AGRESSIV MUHITDA ISHLAYDIGAN MASHINASOZLIK DETALLARI SIRTINI PLAZMALI YOKI LAZERLI QOPLASH ORQALI ULARNING YEYILISH VA KORROZIYAGA CHIDAMLILIGINI OSHIRISH

Ramazonov Sobirjon Said o‘g’li
Ilmiy rahbar: **Sharipov Jamshid Olimovich**
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
E-mail: ramazonov01@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.22701576

Annotatsiya. Mazkur maqolada agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining yeyilish va korroziyaga chidamliligini oshirishda zamonaviy sirtni muhandislik qilish texnologiyalaridan foydalanish masalalari tadqiq etilgan. Mashina va mexanizmlarning ishchi detallari ekspluatatsiya jarayonida yuqori mexanik yuklamalar, ishqalanish, abraziv zarrachalar, yuqori harorat, namlik hamda kimyoviy faol muhitlarning birgalikdagi ta’siriga duch keladi. Natijada detal sirtida yeyilish, eroziya, korroziya va korrozion-mexanik shikastlanish jarayonlari jadallashib, uning ishlash muddati va ishonchliligi pasayadi. Mazkur muammolarni bartaraf etishda detalning butun hajmini qimmatbaho va yuqori legirlangan materialdan tayyorlash o‘rniga, uning funksional ishchi sirtini maxsus himoya qoplamalari bilan modifikatsiyalash samarali texnologik yechim hisoblanadi. Maqolada plazmali purkash va lazerli qoplash texnologiyalarining fizik-texnologik xususiyatlari, qoplama hosil bo‘lish mexanizmi, mikrostrukturasi, qattiqligi, adgeziyasi hamda yeyilish va korroziyaga chidamliligiga ta’sir etuvchi asosiy omillar tahlil qilingan. Plazmali qoplashda metall, keramika va kompozit materiallardan, lazerli qoplashda esa nikel, kobalt, temir asosidagi qotishmalar hamda karbid va borid fazalariga ega kompozitsion materiallardan foydalanish imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot natijasida qoplama materiali, qatlam qalinligi, energiya zichligi, purkash yoki lazerli eritish tezligi, qoplama g‘ovakligi va asosiy material bilan bog‘lanish mustahkamligini optimal boshqarish orqali detallar sirtining ekspluatatsion xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilash mumkinligi asoslangan. Plazmali va lazerli qoplash texnologiyalarini qo‘llash mashinasozlik detallarining xizmat muddatini uzaytirish, ta’mirlash xarajatlarini kamaytirish, material resurslarini tejash va agressiv muhitlarda ishlaydigan texnik qurilmalarning ishonchliligini oshirishga xizmat qilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: mashinasozlik detallari, agressiv muhit, sirt muhandisligi, plazmali qoplash, lazerli qoplash, himoya qoplamasi, yeyilish, korroziya, korrozion yeyilish, tribologiya, mikrostruktura, mikroqattiqlik, adgeziya, kompozit qoplama, karbidlar, boridlar, sirt modifikatsiyasi, ekspluatatsion chidamlilik, yeyilishga chidamlilik, korroziyaga chidamlilik.

Аннотация. В данной статье исследуется применение современных технологий поверхностной обработки для повышения износостойкости и коррозионной стойкости механических деталей, работающих в агрессивных средах. В процессе эксплуатации рабочие части машин и механизмов подвергаются комбинированному воздействию высоких механических нагрузок, трения, абразивных частиц, высоких температур,

влажности и химически активной среды. В результате ускоряются процессы износа, эрозии, коррозии и коррозионно-механического повреждения поверхности детали, что снижает срок ее службы и надежность. Для устранения этих проблем вместо изготовления всего объема детали из дорогостоящих и высоколегированных материалов эффективным технологическим решением является модификация ее функциональной рабочей поверхности специальными защитными покрытиями. В статье анализируются физико-технологические свойства технологий плазменного напыления и лазерного нанесения покрытий, механизм образования покрытий, микроструктура, твердость, адгезия, а также основные факторы, влияющие на износостойкость и коррозионную стойкость. Рассмотрены возможности использования металлов, керамики и композитных материалов в плазменном нанесении покрытий, а также сплавов на основе никеля, кобальта, железа и композитных материалов с карбидными и боридными фазами в лазерном нанесении покрытий. Результаты исследований показали, что эксплуатационные свойства поверхности деталей могут быть значительно улучшены за счет оптимального контроля материала покрытия, толщины слоя, плотности энергии, скорости напыления или лазерного плавления, пористости покрытия и прочности сцепления с основным материалом. Использование технологий плазменного и лазерного нанесения покрытий может продлить срок службы деталей машин, снизить затраты на ремонт, сэкономить материальные ресурсы и повысить надежность технических устройств, работающих в агрессивных средах.

Ключевые слова: детали машин, агрессивная среда, обработка поверхности, плазменное покрытие, лазерное покрытие, защитное покрытие, эрозия, коррозия, коррозионная эрозия, трибология, микроструктура, микротвердость, адгезия, композитное покрытие, карбиды, бориды, модификация поверхности, эксплуатационная стойкость, эрозионная стойкость, коррозионная стойкость.

Abstract. This article studies the use of modern surface engineering technologies to increase the wear and corrosion resistance of mechanical parts operating in aggressive environments. During operation, the working parts of machines and mechanisms are exposed to the combined effects of high mechanical loads, friction, abrasive particles, high temperature, humidity, and chemically active environments. As a result, the processes of wear, erosion, corrosion, and corrosion-mechanical damage on the surface of the part accelerate, reducing its service life and reliability. To eliminate these problems, instead of making the entire volume of the part from expensive and highly alloyed materials, an effective technological solution is to modify its functional working surface with special protective coatings. The article analyzes the physical and technological properties of plasma spraying and laser coating technologies, the mechanism of coating formation, microstructure, hardness, adhesion, and the main factors affecting wear and corrosion resistance. The possibilities of using metals, ceramics and composite materials in plasma coating, and alloys based on nickel, cobalt, iron and composite materials with carbide and boride phases in laser coating were considered. The research results showed that the operational properties of the surface of the parts can be significantly improved by optimally controlling the coating material, layer thickness, energy density, spraying or laser melting rate, coating porosity and

bond strength to the base material. The use of plasma and laser coating technologies can extend the service life of machine parts, reduce repair costs, save material resources and increase the reliability of technical devices operating in aggressive environments.

Key words: machine parts, aggressive environment, surface engineering, plasma coating, laser coating, protective coating, erosion, corrosion, corrosion erosion, tribology, microstructure, microhardness, adhesion, composite coating, carbides, borides, surface modification, operational durability, erosion resistance, corrosion resistance.

Kirish. Mashinasozlik sanoatining jadal rivojlanishi texnik qurilmalar, mashina va mexanizmlarning ekspluatatsion ishonchliligi, uzoq muddat xizmat qilishi hamda og‘ir ish sharoitlarida barqaror ishlashiga qo‘yiladigan talablarning ortishiga olib kelmoqda. Zamonaviy sanoat korxonalarida mashina detallarining katta qismi yuqori mexanik yuklanish, ishqalanish, zarbali ta’sir, abraziv zarrachalar, yuqori va past harorat, namlik, agressiv gazlar hamda kimyoviy faol suyuqliklar ta’sirida ishlaydi. Ayniqsa, neft-gaz, kimyo, energetika, tog‘-kon, metallurgiya, transport va qishloq xo‘jaligi mashinasozligi kabi sohalarda foydalaniladigan detallar ekspluatatsiya jarayonida bir vaqtning o‘zida bir nechta destruktiv omillarga duch keladi. Natijada ularning ishchi sirtlarida yeyilish, korroziya, eroziya, oksidlanish, termik charchash va boshqa shikastlanish jarayonlari rivojlanadi. Mashinasozlik detallarining ishdan chiqishida sirt qatlamining holati alohida ahamiyatga ega. Chunki tashqi muhit bilan bevosita aloqada bo‘ladigan qatlam aynan detalning sirt qismi bo‘lib, mexanik va fizik-kimyoviy ta’sirlarning asosiy qismi shu hududda yuzaga keladi. Detalning ichki hajmidagi material konstruktiv yuklamani qabul qilish uchun yetarli mexanik xususiyatlarga ega bo‘lishi mumkin, biroq uning sirt qatlami yeyilishga yoki korroziyaga yetarlicha chidamli bo‘lmasa, butun detalning xizmat muddati keskin qisqaradi. Shu sababli zamonaviy mashinasozlikda materialning butun hajmini o‘zgartirishdan ko‘ra, uning funksional xususiyatlarini sirt qatlamida maqsadli ravishda shakllantirishga asoslangan sirt muhandisligi texnologiyalariga katta e’tibor qaratilmoqda. Agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining asosiy muammolaridan biri yeyilish va korroziyaning o‘zaro bog‘langan holda kechishidir. Oddiy mexanik yeyilish jarayonida sirtning mikroskopik qatlamlari ishqalanish natijasida ajralib chiqadi. Korroziya jarayonida esa metallning agressiv muhit bilan kimyoviy yoki elektrokimyoviy reaksiyaga kirishishi natijasida sirtning strukturaviy yaxlitligi buziladi. Ushbu ikki jarayon bir vaqtda sodir bo‘lganda korrozion-mexanik yeyilish yoki tribokorroziya jarayoni yuzaga kelishi mumkin. Bunda mexanik ishqalanish korroziya mahsulotlarini sirtidan olib tashlab, yangi metall qatlamini agressiv muhit ta’siriga ochadi, korroziya esa sirtning mexanik mustahkamligini pasaytirib, keyingi yeyilish jarayonini tezlashtiradi. Mazkur holat mashina detallarining xizmat muddatini qisqartirish bilan birga, ishlab chiqarish jarayonlarida avariya va texnik to‘xtashlar xavfini oshiradi. Detalning ishdan chiqishi natijasida uskunalarni ta’mirlash yoki almashtirishga qo‘shimcha mablag‘, vaqt va material sarflanadi. Shu sababli detallar sirtining yeyilish va korroziyaga chidamliligini oshirish nafaqat materialshunoslik, balki ishlab chiqarish samaradorligi, energiya tejamkorligi va texnik xavfsizlik nuqtayi nazaridan ham muhim masala hisoblanadi. An’anaviy konstruktiv yondashuvda agressiv muhitda ishlaydigan detallarni korroziyaga va yeyilishga chidamli yuqori legirlangan po‘latlar, maxsus qotishmalar yoki boshqa qimmat materiallardan tayyorlash mumkin. Biroq detalning butun

hajmini yuqori ekspluatatsion xususiyatlarga ega materialdan tayyorlash har doim ham iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emas. Chunki bunday materiallarning narxi yuqori bo‘lishi, mexanik ishlov berishning murakkabligi va ishlab chiqarish jarayonining energiya sarfi ortishi mumkin. Bundan tashqari, detalning asosiy hajmida yuqori korroziyaga yoki yeyilishga chidamlilik talab qilinmaydigan hollarda materialning katta qismini maxsus qotishmadan tayyorlash resurslardan samarasiz foydalanishga olib keladi. Shu nuqtayi nazardan, detalning faqat ishchi sirtiga yuqori funksional xususiyatlarga ega himoya qatlamini hosil qilish samarali yechimlardan biri hisoblanadi. Sirtni qoplash texnologiyalari yordamida asosiy materialning konstruktiv va mexanik afzalliklarini saqlab qolgan holda, uning sirtiga yuqori qattiqlik, yeyilishga chidamlilik, korroziyaga barqarorlik, issiqlikka chidamlilik va boshqa maxsus xususiyatlar berish mumkin. Bugungi kunda termik purkash, plazmali purkash, yuqori tezlikli gaz-termik qoplash, lazerli qoplash, elektr-kimyoviy qoplash va boshqa sirt modifikatsiyalash usullari mashinasozlik detallarining ekspluatatsion xususiyatlarini oshirishning istiqbolli yo‘nalishlari sifatida qaralmoqda. Ayniqsa, plazmali va lazerli qoplash texnologiyalari turli xil metall, keramika va kompozit materiallarni detal sirtiga yotqizish yoki metallurgik bog‘langan qatlam hosil qilish imkoniyati bilan ajralib turadi. Plazmali purkash texnologiyasida qoplama materiali yuqori haroratli plazma oqimida qizdirilib yoki qisman eritilib, yuqori tezlikda asosiy detal sirtiga yo‘naltiriladi. Sirtga kelib tushgan zarrachalar deformatsiyalanadi, soviydi va bir-birining ustiga yotqizilib, ko‘p qatlamli qoplama hosil qiladi. Mazkur texnologiyaning muhim afzalliklaridan biri turli xil metall, keramika va kompozit materiallardan foydalanish imkoniyatidir. Zamonaviy tadqiqotlarda plazmali qoplamalarning yeyilishga chidamliligini oshirishda qoplama kukunining tarkibi, zarracha o‘lchami, purkash parametrlari, g‘ovaklik, qattiq fazalar va keyingi ishlov berish usullari muhim omillar sifatida ko‘rsatilmoqda. Plazmali qoplamalarning ekspluatatsion xususiyatlari ularning mikrostrukturasi bilan chambarchas bog‘liq. Qoplama tarkibidagi qattiq karbid, oksid yoki boshqa mustahkamlovchi fazalar sirtning qattiqligini va abraziv yeyilishga qarshiligini oshirishi mumkin. Shu bilan birga, qoplamadagi mikrobo‘shliqlar, yoriqlar va qatlamlararo bog‘lanishning yetarli emasligi korroziyaga chidamlilikni pasaytirishi mumkin. Shuning uchun plazmali qoplashda faqat qattiqlikni oshirish emas, balki zich, bir jinsli va asosiy material bilan yetarlicha mustahkam bog‘langan mikrostrukturani shakllantirish ham muhim hisoblanadi. Lazerli qoplash texnologiyasi esa yuqori energiya zichligiga ega lazer nuri yordamida qoplama materialini detal sirtida lokal eritish va asosiy material bilan birgalikda qotirishga asoslanadi. Natijada qoplama bilan asosiy material o‘rtasida kuchli metallurgik bog‘lanish shakllanadi. Ilmiy manbalarda lazerli qoplashning past suyultirish darajasi, kichik termik ta’sir zonasi va kuchli metallurgik bog‘lanishi uning muhim afzalliklari sifatida qayd etiladi. Lazerli qoplash ayniqsa qimmatbaho va murakkab geometrik shaklga ega detallarni qayta tiklash hamda ularning alohida ishchi zonalarini mustahkamlashda katta imkoniyatlarga ega. Jarayonning lokal xarakteri detalning butun hajmini yuqori harorat ta’siriga duchor qilmasdan faqat kerakli hududni modifikatsiyalash imkonini beradi. Bu esa termik deformatsiyalarni kamaytirish, material sarfini optimallashtirish va yuqori aniqlikdagi qoplamalarni shakllantirish uchun muhimdir. Lazerli qoplamalarda qoplama materialining kimyoviy tarkibi va texnologik parametrlarini boshqarish orqali sirtning mikrostrukturasi va fazaviy tarkibini maqsadli shakllantirish mumkin. Nikel, kobalt va temir asosidagi qotishmalar,

karbidlar, boridlar, oksidlar, kompozit materiallar hamda zamonaviy yuqori entropiyali qotishmalar ushbu yo‘nalishda istiqbolli materiallar sifatida o‘rganilmoqda. So‘nggi tadqiqotlarda lazerli qoplama tarkibi va jarayon parametrlarini optimallashtirish orqali yuqori yuklama, harorat va korrozion muhit sharoitlarida yeyilishga chidamlilikni oshirishga katta e’tibor berilmoqda. Qoplama texnologiyasining samaradorligi faqat qoplama materialining kimyoviy tarkibi bilan belgilanmaydi. Lazer quvvati, lazer nurining diametri, skanerlash tezligi, kukun berish tezligi, qoplama qalinligi, himoya gazining sarfi, substratning boshlang‘ich harorati va sovitish sharoitlari kabi parametrlar ham qoplamaning yakuniy xususiyatlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Energiya kiritilishining haddan tashqari yuqori bo‘lishi suyultirish darajasini oshirishi, donalarning yiriklashishi va ayrim nuqsonlarning paydo bo‘lishiga olib kelishi mumkin. Aksincha, energiya kiritilishining yetarli bo‘lmasligi qoplamaning asosiy material bilan bog‘lanishini yomonlashtirishi va g‘ovaklikni oshirishi mumkin. Shu sababli lazerli qoplash jarayonida texnologik parametrlarni optimal diapazonda tanlash muhim ilmiy va amaliy vazifa hisoblanadi. Agressiv muhitda ishlaydigan detallar uchun qoplama tanlashda tribologik va korroziyaviy xususiyatlarni alohida-alohida emas, balki o‘zaro bog‘langan holda baholash zarur. Masalan, faqat yuqori qattiqlikka ega qoplama abraziv yeyilishga chidamli bo‘lishi mumkin, biroq uning mikrostrukturasi mo‘rt bo‘lsa yoki qoplamada yoriqlar mavjud bo‘lsa, korroziy muhitda ushbu nuqsonlar korroziyaning rivojlanish markaziga aylanishi mumkin. Shuningdek, qoplamaning g‘ovakligi agressiv suyuqliklarning asosiy materialga kirib borishini osonlashtirib, korroziya jarayonini tezlashtirishi mumkin. Shu sababli zamonaviy sirt muhandisligida “qattiqroq qoplama — yaxshi qoplama” degan oddiy yondashuvdan ko‘ra, “mikrostruktura — fazaviy tarkib — qattiqlik — adgeziya — g‘ovaklik — korroziyaga chidamlilik — yeyilish mexanizmi” o‘rtasidagi kompleks bog‘liqlikni o‘rganish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, korroziya va mexanik yeyilish birgalikda kechadigan sharoitlarda qoplamaning tribokorroziya xususiyatlarini baholash dolzarb ilmiy masalalardan biridir. Bundan tashqari, qoplamaning samaradorligini oshirish uchun qoplashdan keyingi ishlov berish jarayonlaridan ham foydalanish mumkin. Masalan, lazerli qayta eritish, issiqlik bilan ishlov berish, sirtni mexanik mustahkamlash va zichlashtirish usullari qoplamaning mikrostrukturasi, g‘ovakligi, qattiqligi va yeyilishga chidamliligini boshqarishga yordam beradi. Zamonaviy tadqiqotlar plazmali qoplamalarda muhrlash, lazerli qayta eritish va kukun tarkibini modifikatsiyalash kabi usullar qoplama xususiyatlarini yaxshilashi mumkinligini ko‘rsatmoqda. Agressiv muhitlarda ishlaydigan mashinasozlik detallarining sirtini qoplashning yana bir muhim jihati — texnologiyaning resurs va iqtisodiy samaradorligidir. Ishchi sirtni mustahkamlash orqali yangi detal ishlab chiqarish o‘rniga mavjud detalning xizmat muddatini uzaytirish mumkin. Ayniqsa, katta o‘lchamli, murakkab geometrik shaklga ega yoki yuqori qiymatli detallarni qayta tiklashda lazerli qoplash texnologiyasi material va vaqtni tejash imkonini beradi. 2024-yilgi tadqiqotlarda lazerli qoplash texnologiyasi shikastlangan komponentlarni qayta tiklash va ularning sirtiga yeyilish hamda korroziyaga chidamli funksional qatlamlar hosil qilish uchun qo‘llanilayotgani qayd etilgan. Shunday qilib, agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining yeyilish va korroziyaga chidamliligini oshirish masalasi zamonaviy materialshunoslik, tribologiya va sirt muhandisligining muhim ilmiy yo‘nalishlaridan biridir. Ushbu muammoni hal qilishda plazmali va lazerli qoplash texnologiyalaridan foydalanish yuqori funksional xususiyatlarga

ega sirt qatlamlarini shakllantirish, detalning xizmat muddatini uzaytirish va uning ekspluatatsion ishonchliligini oshirish imkonini beradi.

Mazkur tadqiqotning maqsadi agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining sirtini plazmali va lazerli qoplash orqali ularning yeyilish hamda korroziyaga chidamliligini oshirishning ilmiy-texnologik asoslarini tahlil qilishdan iborat. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining xizmat muddatini oshirish masalasida plazmali va lazerli qoplash texnologiyalarining yeyilish hamda korroziya jarayonlariga kompleks ta'siri yagona "material–qoplama–mikrostruktura–ekspluatatsiya muhiti" tizimi asosida ko'rib chiqiladi. Tadqiqotning amaliy ahamiyati esa ishlab chiqarish va ta'mirlash korxonalarida nasos, kompressor, val, shtok, klapan, turbina va boshqa mas'uliyatli detallar sirtini funksional qoplamalar yordamida mustahkamlash, ularning xizmat muddatini uzaytirish va ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish imkoniyatlari bilan belgilanadi. Umuman olganda, zamonaviy sirt muhandisligi texnologiyalaridan oqilona foydalanish mashinasozlik detallarining faqat qattiqligini oshirish emas, balki ularning agressiv muhitdagi kompleks ekspluatatsion barqarorligini ta'minlashga qaratilishi lozim. Buning uchun qoplama tarkibi, mikrostrukturasi, texnologik parametrlar va real ish sharoitlari o'rtasidagi bog'liqlikni chuqur o'rganish hamda har bir detal uchun individual qoplama tizimini tanlash muhim ahamiyat kasb etadi.

Adabiyotlar tahlili. Agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining sirtini mustahkamlash, ularning yeyilish va korroziyaga chidamliligini oshirish masalalari so'nggi yillarda materialshunoslik, tribologiya, metallurgiya va sirt muhandisligining muhim ilmiy yo'nalishlaridan biriga aylandi. Mashina detallarining ekspluatatsion resursini oshirish bo'yicha olib borilayotgan tadqiqotlarda materialning hajmiy xususiyatlarini o'zgartirishdan ko'ra, uning ishchi sirtini maqsadli modifikatsiyalashga asoslangan texnologiyalarga katta e'tibor berilmoqda. Bunday yondashuv detalning asosiy konstruktiv xususiyatlarini saqlab qolgan holda, uning sirtiga yuqori qattiqlik, yeyilishga chidamlilik, korroziyaga barqarorlik va termik mustahkamlik kabi funksional xususiyatlarni berish imkonini beradi. Adabiyotlarda sirtni muhandislik qilishning termik purkash, plazmali purkash, lazerli qoplash, elektr-kimyoviy qoplash, diffuzion to'yintirish va boshqa usullari keng o'rganilgan. Ularning orasida plazmali va lazerli qoplash texnologiyalari yuqori ekspluatatsion yuklamalar ostida ishlaydigan detallar uchun istiqbolli usullar sifatida ajralib turadi. Mazkur texnologiyalarning umumiy maqsadi detalning ishchi sirtida mexanik va fizik-kimyoviy ta'sirlarga bardoshli funksional qatlam hosil qilishdan iborat.

Plazmali qoplash bo'yicha tadqiqotlar tahlili. Plazmali purkash texnologiyasi termik purkashning rivojlangan usullaridan biri bo'lib, unda qoplama materiali yuqori haroratli plazma oqimida qizdiriladi va yuqori tezlikda substrat sirtiga yo'naltiriladi. Sirtga kelib tushgan zarrachalar deformatsiyalanib, tez sovishi natijasida bir-birining ustiga yotqizilgan qatlamlardan tashkil topgan qoplama hosil qiladi. Zamonaviy adabiyotlarda plazmali qoplamalarning yeyilishga chidamliligi qoplama materialining turi, kukun zarrachalarining o'lchami va morfologiyasi, plazma oqimining harorati va tezligi, purkash masofasi, substratning harorati hamda qoplamaning g'ovakligi bilan bog'liqligi ko'rsatiladi. 2024-yilda chop etilgan keng qamrovli sharhda plazmali purkash orqali hosil qilinadigan yeyilishga chidamli qoplamalar temir, nikel va mis asosidagi metall tizimlari, oksidli

keramika hamda boshqa kompozit materiallarni o‘z ichiga olishi qayd etilgan. Tadqiqotchilar qoplama xususiyatlarini faqat material tarkibi bilan emas, balki kukun dizayni, purkash rejimi va purkashdan keyingi ishlov berish orqali ham boshqarish mumkinligini ta’kidlaydilar. Plazmali qoplamalarning tribologik xususiyatlarini tadqiq etishda qattiqlik, ishqalanish koeffitsiyenti, yeyilish tezligi, qoplama zichligi va sirt g‘adir-budirligi asosiy ko‘rsatkichlar sifatida qaraladi. Qattiq fazalarning qoplama matritsasiga kiritilishi natijasida sirtning deformatsiyaga qarshiligi ortadi va abraziv yeyilish jarayoni sekinlashadi. Ayniqsa, karbidli va oksidli komponentlar bilan mustahkamlangan qoplamalar yuqori yuklamali sharoitlarda istiqbolli hisoblanadi. Biroq plazmali qoplamalarning asosiy muammolaridan biri ularning lamellyar mikrostrukturaga ega bo‘lishi va ma’lum darajada g‘ovaklik hosil qilishidir. G‘ovaklar, mikrobo‘shliqlar va qatlamlararo chegaralar agressiv muhitning qoplama ichiga kirib borishiga sharoit yaratishi mumkin. Shu sababli korroziyaga chidamlilik talab qilinadigan detallar uchun plazmali qoplamaning faqat mexanik yeyilishga chidamliligini emas, balki uning zichligi va elektrokimyoviy barqarorligini ham baholash zarur. 2025-yilda e’lon qilingan NiCrAlY plazmali qoplamalariga bag‘ishlangan sharhda bunday qoplamalar yeyilish, eroziya va korroziyaga qarshi himoyada samarali ekanligi ko‘rsatilgan. Tadqiqotlarda ikkilamchi qattiq fazalarni qo‘shish qoplamaning qattiqligi va yuqori haroratdagi yeyilishga chidamliligini yaxshilashi mumkinligi qayd etilgan. Shu bilan birga, plazmali qoplamalarda qoplama zichligini oshirish uchun muhrlash, lazerli qayta eritish va modifikatsiyalash kabi qo‘shimcha texnologiyalarni qo‘llash imkoniyatlari ham o‘rganilmoqda. Bunday post-treatment jarayonlari qoplamadagi g‘ovaklikni kamaytirib, uning mexanik va korroziyaviy xususiyatlarini yaxshilashi mumkin.

Lazerli qoplash bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar. Lazerli qoplash zamonaviy sirt muhandisligining eng istiqbolli texnologiyalaridan biri hisoblanadi. Ushbu usulda yuqori energiya zichligiga ega lazer nuri yordamida substrat sirtida lokal eritilgan vanna hosil qilinadi va unga kukun yoki sim ko‘rinishidagi qoplama materiali kiritiladi. Qoplama materiali va substratning bir qismi birgalikda erib, tez sovishi natijasida metallurgik jihatdan mustahkam bog‘langan sirt qatlami hosil bo‘ladi. Lazerli qoplashning asosiy afzalliklari sifatida kichik termik ta’sir zonasi, past suyultirish darajasi, asosiy material bilan kuchli metallurgik bog‘lanish, qoplama qalinligini aniq boshqarish va lokal ishlov berish imkoniyati ko‘rsatiladi. 2021-yilda chop etilgan keng qamrovli sharhda lazerli qoplashning mashina detallarini ta’mirlash va funksional qoplamalar hosil qilishda keng qo‘llanayotgani qayd etilgan. Shu tadqiqotda jarayonni modellashtirish, monitoring qilish va texnologik parametrlarni optimallashtirish masalalari ham alohida ko‘rib chiqilgan. Lazerli qoplamaning sifatini belgilovchi asosiy texnologik parametrlar qatoriga lazer quvvati, nur diametri, skanerlash tezligi, kukun berish tezligi, fokuslash holati, qoplama yo‘nalishi va substratning boshlang‘ich harorati kiradi. Ushbu parametrlarning o‘zgarishi qoplama geometriyasi, suyultirish darajasi, mikrostrukturasi, fazaviy tarkibi, qattiqligi va qoldiq kuchlanishlariga ta’sir qiladi. 2026-yilda e’lon qilingan zamonaviy sharhda lazerli qoplash jarayonida parametrlarni optimallashtirish natijasida mayda donali hujayraviy yoki ekviaksial mikrostrukturalar hosil bo‘lishi va buning natijasida qattiqlik, yeyilishga hamda korroziyaga chidamlilik yaxshilanishi mumkinligi ko‘rsatilgan. Aksincha, ortiqcha issiqlik kiritilishi donalarning yiriklashishi, suyultirishning ortishi va nuqsonlar paydo bo‘lish ehtimolini oshirishi mumkin. Shu sababli lazerli qoplash jarayonida “yuqori energiya —

yuqori sifat” tamoyilidan foydalanish doimo ham to‘g‘ri emas. Optimal energiya zichligi va skanerlash tezligi shunday tanlanishi kerakki, bir tomondan, qoplama bilan asosiy material o‘rtasida yetarli metallurgik bog‘lanish hosil bo‘lsin, ikkinchi tomondan esa ortiqcha suyultirish, termik deformatsiya, yoriqlar va boshqa nuqsonlar yuzaga kelmasin.

Lazerli qoplamalarda yuqori entropiyali qotishmalardan foydalanish. So‘nggi yillarda lazerli qoplash materiallari orasida yuqori entropiyali qotishmalar (High-Entropy Alloys — HEA) alohida ilmiy qiziqish uyg‘otmoqda. Ushbu materiallarning ko‘p komponentli tarkibi, yuqori qattiqligi, mustahkamligi va yeyilishga chidamliligi ularni funksional sirt qoplamalari uchun istiqbolli materialga aylantirgan. 2024-yilda Xiang va hammualliflar tomonidan e’lon qilingan sharhda lazerli qoplangan yuqori entropiyali qotishmalarning yeyilishga chidamliligi batafsil tahlil qilingan. Tadqiqotda qoplama materialining tarkibi, lazer texnologik parametrlari, mustahkamlovchi fazalar, amorf faza, yordamchi qoplash usullari va post-treatment jarayonlarining yeyilishga chidamlilikka ta’siri ko‘rib chiqilgan. Mualliflar lazerli qoplama asosiy material bilan yaxshi metallurgik bog‘langan qatlam hosil qilishi va sirtning yeyilishga chidamliligini sezilarli yaxshilashi mumkinligini qayd etadilar. Yuqori entropiyali qotishmalarda qattiq eritma mustahkamlanishi, donalarni maydalash, ikkilamchi qattiq fazalarning hosil bo‘lishi va ayrim hollarda amorf strukturaning shakllanishi qoplamaning yuqori qattiqligi va yeyilishga chidamliligini ta’minlashi mumkin. Biroq HEA qoplamalarining xususiyatlari qotishma tarkibi va lazerli qoplash parametrlariga juda kuchli bog‘liq bo‘lib, barcha HEA tizimlarini bir xil sharoitda qo‘llash mumkin emas. Yuqori haroratda ishlaydigan detallar uchun ham HEA qoplamalari istiqbolli hisoblanadi. 2024-yilgi tadqiqotlarda Al, Ti, Cu, Si va Mo kabi elementlar hamda TiC, WC va NbC kabi qattiq keramika fazalarining yuqori entropiyali qotishma qoplamalarining yuqori haroratdagi yeyilish xususiyatlariga ta’siri tahlil qilingan.

Korroziyaga chidamlilik bo‘yicha tadqiqotlar. Agressiv muhitda ishlaydigan detallar uchun qoplamaning mexanik yeyilishga chidamliligi bilan bir qatorda korroziyaga chidamliligi ham muhim hisoblanadi. Korroziya jarayonining rivojlanishida qoplamaning kimyoviy tarkibi, fazaviy strukturasi, g‘ovakligi, sirt holati va agressiv muhitning pH qiymati, harorati hamda ion tarkibi muhim rol o‘ynaydi. Lazerli qoplangan yuqori entropiyali qotishmalarning korroziyaga chidamliligiga bag‘ishlangan tadqiqotlarda Ni, Cr va Co kabi elementlarning ma’lum miqdorda qo‘shilishi qoplamaning passiv himoya xususiyatlarini yaxshilashi mumkinligi ko‘rsatilgan. Biroq elementlarning ortiqcha miqdorda kiritilishi fazalar taqsimotining notekisligiga, kristall panjaradagi buzilishlarga yoki mikrostrukturaviy nomutanosibliklarga olib kelishi mumkin. Korroziyaga chidamlilikni baholashda qoplamaning zichligi alohida ahamiyatga ega. Qoplamada mavjud mikrobo‘shliqlar, yoriqlar va boshqa nuqsonlar agressiv elektrolitning asosiy metallga yetib borishiga sabab bo‘lishi mumkin. Natijada qoplama ostida lokal korroziya, pitting yoki galvanik korroziya rivojlanishi ehtimoli ortadi. Shuning uchun zamonaviy tadqiqotlarda korroziyaga chidamlilikni faqat qoplama kimyoviy tarkibi orqali emas, balki “tarkib–mikrostruktura–nuqsonlar–passivlanish” tizimi asosida baholashga e’tibor berilmoqda.

Umuman olganda, ilmiy adabiyotlar tahlili plazmali va lazerli qoplash texnologiyalarining mashinasozlik detallarining sirt xususiyatlarini yaxshilashda katta imkoniyatlarga ega ekanligini ko‘rsatadi. Plazmali qoplash katta sirtlarni qoplash, turli xil metall, keramika va kompozit materiallardan foydalanish imkoniyati bilan ajralib tursa,

lazerli qoplash asosiy material bilan mustahkam metallurgik bog‘langan, zich va aniq nazorat qilinadigan funksional qatlam hosil qilish imkonini beradi. Shu bilan birga, agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining sirtini himoyalash uchun faqat yuqori qattiqlikni ta’minlash yetarli emas. Qoplamaning mikrostrukturasi, fazaviy tarkibi, g‘ovakligi, adgeziyasi, qoldiq kuchlanishlari, korroziyaga chidamliligi va tribologik xususiyatlari kompleks ravishda baholanishi kerak. Shundan kelib chiqib, mazkur tadqiqotning asosiy ilmiy yo‘nalishi “qoplama materiali – texnologik parametrlar – mikrostruktura – yeyilish – korroziya – tribokorroziya – ekspluatatsion resurs” o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni aniqlashga qaratilishi maqsadga muvofiqdir. Bunday kompleks yondashuv agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining xizmat muddatini ilmiy asosda prognoz qilish, optimal qoplama materialini tanlash va texnologik jarayon parametrlarini takomillashtirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari va muhokamasi. Tadqiqot natijalari agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining ekspluatatsion ishonchliligi, avvalo, ularning sirt qatlamining fizik-mexanik va fizik-kimyoviy xususiyatlariga bog‘liqligini ko‘rsatdi. Detalning ishchi sirtida bir vaqtning o‘zida mexanik yuklama, ishqalanish, abraziv ta’sir, namlik, yuqori harorat va kimyoviy faol muhitning mavjudligi yeyilish va korroziya jarayonlarining o‘zaro kuchayishiga olib keladi. Shu sababli bunday detallar uchun sirtni oddiy himoyalash emas, balki uning tribologik va korroziyaviy xususiyatlarini kompleks ravishda yaxshilash talab etiladi. Tadqiqot davomida plazmali va lazerli qoplash texnologiyalarining asosiy afzalliklari, ularning qoplama mikrostrukturasi va ekspluatatsion xususiyatlarga ta’siri hamda agressiv muhitda foydalanish imkoniyatlari qiyosiy tahlil qilindi. Tahlil natijalariga ko‘ra, har ikkala texnologiya ham detal sirtining qattiqligi va yeyilishga chidamliligini oshirish imkonini beradi, biroq hosil bo‘ladigan qoplamaning strukturasi, asosiy material bilan bog‘lanish mexanizmi va nuqsonlar tabiati jihatidan ular o‘rtasida sezilarli farqlar mavjud.

Plazmali qoplamalarning ekspluatatsion xususiyatlari. Plazmali purkash orqali hosil qilingan qoplamalarning asosiy afzalligi turli xil metall, keramika va kompozit materiallarni detal sirtiga yotqizish imkoniyatidir. Qoplama tarkibiga yuqori qattiqlikdagi karbidlar yoki boshqa mustahkamlovchi fazalarning kiritilishi sirtning plastik deformatsiyaga va abraziv yeyilishga qarshiligini oshiradi. Plazmali qoplama mikrostrukturasi, odatda, deformatsiyalangan va tez sovigan zarrachalarning ketma-ket joylashishidan tashkil topadi. Mazkur strukturada qatlamlararo chegaralar, mikrobo‘shliqlar va ayrim hollarda oksidlangan hududlar mavjud bo‘lishi mumkin. Shu sababli qoplamaning mexanik mustahkamligi va korroziyaga chidamliligi uning g‘ovaklik darajasi hamda qatlamlararo bog‘lanish sifatiga bevosita bog‘liq. Tadqiqotning tahliliy natijalari shuni ko‘rsatadiki, plazmali qoplamalarda qoplama materialining qattiqligi oshirilishi abraziv yeyilishga qarshilikni kuchaytiradi, biroq qoplamaning haddan tashqari mo‘rtlashishi mikro yoriqlar paydo bo‘lish xavfini oshirishi mumkin. Demak, optimal qoplama tarkibini tanlashda yuqori qattiqlik bilan bir qatorda qovushqoqlik va strukturaviy yaxlitlik ham hisobga olinishi kerak. Plazmali qoplamalarning korroziyaga chidamliligini oshirishda esa qoplamaning zichligi hal qiluvchi omillardan biri hisoblanadi. Agressiv elektrolitlar mikrobo‘shliqlar va ochiq g‘ovaklar orqali qoplama ostidagi metall sirtga yetib borishi mumkin. Bu esa qoplama osti korroziyasining rivojlanishiga olib keladi. Shu sababli plazmali qoplamalardan keyingi lazerli qayta eritish,

muhrlash yoki boshqa zichlashtirish texnologiyalaridan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Lazerli qoplamalarning tadqiqot natijalari. Lazerli qoplash texnologiyasi orqali hosil qilingan qoplamalarda asosiy material bilan kuchli metallurgik bog‘lanish shakllanishi ushbu texnologiyaning muhim afzalligi sifatida aniqlandi. Lazer energiyasining detal sirtiga lokal kiritilishi qoplama materiali va substratning ma’lum qismini eritib, keyinchalik tez qotuvchi metallurgik qatlam hosil qiladi. Bunday qatlamning zichligi yuqori bo‘lishi, g‘ovaklikning nisbatan pastligi va asosiy material bilan bog‘lanishning mustahkamligi uning agressiv muhitda ishlash imkoniyatlarini oshiradi. Ayniqsa, yuqori bosim va mexanik yuklama sharoitida qoplamaning substratdan ajralib ketmasligi muhim ahamiyatga ega. Lazerli qoplashda qoplama mikrostrukturasi jarayonning yuqori sovish tezligi bilan chambarchas bog‘liq. Tez qotish jarayoni mayda donali yoki dendritlararo strukturaga ega qatlamlarning shakllanishiga olib kelishi mumkin. Bunday mikrostruktura sirtning mexanik mustahkamligi va yeyilishga chidamliligini yaxshilash uchun qulay sharoit yaratadi. Biroq lazerli qoplash jarayonida texnologik parametrlarning noto‘g‘ri tanlanishi qoplama sifatining pasayishiga olib kelishi mumkin. Lazer quvvatining ortiqcha oshirilishi asosiy materialning haddan tashqari erishi va qoplamaning suyultirish darajasining ortishiga sabab bo‘lishi mumkin. Lazer energiyasining yetarli emasligi esa qoplamaning asosiy material bilan to‘liq bog‘lanmasligi va g‘ovaklikning ortishiga olib keladi. Shu sababli tadqiqotda lazer quvvati, skanerlash tezligi, kukun berish tezligi va lazer nuri diametri o‘zaro bog‘liq parametrlar sifatida qaraldi. Optimal texnologik rejim qoplamaning zichligi, metallurgik bog‘lanishi, mikrostrukturasi va mexanik xususiyatlarini birgalikda ta’minlashi kerak.

Yeyilishga chidamlilikning o‘zgarishi. Tadqiqot natijalari qoplamaning yeyilishga chidamliligini baholashda faqat sirt qattiqligini hisobga olish yetarli emasligini ko‘rsatdi. Yeyilish jarayoniga qoplama mikrostrukturasi, qattiq fazalarning taqsimlanishi, sirt g‘adir-budirligi, adgeziya, qoldiq kuchlanishlar va ishqalanish sharoitlari ham sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Abrasiv yeyilish sharoitida qattiq zarrachalar bilan mustahkamlangan qoplamalar samarali himoya qatlamini hosil qiladi. Karbidli fazalar ishqalanish juftligidagi qattiq zarrachalarning qoplama matritsasiga chuqur kirib borishiga qarshilik ko‘rsatadi. Natijada materialning sirtidan ajralib chiqadigan zarrachalar miqdori kamayadi. Adgezion yeyilish sharoitida esa qoplama sirtining kimyoviy va strukturaviy xususiyatlari muhim rol o‘ynaydi. Sirtning haddan tashqari g‘adir-budirligi kontakt bosimining lokal ravishda oshishiga va ishqalanish jarayonining kuchayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli qoplashdan keyingi mexanik ishlov berish orqali sirt g‘adir-budirligini optimallashtirish muhim hisoblanadi.

Tadqiqot natijalarini umumlashtirish asosida qoplamalarning yeyilishga chidamliligini oshirish mexanizmi quyidagi ketma-ketlikda ifodalanishi mumkin:

qoplama materiali tanlovi → optimal mikrostruktura → yuqori sirt qattiqligi → deformatsiyaga qarshilik → yeyilish tezligining pasayishi → detal xizmat muddatining uzayishi.

Biroq ushbu zanjirning samaradorligi qoplamaning korroziyaga chidamliligi bilan ham chambarchas bog‘liq.

Korroziyaga chidamlilik natijalari. Agressiv muhitda ishlaydigan detallar uchun korroziyaga chidamlilikni oshirish qoplamaning asosiy vazifalaridan biri hisoblanadi. Tadqiqot natijalari qoplamaning kimyoviy tarkibi bilan bir qatorda uning zichligi va

nuqsonsizligi ham korroziyaviy barqarorlikni belgilashini ko‘rsatdi. Korroziya jarayoni qoplamadagi mikro yoriqlar, g‘ovaklar yoki qatlamlararo bo‘shliqlar orqali tezlashishi mumkin. Agressiv muhit qoplama ichiga kirib, asosiy metall bilan kontaktga kirganda lokal korroziya o‘choqlari shakllanishi ehtimoli ortadi. Shu nuqtayi nazardan, lazerli qoplamalarning zich va metallurgik bog‘langan strukturasi ayrim ekspluatatsion sharoitlarda muhim ustunlikka ega. Qoplama tarkibida xrom, nikel va molibden kabi elementlarning mavjudligi korroziyaga chidamlilikni oshirishga xizmat qilishi mumkin. Ushbu elementlar ishtirokida sirtning passivlanish xususiyatlari yaxshilanib, agressiv muhitning metall asosga ta’siri kamayadi. Biroq korroziyaga chidamlilikni oshirishda qoplama tarkibining optimal nisbatini ta’minlash muhim. Ayrim legirlovchi elementlarning haddan tashqari ko‘payishi qoplamada ikkilamchi mo‘rt fazalar hosil bo‘lishiga yoki mikrostrukturaviy notekislikning kuchayishiga sabab bo‘lishi mumkin. Shu sababli qoplama tarkibi va texnologik parametrlar birgalikda optimallashtirilishi lozim.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining ishonchliligini oshirish masalasini faqat materialning hajmiy xususiyatlarini yaxshilash orqali hal etish yetarli emas. Detalning ishdan chiqishi ko‘pincha aynan sirt qatlamida boshlanadi. Shuning uchun sirtni funksional qoplama bilan modifikatsiyalash materialning resursidan samaraliroq foydalanish imkonini beradi. Plazmali qoplash texnologiyasida qoplama tarkibi va purkash rejimini boshqarish orqali katta sirtlarni yeyilishga chidamli qatlam bilan himoyalash mumkin. Biroq korroziyaga qarshi yuqori samaradorlikka erishish uchun qoplamaning g‘ovakligini kamaytirish muhimdir. Lazerli qoplashda esa metallurgik bog‘lanish va yuqori zichlik afzalliklari korroziy va mexanik ta’sirlar birgalikda mavjud bo‘lgan sharoitlarda muhim ustunlik beradi. Shu bilan birga, lazerli qoplashning samaradorligi texnologik parametrlarning aniqligiga juda bog‘liq. Lazer quvvati va skanerlash tezligining optimal nisbatini aniqlash qoplama vannasining barqarorligi, mikrostrukturasi va nuqsonsiz qatlam shakllanishini ta’minlaydi. Demak, kelgusidagi tadqiqotlarda qoplash parametrlarini eksperimental ma’lumotlar va matematik modellashtirish asosida optimallashtirish maqsadga muvofiq. Tadqiqotning yana bir muhim jihati shundaki, agressiv muhitda qoplamaning samaradorligini baholashda faqat standart yeyilish yoki korroziya sinovlari bilan chegaralanish mumkin emas. Real ekspluatatsiya sharoitiga yaqinlashtirilgan tribokorroziya sinovlari qoplamaning haqiqiy xizmat ko‘rsatish imkoniyatlarini aniqroq baholashga yordam beradi. Umuman olganda, plazmali va lazerli qoplash texnologiyalarining rivojlanishi mashinasozlikda “detalni almashtirish” konsepsiyasidan “detal sirtini qayta tiklash va funksionallashtirish” konsepsiyasiga o‘tish imkonini bermoqda. Bu yondashuv materiallardan oqilona foydalanish, ta’mirlash muddatlarini qisqartirish, ishlab chiqarish samaradorligini oshirish va mashina detallarining ekologik hamda iqtisodiy samaradorligini yaxshilashga xizmat qiladi. Kelgusidagi tadqiqotlar uchun ayniqsa gradient qoplamalar, nanokompozit qoplamalar, yuqori entropiyali qotishmalar, karbid bilan mustahkamlangan qoplamalar, lazer-parametrlarni sun’iy intellekt asosida optimallashtirish hamda real vaqt rejimida qoplama sifatini monitoring qilish yo‘nalishlari istiqbolli hisoblanadi.

Xulosa. Olib borilgan tadqiqot va ilmiy adabiyotlar tahlili natijasida agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining ekspluatatsion ishonchliligi va xizmat muddatini

oshirishda sirtni plazmali hamda lazerli qoplash texnologiyalaridan foydalanish yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlandi. Mashina detallarining ishdan chiqish jarayonlari ko‘pincha ularning sirt qatlamida boshlanib, mexanik yeyilish, abraziv va adgezion yeyilish, korroziya, eroziya hamda ushbu jarayonlarning o‘zaro ta’siri natijasida jadallashadi. Shu sababli detalning butun hajmini qimmat va yuqori legirlangan materialdan tayyorlash o‘rniga faqat ishchi sirtiga zarur funksional xususiyatlarga ega qoplama berish texnik va iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq yondashuv hisoblanadi. Tadqiqot natijalari plazmali qoplash texnologiyasi katta yuzali detallarni yeyilishga chidamli materiallar bilan qoplash, qoplama tarkibini turli metall, keramika va kompozit materiallar asosida shakllantirish imkonini berishini ko‘rsatdi. Plazmali qoplamalarning samaradorligi qoplama materiali, zarracha o‘lchami, purkash masofasi, plazma parametrlari, substrat harorati va qoplamadan keyingi ishlov berish jarayonlariga bevosita bog‘liq. Ayniqsa, qoplama g‘ovakligini kamaytirish va qatlamlararo bog‘lanishni yaxshilash korroziyaga chidamlilikni oshirishda muhim ahamiyatga ega. Zamonaviy tadqiqotlar ham plazmali qoplamalarning yeyilishga chidamliligini oshirishda kukun tarkibini optimallashtirish, muhrlash va lazerli qayta eritish kabi usullar muhimligini ko‘rsatmoqda. Lazerli qoplash texnologiyasining asosiy afzalligi esa qoplama va asosiy material o‘rtasida mustahkam metallurgik bog‘lanish hosil bo‘lishi, suyultirish zonasining nisbatan kichikligi va issiqlik ta’sir zonasining cheklanganligi bilan izohlanadi. Bu xususiyatlar yuqori mexanik yuklama va agressiv muhit sharoitida ishlaydigan mas’uliyatli detallar uchun lazerli qoplashni istiqbolli texnologiyaga aylantiradi. Lazerli qoplash bo‘yicha zamonaviy sharhlarda ushbu texnologiyaning yeyilishga va korroziyaga chidamli funksional qoplamalar hosil qilish hamda mashina detallarini qayta tiklashdagi imkoniyatlari qayd etilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, qoplamaning yuqori qattiqligi o‘z-o‘zidan uning maksimal ekspluatatsion samaradorligini ta’minlamaydi. Qoplama mikrostrukturasi, donalar o‘lchami, mustahkamlovchi fazalarning taqsimlanishi, g‘ovaklik, mikro yoriqlar, qoplama-asos adgeziyasi, qoldiq kuchlanishlar va sirt g‘adir-budirligi ham yeyilish va korroziya jarayonlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli qoplama samaradorligini baholashda “qattiqlik–mikrostruktura–adgeziya–yeyilish–korroziya” o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlik kompleks ravishda o‘rganilishi lozim.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari “qoplama materiali – texnologik parametrlar – mikrostruktura – mexanik xususiyatlar – yeyilish – korroziya – tribokorroziya – ekspluatatsion resurs” tizimi asosida yondashish agressiv muhitda ishlaydigan mashinasozlik detallarining ishonchliligini oshirishning eng maqbul yo‘nalishlaridan biri ekanligini ko‘rsatdi. Kelgusidagi tadqiqotlarda plazmali va lazerli qoplash jarayonlarini matematik modellashtirish, texnologik parametrlarni optimallashtirish, yuqori entropiyali va nanokompozit qoplamalarni ishlab chiqish, qoplama sifatini real vaqt rejimida monitoring qilish hamda sun’iy intellekt asosida optimal qoplash rejimlarini aniqlash istiqbolli yo‘nalishlar sifatida qaralishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., Yang, Z., Xu, P., & Liu, Z. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology, 138*, 106915. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915.
2. Xiang, D., Liu, Y., Yu, T., Wang, D., Leng, X., Wang, K., Liu, L., Pan, J., Yao, S., & Chen, Z. (2024). Review on wear resistance of laser cladding high-entropy alloy coatings. *Journal of Materials Research and Technology, 28*, 911–934. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.138.
3. Gao, R., Huang, Y.-F., Zhou, X., Ma, G., Jin, G., Wang, H.-D., et al. (2024). Material system and tribological mechanism of plasma sprayed wear resistant coatings: Overview. *Surface and Coatings Technology, 483*, 130758. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130758.
4. Ouyang, C., Deng, R., Wei, R., Li, H., Wang, R., & Zhao, C. (2025). Methods and techniques for enhancing wear resistance of laser cladding coatings: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes, 152*, 1123–1149.
5. Han, Y., & Fu, H. (2024). Improvement of high temperature wear resistance of laser-cladding high-entropy alloy coatings: A review. *Metals, 14*(9), 1065.
6. Davis, J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International.
7. Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
8. Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2005). *Laser Cladding*. CRC Press.
9. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing* (4th ed.). Springer.
10. Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
11. Davis, J. R. (2001). *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. ASM International.
12. Liu, M., Cai, Y., Duan, C., & Li, G. (2024). Key techniques in parts repair and remanufacturing based on laser cladding: A review. *Journal of Manufacturing Processes, 132*, 994–1014. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.039.
13. *Corrosion of Laser Cladding High-Entropy Alloy Coatings: A Review*. (2022). *Coatings, 12*(11), 1669.
14. *Microstructures, Corrosion Resistance and Wear Resistance of High-Entropy Alloys Coatings with Various Compositions Prepared by Laser Cladding: A Review*. (2022). *Coatings, 12*(7), 1023.
15. *A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications*. (2021). *Journal of Manufacturing Processes*.
16. *NiCrAlY Plasma Sprayed Coatings: A Critical Review*. (2025). *Results in Surfaces and Interfaces*.