

**SHAKLDOR YUZALARGA LAZERLI SO'NGI ISHLOV BERISHDA  
EKSPERIMENTAL TADQIQOT REJASINI ISHLAB CHIQISH  
DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL RESEARCH PLAN FOR FINISH  
LASER PROCESSING OF SHAPED SURFACES**

**Tursunov Shovkat Talibovich**

*Farg'ona davlat texnika universiteti Mexanika-mashinasozlik fakulteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasida texnika fanlari falsafa doktori, dotsent.*

**Alijonov Qobiljon Qodirali o'g'li**

*Farg'ona davlat texnika universiteti Mexanika-mashinasozlik fakulteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasida tayanch doktoranti*

**Abstract: Background:** Shaped-surface components (turbine blades, orthopaedic implants, optical lenses) demand surface roughness  $Ra \leq 0.1 - 0.4 \mu\text{m}$  and geometric accuracy  $\pm 0.002 - 0.01 \text{ mm}$ . Existing literature lacks an optimised multi-parameter model for 5-axis finish laser machining on the KF301 5LN centre.

**Objective:** To develop a scientifically grounded experimental research plan for finish laser machining of shaped surfaces and to define the statistical methodology for parameter optimisation.

**Methods:** Taguchi L27 orthogonal array (27 runs per material  $\times$  3 materials  $\times$  3 surface types = 243 runs, 486 with replicates); ANOVA for factor significance; Response Surface Methodology (RSM) with OLS regression; Signal-to-Noise ratio analysis (Smaller-the-Better); Minitab 21 software.

**Expected results:**  $Ra \leq 0.10 \mu\text{m}$  and  $HAZ \leq 6 \mu\text{m}$  for VT6 titanium (ISO 10993);  $R^2 \geq 0.95$  empirical model; geometric error  $\pm 0.003 \text{ mm}$  for 5-axis normal orientation.

**Keywords:** laser machining, shaped surfaces, KF301 5LN, Taguchi L27, ANOVA, RSM, surface roughness  $Ra$ , HAZ, experimental design, titanium alloy.

## 1. KIRISH / INTRODUCTION

Turbina lapallari, ortopedik implantlar, optik linzalar va qoliplar kabi yuqori talabli detallar  $Ra = 0,05 - 0,4 \text{ mkm}$  g'adir-budurlik va  $\pm 0,002 - 0,01 \text{ mm}$  geometrik aniqlikka ega bo'lishi lozim. Lazerli ablatsiya texnologiyasi — ayniqsa nanosekund impulsli rejimda — an'anaviy abraziv va elektr-erozion usullarning munosib muqobiliga aylanmoqda: HAZ minimallasadi, kontaktsiz ta'sir ta'minlanadi va murakkab geometriya boshqariladi.

Muammoning dolzarbligi: KF301 5LN 5-o'qli lazerli stanoq uchun shakldor yuzalarga moslashtirilgan optimallashtirilgan parametrlar majmuasi ilmiy adabiyotlarda hali to'liq taqdim etilmagan. Mazkur tezis ushbu bo'shliqni to'ldiruvchi eksperimental tadqiqot rejasini bayon etadi.

## 2. TADQIQOT OB'EKTI / RESEARCH OBJECT

Tadqiqot KF301 5LN 5-o'qli CNC lazerli stanoqda uch tipli shakldor yuzali namunalarda olib boriladi:

- **1-tip** — **Toroidli yuza:** Tashqi  $R = 50$  mm, ichki  $r = 10$  mm; qolipsozlikda tipik shakl.
- **2-tip** — **S-shakldagi yuza:** Ikki yoʻnalishda qarama-qarshi egrilik; turbina lapasi modeli.
- **3-tip** — **NURBS erkin shakldor yuza:** Ortopedik implant modeli; murakkab geometriya.

Har bir tip uchun uchta material sinovdan oʻtkaziladi: R6M5 tez kesuvchi poʻlat, VK8 qattiq qotishma (WC-Co) va VT6 titan qotishmasi (Ti-6Al-4V). Barcha namunalar lazerli ishlov berishdan oldin abraziv silliqlash bilan dastlabki  $Ra = 1,2-1,6$  mkm darajasida tayyorlanadi.

### 3. EKSPERIMENTAL METODOLOGIYA / METHODOLOGY

#### 3.1. Taguchi L27 ortogonal massivi

Beshta mustaqil omil va ularning uch darajasi asosida L27 ortogonal massivi qoʻllaniladi — minimal tajribalar soni (27/material) bilan maksimal maʼlumot olinadi. Har bir material uchun 27 ta sinov, jami:  $27 \times 3$  material  $\times$  3 yuza tipi = 243 sinov; takrorlanish bilan 486 oʻlchash.

Omil (parametr)	Belgi	1-daraja (past)	2-daraja (oʻrta)	3-daraja (yuqori)	Birlik
Lazer quvvati	P	30	55	80	Vt
Skanerlash tezligi	v	2000	4000	7000	mm/min
Impuls chastotasi	f	50	100	150	kHz
Fokus diametri	d	50	100	180	mkm
Qator ozi	$\eta$	20	40	60	%

1-jadval. Taguchi L27 rejasi uchun omillar va darajalari (5 omil  $\times$  3 daraja)

#### 3.2. Chiqish parametrlari (javob oʻzgaruvchilari)

Har bir tajribada toʻrtta oʻlcham qayd etiladi:

- ▶ **Ra (mkm):** Arifmetik oʻrtacha gʻadir-budurlik — Mitutoyo SJ-210 profilomer ( $\pm 0,001$  mkm), 5 nuqta/namuna.
- ▶ **Rz (mkm):** Oʻnta nuqta oʻrtacha gʻadir-budurligi — bir vaqtda Ra bilan oʻlchanadi.
- ▶  **$\Delta$  (mm):** Geometrik oʻlchov xatosi — Renishaw Revo-2 CMM ( $\pm 0,0005$  mm), 50 nuqta/namuna.
- ▶ **HAZ (mkm):** Issiqlik taʼsir zonasi chuqurligi — Zeiss Axio Observer mikroskopi (50–1000 $\times$ ) va XPS spektrometri.

Standart sinov sharoiti: muhit harorati  $20 \pm 1$  °C, nisbiy namlik  $50 \pm 5\%$ . Himoya gazi materialga qarab: R6M5 — N<sub>2</sub> (3 bar), VK8 — He (4 bar), VT6 — Ar (5 bar).

#### 3.3. Statistik tahlil usullari

ANOVA (dispersiya tahlili): har bir omilning Ra ga taʼsir ulushini ( $\eta^2$ , %) va statistik ahamiyatlilikini (F-statistika,  $p < 0,05$ ) aniqlaydi. RSM (Response Surface Methodology) ikkinchi tartibli polinom model quradi:

$$Ra = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (R^2 \geq 0,95 \text{ talab etiladi})$$

Signal-shovqun (S/N) nisbati «kichikroq — yaxshiroq» (Smaller-the-Better) printsipli bo'yicha:  $S/N = -10 \cdot \log_{10}(\sum y_i^2/n)$ . Barcha hisob-kitoblar Minitab 21 dasturida amalga oshiriladi.

#### 4. USKUNALAR VA O'LCHOV TIZIMLARI / EQUIPMENT

Uskuna nomi	Model	Metrologik xarakteristika
Lazerli ishlov berish markazi	KF301 5LN (5-o'qli CNC)	150 Vt, kontur aniqligi $\pm 0,002$ mm
Kontaktli profilomer	Mitutoyo SJ-210	Ra $\pm 0,001$ mkm, l = 4 mm
Koordinatali o'lchash mashinasi	Renishaw Revo-2 CMM	$\pm 0,0005$ mm
Optik mikroskop	Zeiss Axio Observer	50–1000 $\times$ , 1 mkm aniqlik
XPS spektrometr	Thermo K-Alpha	HAZ chuqurligi 1–50 mkm
Statistik dastur	Minitab 21	ANOVA, RSM, R <sup>2</sup> nazorat

2-jadval. Eksperimentda qo'llaniladigan asosiy uskunalar va metrologik xarakteristikalar

#### 5. ILMIY GIPOTEZALAR / RESEARCH HYPOTHESES

Adabiyotlar tahlili va dastlabki sinovlar asosida beshta tekshiriladigan gipoteza ilgari suriladi:

N <sup>o</sup>	Gipoteza mazmuni	Tekshiruv mezonlari
H <sub>1</sub>	P va v birgalikda Ra ga $\geq 60\%$ ta'sir qiladi	ANOVA: $\eta^2(P) + \eta^2(v) \geq 60\%$
H <sub>2</sub>	$\eta = 40-50\%$ da Ra minimum qiymatga erishadi	RSM kontur grafigi
H <sub>3</sub>	VT6 da Ra $\leq 0,10$ mkm va HAZ $\leq 6$ mkm (ISO 10993)	Profilomer + XPS o'lchov
H <sub>4</sub>	Dinamik fokuslashtirish Ra ni 30–40% kamaytiradi	Statik/dinamik taqqoslash
H <sub>5</sub>	5 o'qli normal yo'naltirish $\Delta \leq \pm 0,003$ mm ta'minlaydi	CMM o'lchovi (50 nuqta)

3-jadval. Tekshiriladigan ilmiy gipotezalar va ularning baholash mezonlari

#### 6. MUQOBIL USULLAR BILAN QIYOSIY TAHLIL/ COMPARATIVE ANALYSIS

Mezon	Abrziv silliqdash	EDM	KF301 5LN (lazer)*	Standart talab
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,25–0,40	0,10–1,60	<b>0,09–0,18</b>	$\leq 0,20$
Geom. aniqlik (mm)	$\pm 0,008$	$\pm 0,010$	<b><math>\pm 0,002-0,004</math></b>	$\pm 0,005$
HAZ chuqurligi ( $\mu\text{m}$ )	15–40	20–50	<b>3–12</b>	$\leq 15$
Ishlov berish vaqti (daq)	45–60	60–90	<b>18–25</b>	—

4-jadval. Ishlov berish usullari qiyosiy tahlili (\* — kutilayotgan qiymatlar)

**7. XULOSA / CONCLUSION**

Ushbu tezisda KF301 5LN 5-o‘qli CNC lazerli stanoqda shakldor yuzalarga so‘nggi ishlov berishning ilmiy asoslangan eksperimental tadqiqot rejasi taqdim etildi. Asosiy natijalar:

1. Taguchi L27 ortogonal massivi (486 o‘lchash) 5 ta parametr ta'sirini minimal tajribalar soni bilan bir vaqtda aniqlash imkonini beradi — bu klassik to‘liq faktorial rejaga nisbatan 81 marta samarali.
2. ANOVA + RSM + S/N metodologiyasi kombinatsiyasi  $R^2 \geq 0,95$  aniqlikdagi empirik model va parametrlar optimallashtirish xaritasini shakllantiradi.
3. Beshta ilmiy gipoteza ( $H_1-H_5$ ) aniq miqdoriy mezonlar bilan belgilanib, eksperimental tasdiqlashga tayyor holatda taqdim etildi.
4. VT6 titan qotishmasida  $Ra \leq 0,10$  mkm va  $HAZ \leq 6$  mkm erishish prognozi ISO 10993 tibbiy implantlar standartini qondiradi — bu O‘zbekiston sanoati uchun yangi ilmiy-texnik yo‘nalish.
5. Ishlab chiqilgan eksperimental reja R6M5, VK8 va VT6 uchun optimal parametrlar jadvalini shakllantiradi va Farg‘ona viloyati sanoat korxonalarida bevosita qo‘llanilishi mumkin.

**ADABIYOTLAR / REFERENCES**

1. Davim J.P. (Ed.) Surface Integrity in Machining. London: Springer, 2010.
2. Sugioka K., Cheng Y. Ultrafast Laser Processing: From Micro to Nanoscale. Pan Stanford, 2013.
3. Walter C., Kuster F., Wegener K. Laser polishing of metal surfaces: A review // CIRP Annals. 2019. Vol. 68(2). P. 783–806.
4. Teixidor D., Ciurana J., Rodriguez C.A. Nanosecond pulsed laser machining of hardened steel // J. Mater. Process. Tech. 2015. Vol. 209. P. 2839–2847.
5. Ross P.J. Taguchi Techniques for Quality Engineering. 2nd ed. McGraw-Hill, 1996.
6. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 8th ed. Wiley, 2013.
7. Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. Response Surface Methodology. 4th ed. Wiley, 2016.
8. Derringer G., Suich R. Simultaneous optimization of several response variables // J. Quality Technology. 1980. Vol. 12(4). P. 214–219.