SHAKLDOR YUZALARGA SO‘NGI LAZERLI ISHLOV BERISH TEXNOLOGIK JARAYONLARINI TAKOMILLASHTIRISH: MATEMATIK MODEL VA DASTURIY TA'MINOT

IMPROVING TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FINAL LASER PROCESSING OF SHAPED SURFACES: MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE

Tursunov Shovkat Talibovich
Farg‘ona davlat texnika universiteti Mexanika-mashinasozlik fakulteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasi texnika fanlari falsafa doktori, dotsent.
Alijonov Qobiljon Qodirali o‘g‘li
Farg‘ona davlat texnika universiteti Mexanika-mashinasozlik fakulteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasi tayanch doktoranti
+998 91 886 70 60

Abstract: ***Purpose:*** *To develop a mathematical model and software for optimising the technological parameters of finish laser machining of shaped surfaces on the KF301 5LN multi-axis laser machine tool, and to validate the approach experimentally.*

Methods: *Response Surface Methodology (RSM) combined with Taguchi L27 orthogonal array (81 experiments across R6M5, VK8, and VT6 materials); ANOVA for factor significance; Nelder-Mead optimisation; CMM and profilometer metrology.*

Key results: *R^2 = 0.973 empirical model; surface roughness reduced by 88–93% (Ra = 0.09–0.18 μm); geometric error ±0.002–0.004 mm; HAZ depth 3–12 μm; annual cost reduction ~32%.*

Keywords: *laser machining, shaped surfaces, KF301 5LN, RSM, surface roughness Ra, ANOVA, CAD/CAM integration, Taguchi L27, software optimisation.*

1. KIRISH / INTRODUCTION

Zamonaviy mashinasozlikda turbina lapalari, ortopedik implantlar va optik linzalar kabi murakkab shakldor detallar yuzasiga Ra = 0,05–0,4 mkm aniqlikda so‘nggi ishlov berish talab etiladi. Mavjud texnologik echimlar uchta asosiy muammoni hal etmagan: (1) KF301 5LN uchun dinamik fokuslashtirish sharoitida 5 o‘qli lazerli ishlov berishning to‘liq matematik modeli yo‘q; (2) VK8 va VT6 uchun optimal skanerlash strategiyalari aniqlanmagan; (3) ishlab chiqarishga integratsiyalashgan dasturiy ta'minot mavjud emas. Ushbu tezis mazkur uchta bo‘shliqni to‘ldiradi.

2. METODOLOGIYA / METHODOLOGY

2.1. RSM asosidagi matematik model

Yuzaning g‘adir-budurligi Ra uchun ikkinchi tartibli empirik model quruldi:

$$Ra = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 v + \beta_3 f + \beta_4 \eta + \beta_{12} Pv + \beta_{13} Pf + \beta_{14} P\eta + \varepsilon$$

Bu yerda P — lazer quvvati (Vt), v — skanerlash tezligi (mm/min), f — impuls chastotasi (kHz), η — qator ozi (%), ε — o‘lchash xatosi. Koeffitsientlar OLS usuli bilan 81 ta eksperimental sinov asosida aniqlanadi. Modelning qabul qilinish mezoni: $R^2 > 0,95$, $p < 0,05$.

2.2. Taguchi L27 eksperimental rejasi

Har bir material uchun 27 ta sinov (jami 81 ta) Taguchi L27 ortogonal matritsasi bo‘yicha rejalashtirildi. Uch turdagi shakldor yuzali namunalar: toroidli (R = 50 mm), S-shakldagi (turbina lapasi modeli) va NURBS-tavsifidagi erkin shakldor (ortopedik implant modeli). O‘lchash asboblari: Mitutoyo SJ-210 profilomer (±0,001 mkm), Renishaw Revo-2 CMM (±0,0005 mm).

2.3. Dasturiy ta'minot arxitekturasi

Python 3.11 tilida ishlab chiqilgan tizim to‘rtta moduldan iborat: (1) CAD/CAM integratsiya — 3D-modeldan normal vektorlar matritsasi, G-kod avtomatik generatsiyasi (Hypermill/PowerMILL interfeysi); (2) RSM-optimizatsiya — ANOVA, OLS, Nelder-Mead; (3) Sifat nazorat — CMM natijalarini ISO 1302 bilan solishtirish; (4) Ma'lumotlar bazasi — SQLite arxivi, ML dataset. KF301 5LN (FANUC 0i-MD) bilan RS-232 orqali real vaqt bog‘lanishi ta'minlangan.

3. ASOSIY NATIJALAR / RESULTS

3.1. ANOVA tahlili — ta'sir omillari

R6M5 po‘lati uchun ANOVA tahlili natijalari ($R^2 = 0,973$):

Parametr	F-qiymati	p-qiymati	Ta'sir ulushi (%)
Lazer quvvati (P)	142,3	< 0,001	**38,2**
Skanerlash tezligi (v)	98,7	< 0,001	26,5
Qator ozi (η)	76,4	< 0,001	20,5
Impuls chastotasi (f)	34,1	0,002	9,1
Fokus diametri (d)	21,8	0,008	5,8
Xato	—	—	< 1,0

1-jadval. R6M5 po‘lat uchun ANOVA natijalari (Ra parametri bo‘yicha, $R^2 = 0,973$)

3.2. G‘adir-budurlik va geometrik aniqlik

5 o‘qli boshqaruv va dinamik fokuslashtirish qo‘llanilganda erishilgan yakuniy natijalar:

Material	Ra boshl. (µm)	Ra yakuniy (µm)	Geom. xato (mm)	HAZ (µm)	Kamayish (%)
R6M5 po‘lat	1,4	**0,12**	±0,003	8–12	**91,4**
VK8 qotishma	1,6	**0,18**	±0,004	5–8	**88,8**
VT6 (Ti-6Al-4V)	1,3	**0,09**	±0,002	3–6	**93,1**

2-jadval. Lazerli so‘nggi ishlov berish yakuniy natijalari (KF301 5LN, 5 o‘qli rejim)

3.3. Optimal texnologik parametrlar

Material	P (Vt)	v (mm/min)	f (kHz)	η (%)	Gaz
R6M5 po‘lat	55–65	3500–4000	80–100	45–50	N_2, 3 bar
VK8 qotishma	40–50	4000–5000	100–120	40–45	He, 4 bar
VT6 titan	35–45	4500–5500	120–150	40–50	Ar, 5 bar

3-jadval. Turli materiallar uchun optimal lazerli ishlov berish parametrlari

4. MUHOKAMA / DISCUSSION

Titan qotishmasida (VT6) erishilgan Ra = 0,09 mkm ISO 1302 standartining N4 sinfiga to‘g‘ri keladi va tibbiy implantlar uchun xalqaro Ra < 0,1 mkm talabini qondiradi. HAZ chuqurligi 3–6 mkm — abraziv silliqlash bilan solishtirganda 4–5 baravar kichik. Lazer quvvati (38,2%) va skanerlash tezligi (26,5%) birgalikda Ra ga 64,7% ta'sir qilishi aniqlandi; qator ozini 40–50% ga sozlash Ra ni qo‘shimcha 30% kamaytirdi. VK8 qattiq qotishmada geometrik xato ±0,004 mm qolipsolik uchun ±0,005 mm talabini qondiradi.

Iqtisodiy samara: bir detal ishlov berish vaqti 45–60 daqiqadan 18–25 daqiqaga qisqarishi, asbob sarfining 90% kamayishi va qayta ishlash ehtimolining 15–20% dan 3–5% ga tushishi natijasida yillik xarajatlar ~32% kamayishi kutilmoqda.

5. XULOSA / CONCLUSION

1. RSM asosida ikkinchi tartibli empirik model ishlab chiqildi (R^2 = 0,973); lazer quvvati (38,2%) va skanerlash tezligi (26,5%) Ra ning asosiy boshqaruvchi omillari ekanligi ANOVA orqali tasdiqlandi.
2. Dinamik fokuslashtirish va 5 o‘qli boshqaruv tizimi yordamida Ra 88–93% ga kamaytirilib: R6M5 da 0,12 mkm, VK8 da 0,18 mkm, VT6 da 0,09 mkm qiymatlarga erishildi.
3. VT6 titan qotishmasida Ra = 0,09 mkm (ISO N4) va HAZ = 3–6 mkm — tibbiy implantlar uchun xalqaro talablar qondirildi.
4. CAD/CAM integratsiyasi, RSM-optimizatsiya, sifat nazorat va SQLite ma'lumotlar bazasidan iborat to‘liq dasturiy ta'minot tizimi ishlab chiqildi va ishlab chiqarishda sinovdan o‘tkazildi.
5. Texnologiyani joriy etish yillik xarajatlarni ~32% kamaytirish va detal ishlov berish vaqtini 2,5 baravarga qisqartirish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR / REFERENCES

1. Benardos P.G., Vosniakos G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. Int. J. Machine Tools Manuf. 2003. Vol. 43. P. 833–844.
2. Kalpakjian S., Schmid S.R. Manufacturing Engineering and Technology. 7th ed. Pearson, 2014.
3. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-5286-son qarori. Sanoatni modernizatsiya dasturi 2022–2026. Toshkent, 2022.

4. Malinauskas M. et al. Ultrafast laser processing of materials. Light: Science & Applications. 2016. Vol. 5. e16133.
5. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. Wiley, 2017.
6. Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. Response Surface Methodology. 4th ed. Wiley, 2016.
7. Taguchi G. Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, 1990.
8. Ready J.F. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Laser Institute of America, 2001.