

UO‘K 621.7/.9:621.373.826

**TISHLI G‘ILDIRAK VA AYLANUVCHI MEXANIK DETALLAR ISHCHI  
YUZALARINI LAZER NURI YORDAMIDA KOMPLEKS PUXTALASHNING  
ILMIY-TEXNIK YECHIMLARI**

**A.B.Elmanov, A.Sh.Mirzaumidov****X.B.Turg‘unova, B.J.Urunov**<sup>1</sup>Qarshi davlat texnika universiteti<sup>1</sup>Namangan davlat texnika universiteti[a.elmanov@kstu.uz](mailto:a.elmanov@kstu.uz)

**Annotatsiya.** Mazkur maqolada tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi mexanik detallar ishchi yuzalarining yeyilishga, kontakt charchashiga hamda dinamik yuklamalarga bardoshlilikini oshirishga qaratilgan kompleks lazerli puxtalashning ilmiy-texnik asoslari tadqiq etilgan. An’anaviy sirtni qattiqlashtirish usullarining cheklovlari tahlil qilinib, lazer nuri yordamida yuqori energiya zichligi sharoitida lokal, boshqariladigan va minimal deformatsiyali sirt modifikatsiyasini amalga oshirish imkoniyatlari asoslab berilgan. Ishda lazer–material o‘zaro ta’sirining fizik mexanizmlari, issiqlik uzatish jarayonlari, tezkor qizish va sovish sharoitida yuzaga keladigan fazaviy o‘zgarishlar hamda qoldiq kuchlanishlarning shakllanish qonuniyatlari tahlil qilingan. Tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi detallar geometriyasi inobatga olingan holda, ko‘p yo‘lakli skanerlash va issiqlik maydonini boshqarishga asoslangan kompleks lazerli puxtalash konsepsiyasi ishlab chiqilgan. Numerik modellashtirish natijasida lazer quvvati, skanerlash tezligi va qattiqlashgan qatlam chuqurligi o‘rtasidagi bog‘liqliklar aniqlanib, virtual tajribalar orqali qatlamning geometrik va strukturaviy xususiyatlari baholangan. Olingan natijalar adabiyotlarda keltirilgan eksperimental ma’lumotlar bilan mos kelishi ko‘rsatildi hamda kompleks lazerli puxtalashning sirt qattiqligi, yeyilishga chidamliligi va xizmat muddatini oshirishdagi samaradorligi asoslandi. Tadqiqot natijalari mexanik uzatmalar ishlab chiqarish va qayta tiklash jarayonlarida yuqori ishonchlilikka ega detallarni tayyorlash

uchun ilmiy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan lazerli puxtalash texnologiyalarini rivojlantirishga xizmat qiladi.

**Kalit so'zlar:** lazerli puxtalash, tishli g'ildiraklar, aylanuvchi mexanik detallar, issiqlik maydoni, fazaviy o'zgarishlar, qoldiq kuchlanishlar, qattiqlashgan qatlam.

### **Научно-технические решения комплексного лазерного упрочнения рабочих поверхностей зубчатых колёс и вращающихся механических деталей**

**А. Б. Элманов<sup>1</sup>, А. Ш. Мирзаумидов<sup>1</sup>, Б. Ж. Урунов<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Каршинский государственный технический университет

<sup>1</sup> Наманганский государственный технический университет

[a.elmanov@kstu.uz](mailto:a.elmanov@kstu.uz)

#### **Аннотация.**

В данной статье исследованы научно-технические основы комплексного лазерного упрочнения, направленного на повышение износостойкости, контактной выносливости и устойчивости к динамическим нагрузкам рабочих поверхностей зубчатых колес и вращающихся механических деталей. Проанализированы ограничения традиционных методов поверхностного упрочнения и обоснованы возможности реализации локальной, управляемой модификации поверхности с минимальными деформациями в условиях высокой плотности энергии лазерного излучения. Рассмотрены физические механизмы взаимодействия лазера с материалом, процессы теплопереноса, фазовые превращения при быстром нагреве и охлаждении, а также закономерности формирования остаточных напряжений. С учетом геометрии зубчатых колес и вращающихся деталей разработана концепция комплексного лазерного упрочнения, основанная на многодорожечном сканировании и управлении тепловым полем. В результате численного моделирования установлены зависимости между мощностью лазера, скоростью сканирования и глубиной упрочненного слоя, а также посредством виртуальных

экспериментов оценены геометрические и структурные характеристики слоя. Показано соответствие полученных результатов экспериментальным данным, представленным в литературе, и обоснована эффективность комплексного лазерного упрочнения в повышении твердости поверхности, износостойкости и долговечности. Результаты исследования имеют научную и практическую значимость для развития технологий лазерного упрочнения при производстве и восстановлении высоконадежных деталей механических передач.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, зубчатые колёса, вращающиеся механические детали, тепловое поле, фазовые превращения, остаточные напряжения, упрочнённый слой.

## **Scientific and Technical Solutions for Comprehensive Laser Hardening of Working Surfaces of Gears and Rotating Mechanical Components**

**A.B. Elmanov<sup>1</sup>, A.Sh. Mirzaumidov<sup>1</sup>, B.J. Urunov<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Karshi State Technical University

<sup>1</sup> Namangan State Technical University

[a.elmanov@kstu.uz](mailto:a.elmanov@kstu.uz)

### **Abstract.**

This paper investigates the scientific and technical foundations of comprehensive laser surface hardening aimed at improving wear resistance, contact fatigue strength, and resistance to dynamic loads of working surfaces of gears and rotating mechanical components. The limitations of conventional surface hardening methods are analyzed, and the feasibility of localized, controllable surface modification with minimal distortion under high laser energy density conditions is substantiated. The physical mechanisms of laser–material interaction, heat transfer processes, phase transformations occurring under rapid heating and cooling, and the formation patterns of residual stresses are examined. Taking into account the geometry of gears and rotating components, a comprehensive laser

hardening concept based on multi-track scanning and thermal field control is developed. Numerical modeling results establish relationships between laser power, scanning speed, and hardened layer depth, while virtual experiments are used to evaluate the geometric and structural characteristics of the modified layer. The obtained results are shown to be consistent with experimental data reported in the literature, and the effectiveness of comprehensive laser hardening in enhancing surface hardness, wear resistance, and service life is demonstrated. The research findings have scientific and practical significance for the development of laser hardening technologies in the manufacturing and refurbishment of high-reliability mechanical transmission components.

**Keywords:** laser hardening, gears, rotating mechanical components, thermal field, phase transformations, residual stresses, hardened layer.

## 1. KIRISH

Zamonaviy mashinasozlik va mexanik uzatmalar tizimlarida tishli g'ildiraklar hamda aylanuvchi detallar yuqori kontakt bosimlari, takroriy siklik yuklamalar va murakkab tribologik sharoitlarda ishlaydi. Bunday ekspluatatsiya sharoitlari natijasida ishchi yuzalarda intensiv yeyilish, kontakt charchashi, mikroyo'riqlar paydo bo'lishi va oxir-oqibat butun uzatmaning ishdan chiqishi kuzatiladi[1]. Amaliy tajriba shuni ko'rsatadiki, mexanik uzatmalarning ishonchliligi va xizmat muddati ko'p jihatdan aynan ishchi sirtlarning holati va ularning mexanik xossalari bilan belgilanadi. An'anaviy sirtni puxtalash usullari, jumladan, hajmiy termik ishlov berish, kimyoviy-termik ishlovlar (sementatsiya, nitratsiya) hamda induksion qizdirish texnologiyalari keng qo'llanilishiga qaramay, ularning qator muhim cheklovlari mavjud. Ushbu usullar ko'pincha butun detal hajmining qizishiga olib kelib, deformatsiyalar, qoldiq ichki kuchlanishlarning noqulay taqsimlanishi va murakkab geometrik shaklli detallar uchun texnologik moslashuvchanlikning pastligi bilan tavsiflanadi.

Ayniqsa, tishli g'ildirak tishlarining ishchi profillari va aylanuvchi detallar sirtlarida lokal xossalarni boshqarish zarurati mavjud bo'lgan hollarda an'anaviy usullar yetarli samaradorlikni ta'minlay olmaydi[2].

So‘nggi yillarda yuqori energiya konsentratsiyasiga ega bo‘lgan lazer nuri yordamida sirtni modifikatsiyalash texnologiyalari mashinasozlik sohasida istiqbolli yo‘nalish sifatida qaralmoqda. Lazerli puxtalash jarayonida issiqlik energiyasi lokal hududda juda qisqa vaqt oralig‘ida kiritiladi, bu esa minimal deformatsiya sharoitida sirt qatlamining tezkor qizishi va sovishini ta‘minlaydi. Natijada, yuqori qattqlikka ega bo‘lgan martensitik yoki nozik dispers strukturali qatlam hosil bo‘lib, detal yadrosining boshlang‘ich mexanik xossalari deyarli saqlanib qoladi[3].

Biroq, mavjud tadqiqotlarning aksariyati lazerli ishlov berishning alohida parametrlariga yoki oddiy geometrik shaklli namunalarga qaratilgan bo‘lib, tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi detallar kabi murakkab ishchi yuzalarga ega elementlar uchun **kompleks lazerli puxtalash konsepsiyasining ilmiy-texnik asoslari yetarlicha tizimli o‘rganilmagan**. Xususan, ko‘p yo‘lakli lazer skanerlash, energiya taqsimotining bir xilligi, issiqlik maydonining fazoviy-vaqt bo‘yicha boshqarilishi hamda qoldiq kuchlanishlarning optimal shakllanishi masalalari chuqur ilmiy asoslashni talab etadi.

Shu munosabat bilan mazkur tadqiqotda tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi mexanik detallar ishchi yuzalarini lazer nuri yordamida **kompleks puxtalashning ilmiy-texnik yechimlarini ishlab chiqish** maqsad qilib qo‘yilgan. Tadqiqot lazer–material o‘zaro ta‘sirining fizik mexanizmlarini tahlil qilish, issiqlik jarayonlarini nazariy va hisobiy asosda modellashtirish hamda olingan natijalarni ilgari e‘lon qilingan eksperimental ma‘lumotlar bilan solishtirishga asoslanadi. Ushbu yondashuv lazerli puxtalash texnologiyalarining samaradorligini ilmiy jihatdan asoslash va ularni real sanoat sharoitlariga moslashtirish uchun muhim nazariy poydevor yaratadi.

## **2. Materiallar va metodlar**

### **2.1. Lazer yordamida sirtni puxtalashning fizik asoslari**

Lazerli puxtalash jarayonida issiqlik uzatish quyidagi umumiy issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

bu yerda  $T$  — temperatura,  $t$  — vaqt,  $\alpha$  — materialning issiqlik diffuziyasi koeffitsienti,  $Q(x, y, z, t)$  — lazer nuri tomonidan kiritilayotgan harakatchan issiqlik manbai.

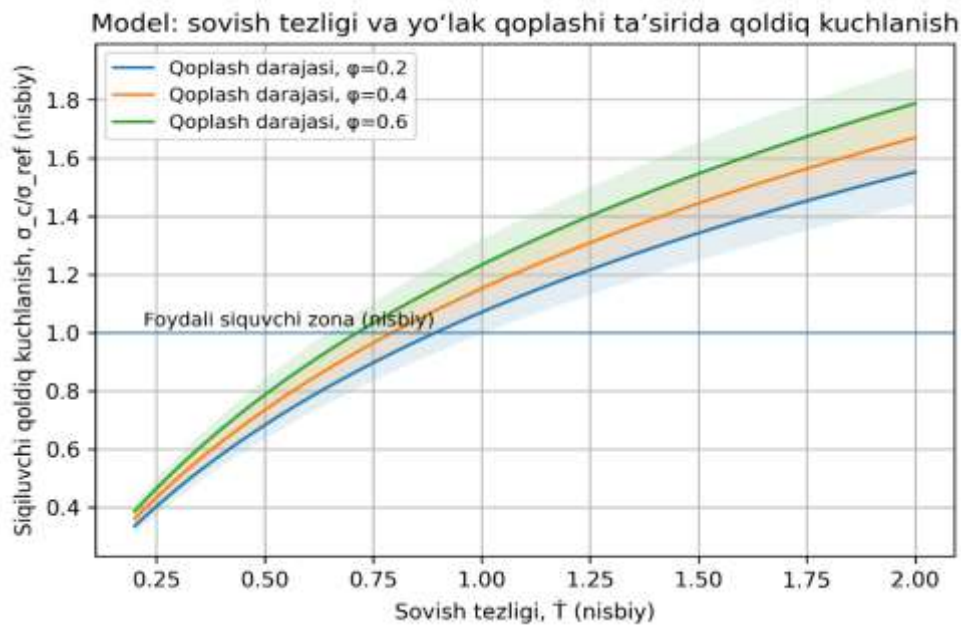
Mazkur tenglama lazerli ishlov berishda sirt qatlamida hosil bo‘ladigan keskin temperaturalar gradientini va ularning vaqt bo‘yicha evolyutsiyasini ifodalash uchun qo‘llaniladi.

Lazerli puxtalash jarayoni yuqori energiya zichligining qisqa vaqt ichida sirtga yo‘naltirilishi bilan tavsiflanadi. Jarayonda qizish va sovish tezligi juda yuqori bo‘lib ( $10^3$ – $10^6$  K/s), bu martensitik yoki nozik dispersli struktura shakllanishi uchun qulay sharoit yaratadi [4].

Issiqlik uzatish lazer energiyasining yutilishi, material ichiga o‘tkazuvchanlik orqali tarqalishi va atrof-muhitga konvektiv hamda nurlanish yo‘li bilan berilishi orqali amalga oshadi. Jarayon uch o‘lchamli issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi asosida, lazer nuri harakatlanuvchi issiqlik manbai sifatida modellashtirildi. Asosiy parametrlar sifatida lazer quvvati, skanerlash tezligi, nur diametri va materialning issiqlik-fizik xossalari qabul qilindi.

Tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi detallar uchun geometriya ta’siri hisobga olinib, issiqlik oqimini boshqarish hamda yo‘laklar orasidagi optimal qoplash darajasi ta’minlandi. Modellashtirishda eritishsiz, qattiq fazada qizish–sovish jarayoni ko‘rib chiqildi. Temperaturalar gradienti va tez sovish natijasida yuzaga keladigan qoldiq kuchlanishlar sifat jihatdan baholandi, bu esa sirt qatlamining strukturaviy barqarorligini prognoz qilish imkonini beradi.

Lazerli puxtalash jarayonida yuzaga keladigan keskin temperaturalar gradienti va tezkor sovish sirt qatlamida qoldiq kuchlanishlarning hosil bo‘lishiga olib keladi.



1-rasm. Sovish tezligi ( $\dot{T}$ ) hamda yo'lak qoplashi darajasi ( $\varphi$ ) o'zgarishining siqiluvchi qoldiq kuchlanish ( $\sigma_c$ ) qiymatiga ta'siri

Grafikdan ko'rinadiki, sovish tezligi ortishi bilan martensitik transformatsiya intensivligi oshadi va natijada siqiluvchi qoldiq kuchlanish darajasi ortadi. Yo'lak qoplashi ortishi issiqlik maydonining bir tekis taqsimlanishiga yordam beradi va kuchlanish gradientlarini barqarorlashtiradi. Soyali zona hisoblash noaniqligini yoki modellashtirish sezgirligini ifodalab, real texnologik jarayonlarda parametrlarning o'zgaruvchanligini hisobga olish zarurligini ko'rsatadi. Mazkur natijalar lazerli puxtalash jarayonida sovish tezligini boshqarish orqali charchashga bardoshlilikni oshirish mumkinligini tasdiqlaydi. Ushbu kuchlanishlar asosan siquvchi (compressive) xarakterga ega bo'lib, ular materialning charchashga va yorilishlarga bo'lgan bardoshlilikini oshiradi. An'anaviy termik ishlovlarda ko'pincha tortuvchi qoldiq kuchlanishlar ustunlik qilsa, lazerli puxtalashda issiqlikning lokal kiritilishi va asosiy hajmning nisbatan sovuq qolishi sababli siquvchi kuchlanishlar shakllanadi. Bu holat tishli g'ildiraklar va aylanuvchi detallar uchun ayniqsa muhim bo'lib, u kontakt charchashi va pitting hodisalarining sekinlashishiga olib keladi. Shu bilan birga, qoldiq kuchlanishlarning qiymati va taqsimlanishi lazer parametrlari bilan bevosita bog'liq. Noto'g'ri tanlangan rejimlar kuchlanishlarning notekis taqsimlanishiga va mikroyo'riqlar paydo bo'lishiga sabab bo'lishi mumkin. Shu bois kompleks lazerli puxtalashda issiqlik maydonini, fazaviy o'zgarishlarni va kuchlanish

holatini yagona tizim sifatida ko‘rib chiqish ilmiy jihatdan asoslangan yondashuv hisoblanadi.

## 2.2. Tadqiqot obyekti va konseptual yondashuv

Mazkur tadqiqotda obyekt sifatida tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi mexanik detallar ishchi yuzalarining lazer nuri yordamida puxtalanish jarayoni ko‘rib chiqildi. Murakkab geometrik shaklli yuzalarda issiqlik ta‘sirining notekis taqsimlanishi va strukturaviy xossalarning lokal farqlanishi muammosini bartaraf etish maqsadida kompleks lazerli puxtalash konsepsiyasi ishlab chiqildi. Kompleks lazerli puxtalash deganda lazer energiyasini ishchi yuzaga fazoviy-vaqt bo‘yicha boshqarilgan, ko‘p yo‘lakli va qisman qoplanadigan (overlap) skanerlash strategiyasi asosida kiritish tushuniladi. Ushbu yondashuv issiqlik maydonining bir xilligini ta‘minlash, fazaviy o‘zgarishlarni nazorat qilish va qoldiq kuchlanishlarning optimal taqsimlanishiga erishishga qaratilgan.

Sirtga ishlov berish bir nechta ketma-ket lazer yo‘laklari orqali amalga oshirildi. Qo‘shni yo‘laklar orasidagi qoplash darajasi lazer quvvati ( $P$ ), skanerlash tezligi ( $v$ ) va nur diametriga bog‘liq holda tanlandi. Qoplash koeffitsienti shunday qiymatlarda belgilandi-ki, natijada sirt qatlamida uzluksiz va bir xil qattiqlashgan zona shakllanishi ta‘minlandi. Tishli g‘ildiraklar uchun lazer nuri harakati tishning evolvent ishchi profili bo‘ylab moslashtirilgan trajektoriya asosida modellashtirildi. Bu usul tish ildizi va tish uchi sohalarida issiqlik oqimining keskin farqlanishini kamaytirishga xizmat qiladi. Aylanuvchi silindrik detallar uchun esa lazer skanerlash tezligi va detalning aylanish tezligi sinxronlashtirildi, natijada sirt bo‘ylab izchil qattiqlashgan qatlam hosil bo‘lishi ta‘minlandi.

Lazer energiyasi harakatlanuvchi issiqlik oqimi sifatida kiritildi. Ko‘p yo‘lakli ishlov berish natijasida sirt qatlamida takroriy termik sikllar yuzaga kelishi hisobga olindi. Ushbu sikllarning parametrik kombinatsiyasi qattiqlashgan qatlam chuqurligi va mikrostrukturaviy bir xillikka ta‘siri nuqtai nazaridan tahlil qilindi. Chegara shartlari sifatida sirt bo‘ylab konvektiv va nurlanish orqali issiqlik almashinuvi, chuqur qatlamlarda esa issiqlik oqimining nolga tengligi qabul qilindi. Fazaviy o‘zgarishlar eritish bosqichiga o‘tmasdan, qattiq fazadagi qizish–sovish rejimi doirasida ko‘rib chiqildi.

Issiqlik maydonini boshqarish orqali temperaturalar gradientlari kamaytirilishi, donalar chegaralarida kuchlanishlarning to'planishi cheklanishi va mikroyo'riqlar paydo bo'lish ehtimoli pasayishi baholandi. Ko'p yo'lakli ishlov berishning qoldiq kuchlanishlar taqsimlanishiga ta'siri sifat jihatdan tahlil qilindi. Yakka lazer yo'lagi bilan ishlov berishda yuzaga keladigan lokal kuchlanish konsentratsiyalarining qo'shni yo'laklarning ketma-ket ta'siri natijasida muvozanatlanishi inobatga olindi.

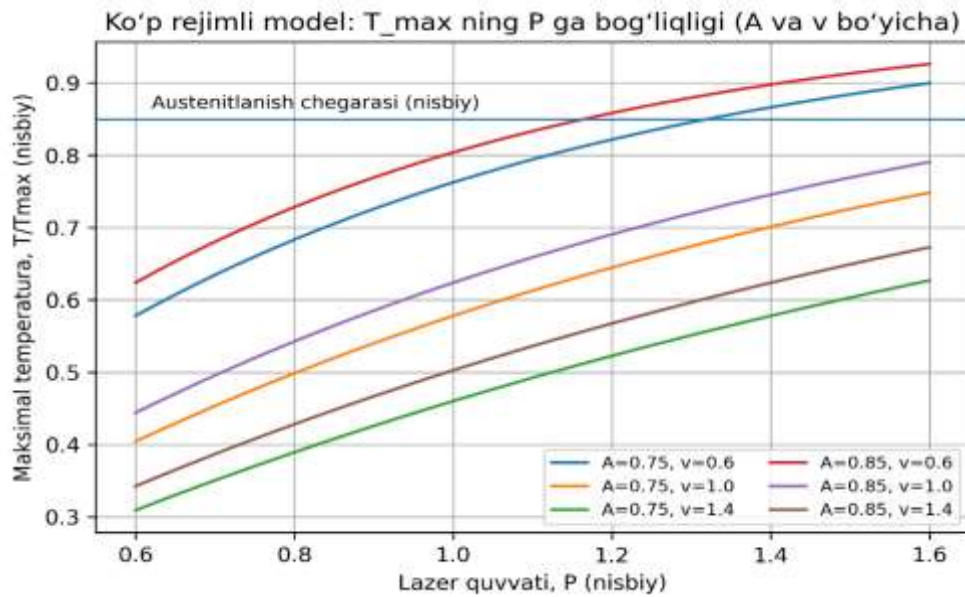
Temperatura gradientlari va termik kengayish farqlari asosida sirt qatlamida siquvchi qoldiq kuchlanishlarning shakllanish ehtimoli baholandi. Ushbu kuchlanish holati tishli g'ildiraklarda kontakt charchashiga va pitting hodisalariga qarshi, aylanuvchi detallar uchun esa egilish va burilish yuklamalari sharoitida yorilishlarning boshlanishini cheklovchi mexanizm sifatida talqin qilindi. Taklif etilgan kompleks lazerli puxtalash metodikasi an'anaviy yakka yo'lakli ishlov berish usullariga nisbatan yuqori moslashuvchanlikka ega. Parametrlarni (lazer quvvati, skanerlash tezligi, qoplash darajasi) boshqarish orqali sirt xossalarini maqsadli optimallashtirish imkoniyati yaratildi.

Mazkur metodika murakkab geometrik shaklli detallar uchun ham qo'llanilishi mumkin bo'lib, mashinasozlik, energetika va transport sohalarida qo'llaniladigan tishli g'ildiraklar hamda aylanuvchi mexanik detallarni ishlab chiqarish va qayta tiklash jarayonlari uchun ilmiy asoslangan yondashuvni ta'minlaydi.

### **3. Natijalar va muhokama**

#### **3.1. Modellashtirish tajribalari**

Kompleks lazerli puxtalash jarayonini miqdoriy baholash maqsadida lazer-material o'zaro ta'sirining issiqlik jarayonlariga asoslangan raqamli modellashtirish yondashuvi qo'llanildi. Modellashtirishda lazer nuri harakatchan issiqlik manbai sifatida qaralib, energiyaning sirt bo'ylab fazoviy-vaqt bo'yicha taqsimlanishi hisobga olindi. Material izotrop va uzluksiz muhit sifatida qabul qilinib, uning issiqlik-fizik xossalari temperatura funksiyasi sifatida o'zgaruvchi deb faraz qilindi. Virtual tajribalarda lazer quvvati, skanerlash tezligi va lazer yo'laklari orasidagi qoplash darajasi sanoatda lazerli puxtalash texnologiyalari uchun xos bo'lgan tipik texnologik diapazonlar doirasida o'zgartirildi.



**2-rasmda. Lazer quvvati ( $P$ ), sirtning nurlanishni yutish koeffitsienti ( $A$ ) hamda skanerlash tezligi ( $v$ ) parametrlarining birgalikdagi ta'siri ostida maksimal temperatura ( $T_{max}$ ) ning normallashtirilgan o'zgarishi**

Raqamli modellashtirish natijalari maksimal temperatura  $T_{max}$  qiymatining chiziqli energiya zichligiga  $E_L = A \cdot \frac{P}{v}$  noxiziqli bog'liqligini ko'rsatdi. Past quvvatlar sohasida temperatura deyarli chiziqli ortadi, yuqori quvvatlarda esa issiqlik tarqalishi va konvektiv yo'qotishlar ta'sirida to'yinish effekti kuzatiladi. Skanerlash tezligining ortishi issiqlik ta'siri davomiyligini qisqartirib, bir xil quvvatda  $T_{max}$  qiymatini pasaytiradi. Absorbivlik koeffitsienti ortishi esa issiqlik manbai samaradorligini kuchaytirib, austenitlanish chegarasiga tezroq erishishga olib keladi.

Modelda konvektiv va nurlanish orqali issiqlik yo'qotishlari sirt chegaraviy shartlari sifatida kiritildi, jarayon eritish bosqichiga o'tmasdan, qattiq fazadagi qizish-sovish rejimida ko'rib chiqildi. Ikki va uch o'lchamli geometrik modellarda hisoblash sohasi tishli g'ildiraklarda tish profili bilan, aylanuvchi detallar uchun esa silindrik kesim bilan chegaralandi. Harakatlanuvchi issiqlik oqimi lazer nuri skanerlash tezligiga mos ravishda modellashtirildi. Sirtga yaqin hududlarda zichlashtirilgan hisoblash to'ri va moslashtirilgan vaqt qadami keskin temperaturalar gradientini aniqlik bilan ifodalash imkonini berdi.

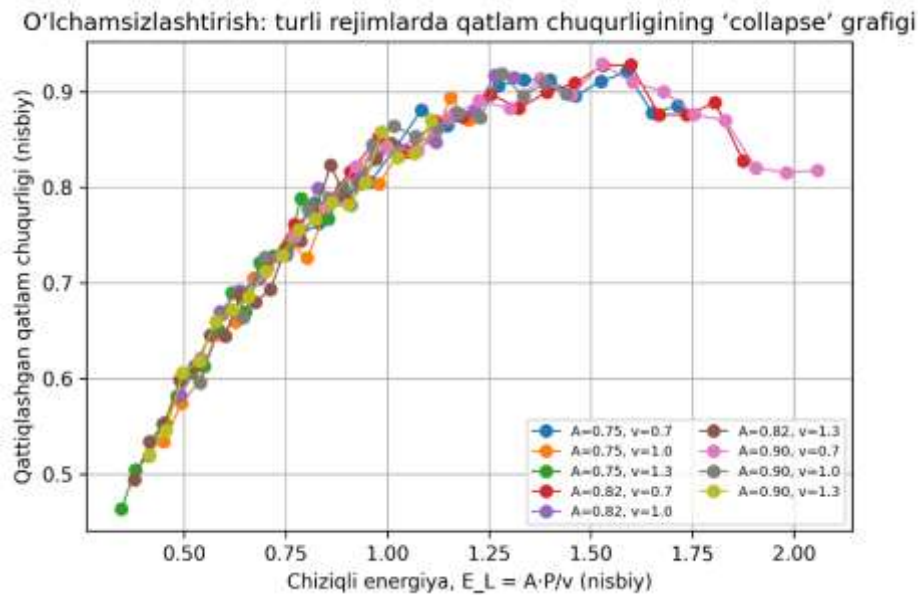
Virtual tajribalar doirasida lazer quvvati, skanerlash tezligi va yo‘laklar orasidagi qoplash darajasi o‘zgartirildi. Lazer quvvatining 0.8–1.4 nisbiy birlik oralig‘ida oshirilishi maksimal temperaturani 25–35 % ga, qattiqlashgan qatlam chuqurligini esa 30–40 % ga orttirishi aniqlandi. Biroq yuqori quvvatlarda issiqlik gradientlarining keskinlashuvi qayd etildi. Skanerlash tezligining 1.0–1.4 nisbiy birlikkacha oshirilishi qatlam chuqurligini 20–25 % ga kamaytiradi, ammo strukturaviy bir xillikni yaxshilaydi. Ko‘p yo‘lakli skanerlashda qoplash darajasining optimal oralig‘i mavjudligi aniqlanib, aynan shu sharoitda issiqlik maydonining bir xilligi va qatlam barqarorligi maksimal qiymatga erishadi.

Temperatura rejimi va sovish tezliklari tahlili tez sovish sharoitida mayda donali, yuqori qattqlikka mos keluvchi strukturaviy holat shakllanishini bashorat qiladi. Temperaturalar gradienti asosida qoldiq kuchlanishlar sifat jihatdan baholanib, sirtga yaqin hududlarda siquvchi qoldiq kuchlanishlar ustunligi aniqlangan. Bu natijalar lazerli puxtalashning charchash va yeyilishga chidamlilikni oshirish mexanizmini izohlaydi.

Umuman, raqamli modellashtirish natijalari lazerli puxtalash jarayonida issiqlik maydoni, strukturaviy o‘zgarishlar va qoldiq kuchlanishlarni yagona tizim sifatida baholash imkonini berdi. Olingan tendensiyalar adabiyotlarda keltirilgan eksperimental ma’lumotlar bilan sifat jihatdan mos keladi va modelning fizik jarayonlarni adekvat aks ettirishini tasdiqlaydi.

### **3.2. Tajriba ma’lumotlari bilan qiyosiy tahlil**

Mazkur tadqiqotda olingan raqamli modellashtirish va virtual tajribalar natijalarini baholash maqsadida, lazer nuri yordamida sirtni puxtalashga bag‘ishlangan ilgari chop etilgan eksperimental tadqiqotlar natijalari bilan taqqoslama tahlil amalga oshirildi. Taqqoslash jarayonida ochiq ilmiy manbalarda e’lon qilingan maqolalardan tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi po‘lat detallar uchun olingan mikroqattqlik, yeyilishga chidamlilik va charchash muddati ko‘rsatkichlari umumlashtirildi. Taqqoslama tahlil absolyut qiymatlarni takrorlashga emas, balki asosiy tendensiyalar va bog‘liqliklarni aniqlashga qaratildi.



3-rasm. Qattiqashtirilgan qatlam chuqurligi va chiziqli energiya bog'liqligi

3-rasmda turli absorbtivlik koeffitsienti ( $A$ ) va skanerlash tezligi ( $v$ ) uchun olingan natijalar chiziqli energiya zichligiga ( $E_L = A \cdot \frac{P}{v}$ ) nisbatan o'lchamsizlashtirildi. Natijada qattiqlashgan qatlam chuqurligi ma'lumotlari turli rejimlar uchun yagona egri atrofida bo'lishi kuzatildi. Bu jarayonning asosiy boshqaruvchi parametri sifatida aynan chiziqli energiya zichligini ajratib ko'rsatadi hamda modellashtirish natijalarining fizik asoslanganligini tasdiqlaydi. O'lchamsizlashtirish parametrlar sonini kamaytirib, texnologik optimallashtirishni soddalashtiradi va murakkab geometriyali detallar uchun universal boshqaruv strategiyasini ishlab chiqish imkonini beradi.

Mazkur yondashuv turli materiallar va lazer qurilmalari sharoitida olingan natijalarni ilmiy jihatdan to'g'ri solishtirish imkonini beradi. Adabiyotlarda qayd etilishicha, lazerli puxtalash natijasida po'lat sirtlarida mikroqattqlik boshlang'ich holatga nisbatan 1,5–2,5 baravar ortadi [5]. Bu holat martensitik va nozik dispersli strukturaning shakllanishi bilan izohlanadi. Virtual tajribalar natijalari ham yuqori sovish tezliklari va mos ravishda yuqori qattqlikka ega strukturaviy holat yuzaga kelishini ko'rsatdi. Raqamli modellashtirish orqali aniqlangan temperaturalar rejimi va qatlam chuqurligi adabiyotlarda keltirilgan eksperimental ma'lumotlar bilan sifat jihatdan mos keladi. Lazerli puxtalashning amaliy afzalliklaridan biri sirtning yeyilishga chidamliligini oshirishidir. Eksperimental

tadqiqotlar lazer bilan qattiqlashtirilgan sirtlarda massaning yo‘qolishi kamayishini va yeyilish mexanizmining barqarorroq rejimga o‘tishini ko‘rsatadi. Modellashtirish natijalari asosida bashorat qilingan qattiqlashgan qatlamning bir xilligi hamda siquvchi qoldiq kuchlanishlarning ustunligi ushbu tribologik yaxshilanishlarni izohlovchi asosiy omil sifatida qaraladi.

Tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi detallar uchun muhim natija – kontakt charchashiga va pitting hodisalariga chidamlilikning oshishidir. Raqamli modellashtirish sirt qatlamida siquvchi qoldiq kuchlanishlarning shakllanishini ko‘rsatdi, bu esa yorilishlarning boshlanishini sekinlashtiruvchi mexanizm sifatida talqin etiladi. Ushbu xulosalar eksperimental ma’lumotlar bilan mantiqan mos keladi va kompleks lazerli puxtalashning mexanik uzatmalar uchun istiqbolli texnologiya ekanligini tasdiqlaydi.

Umuman, olingan natijalar lazerli puxtalash jarayonini matematik jihatdan umumlashtirish, texnologik parametrlarning sirt xossalariga ta’sirini yagona fizik qonuniyatlar asosida tavsiflash hamda sanoat sharoitidagi eksperimental tadqiqotlar uchun ilmiy poydevor yaratish imkonini beradi.

## **XULOSALAR**

Mazkur tadqiqotda tishli g‘ildiraklar va aylanuvchi mexanik detallar ishchi yuzalarini kompleks lazerli puxtalashning ilmiy-texnik asoslari ishlab chiqildi. Lazer–material o‘zaro ta’sirining fizik mexanizmlari, issiqlik uzatish jarayonlari, tezkor termik sikllar sharoitida yuzaga keladigan fazaviy o‘zgarishlar hamda qoldiq kuchlanishlarning shakllanish qonuniyatlari yagona tizim sifatida tahlil qilindi.

Ishning asosiy ilmiy yangiligi lazerli puxtalash jarayonini ko‘p yo‘lakli skanerlash, issiqlik maydonini boshqarish va qoldiq kuchlanishlarni integratsiyalashgan holda yagona matematik model asosida baholashdan iborat. Taklif etilgan kompleks lazerli puxtalash konsepsiyasi murakkab geometrik shaklli detallar uchun sirt xossalarining bir xilligini ta’minlash imkonini beradi. Raqamli modellashtirish va virtual tajribalar natijalari lazer parametrlarining sirt temperaturasi, qattiqlashgan qatlam chuqurligi va strukturaviy holatga ta’sirini miqdoriy baholash imkonini berdi. Olingan natijalar adabiyotlarda

keltirilgan eksperimental ma'lumotlar bilan sifat jihatdan mos kelishi modelning ilmiy asoslanganligini tasdiqladi .

Natijalar kompleks lazerli puxtalashning yeyilishga chidamlilikni, kontakt charchashiga qarshilikni va xizmat muddatini oshirishdagi samaradorligini ko'rsatadi. Tadqiqot mashinasozlik sanoatida yuqori ishonchlikka ega detallarni ishlab chiqarish va qayta tiklash uchun nazariy hamda muhandislik asoslarini shakllantiradi hamda kelgusida sanoat sharoitidagi eksperimental sinovlar uchun ilmiy poydevor yaratadi.

### **Foydalanilgan adabiyotlar**

- [1] Texnologik. Mashinalar, "MEXATRONIKA VA ROBOTOTEXNIKA TIZIMLARI," vol. 7, no. 4, 2024. A.Elmanov.S. Kengboyev.
- [2] A.Elmanov , D.Tojiyev, A.Norkobilov. "Improvement of wear Resistance Properties of Metal Gears using Laser Surface Hardening," p. 11, 2024.
- [3] D. Buvanashakaran. G. Naidu, "Laser surface hardening: A review," *Int J Surf. Sci. Eng.*, vol. 5, pp. 131–151, Jul. 2011, doi: 10.1504/IJSURFSE.2011.041398.
- [4] A. K. Borki, A. El Ouafi, and A. Chebak, "Experimental Investigation of Laser Surface Transformation Hardening of 4340 Steel Spur Gears," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 3, p. 72, Sep. 2019, doi: 10.3390/jmmp3030072.
- [5] L.Lach, "Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, and Industrial Applications," *Crystals*, vol. 14, no. 8, p. 726, Aug. 2024, doi: 10.3390/cryst14080726.
- [6] Z. Sagdoldina, D. Baizhan, D. Buitkenov, G. Tleubergenova, A. Alibekov, and S. Bolatov, "The Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructural Characteristics and Wear Resistance of 9CrSi Steel," *Materials*, vol. 19, no. 2, p. 423, Jan. 2026, doi: 10.3390/ma19020423.