Vol. 1, Issue 1

MASHINASOZLIKDA KOMPOZITSION POLIMER QOPLAMALARNING ADGEZION MUSTAHKAMLIGINI OSHIRISHNING ZAMONAVIY USULLARI VA ISTIQBOLLARI

Nazirov Bobur Ikromjon o‘g‘li,
Z.U.Maxammadjonov
“Avtomobilsozlik va transport” kafedrasi dotsenti
texnika fanlari falsafa doktori, dotsent

Zamonaviy mashinasozlikda detallar va konstruksiyalarning xizmat muddatini uzaytirish, ularning yeyilishga, korroziyaga va tashqi muhit ta’siriga chidamliligini oshirish muhim texnologik vazifalardan biri hisoblanadi. Ushbu maqsadlarda metall sirtlarga turli funksional qoplamalar qo‘llaniladi. Kompozitsion polimer qoplamalar o‘zining tarkibini o‘zgartirish, turli funksional qo‘shimchalarni kiritish va kerakli ekspluatatsion xususiyatlarni shakllantirish imkoniyati bilan alohida ahamiyatga ega. Biroq qoplamaning samaradorligi faqat uning mexanik xususiyatlariga emas, balki metall asos bilan hosil qiladigan chegara qatlamining mustahkamligiga ham bog‘liq.

Adgeziya - turli materiallar sirtlari orasida yuzaga keladigan o‘zaro tortishish va bog‘lanish hodisasi bo‘lib, qoplamaning metall asosga birikish darajasini tavsiflaydi. Adgezion mustahkamlik yetarli bo‘lmaganda qoplamada ko‘chish, pufaklanish, yorilish yoki qatlamlararo ajralish kabi nuqsonlar yuzaga kelishi mumkin. Bunday holatlar detalning himoya xususiyatlarini pasaytirib, ta’mirlash zarurati va ekspluatatsion xarajatlarning ortishiga olib kelishi mumkin.

Adgezion bog‘lanishning shakllanishida metall sirtning tozaligi, oksid qatlamining holati, mikronotekisliklar, sirt energiyasi, polimerning kimyoviy tarkibi va qoplamani qotirish sharoitlari muhim rol o‘ynaydi. Shu sababli adgeziyani oshirish masalasini faqat polimer tarkibini o‘zgartirish orqali hal etish yetarli emas. Metall sirtni

tayyorlash, uning fizik-kimyoviy xususiyatlarini boshqarish va qoplama materialini to‘g‘ri tanlashni yagona texnologik tizim sifatida ko‘rib chiqish zarur.

Zamonaviy adabiyotlarda lazerli teksturalash, plazmali sirt modifikatsiyasi va kimyoviy adgezion promouterlardan foydalanish kabi yondashuvlarga alohida e’tibor qaratilmoqda. Masalan, 2025-yilda Progress in Surface Science jurnalida e’lon qilingan sharh lazerli teksturalashning sirt morfologiyasi, kimyoviy xususiyatlari va bog‘lanish mustahkamligiga ta’sirini tizimli ravishda ko‘rib chiqadi [1]. Metall-polimer birikmalarida silanli qatlamlardan foydalanish ham bog‘lanish mexanizmlarini boshqarishning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi [2].

Mazkur tezisning maqsadi mashinasozlikda kompozitsion polimer qoplamalarning adgezion mustahkamligiga ta’sir qiluvchi omillarni ilmiy manbalar asosida tahlil qilish, zamonaviy sirt modifikatsiyasi usullarining imkoniyatlari va cheklovlarini qiyoslash hamda qoplamalarning ekspluatatsion ishonchliligini oshirish bo‘yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat.

Metall va polimer orasidagi adgezion bog‘lanish bir nechta mexanizmlarning o‘zaro ta’siri natijasida shakllanadi. Ular qatoriga mexanik ilashish, fizik o‘zaro ta’sirlar va kimyoviy bog‘lanishlar kiradi. Ayrim material tizimlarida molekulalarning o‘zaro diffuziyasi ham muhim bo‘lishi mumkin. Mazkur mexanizmlarning nisbiy ahamiyati metall turi, polimer tarkibi, sirtning tayyorlanish holati va qoplama hosil qilish texnologiyasiga bog‘liq.

Birinchi muhim omil - metall sirtning tozaligidir. Sirtga yopishib qolgan moy, chang, oksid qoldiqlari yoki boshqa ifloslantiruvchi moddalar polimer bilan metallning bevosita o‘zaro ta’sirini cheklashi mumkin. Natijada qoplama ayrim hududlarda yaxshi birikib, boshqa hududlarda zaif bog‘lanish hosil qiladi. Shu sababli qoplama surtishdan oldin sirtni mos mexanik yoki kimyoviy usulda tozalash va qayta ifloslanishning oldini olish muhimdir.

Ikkinchi omil - sirtning mikrogeometriyasi. Muayyan darajadagi g‘adir-budurlik polimerning metall yuzadagi mikronotekisliklarga kirib borishiga va qotgandan so‘ng mexanik ilashish hosil bo‘lishiga yordam berishi mumkin. Biroq sirtning haddan tashqari notekisligi har doim ham yuqori adgeziyani ta’minlamaydi. Chuqur yoriqlar, ishlovdan qolgan zarrachalar va notekis qoplangan joylar zaif nuqtalarning shakllanishiga sabab bo‘lishi mumkin. Demak, maqsad sirt g‘adir-budurligini maksimal darajaga yetkazish emas, balki muayyan material uchun maqbul sirt tuzilishini hosil qilishdir.

Uchinchi omil - sirtning namlanish xususiyatidir. Qoplama materiali metall yuzaga bir tekis tarqalishi va sirt bilan yetarli kontakt hosil qilishi lozim. Sirt energiyasi va qoplama tarkibining o‘zaro muvofiqligi bu jarayonga ta’sir ko‘rsatadi. Biroq yaxshi namlanish yuqori adgezion mustahkamlikning o‘zi bilan teng emas. Sirtning kimyoviy holati, qoplamaning qotishi va interfeysdagi nuqsonlar ham hisobga olinishi kerak.

To‘rtinchi omil - polimer matritsasi va kompozit tarkibi. Polimer turi, to‘ldiruvchilarning kimyoviy tabiati, zarrachalar o‘lchami, ularning taqsimlanishi hamda qoplamaning qotish darajasi interfeys xususiyatlariga ta’sir qiladi. Masalan, nanoto‘ldiruvchilar ayrim kompozitsiyalarda mexanik xususiyatlarni yaxshilashi mumkin, ammo ularning haddan tashqari ko‘p qo‘shilishi yoki notekis tarqalishi qoplama ichida nuqsonlar hosil qilishi mumkin. Shuning uchun kompozitning hajmiy xususiyatlari bilan bir qatorda uning metall sirt bilan o‘zaro ta’sirini ham baholash zarur.

Beshinchi omil - ekspluatatsion sharoitlar. Harorat o‘zgarishi, namlik, kimyoviy muhit, tebranish va takroriy mexanik yuklanishlar qoplama hamda metall orasidagi bog‘lanishning uzoq muddatli barqarorligiga ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Dastlabki sinovda yuqori adgeziya ko‘rsatgan qoplama ham uzoq muddatli foydalanishda xususiyatlarini yo‘qotishi ehtimoldan xoli emas. Shu bois adgezion mustahkamlikni baholashda dastlabki mexanik ko‘rsatkichlar bilan birga muhit ta’siridan keyingi holatni ham hisobga olish lozim.

Adgezion mustahkamlikni oshirishning zamonaviy usullari hozirda quyidagilardan iborat hisoblanadi:

Mexanik sirt tayyorlash abraziv ishlov, silliqlash, qum yoki boshqa abraziv zarrachalar bilan ishlov berish kabi usullarni o‘z ichiga oladi [5]. Ushbu jarayonlar sirt iflosliklarini va ayrim oksid qatlamlarini olib tashlash, shuningdek, mikronotekisliklar hosil qilish imkonini beradi. Natijada polimerning metall sirt bilan mexanik ilashishi kuchayishi mumkin. Mazkur usulning asosiy afzalligi - texnologiyaning nisbatan sodda va ko‘plab ishlab chiqarish sharoitlariga mosligidir. Shu bilan birga, ishlov berish sifati abraziv material, bosim, ishlov davomiyligi va metallning xususiyatlariga bog‘liq. Noto‘g‘ri tanlangan rejim sirtning ortiqcha shikastlanishiga, geometrik aniqlikning buzilishiga yoki ishlovdan keyin sirtga zarrachalar yopishib qolishiga olib kelishi mumkin.

Mexanik tayyorlashni boshqa usullar bilan birgalikda qo‘llash mumkin. Masalan, abraziv ishlovdan so‘ng sirtni tozalash va zaruratga qarab kimyoviy promouter bilan ishlov berish mexanik ilashish bilan bir qatorda kimyoviy bog‘lanishni ham yaxshilashga qaratilgan yondashuv hisoblanadi. Biroq bunday kombinatsiyaning samaradorligi muayyan metall-polimer tizimi uchun alohida baholanishi kerak.

Lazerli teksturalash metall sirtida oldindan belgilangan mikro- va nanogeometrik tuzilmalarni shakllantirish imkonini beradigan zamonaviy texnologiyadir. Lazer energiyasi yordamida sirtning ayrim qismlari ishlanadi, natijada uning topografiyasi va ayrim hollarda kimyoviy holati o‘zgaradi. Bunday tuzilmalar polimerning sirtga kirib borishi va mexanik ilashishning kuchayishi uchun sharoit yaratishi mumkin. Zhang va hammualliflarning 2025-yildagi sharhida lazerli teksturalash orqali sirt morfologiyasi, g‘adir-budurligi va namlanish xususiyatlarini boshqarish imkoniyatlari tahlil qilingan [1]. Ushbu yondashuvning muhim jihati shundaki, lazer yordamida faqat sirtni tozalash emas, balki bog‘lanish uchun maqsadli mikrogeometriya hosil qilish ham mumkin.

Lazerli ishlovning samaradorligi lazer quvvati, impuls davomiyligi, skanerlash tezligi, nurlanish energiyasi va hosil qilinadigan teksturaning shakliga bog‘liq. Rejimlar noto‘g‘ri tanlansa, sirtning ortiqcha erishi, oksidlanishi yoki kerakli geometriyaning buzilishi kuzatilishi mumkin. Bundan tashqari, lazer uskunalarining qiymati va texnologik jarayonni sozlashga bo‘lgan talablar uni barcha ishlab chiqarish korxonalarida bir xil darajada qulay qilmaydi. Shu sababli lazerli teksturalashni, ayniqsa, yuqori aniqlikdagi sirt tayyorlash, murakkab shaklli detallar va yuqori ishonchlilik talab etiladigan birikmalar uchun istiqbolli usul sifatida ko‘rib chiqish mumkin. Biroq uning mexanik abraziv ishlovdan ustunligini tasdiqlash uchun aynan bir xil materiallar, qoplama sharoitlari va sinov metodikalarida olingan natijalar zarur.

Plazmali ishlov material sirtining fizik-kimyoviy xususiyatlarini o‘zgartirishga qaratilgan texnologiyadir [6]. Plazma ta’sirida sirt ifloslikларini kamaytirish, ayrim funksional guruhlarni hosil qilish yoki o‘zgartirish va namlanish xususiyatlarini boshqarish mumkin. Ushbu o‘zgarishlar polimer qoplamaning sirt bilan kontaktini yaxshilashga yordam berishi mumkin. Plazmali ishlovning muhim afzalliklaridan biri - ayrim jarayonlarda sirtni nisbatan kam miqdordagi kimyoviy reagentlar bilan modifikatsiyalash imkoniyatidir. Shu bilan birga, plazmaning turi, ishlov davomiyligi, gaz tarkibi, quvvat va materialning boshlang‘ich holati natijaga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. 2024-yilda Materials jurnalida chop etilgan sharhda plazma yordamida polimer sirtlarini modifikatsiyalash va qoplamalar adgeziyasini yaxshilash bo‘yicha natijalar tahlil qilingan [3]. Unda plazmali ishlov natijalari barcha materiallarda bir xil bo‘lmasligi, sirtning namlanishi yaxshilangani bilan adgezion kuch har doim ham mutanosib ravishda ortmasligi ta’kidlangan. Bu holat sirtning vaqt o‘tishi bilan dastlabki xususiyatlariga qaytishi va zaif bog‘langan oraliq qatlamlarning shakllanishi kabi omillar bilan izohlanishi mumkin. Mazkur manbaning asosiy obyekti polimer sirtlari bo‘lsa-da, undagi xulosalar plazma ta’sirining mexanizmlarini tushunishda foydalidir. Metall-polimer tizimlari uchun esa ishlov aynan metallga, polimerga yoki har ikkala sirtga

qo‘llanilayotganini farqlash zarur. Chunki bu holatlarda yuz beradigan fizik-kimyoviy o‘zgarishlar bir xil bo‘lmaydi.

Silanli birikmalar metall kabi noorganik sirtlar bilan organik polimerlar orasidagi bog‘lanishni yaxshilash uchun qo‘llaniladigan kimyoviy vositalardan biridir. Ularning samaradorligi molekulaning turli qismlari orqali noorganik sirt va polimer bilan o‘zaro ta’sir hosil qila olishiga bog‘liq. Tegishli kimyoviy sharoitlarda silan molekulalari metall sirtidagi oksid qatlam bilan bog‘lanib, boshqa funksional guruhi orqali polimer bilan o‘zaro ta’sirlashishi mumkin. Silanning turi, eritma tarkibi, gidroliz va kondensatsiya sharoitlari, sirtning tozaligi va hosil bo‘ladigan qatlam qalinligi yakuniy natijaga ta’sir qiladi. Silan qatlamining haddan tashqari qalin yoki notekis bo‘lishi har doim ham yaxshi natija bermaydi. Bundan tashqari, har bir silan barcha polimerlar bilan bir xil darajada samarali bog‘lanmaydi.

Zhang va hammualliflar 2024-yilda chop etilgan maqolada lazer bilan biriktirilgan zanglamaydigan po‘lat va uzluksiz tolalar bilan mustahkamlangan termoplastik kompozit orasidagi bog‘lanishni yaxshilashda ikki qatlamli silan plyonkasining imkoniyatlarini o‘rgangan [2]. Bu misol kimyoviy promouterlarni materiallar juftligiga mos tanlash muhimligini ko‘rsatadi. Biroq mazkur natijalarni boshqa metall va polimer tizimlariga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirish mumkin emas.

Silanli promouterlarning asosiy afzalligi - kimyoviy bog‘lanishni boshqarish imkoniyatidir. Cheklovlari esa qo‘shimcha texnologik bosqich, eritma sharoitlarini nazorat qilish zarurati, ayrim reagentlar bilan ishlash xavfsizligi va uzoq muddatli barqarorlikni tekshirish talablaridan iborat.

Ko‘rib chiqilgan texnologiyalar turli mexanizmlar orqali adgezion mustahkamlikni oshirishga qaratilgan. Mexanik ishlov asosan sirt tozaligi va mikronotekisliklarni boshqarishga xizmat qiladi. Lazerli teksturalash sirtning mikrogeometriyasini yuqori aniqlikda shakllantiradi. Plazmali modifikatsiya sirtning

fizik-kimyoviy holatini o‘zgartirishga yordam beradi. Silanli promouterlar esa metall va polimer orasida kimyoviy bog‘lanish hosil qilish yoki uni kuchaytirishga yo‘naltiriladi.

1-jadval

Adgeziyani oshirish usullarining qiyosiy tavsifi [1;3]

Usul	Asosiy mexanizm	Afzalligi	Asosiy cheklovi
Mexanik ishlov	Sirtni tozalash va mexanik ilashish	Nisbatan sodda, keng qo‘llash mumkin	Sirt sifati va tozaligiga bog‘liq
Lazerli teksturalash	Mikrogeometriya va sirt holatini boshqarish	Yuqori aniqlik, maqsadli tekstura hosil qilish	Uskuna qiymati va rejimlarni optimallashtirish talabi
Plazmali ishlov	Sirt kimyosi va namlanish xususiyatlarini o‘zgartirish	Sirtni maqsadli modifikatsiyalash imkoniyati	Ta’sir material va ishlov parametrlariga bog‘liq
Silanli promouter	Kimyoviy ko‘prik va interfeys bog‘lanishini shakllantirish	Metall-polimer o‘zaro ta’sirini kimyoviy boshqarish	Materialga mos tanlash va qo‘shimcha texnologik bosqich

Jadvaldan ko‘rinadiki, usullarning birortasini barcha vaziyatlar uchun mutlaq eng samarali deb belgilash to‘g‘ri emas (1-jadval). Ularning natijasi qoplama materiali, metall turi, sirtning dastlabki holati, ishlab chiqarish sharoiti va ekspluatatsion talablar bilan belgilanadi. Masalan, yuqori aniqlikdagi mikrogeometriya talab etiladigan detal uchun lazerli teksturalash maqsadga muvofiq bo‘lishi mumkin. Kimyoviy bog‘lanishni kuchaytirish talab etilganda silanli promouterlar ko‘rib chiqiladi. Ishlab chiqarish xarajatlari cheklangan sharoitda esa mexanik tayyorlash boshlang‘ich yechim bo‘lishi mumkin. Plazmali ishlov esa sirtning fizik-kimyoviy xususiyatlarini boshqarish zarur bo‘lgan holatlarda istiqbolli hisoblanadi.

Adgeziyani oshirishda bir nechta usulni ketma-ket qo‘llash alohida qiziqish uyg‘otadi. Masalan, metall sirtni lazer yordamida teksturalash, undan keyin mos silanli promouter bilan ishlov berish va polimer qoplamani belgilangan sharoitda qotirish gibrid texnologik zanjir sifatida ko‘rib chiqilishi mumkin. Bunday yondashuvning nazariy afzalligi shundaki, lazerli ishlov sirtning geometrik xususiyatlarini boshqarishi, silanli

qatlam esa kimyoviy bog‘lanishga ko‘maklashishi mumkin. Shunga qaramay, ikki usulni birlashtirish natijasi ularning alohida ta’sirlari yig‘indisiga teng bo‘lishi shart emas. Silan qatlamining teksturalangan sirtga bir tekis joylashishi, lazer bilan hosil qilingan oksid qatlamining holati va qoplamaning qotish sharoitlari yakuniy samaradorlikka ta’sir qilishi mumkin. Shuning uchun gibrid yondashuvni tayyor, barcha materiallar uchun tasdiqlangan yechim sifatida emas, balki materialga moslashtirilishi va tajriba orqali tekshirilishi lozim bo‘lgan istiqbolli texnologik yo‘nalish sifatida baholash kerak.

Adgezion mustahkamlikni oshirishga qaratilgan har qanday texnologiyaning samaradorligini ishonchli baholash uchun standartlashtirilgan sinovlardan foydalanish zarur [7]. Sinov usuli qoplama turi, metall asos, detal geometriyasi va foydalanish sharoitlariga mos tanlanishi kerak.

ASTM D4541-22 standarti metall kabi qattiq asoslarda qoplamaning ajralishigacha bo‘lgan tortib chiqarish mustahkamligini baholash tartibini belgilaydi [4]. Pull-off sinovida maxsus moslama qoplama yuzasiga biriktiriladi va unga yuzaga perpendikulyar kuch beriladi. Ajralish sodir bo‘lgan paytdagi kuch qoplama tizimining mustahkamligini tavsiflash uchun ishlatiladi. Biroq ushbu sinovda aniqlangan qiymatni har doim faqat metall-polimer interfeysining mustahkamligi deb talqin qilish mumkin emas. Ajralish qoplama ichida, metall bilan qoplama chegarasida yoki sinov moslamasini biriktiruvchi yelim qatlamida yuz berishi mumkin. Shu sababli ajralish joyi va buzilish turi ham qayd etilishi lozim. Standartning o‘zida ham o‘lchov natijalariga uskuna, asos materiali, yelim turi, qotish hamda sinov sharoitlari ta’sir qilishi ko‘rsatilgan [4].

O‘tkazilgan adabiyotlar tahlili asosida mashinasozlikda kompozitsion polimer qoplamalarning adgezion mustahkamligini oshirish metall sirtning holati, polimer tarkibi va qoplama hosil qilish texnologiyasini o‘zaro muvofiqlashtirishni talab etishi aniqlandi.

Mexanik sirt tayyorlash sirtni tozalash va mexanik ilashishni yaxshilashga xizmat qilishi mumkin. Lazerli teksturalash sirtning mikrogeometriyasini maqsadli boshqarish imkonini beradi. Plazmali ishlov sirtning fizik-kimyoviy xususiyatlarini

modifikatsiyalashga yo‘naltirilgan. Silanli adgezion promouterlar esa mos materiallar tizimida metall va polimer orasidagi kimyoviy bog‘lanishni kuchaytirishi mumkin. Har bir usulning samaradorligi materiallar juftligi va texnologik sharoitlarga bog‘liq bo‘lib, universal yechim mavjud deb hisoblash uchun yetarli asos yo‘q.

Yuqoridagi tahlildan kelib chiqib, quyidagi amaliy takliflar ishlab chiqildi:

– Qoplama surtishdan oldin metall sirtning tozaligi, oksid qatlamining holati va mikrogeometriyasini nazorat qilish zarur;

– Sirtni tayyorlash usulini metall turi, polimerning kimyoviy tarkibi va detalning ekspluatatsion vazifasiga mos tanlash lozim;

– Yuqori aniqlik talab etiladigan birikmalarda lazerli teksturalashni, kimyoviy bog‘lanishni kuchaytirish zarur bo‘lgan tizimlarda esa mos silanli promouterlardan foydalanish imkoniyatini baholash maqsadga muvofiq;

– Gibrid texnologiyalarni qo‘llashdan oldin ularning alohida va birgalikdagi ta’sirini standartlashtirilgan sinovlar orqali tekshirish kerak;

– Adgezion mustahkamlikni baholashda faqat o‘lchangan qiymat emas, balki buzilish turi, sinov sharoiti va tashqi muhit ta’siridan keyingi natijalar ham qayd etilishi lozim;

Umuman olganda, kompozitsion polimer qoplamalarning ishonchliligini oshirish uchun sirtni tayyorlash, interfeysning fizik-kimyoviy xususiyatlarini boshqarish va qoplama tarkibini moslashtirishga asoslangan kompleks yondashuv istiqbolli hisoblanadi. Ushbu yondashuvning muayyan mashinasozlik detali uchun samaradorligi esa tegishli tajribalar va standartlashtirilgan sinovlar orqali tasdiqlanishi kerak.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zhang X., Wang R., Meng S. et al. Advances and perspectives in laser texturing for adhesion enhancement: a comprehensive research progress // Progress in Surface Science. — 2025. — Vol. 100, Issue 3. — Article 100781. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2025.100781.

2. Zhang Z., Zhao H., Liu F. et al. Improving interface bonding strength of laser-welded steel/CFRTP hybrid joint via bilayer silane film // Journal of Materials Processing Technology. — 2024. — Vol. 327. — Article 118352. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118352.

3. Surface Modification of Polymers by Plasma Treatment for Appropriate Adhesion of Coatings // Materials. — 2024. — Vol. 17, No. 7. — Article 1494. — DOI: https://doi.org/10.3390/ma17071494.

4. ASTM International. ASTM D4541-22: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. — DOI: https://doi.org/10.1520/D4541-22.

5. Silane Coatings for Corrosion and Microbiologically Influenced Corrosion Resistance of Mild Steel: A Review // Materials. — 2022. — Vol. 15, No. 21. — Article 7809. — DOI: https://doi.org/10.3390/ma15217809.

6. Le Rossignol B. et al. Chemical adhesion of silicone elastomers on primed metal surfaces: A comprehensive survey of open and patent literatures // Progress in Organic Coatings. — 2015. — Vol. 80. — P. 120–141. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.11.022.

7. Min J., Wan H., Carlson B. E., Lin J., Sun C. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review // Optics & Laser Technology. — 2020. — Vol. 126. — Article 106188. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106188.