatim je konstruiran presjek temeljnog cilindra i zupčanika funkcijom *Construct Cylinder/Cone-Based Section* na isti način kao i kod konstruiranja presjeka diobenog cilindra i zupčanika. Na presjeku se konstruiraju linije naredbom *Construct Auto Line (Nominal)*, *Measuring Principle* je *Fitting Line*.



Slika 56 Nominalni presjek temeljnog cilindra i zupčanika

Na konstruiranim linijama kreirane su točke na presjeku linije i temeljne kružnice naredbom *Construct Intersection Point*, *Measuring Principle* je *Fitting Element*. Između dviju susjednih točaka konstruirana je udaljenost (*Construct 2-Point Distance*, *Measuring Principle: Referenced Construction*). Da se provjeri koliki je iznos kreirane dimenzije odabire se naredba *Check Distance* koristeći *I-Inspect*.



Slika 57 Temeljni koraci zupčanika Z1.1

U Tablica 18, Tablica 19 i Tablica 20 su vrijednosti odstupanja temeljnog koraka zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3.

Tablica 18 Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$p_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.1,i}$, mm
1	-0,01	9	0	17	0,05
2	0,02	10	0,06	18	-0,02
3	0,02	11	-0,06	19	-0,01
4	-0,02	12	-0,06	20	0,05
5	-0,01	13	-0,08	21	0,06
6	0,05	14	0	22	-0,02
7	0,07	15	-0,04	23	-0,02
8	0	16	0		

Tablica 19 Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$p_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.2,i}$, mm
1	0,01	9	-0,02	17	0,00
2	0,00	10	0,01	18	0,02

3	-0,02	11	0,00	19	0,02
4	-0,02	12	0,02	20	0,00
5	0,00	13	-0,02	21	0,01
6	-0,02	14	-0,02	22	0,00
7	0,02	15	-0,03	23	0,03
8	0,00	16	0,00		

Tablica 20 Odstupanja temeljnog koraka – zupčanik Z1.3

Broj zuba	$p_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$p_{1.3,i}$, mm
1	0,08	9	0,00	17	0,10
2	-0,04	10	0,01	18	-0,04
3	0,02	11	0,26	19	-0,13
4	0,06	12	-0,08	20	-0,10
5	0,16	13	-0,13	21	-0,01
6	0,15	14	0,12	22	-0,03
7	0,09	15	0,00	23	0,00
8	0,05	16	-0,07		

Srednju vrijednost odstupanja temeljnog koraka zupčanika nema razloga računati zato jer mora biti jednaka nuli pa je zato računata srednja vrijednost apsolutnih odstupanja da se vidi kod kojeg zupčanika se javljaju veća odstupanja temeljnog koraka od nominalne duljine:

$$\bar{p}_{a.1.1} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |p_{1.1,i}| = 0,03 \text{ mm}, \quad (6.13)$$

$$\bar{p}_{a.1.2} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |p_{1.2,i}| = 0,01 \text{ mm}, \quad (6.14)$$

$$\bar{p}_{a.1.3} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |p_{1.3,i}| = 0,08 \text{ mm}, \quad (6.15)$$

pri čemu je $\bar{p}_{a.1.1}$ srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka zupčanika Z1.1, $\bar{p}_{a.1.2}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka zupčanika Z1.2, $\bar{p}_{a.1.3}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja temeljnog koraka zupčanika Z1.3, $p_{1.1,i}$ je vrijednost odstupanja temeljnog koraka kod zuba i zupčanika Z1.1, $p_{1.2,i}$ je vrijednost odstupanja

temelnog koraka kod zuba i zupčanika Z1.2, $p_{1.3,i}$ je vrijednost odstupanja temeljnog koraka kod zuba i zupčanika Z1.3.

Uspoređujući rezultate za zupčanike Z1.1 i Z.2 zaključuje se da zupčanik Z1.1 ima veću srednju vrijednost odstupanja temeljnog koraka, a kod njega se javlja i veće standardno odstupanje:

$$m_{p,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{1.1,i} - \bar{p}_{1.1})^2}{n-1}} = 0,04 \text{ mm}, \quad (6.16)$$

$$m_{p,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{1.2,i} - \bar{p}_{1.2})^2}{n-1}} = 0,02 \text{ mm}, \quad (6.17)$$

$$m_{p,1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{1.3,i} - \bar{p}_{1.3})^2}{n-1}} = 0,10 \text{ mm}, \quad (6.18)$$

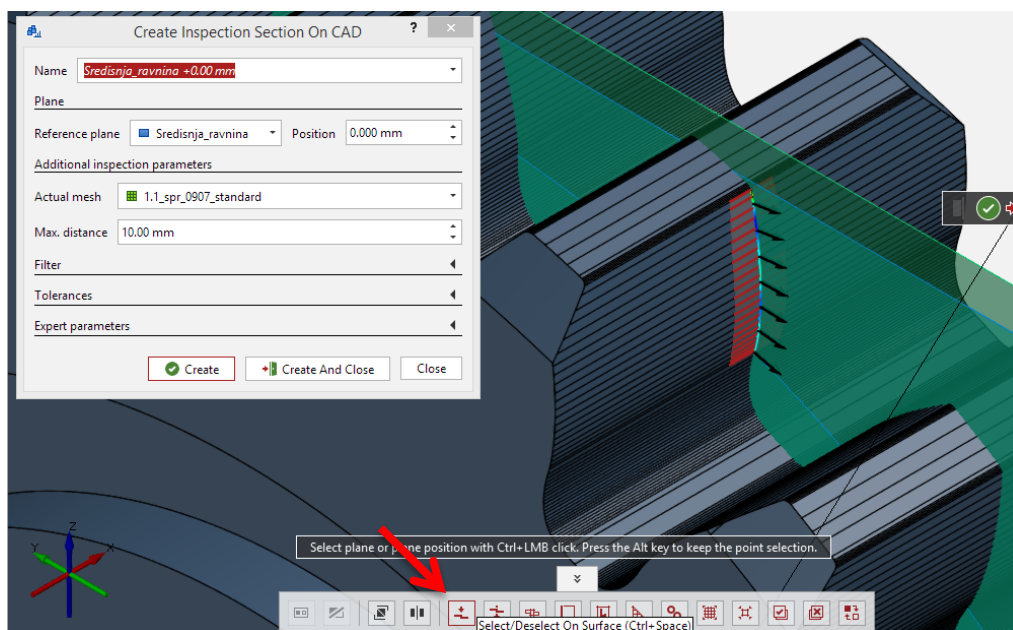
pri čemu je $m_{p,1.1}$ standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.1, $m_{p,1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.2, $m_{p,1.3}$ je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.3.

Kao i kod drugih veličina, i ovdje najveću srednju vrijednost odstupanja temeljnog koraka ima zupčanik Z1.3.

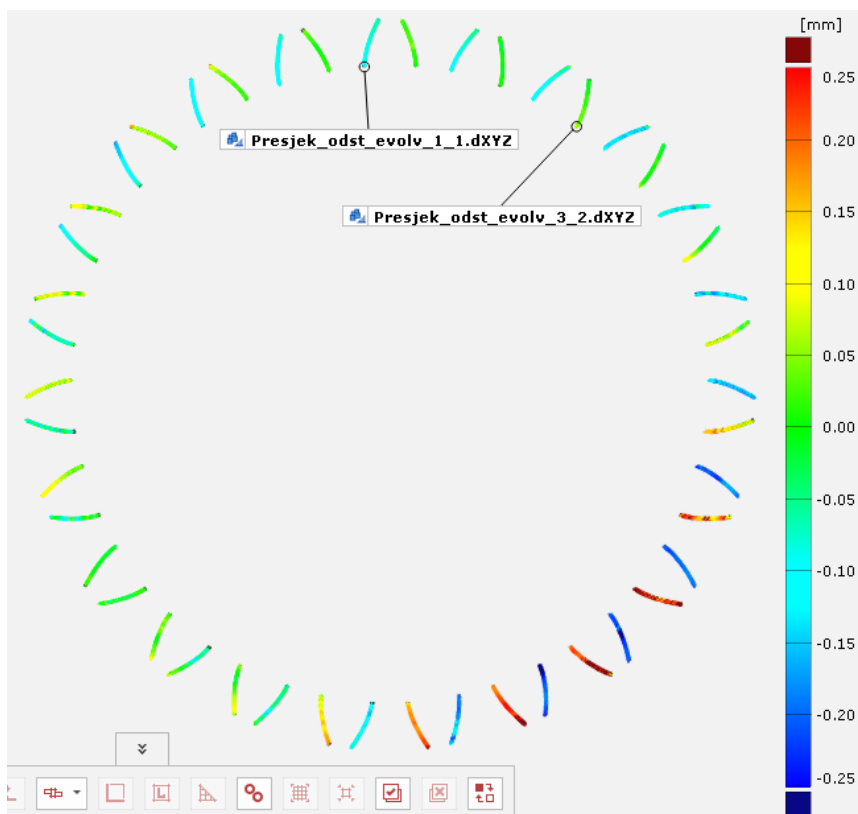
6.5. Evolventa

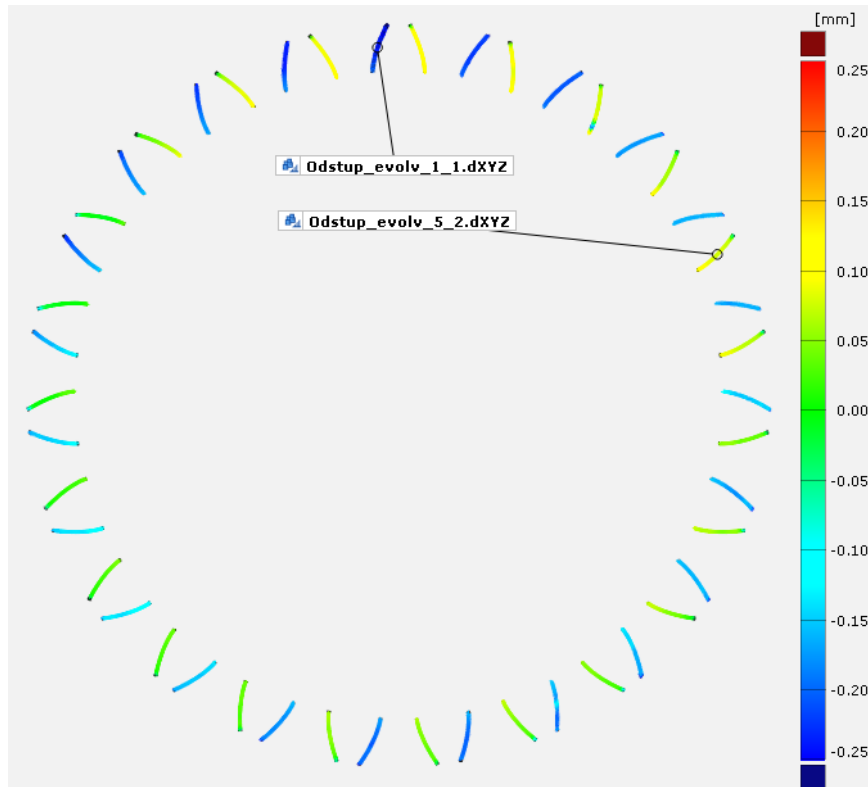
Odstupanje od evolvente predstavlja udaljenost između dviju točnih evolventi temeljne kružnice između kojih je stvarni profil zuba [26].

Odstupanja od evolvente u GOM Inspectu provjerena su na presjeku središnje ravnine i zupčanika. Središnja ravnina kreirana je naredbom *Construct Symmetric Plane (Measuring Principle: Referenced Construction)*. Kako bi se dobila odstupanja provedena je funkcija *Create Inspection Section On CAD*. Tom funkcijom konstruira se presjek kroz nominalni zupčanik po definiranoj ravnini (Slika 58). Funkcijom *Select/Deselect On Surface* odabire se dio zupčanika na kojem se radi presjek. Program izračunava odstupanja u 2D ravnini stvarnih elemenata u odnosu na nominalne. Kada je konstruiran presjek inspekcije, program automatski konstruira i pripadajući stvarni presjek.

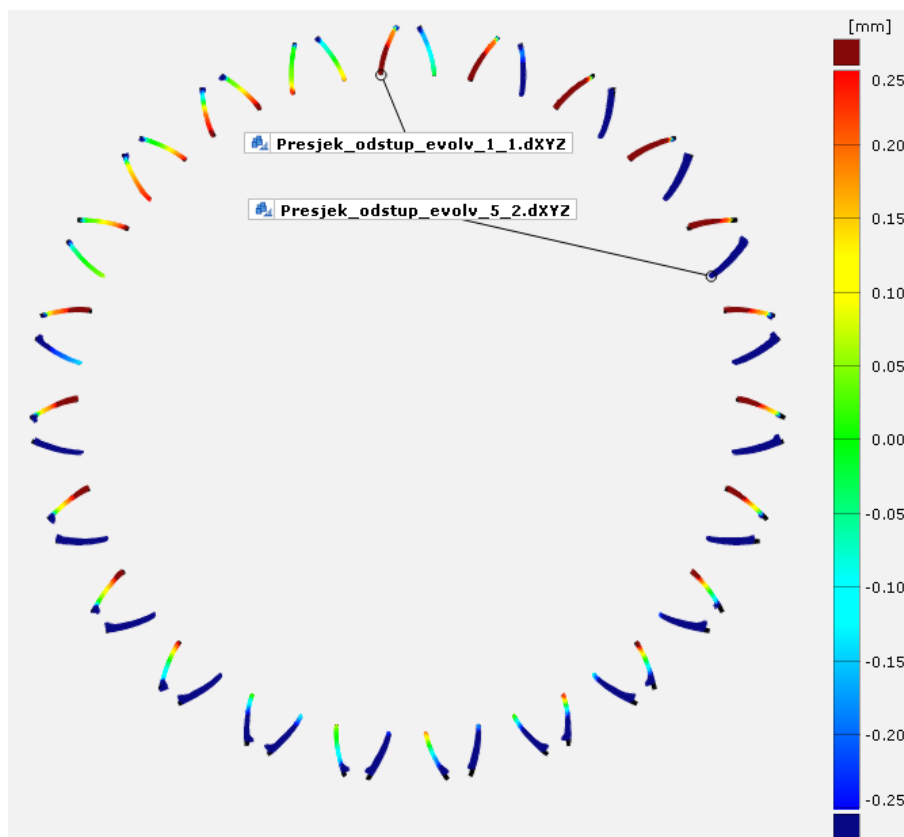
**Slika 58 Inspection Section On CAD**

Nastali presjeci, odnosno odstupanja stvarnih presjeka u odnosu na nominalne mogu se prikazati u boji (Slika 59, Slika 60 i Slika 61).

**Slika 59 Odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.1**



Slika 60 Odstupanja od evolvente – zubčanik Z1.2



Slika 61 Odstupanja od evolvente – zubčanik Z1.3

U Tablica 21, Tablica 22 i Tablica 23 su vrijednosti odstupanja od evolvente.

Tablica 21 Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.1

Oznaka boka	$A_{ev,1.1_min,i}$, mm	$A_{ev,1.1_max,i}$, mm	Oznaka boka	$A_{ev,1.1_min,i}$, mm	$A_{ev,1.1_max,i}$, mm
1_1	-0,09	-0,06	13_1	-0,16	-0,04
1_2	0	0,05	13_2	0,05	0,18
2_1	-0,09	-0,04	14_1	-0,14	0,06
2_2	-0,02	0,02	14_2	-0,03	0,11
3_1	-0,13	0,05	15_1	-0,15	0,15
3_2	-0,01	0,06	15_2	-0,01	0,12
4_1	-0,20	0,01	16_1	-0,07	0,06
4_2	-0,03	0,06	16_2	-0,03	0,03
5_1	-0,20	-0,03	17_1	-0,13	0,06
5_2	-0,05	0,13	17_2	0,00	0,11
6_1	-0,20	-0,04	18_1	-0,18	0,02
6_2	-0,06	0,16	18_2	0,00	0,12
7_1	-0,22	-0,09	19_1	-0,19	0,07
7_2	-0,03	0,22	19_2	0,00	0,15
8_1	-0,27	-0,14	20_1	-0,17	0,01
8_2	0,09	0,30	20_2	-0,02	0,15
9_1	-0,22	-0,18	21_1	-0,18	-0,05
9_2	0,10	0,30	21_2	-0,01	0,17
10_1	-0,27	-0,17	22_1	-0,12	-0,09
10_2	0,05	0,32	22_2	0,00	0,10
11_1	-0,28	-0,18	23_1	-0,12	-0,07
11_2	0,18	0,31	23_2	-0,01	0,04
12_1	-0,22	-0,10			
12_2	0,14	0,25			

Tablica 22 Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.2

Oznaka boka	$A_{ev,1.2_min,i}$ mm	$A_{ev,1.2_max,i}$ mm	Oznaka boka	$A_{ev,1.2_min,i}$ mm	$A_{ev,1.2_max,i}$ mm
1_1	-0,25	-0,20	13_1	-0,26	-0,17
1_2	0,00	0,12	13_2	-0,06	0,06
2_1	-0,26	-0,21	14_1	-0,24	-0,16
2_2	0,04	0,10	14_2	-0,04	0,04
3_1	-0,22	-0,19	15_1	-0,20	-0,13
3_2	-0,19	0,11	15_2	-0,04	0,04
4_1	-0,23	-0,16	16_1	-0,17	-0,11
4_2	-0,04	0,10	16_2	-0,04	0,05
5_1	-0,21	-0,15	17_1	-0,16	-0,11
5_2	-0,06	0,11	17_2	-0,06	0,04
6_1	-0,20	-0,16	18_1	-0,18	-0,10
6_2	-0,05	0,09	18_2	-0,10	0,04
7_1	-0,22	-0,12	19_1	-0,19	-0,12
7_2	-0,05	0,05	19_2	-0,11	0,02
8_1	-0,25	-0,15	20_1	-0,23	-0,14
8_2	-0,08	0,08	20_2	-0,09	0,04
9_1	-0,23	-0,15	21_1	-0,22	-0,16
9_2	-0,04	0,07	21_2	-0,02	0,09
10_1	-0,28	-0,13	22_1	-0,25	-0,17
10_2	-0,1	0,06	22_2	-0,02	0,11
11_1	-0,21	-0,13	23_1	-0,24	-0,18
11_2	-0,09	0,08	23_2	0,02	0,11
12_1	-0,20	-0,16			
12_2	-0,04	0,07			

Tablica 23 Rezultati odstupanja od evolvente – zupčanik Z1.3

Oznaka boka	$A_{ev,1.3_min,i}$ mm	$A_{ev,1.3_max,i}$ mm	Oznaka boka	$A_{ev,1.3_min,i}$ mm	$A_{ev,1.3_max,i}$ mm
1_1	-0,43	0,33	13_1	-0,91	-0,23
1_2	0,35	-0,02	13_2	-0,85	0,08
2_1	-0,17	0,38	14_1	-1,14	-0,13
2_2	-0,35	-0,19	14_2	-0,91	0,04
3_1	-0,09	0,42	15_1	-1,01	-0,27
3_2	-0,66	-0,31	15_2	-0,97	0,28
4_1	-0,35	0,50	16_1	-1,07	-0,31
4_2	-0,87	-0,35	16_2	-0,81	0,41
5_1	0,06	0,50	17_1	-0,88	-0,28
5_2	-1,04	-0,35	17_2	-0,87	0,48
6_1	-0,57	0,47	18_1	-0,59	-0,27
6_2	-1,17	-0,35	18_2	-0,8	0,51
7_1	-0,35	0,46	19_1	-0,73	-0,14
7_2	-1,12	-0,36	19_2	-0,33	0,38
8_1	-0,47	0,46	20_1	-0,35	0,06
8_2	-0,82	-0,28	20_2	-0,16	0,29
9_1	-0,64	0,38	21_1	-0,57	0,24
9_2	-1,20	-0,21	21_2	-0,41	0,27
10_1	-1,02	0,29	22_1	-0,47	0,27
10_2	-1,08	-0,11	22_2	-0,58	0,31
11_1	-0,94	0,23	23_1	-0,25	0,23
11_2	-0,99	0,04	23_2	-0,39	0,17
12_1	-0,69	-0,18	-	-	-
12_2	-0,69	0,21	-	-	-

Srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja (minimalnih i maksimalnih) od evolvente $\bar{A}_{a_ev,1.1}$, $\bar{A}_{a_ev,1.2}$ i $\bar{A}_{a_ev,1.3}$ za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose

$$\bar{A}_{a_{ev,1.1}} = \frac{1}{4Z} \cdot \sum_{i=1}^{4Z} |A_{ev,1.1_{min/max,i}}| = 0,11 \text{ mm}, \quad (6.19)$$

$$\bar{A}_{a_{ev,1.2}} = \frac{1}{4Z} \cdot \sum_{i=1}^{4Z} |A_{ev,1.2_{min/max,i}}| = 0,13 \text{ mm}, \quad (6.20)$$

$$\bar{A}_{a_{ev,1.3}} = \frac{1}{4Z} \cdot \sum_{i=1}^{4Z} |A_{ev,1.3_{min/max,i}}| = 0,48 \text{ mm}, \quad (6.21)$$

pri čemu je $A_{ev,1.1_{min/max,i}}$ donja, odnosno gornja vrijednost odstupanja od evolvente boka i zupčanika Z1.1, $A_{ev,1.2_{min/max,i}}$ je donja, odnosno gornja vrijednost odstupanja od evolvente boka i zupčanika Z1.2, $A_{ev,1.3_{min/max,i}}$ je donja, odnosno gornja vrijednost odstupanja od evolvente boka i zupčanika Z1.3. Rezultati pokazuju da je uspoređujući zupčanike Z1.1 i Z1.2 veća srednja vrijednost apsolutnih odstupanja od evolvente kod zupčanika Z1.2, no razlika nije velika, no rasipanje rezultata je veće kod zupčanika Z1.1:

$$m_{ev,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ev,1.1_{min/max,i}} - \bar{A}_{ev,1.1})^2}{n-1}} = 0,04 \text{ mm}, \quad (6.22)$$

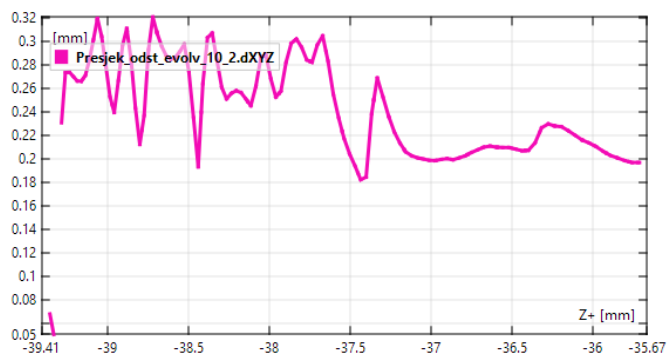
$$m_{ev,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ev,1.2_{min/max,i}} - \bar{A}_{ev,1.2})^2}{n-1}} = 0,02 \text{ mm}, \quad (6.23)$$

$$m_{ev,1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ev,1.3_{min/max,i}} - \bar{A}_{ev,1.3})^2}{n-1}} = 0,10 \text{ mm}. \quad (6.24)$$

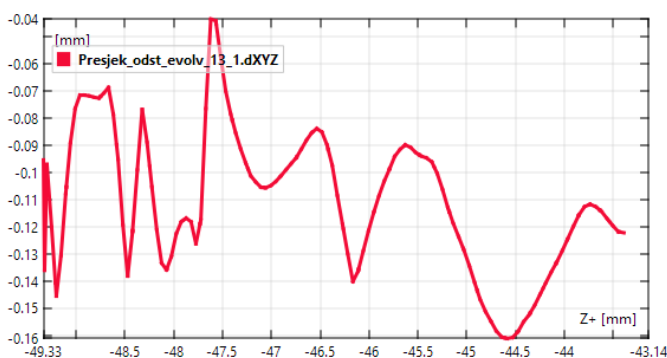
Kod zupčanika Z1.3 je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja znatno veća (u odnosu na razliku između zupčanika Z1.1 i Z1.2), a i standardno odstupanje je veće nego kod Z1.1 i Z1.2.

Na Slika 59 i Slika 60 vidi se kako su uvijek na jednoj strani zuba odstupanja od evolvente negativna, dok su na drugoj strani zuba odstupanja od evolvente većinom pozitivna (Slika 63, Slika 64, Slika 65, Slika 66). Razlog takvog rasporeda vrijednosti može biti i nepravilno definirano glavno poravnanje što ukazuje na potrebu za velikom pažnjom pri definiranju istog. Najveća pozitivna odstupanja na zupčaniku Z1.1 nalaze se na bokovima 8_2 – 12_2 (Slika 59, Slika 62).

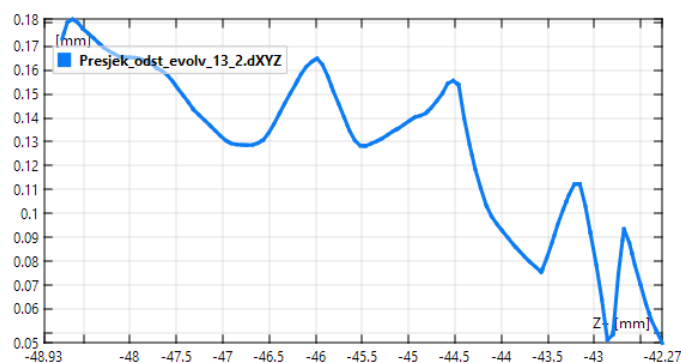
Odstupanja od evolvente moguće je prikazati i dijagramski (Slika 62 - Slika 68)



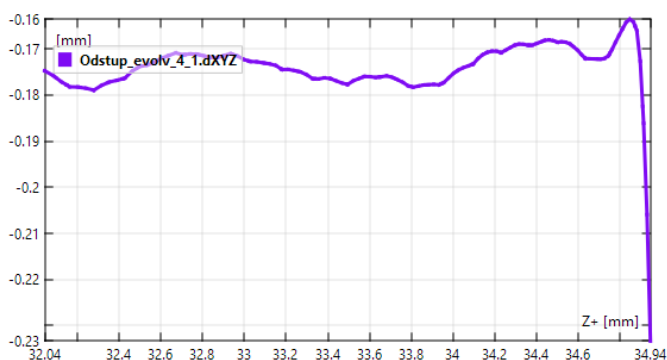
Slika 62 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 10_2 zupčanika Z1.1



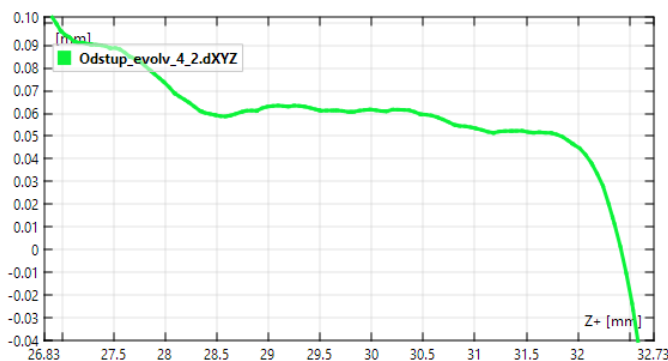
Slika 63 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 13_1 zupčanika Z1.1



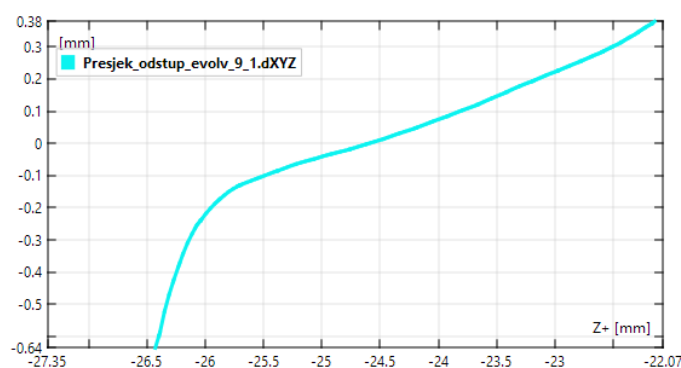
Slika 64 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 13_2 zupčanika Z1.1



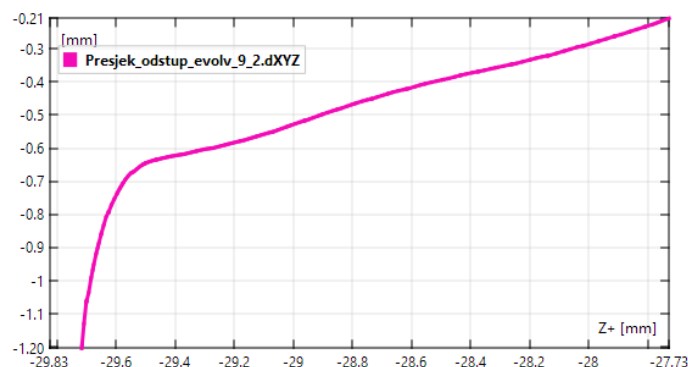
Slika 65 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 4_1 zupčanika Z1.2



Slika 66 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 4_2 zupčanika Z1.2



Slika 67 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 9_1 zupčanika Z1.3

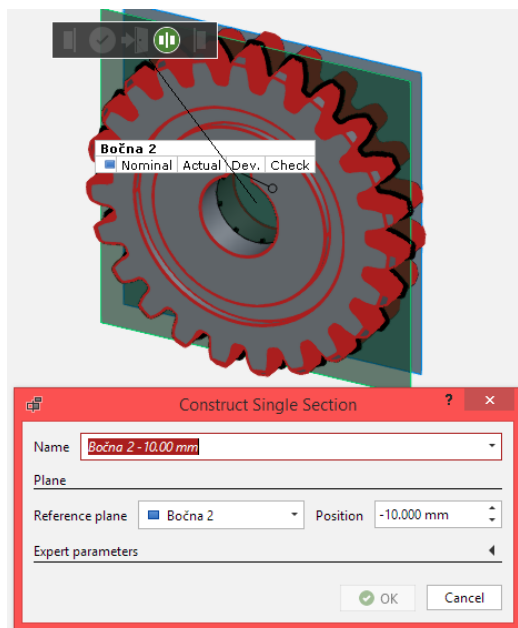


Slika 68 Dijagram odstupanja od evolvente za bok zuba 9_2 zupčanika Z1.3

6.6. Uzubina

Mjerenje odstupanja širine uzubine provedeno je u GOM Inspectu na sličan način kao i u stvarnosti komparatorom. Izračunata je nominalna udaljenost središta kuglice komparatora do središta zupčanika kada kuglica upadne u uzubinu. Ta udaljenost iznosi $l = 48,32 \text{ mm}$.

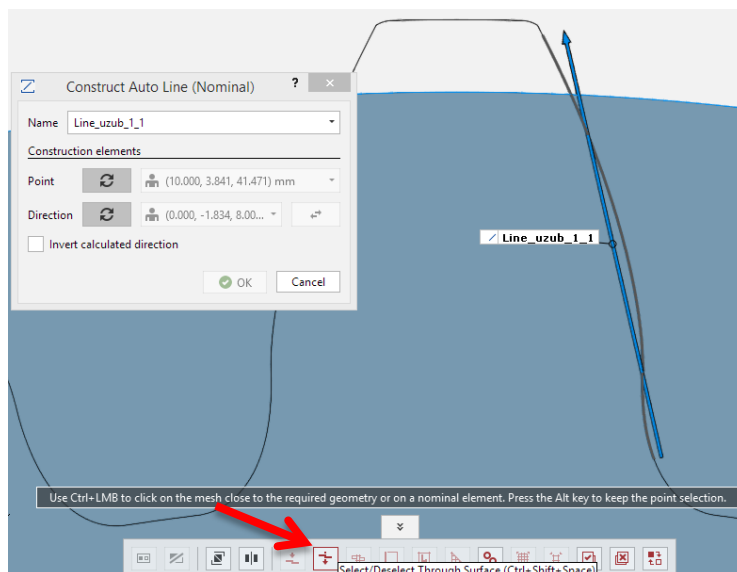
Na početku su konstruirani neki elementi potrebni za konstrukciju kružnice koja predstavlja kuglicu komparatora. Konstruiran je presjek na sredini zupčanika funkcijom *Construct Single Section*. Ravnina presjeka jedna je od bočnih ravnina „pomaknuta“ za 10 mm prema središtu zupčanika (Slika 69). *Measuring Principle* za presjek je *Actual Section*.



Slika 69 Konstruiranje presjeka

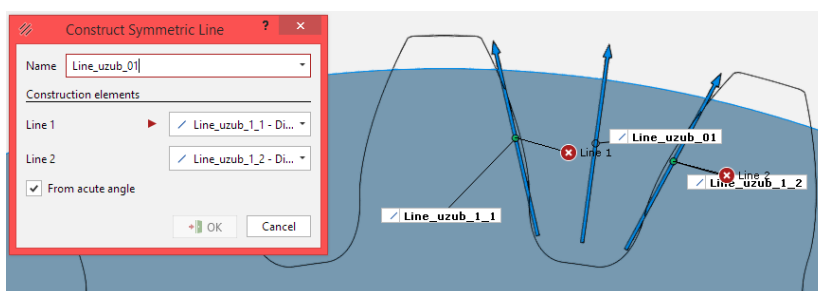
Na nastalom presjeku je konstruirana kružnica *Kružnica_provrt*. Kao *Measuring Principle* odabran je *Fitting Element*. Zatim su konstruirane diobena kružnica, a onda na isti način i temeljna kružnica te kružnica čiji je polumjer jednak udaljenosti središta zupčanika i središta kuglice. Konstruirane su funkcijom *Construct Point-Normal Circle*. Kao točka središta odabrano je središte kružnice *Kružnica_provrt*, a normala na kružnice je u smjeru osi *X*. Radijus diobene kružnice iznosi $r = 46$ mm, temeljne kružnice $r_b = 43,23$ mm, a promjer zadnje kružnice jednak je $r_{48,32} = l = 48,32$ mm. *Measuring Principle* je *Referenced Construction* budući da su to teoretske kružnice, odnosno ne postoje na presjeku zupčanika.

Kuglica se mora nalaziti na simetrali uzubine. Da bi se konstruirala simetrala prvo su konstruirane linije na presjeku boka profila. Linije su konstruirane funkcijom *Construct Auto Line (Nominal)* pri čemu je odabran dio presjeka (naredbom *Select/Deselect Through Surface*) koji se zatim aproksimira u liniju. *Measuring Principle* za linije je *No Measuring Principle* što znači da se na stvarnom zupčaniku ne kreiraju odgovarajuće linije.



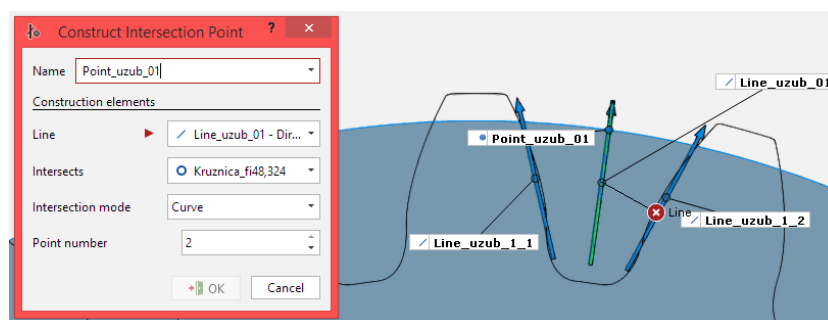
Slika 70 Konstruiranje linije na presjeku zuba

Između dvije tako konstruirane linije na jednoj uzubini se konstruira simetrala uzubine funkcijom *Construct Symmetric Line*. Za tu liniju *Measuring Principle* je *No Measuring Principle*.



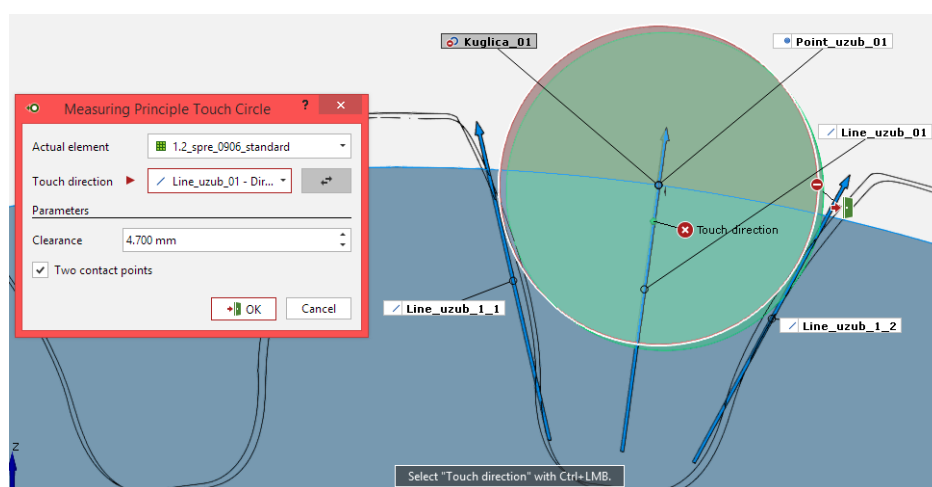
Slika 71 Konstruiranje simetrale uzubine

Na presjeku simetrale uzubine i kružnice polumjera $r_{48,32} = 48,32$ mm konstruirana je točka funkcijom *Construct Intersection Point*. *Measuring Principle* za tu točku je *Referenced Construction*.



Slika 72 Konstruiranje točke (središte kružnice)

Zatim je konstruirana kružnica koja predstavlja kuglicu promjera $d_k = 7,975$ mm funkcijom *Construct Point_Normal Circle* čije središte je kreirana točka, a normala na kružnicu je u smjeru osi X. Kao *Measuring Principle* je izabrana opcija *Touch Circle*. Nastala kružnica proizlazi iz nominalne kružnice koja dodiruje stvarni zupčanik u definiranom smjeru (linija simetrale). Izabrana je opcija da nastala kružnica ima dvije kontaktne točke sa stvarnim zupčanikom. *Clearance* predstavlja početnu udaljenost kružnice i stvarnog zupčanika od koje se kružnica „kreće“ (u zadanom smjeru) dok ne dodirne stvarni zupčanik. Na isti način konstruirane su kružnice na svim uzubinama.



Slika 73 Measuring Principle - Touch Circle

Nakon toga konstruirane su udaljenosti funkcijom *Construct 2-Point Distance* između središta konstruirane kružnice i kružnice provrta. *Measuring Principle* je *Referenced Construction*. Iznos udaljenosti je izračunat funkcijom *Check Distance*. U Tablica 24, Tablica 25 i Tablica 26 su vrijednosti odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3.

Tablica 24 Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$u_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.1,i}$, mm
1	-0,04	9	0,06	17	0,07
2	-0,06	10	0,11	18	0,08
3	-0,06	11	0,12	19	0,06
4	-0,03	12	0,08	20	0,01
5	-0,08	13	0,08	21	-0,01
6	-0,04	14	0	22	-0,04

7	0,02	15	0,02	23	-0,07
8	0,09	16	0,03		

Tablica 25 Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$u_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.2,i}$, mm
1	-0,14	9	-0,13	17	-0,14
2	-0,14	10	-0,13	18	-0,17
3	-0,12	11	-0,18	19	-0,22
4	-0,12	12	-0,18	20	-0,22
5	-0,11	13	-0,14	21	-0,17
6	-0,1	14	-0,13	22	-0,18
7	-0,16	15	-0,12	23	-0,17
8	-0,13	16	-0,12		

Tablica 26 Odstupanja širine uzubine – zupčanik Z1.3

Broj zuba	$u_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$u_{1.3,i}$, mm
1	-0,28	9	-0,23	17	-0,15
2	-0,51	10	-0,26	18	-0,16
3	-0,62	11	-0,02	19	-0,1
4	-0,55	12	-0,06	20	-0,21
5	-0,56	13	0,12	21	-0,12
6	-0,56	14	-0,11	22	-0,37
7	-0,41	15	-0,16	23	-0,32
8	-0,25	16	-0,2	-	-

Srednje vrijednosti odstupanja širine uzubine zupčanika iznose:

$$\bar{u}_{1.1} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z u_{1.1,i} = 0,02 \text{ mm}, \quad (6.25)$$

$$\bar{u}_{1.2} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z u_{1.2,i} = -0,15 \text{ mm}, \quad (6.26)$$

$$\bar{u}_{1.3} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z u_{1.3,i} = -0,26 \text{ mm}, \quad (6.27)$$

pri čemu je $\bar{u}_{1.1}$ srednja vrijednost odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.1, $\bar{u}_{1.2}$ je srednja vrijednost odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.2, $\bar{u}_{1.3}$ je srednja vrijednost odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.3, $u_{1.1,i}$ je vrijednost odstupanja širine uzubine između zuba i - $i+1$ zupčanika Z1.1, $u_{1.2,i}$ je vrijednost odstupanja širine uzubine između zuba i - $i+1$ zupčanika Z1.2, $u_{1.3,i}$ je vrijednost odstupanja širine uzubine između zuba i - $i+1$ zupčanika Z1.3.

Na temelju ovih rezultata je zaključeno kod kojeg zupčanika je srednja vrijednost širine uzubine manja, odnosno veća od nominalne vrijednosti. Kod zupčanika Z1.2 srednja vrijednost odstupanja širine uzubine je negativna što znači da je srednja vrijednost širine uzubine veća od nominalne vrijednosti. Srednja vrijednost odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.1 je pozitivna, odnosno srednja vrijednost širine uzubine je manja od nominalne vrijednosti.

Srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja pokazuju kod kojeg zupčanika su odstupanja veća:

$$\bar{u}_{a.1.1} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.1,i}| = 0,05 \text{ mm}, \quad (6.28)$$

$$\bar{u}_{a.1.2} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.2,i}| = 0,15 \text{ mm}, \quad (6.29)$$

$$\bar{u}_{a.1.3} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |u_{1.3,i}| = 0,28 \text{ mm}, \quad (6.30)$$

pri čemu je $\bar{u}_{a.1.1}$ srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.1, $\bar{u}_{a.1.2}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.2, $\bar{u}_{a.1.3}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja širine uzubine zupčanika Z1.3.

Standardna odstupanja mjerenja zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose:

$$m_{u,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{1.1,i} - \bar{u}_{1.1})^2}{n-1}} = 0,06 \text{ mm}, \quad (6.31)$$

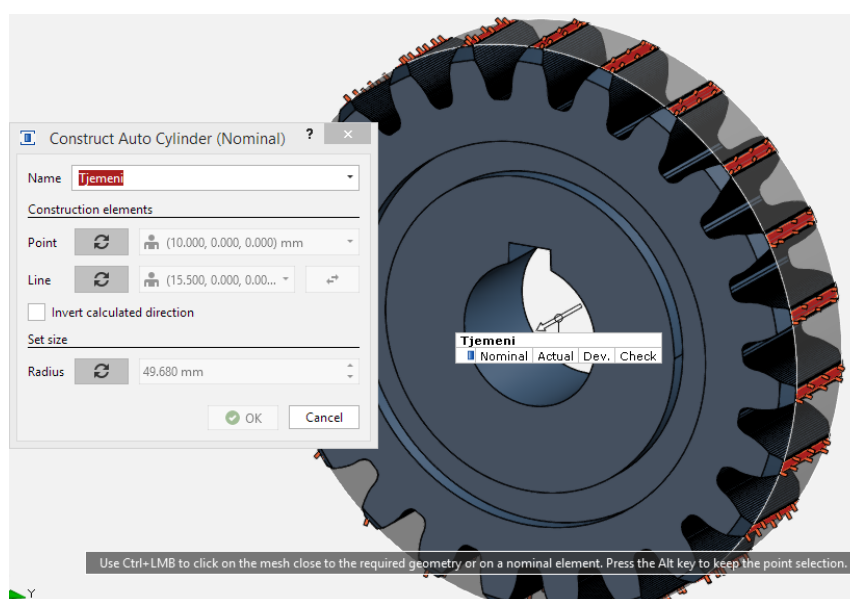
$$m_{u,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{1.2,i} - \bar{u}_{1.2})^2}{n-1}} = 0,03 \text{ mm}, \quad (6.32)$$

$$m_{u,1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{1.3,i} - \bar{u}_{1.3})^2}{n-1}} = 0,20 \text{ mm}, \quad (6.33)$$

pri čemu je $m_{u,1.1}$ standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.1, $m_{u,1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.2, $m_{u,1.3}$ je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.3. Najveća rasipanja od srednje vrijednosti se javlja kod zupčanika Z1.3, a najmanje kod zupčanika Z1.2.

6.7. Točnost vrtnje u radijalnom smjeru

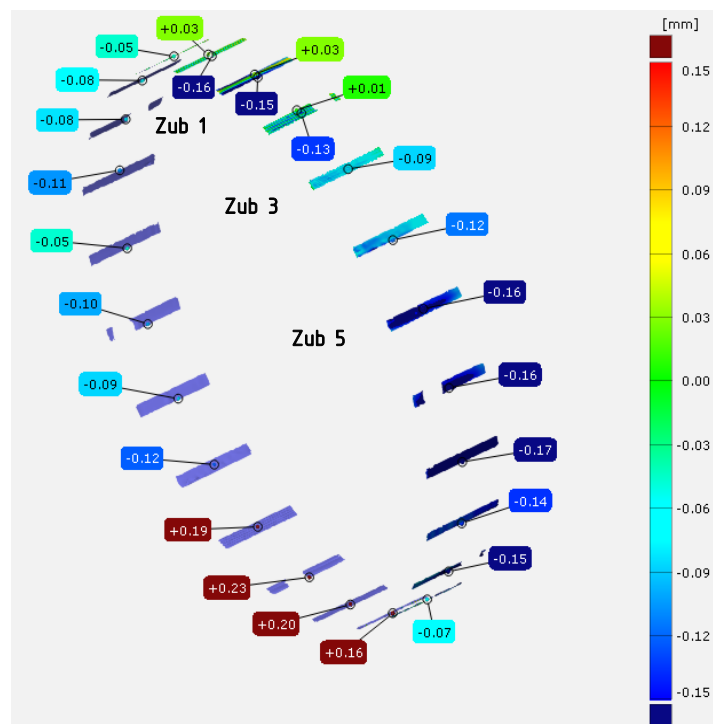
Točnost vrtnje u radijalnom smjeru provjerena je funkcijom *Check Total Run-Out* na tjemenu cilindra. Tjemeni cilindar konstruiran je funkcijom *Construct Auto Cylinder (Nominal)* (Slika 74). *Measuring Principle* je *Fitting Element*.



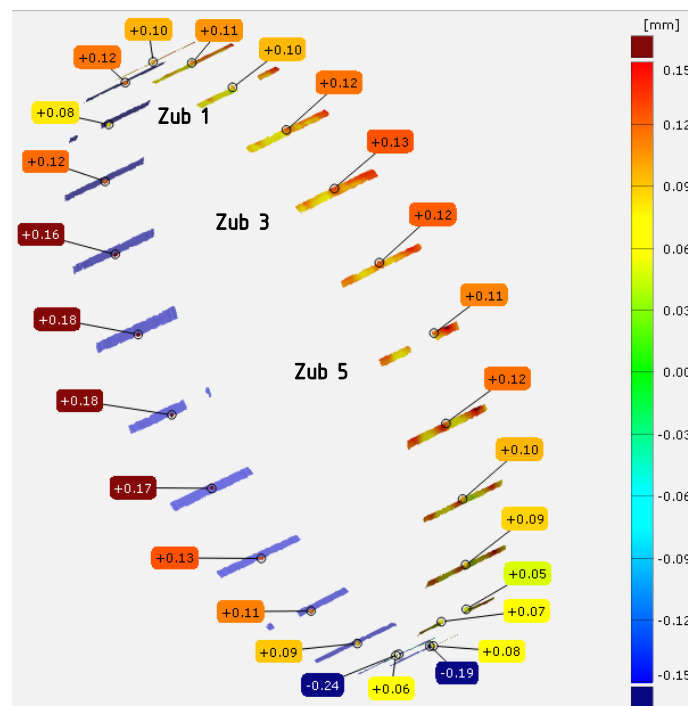
Slika 74 Konstruiranje tjemenuog cilindra

Funkcija *Check Total Run-Out* računa odstupanja ravnosti i kružnosti vrtnje. Program računa odstupanja na cijeloj površini (Slika 75 – Slika 78), dok su u Tablica 27, Tablica 28 i Tablica 29 navedena najveća odstupanja koja se javljaju na sredini zupčanika (kod zupčanika Z1.3 je mjereno na trećini debljine zupčanika od ravne strane) da bude mjereno na istim mjestima kao i komparatorom. U tablicu su unesene samo one vrijednosti koje bi komparator mogao izmjeriti pa tako na Slika 78 nije uzeto u obzir odstupanje -16 mm, nego +0,03 mm (zub 3, zupčanik Z1.1).

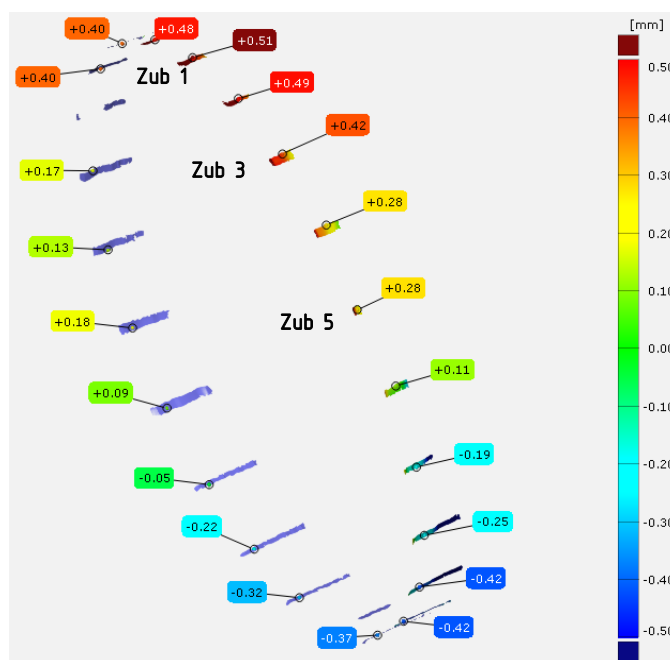
Na Slika 77 je vidljivo kako se vrijednosti odstupanja mijenjaju iz pozitivnih na jednoj strani zupčanika u negativne na drugoj strani zupčanika. Ovakvi rezultati mogu biti pokazatelj ekscentričnosti zupčanika Z1.3.



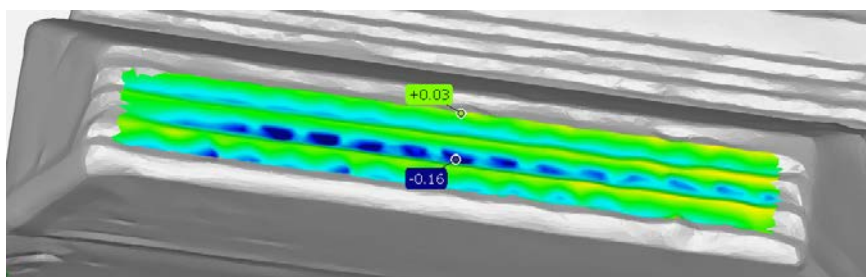
Slika 75 Odstupanja vrtnje u radialnom smjeru – zupčanik Z1.1



Slika 76 Odstupanja vrtnje u radialnom smjeru – zupčanik Z1.2



Slika 77 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.3



Slika 78 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru na zubu 3 (zupčanik Z1.1)

Tablica 27 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$r_{i,1.1}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.1}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.1}$, mm
1	-0,15	9	-0,15	17	-0,1
2	0,01	10	-0,07	18	-0,05
3	-0,09	11	0,16	19	-0,11
4	-0,12	12	0,2	20	-0,08
5	-0,16	13	0,23	21	-0,08
6	-0,16	14	0,19	22	0,01
7	-0,17	15	-0,12	23	0,03
8	-0,14	16	-0,09	-	-

Tablica 28 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$r_{i,1.2}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.2}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.2}$, mm
1	0,1	9	0,07	17	0,18
2	0,12	10	0,08	18	0,16
3	0,13	11	0,06	19	0,12
4	0,12	12	0,09	20	0,08
5	0,11	13	0,11	21	0,12
6	0,12	14	0,13	22	0,1
7	0,1	15	0,17	23	0,11
8	0,09	16	0,18	-	-

Tablica 29 Odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru – zupčanik Z1.3

Broj zuba	$r_{i,1.3}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.3}$, mm	Broj zuba	$r_{i,1.3}$, mm
1	0,51	9	-0,42	17	0,18
2	0,49	10	-0,42	18	0,13
3	0,42	11	-0,37	19	0,17
4	0,28	12	-	20	-
5	-	13	-0,32	21	0,4
6	0,11	14	-0,22	22	0,4
7	-0,19	15	-0,05	23	0,48
8	-0,25	16	0,09	-	-

Srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru $\bar{r}_{a,1.1}$, $\bar{r}_{a,1.2}$ i $\bar{r}_{a,1.3}$ za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose:

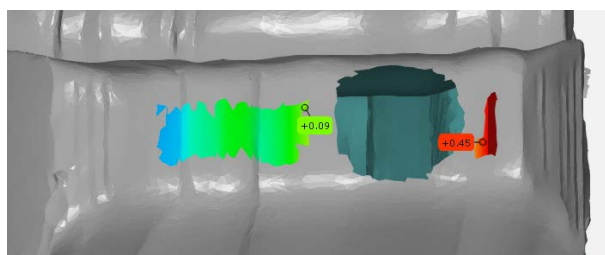
$$\bar{r}_{a,1.1} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |r_{i,1.1}| = 0,12 \text{ mm}, \quad (6.34)$$

$$\bar{r}_{a,1.2} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |r_{i,1.2}| = 0,12 \text{ mm}, \quad (6.35)$$

$$\bar{r}_{a_{1.3}} = \frac{1}{z'} \cdot \sum_{i=1}^{z'} |r_{i,1.3}| = 0,26 \text{ mm}, \quad (6.36)$$

pri čemu je $r_{i,1.1}$ vrijednost odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.1, $r_{i,1.2}$ je vrijednost odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.2, $r_{i,1.3}$ je vrijednost odstupanja vrtnje u radijalnom smjeru zuba i zupčanika Z1.3, $z' = 20$ je broj zubi na kojima su mjerena odstupanja na zupčaniku Z1.3.

Na obodu zupčanika postavljene su referentne točke te na tim mjestima nema rezultata. Na zubima (zupčanika Z1.1 i Z1.2) gdje se ta „rupa“ nalazi na sredini zupčanika (gdje su uzimane vrijednosti odstupanja) uzete su vrijednosti odstupanja pored „rupe“. No, na zupčaniku Z1.3 se oko rupe nalaze međusobno vrlo različiti rezultati (Slika 79) i upitno je koji od njih bi bio najbliži rezultatu na „rupi“ pa na tim zubima nisu uzete vrijednosti odstupanja (prazna mjesta u Tablica 29). Zato se pri računanju srednje vrijednosti i standardnog odstupanja koristi z' .



Slika 79 Odstupanja točnosti vrtnje u radijalnom smjeru na zubu 20 zupčanika Z1.3

Rezultati pokazuju da najveću srednju vrijednost odstupanja ima zupčanik Z1.3, dok zupčanici Z1.1 i Z1.2 imaju jednaku srednju vrijednost odstupanja. Najveće standardno odstupanje ponovno je kod zupčanika Z1.3, a najmanje kod zupčanika Z1.2. Standardna odstupanja $m_{rad,1.1}$, $m_{rad,1.2}$ i $m_{rad,1.3}$ iznose

$$m_{r1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{i,1.1} - \bar{r}_{1.1})^2}{n-1}} = 0,13 \text{ mm}, \quad (6.37)$$

$$m_{r1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{i,1.2} - \bar{r}_{1.2})^2}{n-1}} = 0,03 \text{ mm}, \quad (6.38)$$

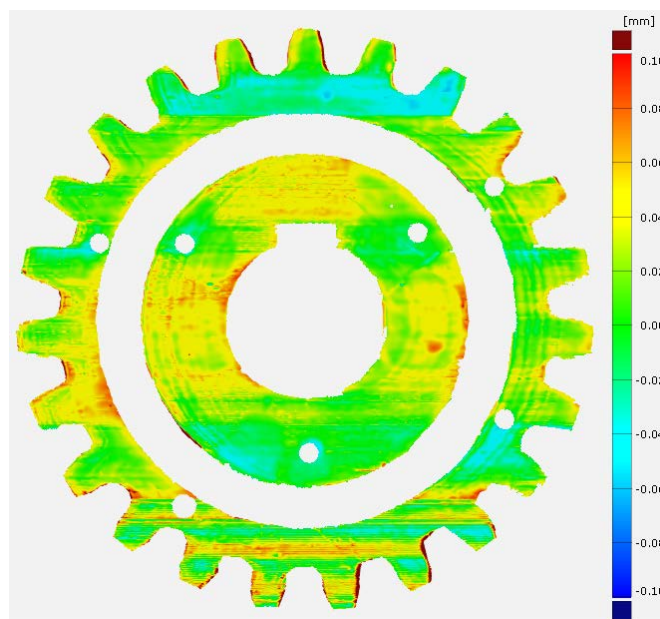
$$m_{r1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{i,1.3} - \bar{r}_{1.3})^2}{n-1}} = 0,33 \text{ mm}. \quad (6.39)$$

Uzmu li se u obzir vrijednosti na cijeloj površini oboda zuba tolerancije ravnosti i kružnosti vrtnje zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose $T_{rad,1.1} = 0,52 \text{ mm}$, $T_{rad,1.2} = 0,54 \text{ mm}$ i $T_{rad,1.3} = 1,70 \text{ mm}$.

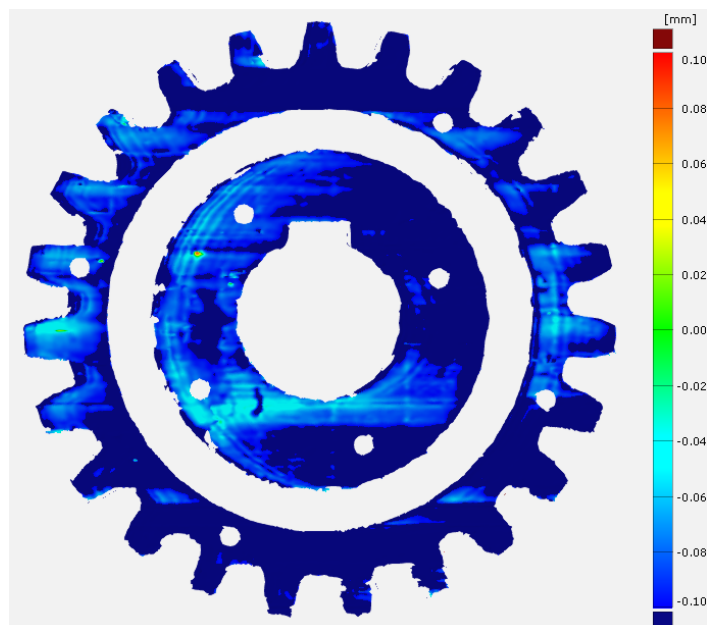
6.8. Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru

Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru provjerena je funkcijom *Check Total Run-Out* na bočnim ravinama zupčanika. Strana 1 zupčanika je strana na kojoj su napisani brojevi zubiju. Strana 2 je suprotna strana. Na zupčaniku Z1.3 odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru mjerena su samo na strani 1 („ravnoj“ strani) zupčanika. Konstruiranje bočnih ravnina opisano je u poglavlju 6.1.1.

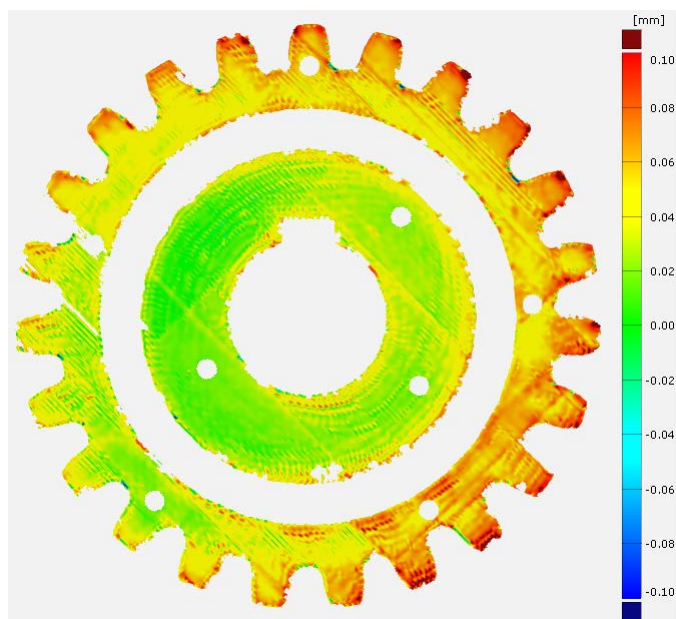
Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru dobivena su funkcijom *Check Total Run-Out*. Program računa odstupanja na cijeloj površini (Slika 80 – Slika 84). U Tablica 30 – Tablica 34 su najveća odstupanja mjerena na promjeru $\varnothing 91$ mm kao što je mjereno komparatorom.



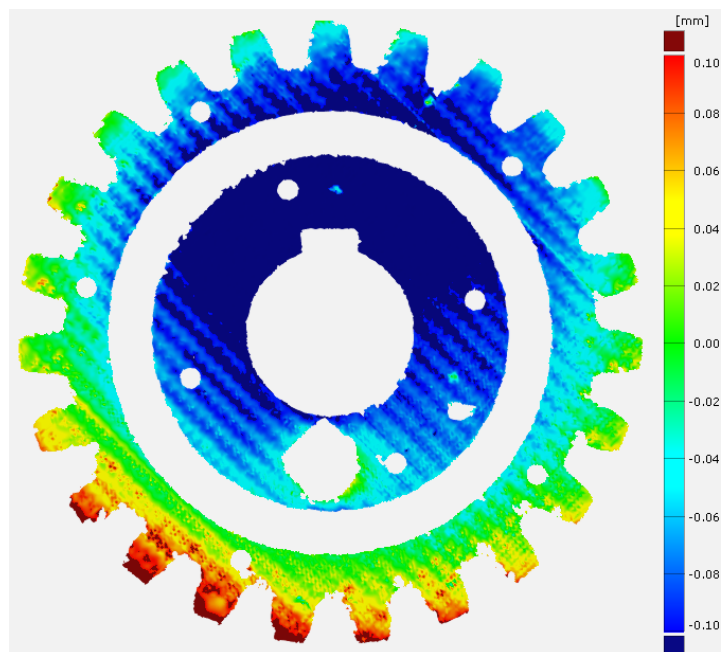
Slika 80 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.1



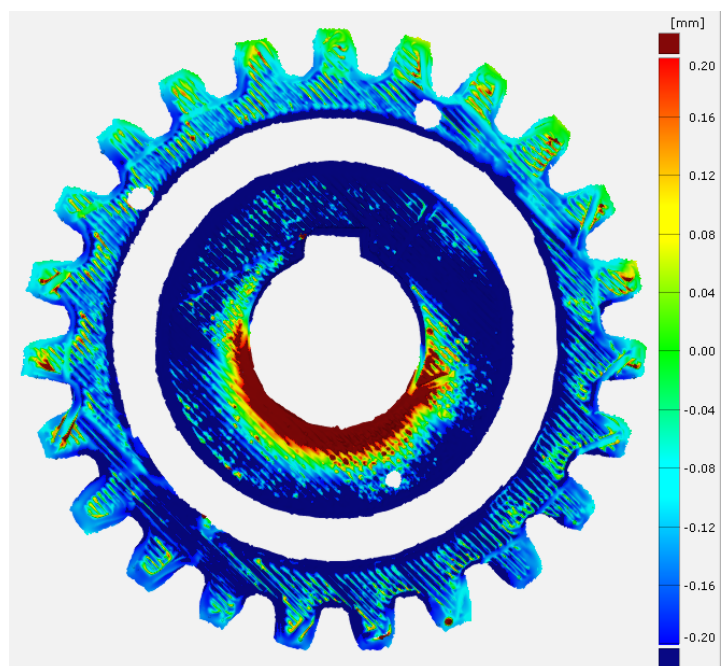
Slika 81 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.1



Slika 82 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.2



Slika 83 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.2



Slika 84 Prikaz odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na zupčaniku Z1.3

Tablica 30 Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.1

Broj zuba	$a_{i,1.1_1}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.1_1}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.1_1}$, mm
1	0,13	9	0,05	17	0,08
2	0,11	10	0,15	18	0,07
3	-0,06	11	0,14	19	0,05

4	0,07	12	0,17	20	0,05
5	0,07	13	0,11	21	0,06
6	0,04	14	0,12	22	0,10
7	0,05	15	0,07	23	0,13
8	-0,05	16	0,10		

Tablica 31 Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.1

Broj zuba	$a_{i,1.1_2}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.1_2}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.1_2}$, mm
1	-0,13	9	-0,14	17	-0,15
2	-0,13	10	-0,24	18	-0,12
3	-0,13	11	-0,15	19	-0,13
4	-0,11	12	-0,16	20	-0,16
5	-0,13	13	-0,17	21	-0,15
6	-0,11	14	-0,16	22	-0,17
7	-0,12	15	-0,18	23	-0,13
8	-0,05	16	-0,16		

Tablica 32 Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.2

Broj zuba	$a_{i,1.2_1}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.2_1}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.2_1}$, mm
1	0,10	9	0,09	17	0,06
2	0,08	10	0,11	18	0,07
3	0,09	11	0,11	19	0,09
4	0,09	12	0,09	20	0,09
5	0,09	13	0,08	21	0,08
6	0,07	14	0,07	22	0,08
7	0,10	15	0,06	23	0,12
8	0,08	16	0,05	-	-

Tablica 33 Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 2 zupčanika Z1.2

Broj zuba	$a_{i,1.2,2}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.2,2}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.2,2}$, mm
1	-0,07	9	0,10	17	0,04
2	-0,06	10	0,11	18	-0,02
3	-0,05	11	0,13	19	-0,03
4	-0,02	12	0,13	20	-0,05
5	0,04	13	0,11	21	-0,06
6	0,05	14	0,08	22	-0,06
7	0,04	15	0,06	23	-0,08
8	0,06	16	0,05	-	-

Tablica 34 Odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru zupčanika Z1.3

Broj zuba	$a_{i,1.3}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.3}$, mm	Broj zuba	$a_{i,1.3}$, mm
1	-0,10	9	-0,20	17	-0,16
2	0,11	10	-0,20	18	-0,13
3	-0,10	11	0,63	19	0,23
4	0,31	12	0,28	20	-0,15
5	0,27	13	-0,19	21	-0,15
6	0,33	14	-0,16	22	-0,13
7	0,24	15	-0,17	23	0,19
8	-0,19	16	-0,16		

Srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja vrtnje u aksijalnom smjeru za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose:

$$\bar{a}_{a1.1.1} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |a_{i,1.1.1}| = 0,09 \text{ mm}, \quad (6.40)$$

$$\bar{a}_{a1.1.2} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |a_{i,1.1.2}| = 0,14 \text{ mm}, \quad (6.41)$$

$$\bar{a}_{a1.2.1} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |a_{i,1.2.1}| = 0,08 \text{ mm}, \quad (6.42)$$

$$\bar{a}_{a1.2.2} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |a_{i,1.2.2}| = 0,07 \text{ mm}, \quad (6.43)$$

$$\bar{a}_{a1.3} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |a_{i,1.3}| = 0,21 \text{ mm}, \quad (6.44)$$

pri čemu su $\bar{a}_{a1.1.1}$ i $\bar{a}_{a1.1.2}$ srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja na strani 1, odnosno strani 2 zupčanika Z1.1, $\bar{a}_{a1.2.1}$ i $\bar{a}_{a1.2.2}$ su srednje vrijednosti apsolutnih odstupanja na strani 1, odnosno strani 2 zupčanika Z1.2, $\bar{a}_{a1.3}$ je srednja vrijednost apsolutnih odstupanja na bočnoj ravnini zupčanika Z1.3, $a_{i,1.1.1}$ i $a_{i,1.1.2}$ su vrijednosti odstupanja kod zuba i na strani 1, odnosno strani 2 zupčanika Z1.1, $a_{i,1.2.1}$ i $\bar{a}_{a1.2.2}$ su vrijednosti odstupanja kod zuba i na strani 1, odnosno strani 2 zupčanika Z1.2, $\bar{a}_{a1.3}$ je vrijednost odstupanja kod zuba i na zupčaniku Z1.3.

Kod zupčanika Z1.1 i Z1.2 strana 1 ima većinom pozitivne vrijednosti odstupanja, dok suprotna strana ima većinom negativne vrijednosti što može upućivati na aksijalno bacanje zupčanika (Slika 80 – Slika 83). Uzmemo li se u obzir vrijednosti na cijeloj površini bočne strane zupčanika tolerancije ravnosti i kružnosti vrtnje zupčanika Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose $T_{aks_1.1.1} = 0.55 \text{ mm}$, $T_{aks_1.1.2} = 0.61 \text{ mm}$, $T_{aks_1.2.1} = 0.29 \text{ mm}$, $T_{aks_1.2.2} = 0.39 \text{ mm}$ i $T_{aks_1.3} = 1,96 \text{ mm}$.

Standardna odstupanja mjerenja iznose

$$m_{a1.1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{i,1.1.1} - \bar{a}_{1.1.1})^2}{n-1}} = 0,06 \text{ mm}, \quad (6.45)$$

$$m_{a1.1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{i,1.1.2} - \bar{a}_{1.1.2})^2}{n-1}} = 0,03 \text{ mm}, \quad (6.46)$$

$$m_{a1.2.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{i,1.2.1} - \bar{a}_{1.2.1})^2}{n-1}} = 0,02 \text{ mm}, \quad (6.47)$$

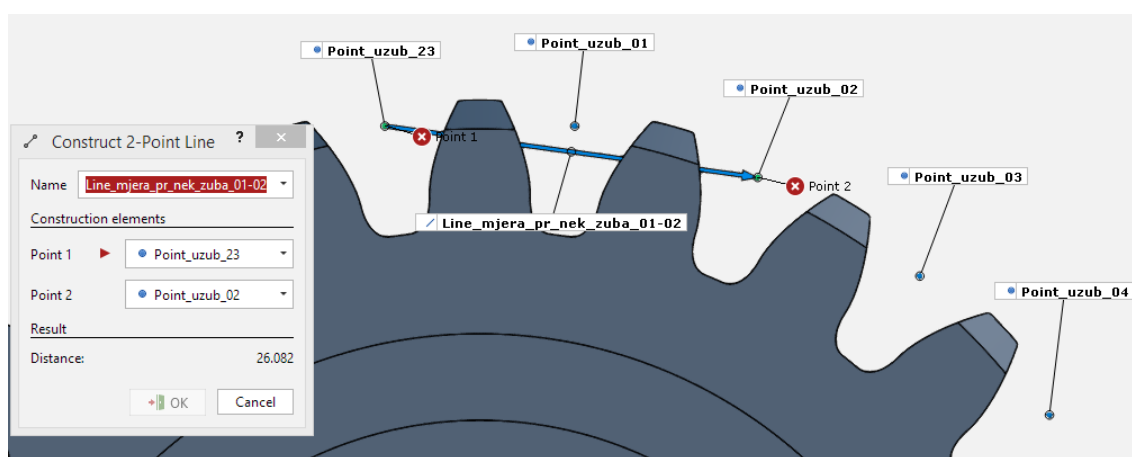
$$m_{a1.2.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{i,1.2.2} - \bar{a}_{1.2.2})^2}{n-1}} = 0,07 \text{ mm}, \quad (6.48)$$

$$m_{a1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{i,1.3} - \bar{a}_{1.3})^2}{n-1}} = 0,24 \text{ mm}. \quad (6.49)$$

pri čemu je $m_{a1.1.1}$ standardno odstupanje mjerenja na strani 1 zupčanika Z1.1, $m_{a1.1.2}$ je standardno odstupanje mjerenja na strani 2 zupčanika Z1.1, $m_{a1.2.1}$ je standardno odstupanje mjerenja na strani 1 zupčanika Z1.2, $m_{a1.2.2}$ je standardno odstupanje mjerenja na strani 2 zupčanika Z1.2, $m_{a1.3}$ je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.3. Standardna odstupanja mjerenja zupčanika Z1.1 i Z1.2 su približno jednaka, dok je standardno odstupanje mjerenja zupčanika Z1.3 najveće.

6.9. Mjera preko nekoliko zuba

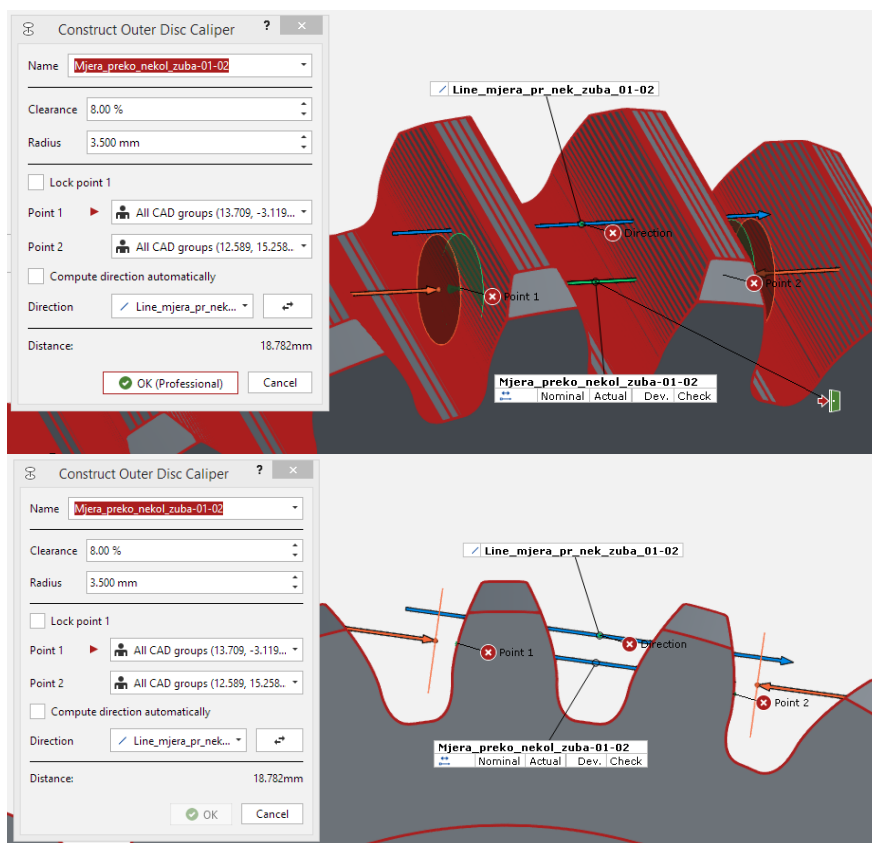
Mjera preko zuba (W) je udaljenost raznoimenih bokova preko određenog broja zuba (mjerni broj zuba), mjereno duž zajedničke okomice krajnjih obuhvaćenih bokova [26]. Tu okomicu u GOM Inspectu predstavlja linija između točaka koje su središte kuglica (mjerenje uzubine). Linija je konstruirana naredbom *Construct 2-Point Line* (Slika 85). *Measuring Principle* za liniju je *Referenced Construction*.



Slika 85 Konstruiranje zajedničke okomice krajnjih obuhvaćenih bokova

Mjera preko nekoliko zuba konstruirana je funkcijom *Construct Outer Disc Caliper*. Ova funkcija temelji se na principu pomičnog mjerila. Potrebno je odabrati dvije točke između kojih se mjeri udaljenost („izvana“). Izabire se bilo koja točka na svakom od bokova zubi između kojih se mjeri udaljenost i funkcijom *Select/Deselect Through Surface* odabire se područje na kojem se mjeri udaljenost. Sa središtem u nastalim točkama nastaju dva kruga koji dodiruju element (međusobno paralelni krugovi).

Clearance predstavlja početnu udaljenost između točaka i stvarnog zupčanika. Krugovi se „kreću“ u zadanom smjeru dok ne dotaknu stvarni element. Program konstruira dvije dodirne točke na mjestima gdje krugovi prvo dotaknu stvarni zupčanik te između njih mjeri stvarnu udaljenost. *Radius* je polumjer krugova.



Slika 86 Konstruiranje mjere preko nekoliko zuba

U Tablica 35, Tablica 36 i Tablica 37 su rezultati mjera preko nekoliko zuba za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3.

Tablica 35 Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.1

Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.1,i}$, mm
1-2	18,75	9-10	18,83	17-18	19,02
2-3	18,76	10-11	18,94	18-19	18,95
3-4	18,72	11-12	18,75	19-20	18,88
4-5	18,79	12-13	18,78	20-21	18,93
5-6	18,9	13-14	18,77	21-22	18,9
6-7	18,96	14-15	19,03	22-23	18,74
7-8	19,01	15-16	18,79	23-1	18,71
8-9	18,93	16-17	18,95		

Tablica 36 Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.2

Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.2,i}$, mm
1-2	18,74	9-10	18,74	17-18	18,74
2-3	18,73	10-11	18,81	18-19	18,68
3-4	18,75	11-12	18,79	19-20	18,69
4-5	18,77	12-13	18,78	20-21	18,73
5-6	18,77	13-14	18,76	21-22	18,75
6-7	18,71	14-15	18,76	22-23	18,76
7-8	18,76	15-16	18,77	23-1	18,77
8-9	18,74	16-17	18,76		

Tablica 37 Mjera preko nekoliko zuba – zupčanik Z1.3

Broj zuba	$W_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.3,i}$, mm	Broj zuba	$W_{1.3,i}$, mm
1-2	19,10	9-10	19,89	17-18	20,08
2-3	18,95	10-11	19,26	18-19	19,12
3-4	19,17	11-12	19,23	19-20	19,2
4-5	19,27	12-13	19,23	20-21	19,32
5-6	19,13	13-14	19,1	21-22	19,42
6-7	19,16	14-15	19,26	22-23	19,44
7-8	19,3	15-16	19,25	23-1	19,43
8-9	19,2	16-17	19,29		

Srednje vrijednosti mjere preko nekoliko zuba $\bar{W}_{1.1}$, $\bar{W}_{1.2}$ i $\bar{W}_{1.3}$ za zupčanike Z1.1, Z1.2 i Z1.3 iznose:

$$\bar{W}_{1.1} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |W_{1.1,i}| = 18,86 \text{ mm}, \quad (6.50)$$

$$\bar{W}_{1.2} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^Z |W_{1.2,i}| = 18,75 \text{ mm}, \quad (6.51)$$

$$\bar{W}_{1.3} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z |W_{1.3,i}| = 19,30 \text{ mm}, \quad (6.52)$$

pri čemu je $W_{1.1,i}$ vrijednost mjere preko zuba $i-i+1$ zupčanika Z1.1, $W_{1.2,i}$ je vrijednost mjere preko zuba $i-i+1$ zupčanika Z1.2, $W_{1.3,i}$ je vrijednost mjere preko zuba $i-i+1$ zupčanika Z1.3.

Nominalna vrijednost mjere preko zuba iznosi $W = 18,78$ mm. Najbliža nominalnoj vrijednosti je srednja vrijednost mjere preko zuba zupčanika Z1.2, dok srednja vrijednost zupčanika Z1.3 najviše odstupa od nominalne vrijednosti.

Standardna odstupanja $m_{w,1.1}$, $m_{w,1.2}$ i $m_{w,1.3}$ iznose

$$m_{w,1.1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{1.1,i} - \bar{W}_{1.1})^2}{n-1}} = 0,10 \text{ mm}, \quad (6.53)$$

$$m_{w,1.2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{1.2,i} - \bar{W}_{1.2})^2}{n-1}} = 0,03 \text{ mm}, \quad (6.54)$$

$$m_{w,1.3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{1.3,i} - \bar{W}_{1.3})^2}{n-1}} = 0,25 \text{ mm}. \quad (6.55)$$

Najviše rasipanja rezultata od srednje vrijednosti javlja se kod zupčanika Z1.3, a najmanje kod zupčanika Z1.2.

7. USPOREDBA REZULTATA DOBIVENIH KONTAKTNIM MJERENJEM I MJERENJEM U GOM INSPECTU

U ovom poglavlju je napravljena usporedba rezultata dobivenih kontaktnim mjerenjem i mjerenjem u GOM Inspectu. Kako bi se mogla napraviti usporedba svi rezultati odstupanja izmjereni u GOM Inspectu su relativizirani u odnosu na rezultat mjerenja na prvom zubu (boku zuba, uzubini) tako da relativni rezultat odstupanja neke veličine izmjerene u GOM Inspectu iznosi

$$x_i = x_{i_k} - x_{i_G}, \quad (7.1)$$

pri čemu je x_i relativna vrijednost odstupanja određene veličine na zubu (boku zuba, uzubini) i , x_{k_i} je relativna vrijednost odstupanja određene veličine dobivena kontaktnim mjerenjem na zubu (boku zuba, uzubini) i , x_{G_i} je relativna vrijednost odstupanja određene veličine dobivena mjerenjem u GOM Inspectu na zubu (boku zuba, uzubini) i .

U Tablica 38, Tablica 39 i Tablica 40 su rezultati relativnih odstupanja na zupčanicima Z1.1, Z1.2 i Z1.3 izračunati prema (7.1). Uspoređujući rezultate iz Tablica 38 - Tablica 40 i Tablica 7 - Tablica 9 zaključeno je kako nema približnog preklapanja rezultata (osim u slučaju točnosti vrtnje u aksijalnom smjeru na strani 1 zupčanika Z1.2, no premali je broj podataka da bi se donio zaključak). Postoji više razloga tome. Jedan od razloga nepoklapanja rezultata je moguće krivo napravljeno poravnanje u GOM Inspectu. Zatim, postoji mnogo čimbenika koji utječu na rezultate mjerenja i kod kontaktnih mjernih metoda i kod optičkih mjernih metoda (osobni utjecaj mjeritelja, različito uvjeti pri mjerenjima, ...). Sami uvjeti mjerenja kontaktnim mjernim uređajima i optičkim mjernim uređajem nisu bili jednaki pa zato niti ova usporedba ne može biti relevantni pokazatelj nečega.

Međutim, ono što se poklapa jest da su najveće srednje vrijednosti odstupanja i standardna odstupanja kod zupčanika Z1.3, a ako se uspoređuju zupčanici Z1.1 i Z1.2 tada je i kod jedne i druge metode najveće standardno odstupanje kod zupčanika Z1.1.

Tablica 38 Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.1

Zupčanik Z1.1 – relativne vrijednosti				
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm
1	0	0	0	0
2	0,16	-0,02	-	-
3	0,06	-0,02	-	-
4	0,03	0,01	-	-
5	-0,01	-0,04	-	-
6	-0,01	0	-	-
7	-0,02	0,06	-0,08	0,01
8	0,01	0,13	-	-
9	0	0,1	-	-
10	0,08	0,15	-	-
11	0,31	0,16	-	-
12	0,35	0,12	-	-
13	0,38	0,12	-0,02	-0,04
14	0,34	0,04	-	-
15	0,03	0,06	-	-
16	0,06	0,07	-	-
17	0,05	0,11	-	-
18	0,1	0,12	-	-
19	0,04	0,1	-0,08	0
20	0,07	0,05	-	-
21	0,07	0,03	-	-
22	0,16	0	-	-
23	0,18	-0,03	0	0

Tablica 39 Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.2

Zupčanik Z1.2 – relativne vrijednosti				
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm
1	0	0	0	0
2	0,02	0	-	-
3	0,03	0,02	-	-
4	0,02	0,02	-	-
5	0,01	0,03	-	-
6	0,02	0,04	-	-
7	0	-0,02	0	0,11
8	-0,01	0,01	-	-
9	-0,03	0,01	-	-
10	-0,02	0,01	-	-
11	-0,04	-0,04	-	-
12	-0,01	-0,04	-	-
13	0,01	0	-0,02	0,18
14	0,03	0,01	-	-
15	0,07	0,02	-	-
16	0,08	0,02	-	-
17	0,08	0	-	-
18	0,06	-0,03	-	-
19	0,02	-0,08	-0,01	0,04
20	-0,02	-0,08	-	-
21	0,02	-0,03	-	-
22	0	-0,04	-	-
23	0,01	-0,03	0	0

Tablica 40 Relativne vrijednosti odstupanja - zupčanik Z1.3

Zupčanik Z1.3 – relativne vrijednosti				
	Točnost vrtnje u radijalnom smjeru, mm	Uzubina, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 1, mm	Točnost vrtnje u aksijalnom smjeru strana 2, mm
1	0	0	0	-
2	-0,02	-0,23	-	-
3	-0,09	-0,34	-	-
4	-0,23	-0,27	-	-
5	-0,51	-0,28	-	-
6	-0,4	-0,28	-	-
7	-0,7	-0,13	0,34	-
8	-0,76	0,03	-	-
9	-0,93	0,05	-	-
10	-0,93	0,02	-	-
11	-0,88	0,26	-	-
12	-0,51	0,22	-	-
13	-0,83	0,4	-0,09	-
14	-0,73	0,17	-	-
15	-0,56	0,12	-	-
16	-0,42	0,08	-	-
17	-0,33	0,13	-	-
18	-0,38	0,12	-	-
19	-0,34	0,18	0,33	-
20	-0,51	0,07	-	-
21	-0,11	0,16	-	-
22	-0,11	-0,09	-	-
23	-0,03	-0,04	0	-

8. ZAKLJUČAK

U radu je provedena analiza utjecaja smjera dodavanja materijala na svojstva zupčanika s ravnim zubima izrađenim FDM aditivnom tehnologijom. Na početku rada je napravljen pregled literature na području aditivnih tehnologija. Zatim su izrađeni zupčanici. Težilo se izradi zupčanika različitim aditivnim tehnologijama, no zbog nepristupačnosti to nije ostvareno pa su svi zupčanici izrađeni FDM tehnologijom. Zupčanik Z1.1 je bio u okomitom položaju pri izradi, a zupčanici Z1.2 i Z1.3 su bili u vodoravnom. Materijal zupčanika Z1.1 i Z1.2 je *EasyFil™ ABS* (akrilonitril butadien stiren), a materijal zupčanika Z1.3 je *Longchain PA* (poliamid). Zupčanik od materijala *Longchain PA* nije bilo moguće izraditi u okomitom položaju.

Nakon izrade zupčanika provedeno je mjerenje kontaktnim mjernim uređajima, a zatim i optičkim mjernim uređajem ATOS Core 135. Na kraju je provedena analiza i usporedba rezultata mjerenja.

Mehanička ispitivanja i probni rad zupčanika nije bilo moguće provesti na vrijeme.

Na temelju rezultata mjerenja zaključuje se kako je optičkim mjernim uređajem ATOS Core 135 moguće dobiti veću količinu podataka nego mjerenjem kontaktnim mjernim uređajima (svedeno na jedinično mjerenje). Dok se jednim mjerenjem kontaktnim mjernim uređajem dobiva podatak u jednoj točki, optičkim mjernim uređajem je moguće dobiti rezultate za cijelu površinu. Osim što se optičkim mjernim uređajem ATOS Core 135 dobilo više podataka mjerenja neke veličine, u programu GOM Inspect mogle su se izmjeriti i neke veličine koje kontaktnim mjernim uređajima nije bilo moguće izmjeriti neposredno (lučna debljina zuba). Kontaktni mjerni uređaji su pogodni za jednostavnija mjerenja, ali porastom složenosti geometrije mjernog objekta rastu prednosti optičkih mjernih uređaja.

Rezultati mjerenja pokazuju da zupčanik Z1.3 ima najmanju dimenzijsku točnost. Srednje vrijednosti odstupanja mjerenih veličina i standardna odstupanja su najveća. To je u skladu s očekivanjima s obzirom na njegovu lošu izvedbu. Jedan od uzroka loše izvedbe zupčanika Z1.3 je primjena neodgovarajućeg materijala i neodgovarajućih parametara izrade (temperatura izrade).

Uspoređujući rezultate mjerenja zupčanika Z1.1 i Z1.2 tada su srednje vrijednosti odstupanja nekih veličina veće kod zupčanika Z1.1 (odstupanje koraka, odstupanje vrtnje u aksijalnom

smjeru, odstupanje mjere preko nekoliko zuba), neke srednje vrijednosti su veće kod zupčanika Z1.2 (odstupanje debljine zuba, odstupanje od evolvente, odstupanje širine uzubine), a neke srednje vrijednosti odstupanja su jednake kod zupčanika Z1.1 i Z1.2 (odstupanje uzdužne linije boka i odstupanje točnosti vrtnje u radijalnom smjeru).

Većina srednjih vrijednosti odstupanja je veća od 0,1 mm. Najmanja je srednja vrijednost odstupanja koraka ($\bar{p}_{a_{1.1}} = 0,03$ mm, $\bar{p}_{a_{1.2}} = 0,01$ mm, $\bar{p}_{a_{1.3}} = 0,08$ mm). Najveće vrijednosti odstupanja kod nekih veličina zupčanika Z1.3 prelaze i 1 mm.

Rezultati odstupanja debljine zuba pokazuju kako je kod svih zupčanika debljina zuba manja od nominalne što je posljedica skupljanja materijala. Ako se uspoređuju rezultati zupčanika Z1.1 i Z1.2 tada se najveće stezanje materijala odvijalo kod zupčanika Z1.2, a pri tome je standardno odstupanje najmanje. Na temelju nominalne i stvarne vrijednosti kod zupčanika Z1.2 moguće je izračunati faktor uvećanja za koji je potrebno uvećati dimenzije nominalnog modela kako bi dobili željene stvarne dimenzije. Taj faktor ovisi o materijalu i parametrima izrade te za zupčanik Z1.2 iznosi:

$$f_s = s_{\text{nom}} / (s_{\text{nom}} - \bar{s}_{1.2}) = 1,029 \text{ mm}, \quad (8.1)$$

pri čemu je f_s faktor uvećanja dimenzija zupčanika Z1.2, s_{nom} je nominalna debljina zuba i iznosi $s_{\text{nom}} = 6,05$ mm.

Razlike srednjih vrijednosti apsolutnih odstupanja od evolvente između zupčanika Z1.1 i Z1.2 nisu velike, kao ni razlike između vrijednosti standardnih odstupanja. Odstupanja od evolvente su na jednom boku zuba većinom pozitivna, dok su na drugom boku negativna. To može biti posljedica nepravilno definiranog poravnanja u Gom Inspectu.

Uspoređujući standardna odstupanja veličina tada su veća standardna odstupanja kod zupčanika Z1.1. To znači da se kod zupčanika Z1.1 javljaju veća rasipanja rezultata od srednjih vrijednosti (najveći ekstremi se kod svih veličina, osim odstupanja širine uzubine, javljaju u rezultatima zupčanika Z1.1) što zasigurno može biti posljedica položaja zupčanika pri izradi.

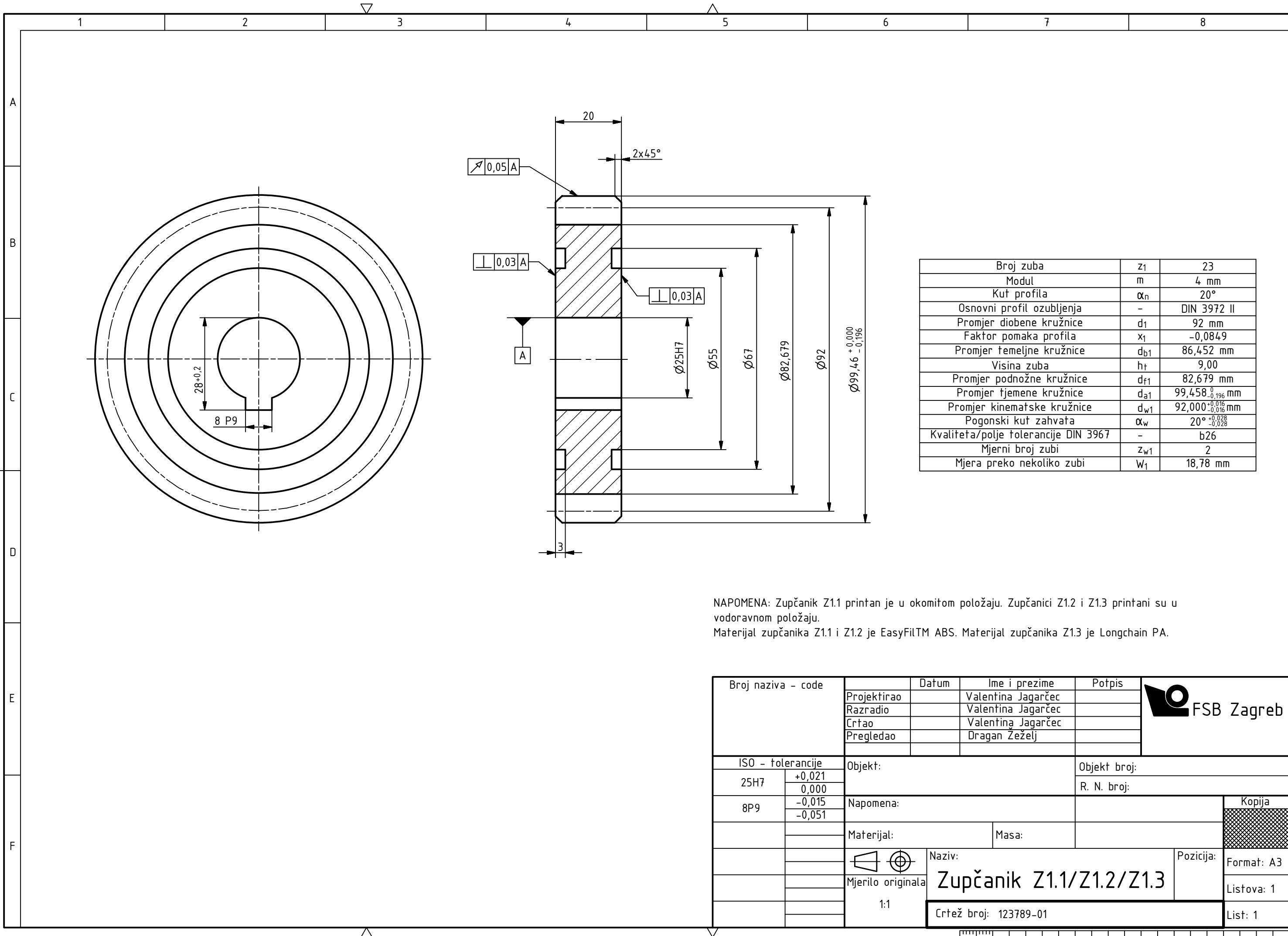
LITERATURA

- [1] <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>
- [2] Pilipović, A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [3] Domitran; Z.: Utjecaj odstupanja dimenzija na životni vijek polimernih zupčanika, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [4] Godec, D., Šercer, M.: Aditivna proizvodnja tvorevina, Zagreb, 2012.
- [5] <http://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69979>
- [6] <https://www.epiloglaser.com/resources/sample-club/trex-head-3d-model.htm>
- [7] <http://www.topomatika.hr/atos.html>
- [8] Drvar, N.: Usporedba metoda za određivanje oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija, magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [9] <https://i.ytimg.com/vi/751kz4SF7ME/maxresdefault.jpg>
- [10] Fudali, P.; Witkowski, W.; Wydrzyński, D.: Comparison of geometric precision of plastic components made by subtractive and additive methods, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 7, 2013., str. 36-40.
- [11] Stanek, M.; Manas, D.; Manas, M.; Navratil, J.; Kvas, K.; Senkerik, V.; Skrobak, A.: Comparison of Different Rapid Prototyping Methods, *International Journal of Mathematics and Computer in Simulation*, Vol. 6, 2012, str. 550-557.
- [12] Pilipović, A.; Raos, P.; Šercer, M.: Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, str. 105-115.
- [13] Szykiedans, K.; Credo, W.: Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints
- [14] <https://www.3dsystems.com/>
- [15] <https://formlabs.com/>
- [16] <https://zortrax.com/>
- [17] <http://www.voxeljet.com/>
- [18] <https://www.eos.info/en>
- [19] <http://www.stratasys.com/>
- [20] 3D Systems: 3D Printer Buyer's Guide For Professional and Production Applications

-
- [21] Zguris, Z.: How mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing, Formlabs White Paper
- [22] <http://treedfilaments.com/3d-printing-filaments/longchaine-polyamide/>
- [23] <https://static.webshopapp.com/shops/021593/files/045088842/tds-easyfil-abs.pdf>
- [24] Časopis Vidi; br. 213 / 2013; str. 42-25; piše: Nenad Drvar; Digitalizacija opipljivog
- [25] http://www.stratasys.com/resources/webinars/~/_media/8EF4EB2B9409429A8979F5EB35327665.ashx
- [26] Oberšmit, E., Ozubljenja i zupčanici, Zagreb 1982

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija



Broj zuba	z_1	23
Modul	m	4 mm
Kut profila	α_n	20°
Osnovni profil ozubljenja	-	DIN 3972 II
Promjer diobene kružnice	d_1	92 mm
Faktor pomaka profila	x_1	-0,0849
Promjer temeljne kružnice	d_{b1}	86,452 mm
Visina zuba	h_t	9,00
Promjer podnožne kružnice	d_{f1}	82,679 mm
Promjer tjemene kružnice	d_{a1}	99,458 ⁰ _{-0,196} mm
Promjer kinematske kružnice	d_{w1}	92,000 ⁰ _{-0,016} mm
Pogonski kut zahvata	α_w	20° ⁰ _{-0,028}
Kvaliteta/polje tolerancije DIN 3967	-	b26
Mjerni broj zubi	z_{w1}	2
Mjera preko nekoliko zubi	W_1	18,78 mm

NAPOMENA: Zupčanik Z1.1 printan je u okomitom položaju. Zupčanici Z1.2 i Z1.3 printani su u vodoravnom položaju.
Materijal zupčanika Z1.1 i Z1.2 je EasyFILTM ABS. Materijal zupčanika Z1.3 je Longchain PA.

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Valentina Jagarčec		
	Crtao		Valentina Jagarčec		
	Pregledao		Dragan Žeželj		
ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:		<div style="background-color: #cccccc; width: 20px; height: 20px; display: inline-block;"></div>
25H7	+0,021 0,000		R. N. broj:		
8P9	-0,015 -0,051		Napomena:		
		Materijal:	Masa:		
			Naziv:	Pozicija:	<div style="background-color: #cccccc; width: 20px; height: 20px; display: inline-block;"></div>
		Mjerilo originala 1:1	Zupčanik Z1.1/Z1.2/Z1.3		
			Crtež broj: 123789-01		Listova: 1
					List: 1

