DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

МАШИНАСОЗЛИК ДЕТАЛЛАРИ СИРТ ҚАТЛАМИНИ ЛАЗЕРЛИ МОДИФИКАЦИЯЛАШДА ЭНЕРГИЯ ЗИЧЛИГИ ВА СКАНЕРЛАШ ТЕЗЛИГИНИ КЎП МЕЗОНЛИ ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

Абдуллаев Зокиржон Джураевич, *в.б. доцент,*
Муҳандислик технологиялари кафедраси,
Қўқон давлат университети

Аннотация. *Мақолада машинасозлик деталларининг ишчи сиртларини лазерли модификациялаш жараёнининг технологик параметрларини такомиллаштириш масаласи тадқиқ қилинган. Лазер қуввати, нур доғи диаметри, сканерлаш тезлиги ва солиштирма энергия киритиш миқдорининг сирт қатлами микротузилмаси, мустаҳкамланган қатлам чуқурлиги, микрокаттиқлик ва ейилишга чидамлиликка таъсири тизимли равишда таҳлил қилинган. Лазерли ишлов бериш жараёнини алоҳида технологик параметрлар бўйича эмас, балки уларни энергия зичлиги ва кўп мезонли оптималлаштириш мезони орқали комплекс бошқариш усули таклиф этилган. Лазер нурининг деталь сиртига таъсир этиш режимини ифодаловчи энергиявий кўрсаткичлар аниқланган ҳамда лазер қуввати ва сканерлаш тезлигининг ўзаро нисбати асосида рационал технологик соҳани шакллантириш ёндашуви ишлаб чиқилган. Сирт микрокаттиқлиги, модификацияланган қатлам чуқурлиги, сирт ғадир-будурлиги ва ейилиш интенсивлигини бир вақтнинг ўзида ҳисобга олувчи интеграл оптималлаштириш мезони таклиф этилган. Таклиф этилаётган ёндашув машинасозлик деталларининг эксплуатацион хусусиятларини ошириш билан бир вақтда ортиқча иссиқлик киритилиши, сиртнинг эриши, термик деформация ва нуқсонлар пайдо бўлиш хавфини камайтириш имконини беради. Тадқиқот натижаларидан тишли ғилдираклар, валлар, ўқлар, кулачоклар, йўналтирувчи элементлар ҳамда ишқаланиш ва циклик юкланиш шароитида ишлайдиган бошқа машина деталларига лазерли ишлов бериш технологиясини ишлаб чиқишда фойдаланиш мумкин.*

Аннотация. *В статье рассмотрена задача совершенствования технологических режимов лазерной модификации поверхностного слоя деталей машин. Предложен комплексный подход к выбору мощности лазерного излучения, скорости сканирования и размера лазерного пятна с использованием энергетических параметров процесса. Разработан многокритериальный показатель эффективности, учитывающий микротвердость, глубину модифицированного слоя, интенсивность изнашивания и шероховатость поверхности. Предложенный подход позволяет определить рациональную область лазерной обработки, обеспечивающую повышение эксплуатационных характеристик поверхностного слоя при ограничении избыточного теплового воздействия.*

Abstract. *The paper addresses the improvement of technological parameters for laser modification of the surface layer of machine components. A comprehensive approach is proposed for selecting laser power, scanning speed, and laser spot size using energy-based process parameters. A multi-criteria performance index combining surface microhardness, modified-layer depth, wear intensity, and surface roughness is introduced. The proposed approach enables determination of a rational laser-processing window that improves functional surface properties while limiting excessive heat input, melting, and thermally induced defects. The methodology can be applied to the technological design of laser surface treatment for gears, shafts, cams, guide elements, and other machine components operating under friction and cyclic loading.*

Калит сўзлар: *лазерли модификациялаш, сирт қатлами, машинасозлик детали, энергия зичлиги, лазер қуввати, сканерлаш тезлиги, микрокаттиқлик, ейилишга чидамлилик, микротузилма, оптималлаштириш.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

Ключевые слова: *лазерная модификация, поверхностный слой, детали машин, плотность энергии, скорость сканирования, микротвердость, износостойкость, оптимизация.*

Keywords: *laser modification, surface layer, machine parts, energy density, scanning speed, microhardness, wear resistance, optimization.*

Кириш. Замонавий машинасозликда деталларнинг ишончлилиги ва хизмат муддатини ошириш масаласи, биринчи навбатда, уларнинг ишчи сиртлари ҳолати билан боғлиқ. Кўплаб деталларда бузилиш жараёни материалнинг бутун ҳажмида эмас, балки ишқаланиш, контакт кучланишлари, циклик юкланиш, абразив таъсир ва коррозияга дучор бўлган сирт қатламида бошланади. Шу сабабли деталнинг асосий ҳажмининг механик хусусиятларини сақлаб қолган ҳолда унинг сирт қатламини локал мустаҳкамлаш технологиялари катта амалий аҳамият касб этади.

Лазерли сирт модификацияси ана шундай истиқболли технологиялардан бири ҳисобланади. Лазер нурининг юқори концентрацияланган энергияси материал сиртини қисқа вақт ичида қиздириш ва кейинчалик деталнинг ички ҳажми ҳисобига юқори тезликда ўз-ўзидан совитиш имконини беради. Бу эса сирт қатламида фазавий ва структура ўзгаришларини ҳосил қилиб, унинг қаттиқлиги ва трибологик хусусиятларини мақсадли равишда ўзгартириш имконини яратади.

Замонавий тадқиқотларда лазер қуввати, ҳаракат тезлиги, нур доғи диаметри ва энергия киритиш режими қаттиқлашган қатлам шаклланишига таъсир этувчи асосий параметрлар сифатида қаралмоқда. Айниқса, энергия зичлиги жараён натижаларини умумлаштирувчи муҳим технологик кўрсаткич сифатида ажратиб кўрсатилган. 2025 йилги лазерли термик ишлов бериш бўйича таҳлилда ҳам энергия киритиш миқдори қаттиқлашиш чуқурлиги ва микрокаттиқликни белгилашда асосий омиллардан экани таъкидланган.

Бироқ амалда лазерли модификациялаш режимларини танлашда қатор зиддиятлар мавжуд. Лазер энергиясининг кам бўлиши зарур фазавий ўзгаришларни тўлиқ таъминламаса, энергиянинг ортиқча бўлиши сирт эриши, ғадир-будурликнинг ортиши, қолдиқ кучланишлар ёки микронуқсонлар пайдо бўлишига сабаб бўлиши мумкин. Шунинг учун фақат максимал қаттиқликка эришиш эмас, балки бир нечта технологик ва эксплуатацион мезонларни бир вақтда ҳисобга олиш талаб қилинади.

Tadqiqotning maqsadi

Машинасозлик деталлари сирт қатламини лазерли модификациялашда лазер қуввати, сканерлаш тезлиги ва энергия зичлигининг модификацияланган қатлам хусусиятларига таъсирини аниқлаш ҳамда микрокаттиқлик, мустаҳкамланган қатлам чуқурлиги, сирт сифати ва ейилишга чидамлиликни биргаликда ҳисобга олувчи кўп мезонли оптималлаштириш усулини ишлаб чиқишдан иборат.

Materiallar va usullar

Тадқиқот объекти сифатида машинасозликда кенг қўлланиладиган **[пўлат маркаси]** дан тайёрланган намуналар қабул қилинди.

Намуналарнинг ўлчамлари:

$$a \times b \times h \text{ мм}$$

Материалнинг дастлабки қаттиқлиги:

$$H_0 = \ldots \text{ HV}$$

Лазерли модификациялаш **[лазер қурилмаси модели]** қурилмасида амалга оширилди.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

Асосий технологик параметрлар қуйидаги оралиқларда ўзгартирилди:

$$P = \ldots - \ldots \text{ Вт}$$

$$v = \ldots - \ldots \text{ мм/с}$$

$$d = \ldots - \ldots \text{ мм}$$

бу ерда: P – лазер нурланиши қуввати;

v – лазер нурининг деталь сирти бўйлаб сканерлаш тезлиги;

d – лазер доғининг самарали диаметри.

Модификациядан кейин намуналарнинг микротузилиши металлографик усулда, микрокаттиқлиги Виккерс усулида, сирт ғадир-будурлиги профилометр ёрдамида, ейилишга чидамлилиги эса [трибологик синов қурилмаси ва схемаси] асосида баҳоланди.

Natijalar

2.1. Лазерли модификациялаш жараёнининг энергиявий кўрсаткичлари

Лазерли ишлов бериш самарадорлигини фақат лазер қуввати билан баҳолаш етарли эмас. Бир хил қувватда сканерлаш тезлиги ўзгариши натижасида материалга узатилаётган энергия миқдори кескин ўзгаради.

Лазер нурининг чизиқли энергияси:

$$E_l = \frac{P}{v}$$

кўринишида аниқланади. Бу ерда: E_l – бирлик траектория узунлигига тўғри келувчи энергия, Ж/мм; P – лазер қуввати, Вт; υ – сканерлаш тезлиги, мм/с.

Лазер доғи диаметри ҳам ҳисобга олинганда сиртга киритилаётган шартли солиштирма энергия:

$$E_s = \frac{P}{v \cdot d}$$

кўринишида ифодаланиши мумкин.

бу ерда:

E_s – шартли солиштирма энергия, Ж/мм²;

P– лазер қуввати, Вт;

v – сканерлаш тезлиги, мм/с;

d – лазер доғининг самарали диаметри, мм.

Шунга кўра лазер қуввати ортиши билан (E_s) ортади, сканерлаш тезлиги ёки нур доғи диаметри ортиши билан эса камаяди.

Ушбу боғланиш технологик режимларни битта умумлаштирувчи энергетик параметр орқали таққослаш имконини беради.

Лазер сиртни қиздирганда юзадаги иссиқлик оқими зичлигини соддалаштирилган ҳолда:

$$q = \frac{\eta P}{A}$$

ифода орқали баҳолаш мумкин.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

Бу ерда: η – материал томонидан лазер нурини ютиш коэффициенти;
P – лазер қуввати, Вт;
A – лазер доғининг юзаси, мм².
Доиравий лазер доғи учун:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

бу ерда: d – лазер доғининг диаметри, мм.
Шундай қилиб:

$$q = \frac{4\eta P}{\pi d^2}$$

бўлади.

2.2. Лазер параметрларининг сирт қатлами шаклланишига таъсири

Лазер параметрларининг сирт қатлами шаклланишига таъсири. Лазер энергияси металл сирти томонидан ютилгандан кейин иссиқликнинг локал манбаи пайдо бўлади. Нур ҳаракатланиши натижасида қиздирилган ҳудуд деталнинг нисбатан совуқ ички қисми ҳисобига тез совийди.

Температуранинг вақт бўйича ўзгаришини умумий кўринишда:

$$\boxed{T = f(P, v, d, \eta, \lambda, c, \rho, t)}$$

кўринишида ифодалаш мумкин.

Бу ерда: T – сирт қатламининг ҳарорати, °C ёки K;
P – лазер қуввати, Вт;
υ – сканерлаш тезлиги, мм/с;
d – лазер доғининг диаметри, мм;
η – материалнинг лазер нурини ютиш коэффициенти;
λ – материалнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти, Вт/(м·К);
c – солиштирма иссиқлик сиғими, Ж/(кг·К);
ρ – материал зичлиги, кг/м³;
t – вақт, с.

Лазер қуввати жуда кичик бўлганда сиртнинг максимал ҳарорати зарур фазавий ўзгариш температурасига етмаслиги мумкин. Натижада микротузилмада тўлиқ қайта қурилиш содир бўлмайди.

Энергия киритиш оптимал соҳада бўлганда эса сирт қатлами қисқа вақт ичида зарур температурагача қизийди ва тез совиш натижасида майда дисперсли мустаҳкамланган структура ҳосил бўлади.

Энергиянинг ҳаддан ташқари ортиши эса:

- сиртнинг локал эриши;
- оксидланиш;
- ғадир-будурликнинг ортиши;
- қолдиқ термик кучланишлар;
- микродарзлар;
- геометрик аниқликнинг пасайиши

каби салбий ҳолатларни келтириб чиқариши мумкин.

2.3. Микроқаттиқлик ва модификацияланган қатлам чуқурлиги

Микроқаттиқлик ва модификацияланган қатлам чуқурлиги

Тажриба натижалари асосида лазер қуввати ортиши билан микрокаттиқликнинг [тажриба натижасини киритиш] гача ортиши кузатилди.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

Ишлов берилмаган материалда:

$$HV_0 = \dots$$

бўлган бўлса, рационал лазер режимида:

$$HV_{\max} = \dots$$

ни ташкил қилди.

Нисбий қаттиқлашиш коэффициенти:

$$\boxed{K_H = \frac{HV_L}{HV_0}}$$

орқали баҳоланди.

бу ерда: K_H – нисбий қаттиқлашиш коэффициенти;

HV_L – лазерли ишлов берилгандан кейинги микрокаттиқлик;

HV_0 – ишлов берилмаган материалнинг дастлабки микрокаттиқлиги.

Эксперимент бўйича:

$$K_H = \dots$$

Модификацияланган қатламнинг самарали чуқурлиги:

$$h_m = \dots \text{ мм}$$

ни ташкил қилди.

Бу ерда: h_m – лазерли модификация натижасида ҳосил бўлган самарали мустаҳкамланган қатлам чуқурлиги.

2.4. Сканерлаш тезлигининг таъсири

Сканерлаш тезлигининг таъсири

Сканерлаш тезлиги материалнинг лазер нурланиши таъсирида қолиш вақтини белгилайди.

Лазер нурининг шартли таъсир вақти:

$$\boxed{t_L = \frac{d}{v}}$$

формула билан аниқланиши мумкин.

бу ерда: t_L – лазер нурининг шартли таъсир вақти, с;

d – лазер доғининг самарали диаметри, мм;

υ – сканерлаш тезлиги, мм/с.

Бунда υ камайганда t_L ортади ва сиртга кўпроқ иссиқлик киритилади.

Бироқ сканерлаш тезлигининг ҳаддан ташқари пасайтирилиши сирт температураси ортиши ва эриш жараёни бошланишига олиб келиши мумкин.

Аксинча, (v) жуда юқори бўлса:

$$t_L \to \min$$

ва материалнинг фазавий қайта ўзгариши учун етарли вақт шаклланмаслиги мумкин.

Шунинг учун:

$$\boxed{v_{\min} < v_{\text{opt}} < v_{\max}}$$

шарти бажарилиши лозим.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

бу ерда: v_{min} – минимал сканерлаш тезлиги;
v_{opt} – оптимал сканерлаш тезлиги;
v_{max} – максимал сканерлаш тезлиги.
Тажрибалар асосида мазкур материал учун рационал сканерлаш тезлиги:

$$v_{opt} = \dots \text{ мм/с}$$

2.5. Ейилишга чидамлиликни баҳолаш

Ейилишга чидамлиликни баҳолаш

Лазерли модификациялаш самарадорлигини фақат микрокаттиқлик билан баҳолаш етарли эмас. Машина деталларининг аксарияти ишқаланиш шароитида ишлаши сабабли уларнинг трибологик хусусиятлари ҳам тадқиқ қилиниши зарур.

Массавий ейилиш:

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

билан аниқланади.

бу ерда: Δ_m – массавий ейилиш, г ёки мг;
m_0 – намунанинг синовдан олдинги массаси;
m_1 – намунанинг синовдан кейинги массаси.

Ейилиш интенсивлиги шартли равишда:

$$I_w = \frac{\Delta m}{L}$$

кўринишида ифодаланади.

бу ерда: I_w – ейилиш интенсивлиги;
Δ_m – массавий ейилиш, г ёки мг;
L – ишқаланиш йўли, м ёки мм.
Лазерли ишловнинг ейилишга чидамлилик бўйича самарадорлик коэффициенти:

$$K_w = \frac{I_{w0}}{I_{wL}}$$

кўринишида қабул қилинди.

бу ерда: K_w – лазерли ишловнинг ейилишга чидамлилик бўйича самарадорлик коэффициенти;
I_{w0} – ишлов берилмаган намунанинг ейилиш интенсивлиги;
I_{wL} – лазерли ишлов берилган намунанинг ейилиш интенсивлиги.
Тажриба натижалари бўйича:

$$K_w = \dots$$

2.6. Кўп мезонли оптималлаштириш усули

Кўп мезонли оптималлаштириш усули

Лазерли модификациялашда энг катта микрокаттиқликни таъминловчи режим ҳар доим ҳам энг яхши технологик режим бўлавермайди. Чунки қаттиқлик ортиши билан бир вақтда сирт ғадир-будурлиги ёки термик таъсир чуқурлиги ортиши мумкин.

Шу сабабли қуйидаги асосий мезонлар қабул қилинди:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

1. максимал микрокаттиқлик – HV;
2. талаб этилган модификация чуқурлиги – h_m;
3. минимал ейилиш интенсивлиги – I_w;
4. минимал сирт ғадир-будурлиги – R_a.

Кўрсаткичлар нормаллаштирилганда қаттиқлик учун:

$$X_1 = \frac{HV - HV_{\min}}{HV_{\max} - HV_{\min}}$$

қатлам чуқурлиги учун:

$$X_2 = \frac{h_m - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}$$

ейилиш учун:

$$X_3 = \frac{I_{w,\max} - I_w}{I_{w,\max} - I_{w,\min}}$$

сирт ғадир-будурлиги учун:

$$X_4 = \frac{R_{a,\max} - R_a}{R_{a,\max} - R_{a,\min}}$$

ифодалар қабул қилиниши мумкин.

Бу ерда X_1, X_2, X_3, X_4 – мос равишда микрокаттиқлик, модификацияланган қатлам чуқурлиги, ейилиш интенсивлиги ва сирт ғадир-будурлигининг нормаллаштирилган қийматларидир.

Шунда интеграл самарадорлик мезони:

$$K_{\text{int}} = w_1 X_1 + w_2 X_2 + w_3 X_3 + w_4 X_4$$

билан аниқланади. Бу ерда ***ω₁, ω₂, ω₃, ω₄*** – ҳар бир кўрсаткичнинг эксплуатацион аҳамиятини ҳисобга олувчи вазн коэффициентлари бўлиб, улар учун:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$$

ω_i – ҳар бир кўрсаткичнинг эксплуатацион аҳамиятини ҳисобга олувчи вазн коэффициенти.

Оптимал технологик режим:

$$K_{\text{int}} \to \max$$

шарти орқали танланади.

2.7. Тавсия этилаётган технологик режим

8. Тавсия этилаётган технологик режим

Ўтказилган экспериментал тадқиқотлар ва кўп мезонли баҳолаш натижасида [материал номи] учун қуйидаги рационал режим аниқланди:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

$$\boxed{P_{\text{opt}} = \ldots \text{ Вт}}$$

$$\boxed{v_{\text{opt}} = \ldots \text{ мм/с}}$$

$$\boxed{d_{\text{opt}} = \ldots \text{ мм}}$$

$$\boxed{E_{s,\text{opt}} = \ldots \text{ Ж/мм}^2}$$

Мазкур режимда:

$$\boxed{HV = \ldots}$$

$$\boxed{h_m = \ldots \text{ мм}}$$

$$\boxed{R_a = \ldots \text{ мкм}}$$

$$\boxed{I_w = \ldots}$$

қийматлар олинди.

Muhokama

3.1. Таклиф этилган технологиянинг илмий янгилиги

Таклиф этилган технологиянинг илмий янгилиги

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Машинасозлик деталлари сирт қатламини лазерли модификациялаш параметрлари лазер қуввати ва сканерлаш тезлигини алоҳида танлаш усулидан фарқли равишда, солиштирма энергия киритиш кўрсаткичи асосида ўзаро боғлиқ ҳолда тизимлаштирилди.

Лазерли ишлов параметрлари, модификацияланган қатлам хусусиятлари ва деталнинг трибологик кўрсаткичлари ўртасидаги функционал боғланишларни биргаликда ҳисобга олишга асосланган ёндашув таклиф этилди.

Амалий аҳамияти

1. Сирт қатламида талаб этилган мустаҳкамланишни таъминлаган ҳолда ортиқча иссиқлик таъсири ва сирт нуқсонларини чекловчи рационал лазерли ишлов бериш соҳасини аниқлаш усули таклиф этилди.

Таклиф қилинган усулдан: тишли ғилдираклар; вал ва ўқлар; подшипник билан контакт қилувчи сиртлар; кулачоклар; штоклар; йўналтирувчи элементлар; қолип ва штамп деталлари; юқори ишқаланиш шароитида ишлайдиган машина қисмлари

Хулоса

Усул лазер технологик қурилмаларини рақамли бошқариш тизимларига интеграция қилиш учун ҳам қулай бўлиб, кейинчалик технологик параметрларни автоматик оптималлаштириш алгоритмларини ишлаб чиқиш имконини беради.

Машинасозлик деталлари сирт қатламини лазерли модификациялаш жараёнида лазер қуввати, сканерлаш тезлиги ва нур доғи диаметри ўзаро боғланган технологик параметрлар экани асосланди.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.20

Лазерли модификация жараёнини умумлаштирилган энергиявий параметрлар орқали баҳолаш технологик режимларни тизимли равишда танлаш имконини беради.

Лазер энергияси етарли бўлмаган режимда сирт қатламида зарур фазавий-структуравий ўзгаришлар тўлиқ шаклланмаслиги, ортиқча энергия киритилганда эса сиртнинг эриши ва технологик нуқсонлар юзага келиши мумкинлиги кўрсатилди.

Шу муносабат билан лазерли модификациялаш учун максимал энергия эмас, балки материал ва деталнинг эксплуатацион шароитига мос рационал энергия интервалини танлаш мақсадга мувофиқ.

Микрокаттиқлик, модификацияланган қатлам чуқурлиги, ейилиш интенсивлиги ва сирт ғадир-будурлигини биргаликда ҳисобга олувчи интеграл мезон асосида лазерли модификациялаш режимларини кўп мезонли оптималлаштириш усули таклиф этилди.

Адабиётлар

1. Wang J., Xia J., Liu Z., Xu L., Liu J., Xiao Y., Gao J., Ru H., Jiao J. A comprehensive review of metal laser hardening: mechanism, process, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 134. P. 5087–5115. DOI: 10.1007/s00170-024-14463-1.

2. Łach Ł. Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, and Industrial Applications. *Crystals*. 2024. Vol. 14, No. 8. Article 726. DOI: 10.3390/cryst14080726.

3. Łuszczek J. et al. Laser Surface Hardening of Carburized Steels: A Review of Process Parameters and Application in Gear Manufacturing. *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 15. Article 3623.

4. The Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructural Characteristics and Wear Resistance of 9CrSi Steel. *Materials*. 2026. Vol. 19, No. 2. Article 423.

5. Kumar P.S., Jegadheesan C., Somasundaram P. et al. State of art: Review on laser surface hardening of alloy metals. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.259.

6. Steen W.M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. London: Springer.

7. Ion J.C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier.

8. Grum J. Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*.

9. Totten G.E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. CRC Press.

10. Диссертация муаллифининг лазерли модификациялаш технологияси бўйича экспериментал тадқиқот материаллари.