TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.10/2025.27.12.T.01.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

TURG‘UNALIYEV ELBEK TO‘XTANAZAR O‘G‘LI

TEMIR YO‘L TRANSPORTINING METALLOPOLIMER TIZIMLARIDAGI TRIBOMEXANIK JARAYONLAR QONUNIYATLARINI O‘RGANISH ASOSIDA SIKLIK YUKLANISHGA CHIDAMLI GETEROKOMPOZIT MATERIALLAR TARKIBLARINI ISHLAB CHIQISHNING ILMIY ASOSLARI

05.02.01- Mashinasozlikda materialshunoslik. Quymachilik. Metallarga termik va bosim ostida ishlov berish. Qora, rangli va noyob metallar metallurgiyasi.

TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent-2026

UO‘K: 620.22-022.532:539.388.1:621.891:629.4

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора наук (DSc)

Content of the dissertation abstract of doctor of science (DSc)

Turg‘unaliyev Elbek To‘xtanazar o‘g‘li
Temir yo‘l transportining metallopolimer tizimlaridagi tribomexanik jarayonlar qonuniyatlarini o‘rganish asosida siklik yuklanishga chidamli geterokompozit materiallar tarkiblarini ishlab chiqishning ilmiy asoslari…..... 3

Тургуналиев Элбек Тухтаназар угли
Научные основы разработки гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, на основе изучения закономерностей трибомеханических процессов в металлополимерных системах железнодорожного транспорта……..... 27

Turgunaliev Elbek Tukhtanazar ugli
Scientific principles for the development of heterocomposite material compositions resistant to cyclic loading, based on the study of tribomechanical processes in metal-polymer systems of railway transport…. 55

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works…….....…….. 59

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.10/2025.27.12.T.01.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

TURG‘UNALIYEV ELBEK TO‘XTANAZAR O‘G‘LI

TEMIR YO‘L TRANSPORTINING METALLOPOLIMER TIZIMLARIDAGI TRIBOMEXANIK JARAYONLAR QONUNIYATLARINI O‘RGANISH ASOSIDA SIKLIK YUKLANISHGA CHIDAMLI GETEROKOMPOZIT MATERIALLAR TARKIBLARINI ISHLAB CHIQISHNING ILMIY ASOSLARI

05.02.01- Mashinasozlikda materialshunoslik. Quymachilik. Metallarga termik va bosim ostida ishlov berish. Qora, rangli va noyob metallar metallurgiyasi.

TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent-2026

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.3.DSc/T3923 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat transport universiteti ta’lim muassasasida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) ilmiy Kengash veb-sahifasida (http://tstu.uz) va «Ziyonet» Axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:	**Ziyamuxamedova Umida Alijonovna** texnika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	**Abduraxmonov Umarbek** fizika-matematika fanlari doktori
	Riskulov Alimjon Axmadjonovich texnika fanlari doktori, professor
	Turaxodjayev Nodir Djaxongirovich texnika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot:	**Jizzax politexnika instituti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat transport universiteti huzuridagi DSc.10/2025.27.12.T.01.04 raqamli ilmiy Kengashning 2026-yil 24-noyabr soat 10^{00} dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100167, Toshkent, Temir yo‘lchi ko‘chasi 1-uy. Tel.: (99871) 299-00-01; faks: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat transport universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (407 raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100167, Toshkent, Temiryo‘lchi ko‘chasi 1-uy. Tel.: (99871)299-05-66)

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil 12 - noyabr kun tarqatildi.
(2026-yil «12»09 dagi 3-raqamli reyestr bayonnomasi).

A.V. Umarov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

E.U. Teshabayeva
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, t.f.d., professor

N.Q.Tursunov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor.

Kirish (Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda temir yo‘l infratuzilmasining barqaror ishlashini ta’minlash, poyezdlar harakat xavfsizligini oshirish va rels yo‘li elementlarining xizmat muddatini uzaytirish rels mahkamlash tizimlarida yuz beradigan tribomexanik jarayonlarni barqarorlovchi organomineral qo’mpozitsiyalar asosidagi prokladkalar ishlatiladi. Shu bilan birga po‘lat rels, metall prujinali mahkamlagich, polimer prokladka, prujinali va yon izolyatorlar hamda temir-beton shpaldan tashkil topgan rels mahkamlash uzeli murakkab metallopolimer tizimlarda yuklarning uzatilishi kontakt bosimining notekis taqsimlanishi, elastik-viskoelastik deformatsiya, mikrosiljish, ishqalanish, friksion qizish, sirt qatlamlarining charchashi va yeyilishini, takroriy dinamik, zarbiy va vibratsion yuklar ta’sirida polimer elementlarda qoldiq deformatsiya, sirpanish, sirt yemirilishi va mikronuqsonlarni, adgezion, abraziv, charchash va fretting-yeyilish mexanizmlari rivojlanib, elementlarning elastikligi, geometrik barqarorligi kontakt bosimi, ishqalanish koeffitsienti, deformatsion gisterezis, friksion qizish, yeyilish intensivligi va siklik shikastlanish o‘rtasidagi qonuniy bog‘lanishlarni aniqlash muhim ahamiyatga ega.

Dunyoda temir yo‘l konstruksiyalari uchun yuqori siklik chidamlilikka ega polimer, elastomer, organomineral va tolali kompozit materiallarning yangi avlodini yaratish, rels mahkamlash tizimi elementlarini tanlashda ularning statik mustahkamligi bilan bir qatorda, uzoq muddatli siklik yuklanishdagi deformatsion-relaksatsion holati, tribologik xossalari, kontakt yuzalarining shikastlanish, polimer matritsa, mineral to‘ldiruvchilar, tolali mustahkamlovchilar, elastiklashtiruvchilar va funksional modifikatorlardan tashkil topgan geterokompozit materiallardan yaratish, ularni fazalararo adgeziya, komponentlarning dispersligi va taqsimlanishi, matritsaning strukturaviy holati, g‘ovaklik hamda ichki kuchlanishlar qattiqlik, elastik tiklanish, yeyilishga va charchashga chidamlilikni, tarkib, struktura, tribomexanik xossalar va siklik chidamlilik o‘rtasidagi qonuniy bog‘lanishlarni aniqlash hamda ularni real metallopolimer kontakt sharoitlariga mos ravishda boshqarish borasida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda.

Respublikamizda temir yo‘l transporti infratuzilmasini modernizatsiya qilish, sanoat mahsulotlarini mahalliylashtirish, mavjud xomashyo resurslaridan samarali foydalanish va yuqori qo‘shilgan qiymatli raqobatbardosh materiallar ishlab chiqarishni kengaytirish bo‘yicha tizimli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida «.....iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish....sanoat tarmoqlarida yo‘qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish..... havoga chiqariladigan zararli gazlar hajmini 20 foizga qisqartirish»[1] vazifalari belgilab berilgan. Bu borada, mahalliy mineral va polimer xomashyolar asosida siklik yuklanishga, tribomexanik ta’sirlarga va iqlimiy eskirishga chidamli geterokompozit materiallar tarkibini yaratish, ularni olish texnologiyasini ishlab chiqish hamda metallopolimer

[1]O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF 60-son «2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni

tizimlarda xizmatga yaroqliligini ilmiy asoslash bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlarini olib borish muhim ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi, 2026-yil 16-fevraldagi PF-21-son «Mamlakat taraqqiyotining 2030-yilgacha mo'ljallangan ustuvor yo'nalishlari doirasida islohotlarni izchil davom ettirish va yangi bosqichga olib chiqishning qo'shimcha chora-tadbirlari to'g'risida»gi farmonlari va 2024-yil 4-martdagi PQ-109-son «O'zbekiston - 2030» strategiyasida belgilangan asosiy yo'nalishlar bo'yicha islohotlarni amalga oshirishning 2024-yildagi ustuvor chora-tadbirlari to'g'risi to'g'risida»gi qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining VI. «yangi materiallar va ilg'or ishlab chiqarish texnologiyalari, shu jumladan, nanotexnologiyalar, additiv ishlab chiqarish, robototexnika va avtomatlashtirilgan tizimlar» ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi[2]. Temir yo'l transportining metallopolimer tizimlaridagi tribomexanik jarayonlarni o'rganish hamda siklik yuklanishga chidamli geterokompozit materiallar yaratish sohasida dunyoning yetakchi oliy ta'lim muassasalari va ilmiy markazlarida, jumladan, University of Illinois Urbana-Champaign qoshidagi Rail Transportation and Engineering Center - RailTEC (AQSH), University of Birmingham qoshidagi Birmingham Centre for Railway Research and Education - BCRRE, University of Huddersfield (Buyuk Britaniya), Chang'an University (Xitoy), Korea Railroad Research Institute - KRRI (Janubiy Koreya), Railway Technical Research Institute - RTRI (Yaponiya), Lozanna federal texnologiya instituti - (Shveysariya), University of Southern Queensland va University of Wollongong (Avstraliya), Suleyman Demirel University (Turkiya), Toshkent davlat transport universiteti (O'zbekiston) olib borilmoqda.

Jahonda metall elementlar jumladan, rels va mahkamlash elementlari bilan polimer material orasidagi kontakt zonasi alohida tribotexnik tizim sifatida qarashning ilmiy tehnologik asosini yaratish borosida olib borilgan tadqiqjtlar natijasida qator, jumladan,quyidagi ilmiy natijalar olingan: metall yuza bilan polimer element o'rtasida yuzaga keladigan ishqalanish kuchi, kontakt bosimi, mikroharakat - fretting va issiqlik ajralishi jarayonlari chuqur o'rganil (University of Illinois Urbana-Champaign qoshidagi Rail Transportation and Engineering Center - RailTEC, AQSH), metallopolimer juftlikning tribomexanik xatti-harakati faqat materialning mustahkamligi bilan emas, balki yuza qattiqligi,

[2] Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi: https://www.sciencedirect.com; https://www.researchgate.net;https://www.nasa.gov/news-release/nasa-tests-game-changing-composite, https://journals.sagepub.com.;https://4spepublications.pericles-prod.literatumonline.com.; www.scholar.google.com; https://www.mdpi.com., https://link.springer.com., https://onlinelibrary.wiley.com., https://cyberleninka.ru., https://www.elibrary.ru., https://uzrailway.uz., https://www.gpntb.ru. https://www.mdpi.com., http://ogi.az va boshqa manbalar asosida ishlab chiqilgan

mikrostrukturaning bir jinsliligi va kontakt zonasidagi kuchlanishlarning taqsimlanishi bilan ham belgilanishi ko‘rsatilgan (University of Birmingham qoshidagi Birmingham Centre for Railway Research and Education - BCRRE, University of Huddersfield, Buyuk Britaniya), siklik dinamik yuklanish sharoitida polimer elementlarning yuza qatlamida charchash yoriqlarining shakllanishi, adgezion va abraziv yeyilish mexanizmlarining birgalikda namoyon bo‘lishi hamda ishqalanish koeffitsiyentining ekspluatatsiya davomida o‘zgarish qonuniyatlari yaratilgan (Chang‘an University, Xitoy; Korea Railroad Research Institute - KRRI, Janubiy Koreya; Railway Technical Research Institute, Yaponiya), geterokompozit materiallar bo‘yicha xorijiy izlanishlarda turli tabiatga ega komponentlar - polimer matritsa, mineral va organik to‘ldiruvchilar, tolali mustahkamlovchilar, elastomer modifikatorlar hamda nanoo‘lchamli qo‘shimchalar o‘rtasidagi fazalararo bog‘lanishlarning struktura shakllanishiga ta’siri o‘rganilgan Lozanna federal texnologiya instituti, Shveysariya; University of Southern Queensland va University of Wollongong, Avstraliya; Suleyman Demirel University, Turkiya; Toshkent davlat transport universiteti, O‘zbekiston).

Dunyoda mashinasozlik tizimlaridagi tribomexanik jarayonlar qonuniyatlarini o‘rganish asosida siklik yuklanishga chidamli geterokompozit materiallar tarkiblarini ishlab chiqishning ilmiy asoslarini o‘rganish bo‘yicha qator, jumladan, quyidagi ustivor yo‘nalishlarda tadqiqotlar olib borilmoqda: jinali va yon izolyatorlar bo‘yicha ishlarda ushbu elementlarning metall qismlar bilan doimiy friksion aloqada bo‘lishi; uzoq muddatli siklik yuklanish ostida geometrik shaklini saqlashi hamda dielektrik xossalarining barqarorligini ta’minlash, metallopolimer kontakt zonasida takroriy ishqalanish natijasida yuzaga keladigan mikroyeyilish; izolyatsion qatlamning yupqalashuvi va buning oqibatida elektr izolyatsiya xususiyatining pasayishi; tribomexanik charchash jarayoni sifatida modellashtirish; dielektrik mustahkamlik bilan bir qatorda friksion barqarorlik va zarbiy yuklanishga chidamlilikni ta’minlovchi geterokompozit tarkiblarni yaratish; rels mahkamlash elementlari va metallopolimer tizimlarning mexanik, dinamik hamda tribomexanik xususiyatlari asosan nazariy modellar va standart, iqlim, xomashyo bazasi, real ekspluatatsion yuklanish rejimlari, shuningdek, va tribologik modifikatorlardan tashkil topgan geterokompozitlarning siklik buzilish qonuniyatlari yaratish va joriy qilish.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Temir yo‘l transportining metallopolimer tizimlarida yuz beradigan tribomexanik jarayonlarni o‘rganish, rels mahkamlash elementlarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirish hamda siklik yuklanishga chidamli polimer kompozit materiallarni yaratish bo‘yicha S. Kaewunruen, A.M. Remennikov, D.J. Thompson, R. Lewis, U. Olofsson, M. Steenbergen, D. Oregui, T. Dahlberg, H. Sato va boshqa olimlar katta hissa qo‘shgan. Polimer va geterokompozit materiallarning strukturaviy shakllanishi, fazalararo o‘zaro ta’siri, fizik-mexanik hamda tribotexnik xossalarini boshqarish bo‘yicha N.S. Yenikolopov, G.N. Bartenev, A.A. Berlin, V.A. Beliy, Y.S. Lipatov, A.I. Sviridyonok, M.A. Asqarov, A.T. Djalilov, S.S. Negmatov, S.Sh. Rashidova, professorlar A.B. Djumabayev, N. Ashurov, A.S. Ibadullayev, A.V. Umarov,

Z.A. Tadjixodjayev, A.A. Risqulov, U. Abduraxmanov, N.Q. Tursunov, A.S. Xasanov, E.U. Teshabayeva, U.A. Ziyamuxamedova va boshqa olimlar tomonidan ilmiy tadqiqot ishlari olib borilgan.

Ular tomonidan metallopolimer tribotizimlarda ishqalanish, adgezion, abraziv va charchash yeyilishi mexanizmlari, polimer materiallarning elastik-viskoelastik deformatsiyasi, relaksatsiyasi hamda takroriy yuklanish ta'sirida strukturasining o'zgarishi bo'yicha nazariy va amaliy asoslar ishlab chiqilgan, shuningdek, polimer matritsa, mineral va organik to'ldiruvchilar, tolali mustahkamlovchilar, elastomer modifikatorlar hamda tribologik qo'shimchalardan tashkil topgan geterokompozitlarda fazalararo adgeziya, disperslik, kristallanish, ichki kuchlanish va g'ovaklikning material xossalariga ta'siri aniqlangan, ushbu tadqiqotlar asosida mashinasozlik va transport vositalari uchun yuqori mustahkamlik, yeyilishga chidamlilik, elastik tiklanish, termik barqarorlik va dielektrik xossalarga ega kompozit materiallar tarkiblari hamda ularni olishning texnologik usullari yaratilgan, rels osti prokladkalari va izolyatorlar bo'yicha olib borilgan izlanishlarda ularning dinamik qattiqligi, deformatsion gisterezisi, tebranishlarni so'ndirish qobiliyati, kontakt bosimini taqsimlashi, qoldiq deformatsiyasi va charchash uzoq muddatliligini baholash usullari takomillashtirilgan.

Shu bilan birga, mavjud ishlarda rels mahkamlash tizimidagi rels-prokladka-shpal, prujinali mahkamlagich-izolyator va rels-yon izolyator metallopolimer kontaktlarida sodir bo'ladigan tribomexanik jarayonlar ko'pincha alohida ko'rsatkichlar bo'yicha o'rganilgan. Siklik yuk amplitudasi va chastotasi, kontakt bosimi, mikrosiljish, ishqalanish koeffitsiyenti, friksion qizish, qoldiq deformatsiya hamda yeyilish intensivligi o'rtasidagi qonuniy bog'lanishlarni, mahalliy mineral va polimer xomashyolar, tolali mustahkamlovchilar va tribologik modifikatorlar asosida yaratilgan geterokompozitlarning keskin harorat almashinuvi, namlik va chang-abraziv muhiti sharoitidagi siklik buzilish mexanizmlarini, metallopolimer tizimlardagi tribomexanik jarayonlar qonuniyatlarini aniqlash, geterokompozitlarning tarkibi, strukturasi, fizik-mexanik va tribologik xossalari hamda siklik chidamliligi o'rtasidagi bog'liqlikni ilmiy asoslash va rels mahkamlash elementlari uchun optimal material tarkiblarini ishlab chiqish borasida ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda.

Ilmiy-tadqiqot mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Uzbek-India 2021-85-«Nano-termoplast (polipropilen), termoreaktiv (epoksid kampaund), nano o'lchamdagi to'ldiruvchilar bilan boyitilgan polimer kompozit materiallar va qoplamalarning mexanik hamda tribotexnik xossalarini takomillashtirish» (2020-2023-yy) mavzusidagi xalqaro amaliy loyiha, 2025/25/44-sonli «Akademik harakatchanlik» loyihasi doirasida «Mahalliy xomashyolar asosida temir yo'l rels prokladkalarini ishlab chiqarish va ularning ekspluatatsion ishonchliligini oshirish» mavzusidagi mahalliy loyiha hamda Toshkent davlat transport univeristetining tadqiqot ishlari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi termoplast (YZPE) va reaktoplast (ED-20) bog'lovchilar asosida temir yo'l transporti sistemasi uchun rels mahkamlash

tizimlarining ekspluatatsion ishonchliligini ta'minlovchi geterokompozit materiallar tarkibini ishlab chiqishdan iborat

Tadqiqotning vazifalari:

temir yo‘l rels mahkamlash tizimlarining ekspluatatsion ishonchliligiga ta’sir etuvchi omillarni tizimli tahlil qilish asosida geterokompozitlarning bog‘lovchi komponent turini maqsadli tanlash;

termoplast (YZPE) matritsa asosida rels osti prokladkalari uchun mahalliy mineral va organik to‘ldiruvchilar, tolali mustahkamlovchilar, elastiklashtiruvchi modifikatorlarni tanlash mezonlarini ilmiy asoslash, komponentlarning turi, miqdori va nisbatlarini hisobga olgan holda geterokompozit materiallar tarkiblarini shakllantirish;

YZPE asosidagi geterokompozit materiallarda ko‘p siklli siqilish sharoitida yuzaga keladigan mikrostrukturaviy o‘zgarishlar va qoldiq deformatsiya, deformatsion gisterezis, relaksatsiya hamda charchash jarayonlarining shakllanish mexanizmlarini o‘rganish va ularning yuklama parametrlariga bog‘liqlik qonuniyatlarini aniqlash;

reaktoplast (ED-20) matritsa asosida prujinali mahkamlagich va yon izolyatorlar uchun mahalliy mineral va organik to‘ldiruvchilar, tolali mustahkamlovchilar hamda funksional modifikatorlarni tanlash mezonlarini ilmiy asoslash;

ko‘p siklli siqilish sharoitidagi ED-20 asosidagi geterokompozit polimer matritsa-to‘ldiruvchi-mustahkamlovchi-modifikator fazalararo chegaralarida kuchlanishlarning taqsimlanishi, strukturaviy nuqsonlar va ichki kuchlanishlarning siklik chidamlilikka ta’siri qonuniyatlarini nazariy va eksperimental jihatdan aniqlash;

YZPE va ED-20 matritsalari asosida ishlab chiqilgan geterokompozit materiallarning fizik-mexanik, tribotexnik, termik, strukturaviy-morfologik, dielektrik, iqlimiy bardoshlilik, tebranish so‘ndirish xossalarini kompleks tadqiq etish hamda komponent tarkibi va strukturaviy shakllanishining ekspluatatsion xossalarga ta’sirini ifodalovchi “tarkib-struktura-xossa-siklik chidamlilik-ekspluatatsion ishonchlilik” o‘zaro bog‘liqlik qonuniyatlarini aniqlash;

mahalliy xomashyolar asosida ishlab chiqilgan YZPE va ED-20 geterokompozit materiallardan rels mahkamlash elementlarining tajriba namunalarini tayyorlash, ularni tajriba-sanoat sharoitida sinovdan o‘tkazish asosida ekspluatatsion ishonchliligini baholash hamda ishlab chiqarishga joriy etishning texnik-iqtisodiy samaradorligini aniqlash.

Tadqiqot obyekti sifatida temir yo‘l rels mahkamlash tizimining rels osti prokladkasi, prujinali mahkamlagich izolyatori va yon izolyatori uchun mo‘ljallangan mahalliy xomashyolar asosidagi geterokompozit materiallar, ulardan tayyorlangan funksional elementlar hamda ularning metall qismlar bilan hosil qiladigan metallopolimer kontakt tizimlari qabul qilingan.

Tadqiqot predmeti geterokompozit materiallarning tarkibi, strukturaviy-morfologik holati va fazalararo ta’siri bilan ularning metallopolimer kontaktlarda siklik yuklama ta’sirida yuzaga keladigan kontakt bosimi, ishqalanish, elastik-

deformatsiya, qoldiq deformatsiya, relaksatsiya, yeyilish va charchashga chidamlilik ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi bog‘liqlik qonuniyati.

Tadqiqot usullari. Dissertatsiya ishida nazariy tahlil, eksperimental tadqiqot, tajribalarni matematik-statistik rejalashtirish, regressiya tahlili va ko‘p mezonli optimallashtirish usullaridan foydalanildi. Geterokompozit materiallarning strukturaviy va fazaviy holati SEM, XRD va IQ-spektroskopiya, termik barqarorligi TGA, tribotexnik xossalari tribometrik sinovlar yordamida tadqiq etildi. Ularning qattiqligi, siqilishdagi deformatsiyasi, qoldiq deformatsiyasi, deformatsion gisterezisi, relaksatsiyasi, ko‘p siklli yuklanishga chidamliligi va dielektrik xossalari standart sinov usullari asosida baholandi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

temir yo‘l rels mahkamlash tizimining funksional vazifalari turlicha bo‘lgan elementlari uchun materiallarni Fuzzy Topsis metodi asosida tanlash tamoyili ilmiy asoslangan;

YZPE asosidagi geterokompozit materiallarda SEBSning 3 % va EVAning 10% miqdorida birgalikda qo‘llanishi natijasida fazalararo moslik hamda elastik tiklanishning o‘zgarishi bilan siklik yuklanishlarda qoldiq deformatsiya yoki dinamik qattiqlikning o‘zgarishi o‘rtasidagi bog‘liqlik aniqlanib, materialning deformatsion barqarorligini ta’minlashda SEBSning kompatibilizatsiyalovchi va EVAning elastifikatsiyalovchi ta’siri ilmiy asoslangan;

geterokompozit materiallarda fazalararo adgeziyaning klassik «matritsa-tola» yondashuvi ko‘p komponentli tarkib va siklik yuklanish sharoitlarini hisobga olgan holda rivojlantirilib, yuk uzatilishi va strukturaviy barqarorlikning matritsa-tola hamda matritsa-dispers mineral zarracha chegaralarida shakllanuvchi interfaza zonalarining o‘zaro bog‘liq ta’siri bilan belgilanishi ilmiy asoslangan;

ED-20 asosidagi geterokompozit materiallarda shina pirolizi uglerodli to‘ldiruvchisining ultrabinafsha nurlarni yutish va ularning matritsaga kirib borishini cheklash ta’siri ilmiy asoslanib, buning natijasida epoksid matritsaning yorug‘lik va kislorod ta’sirida kimyoviy yemirilishi hamda sirt mikroshikastlanishlarining rivojlanishi sekinlashishi aniqlangan;

ED-20 epoksid bog‘lovchisi asosidagi geterokompozitlarda qotiruvchi, mahalliy mineral to‘ldiruvchi, tolali mustahkamlovchi va funksional modifikatorlarning o‘zaro ta’siri natijasida hosil bo‘ladigan fazalararo, to‘rsimonlanish darajasi, ichki kuchlanishlar va strukturaviy nuqsonlarning prujinali hamda yon izolyatorlarning zarbiy yuklamalarga ta’sir qonuniyatlari aniqlangan;

ilk bor rels-prokladka, prujinali mahkamlagich-izolyator va rels-yon izolyator metallopolimer kontaktlarida siklik yuklanish amplitudasi va chastotasi, kontakt bosimi, mikrosiljish va sirpanishdagi ishqalanish koeffitsiyenti, friksion qizish, deformatsion holat hamda yeyilish intensivligiga birgalikdagi ta’sir qonuniyatlari aniqlangan;

ilk bor mexanofaollashtirilgan mahalliy xomashyolar asosida geterokompozit materiallardan funksional vazifalari turlicha bo'lga temir yo'l transporti elementlarining ekspluatatsion ishonchliligini ta’minlovchi, yuqori tebranish so‘ndiruvchiva termik barqaror va siklik yuklanishlarda deformatsion barqarorligi

yuqori geterokompozit materiallarning tarkibi hamda olish texnologiyasi takomillashtirilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari:

mahalliy polimer va mineral xomashyolar, tolali mustahkamlovchilar hamda funksional modifikatorlar asosida temir yo‘l rels mahkamlash tizimining rels osti prokladkasi, prujinali mahkamlagich izolyatori va yon izolyatori uchun siklik yuklanishga chidamli yangi geterokompozit materiallar tarkiblari ishlab chiqilgan hamda ulardan funksional elementlar olish texnologiyasi takomillashtirilgan;

mahalliy mineral to‘ldiruvchilar va modifikatsiyalovchi qo‘shimchalarni polimer matritsaga maqsadli kiritish natijasida ishlab chiqilgan geterokompozit materiallarning siklik siqilish va deformatsion shikastlanishga chidamliligi 1,3-1,5 barobarga, elastik tiklanish ko‘rsatkichi 18-25 foizga oshirilgan hamda ko‘p siklli yuklanish sharoitida shakl va o‘lcham barqarorligi ta’minlangan;

geterokompozit materiallarning tarkibi va strukturaviy holatini optimallashtirish hisobiga metallopolimer kontaktlardagi ishqalanish koeffitsiyenti 20-30 foizga kamaytirilgan, yeyilishga chidamliligi bazaviy materialga nisbatan 1,5-2,0 barobarga oshirilgan hamda termik barqarorlik ko‘rsatkichlari 25-35 foizga yaxshilangan;

ishlab chiqilgan rels osti prokladkasi va izolyatorlarni rels mahkamlash tizimida qo‘llash natijasida ularning xizmat muddatini 1,5-2,0 barobarga oshirish, qoldiq deformatsiya va sirt yeyilishini 30-40 foizga kamaytirish, import qilinadigan polimer elementlarga bo‘lgan ehtiyojni 25-30 foizgacha qisqartirish hamda mahsulot tannarxini 15-20 foizga kamaytirish imkoniyati texnik-iqtisodiy jihatdan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi geterokompozit polimer materiallarning strukturasi, fizik-kimyoviy, mexanik, tribotexnik va texnologik xossalarini o‘rganishda standart sinov usullari hamda zamonaviy tahlil vositalaridan foydalanilganligi, tajriba natijalariga kompyuter dasturlari yordamida matematik-statistik ishlov berilib, komponentlarning miqdoriy nisbatlari optimallashtirilganligi, o‘lchash natijalarining noaniqligi baholanganligi hamda olingan natijalar mavjud ilmiy ma’lumotlar bilan qiyosiy tahlil qilinganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati termoplast (YZPE) va reaktoplast (ED-20) bog‘lovchilar asosidagi geterokompozit materiallarda komponentlar tarkibi, struktura shakllanishi va fazalararo o‘zaro ta’sirning metall-polimer kontaktlardagi tribomexanik jarayonlar hamda siklik chidamlilik bilan bog‘liqlik qonuniyatlari aniqlanganligi, ko‘p komponentli tizimlarda yuk uzatilishi va strukturaviy barqarorlikni izohlovchi fazalararo bog‘lanishlar rivojlantirilganligi hamda funksional vazifalari turlicha bo‘lgan rels mahkamlash elementlari uchun materiallar tarkibini maqsadli tanlashning ilmiy asoslari takomillashtirilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati mahalliy xomashyolar asosida rels osti prokladkalari, prujinali mahkamlagich izolyatorlari va yon izolyatorlar uchun geterokompozit materiallar tarkiblari hamda ularni olish texnologiyasi

takomillashtirilganligi, to‘ldiruvchilarni mexanofaollashtirish va komponentlar nisbatlarini tanlash orqali elementlarning funksional vazifalariga muvofiq tebranishlarni so‘ndirish qobiliyati, termik barqarorligi va siklik yuklanishlarga chidamliligini boshqarish imkoniyati yaratilganligi bilan izohlanadi. Olingan natijalar rels mahkamlash elementlarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirishga yo‘naltirilgan materiallarni ishlab chiqarish, import o‘rnini bosuvchi mahsulotlarni mahalliylashtirish hamda ulardan foydalanishning texnik-iqtisodiy samaradorligini baholash uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Temir yo‘l transportining metallopolimer tizimlaridagi tribomexanik jarayonlar qonuniyatlarini o‘rganish asosida siklik yuklanishga chidamli geterokompozit materiallar tarkiblarini ishlab chiqishning ilmiy asoslari bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

mahalliy xomashyolar asosidagi geterokompozit materiallardan tayyorlangan temir yo‘l rels mahkamlash tizimlari uchun prokladkalar «OLMALIQ KON-METALLURGIYA KOMBINATI» AJ tassarufidagi «Sanoat temir yo‘l boshqarmasi»da amaliyotga joriy etilgan («OLMALIQ KON-METALLURGIYA KOMBINATI» AJ ning 2026-yil 30-iyuldagi 07-26/01-01180 son ma’lumotnomasi). Natijada prokladkalarning xizmat muddati an’anaviy materiallarga nisbatan 1,5-1,8 barobarga uzaytirish imkonini bergan;

termoreaktiv geterokompozit materiallarda tayyorlangan rels mahkamlash tizimida qo‘llaniladigan yon va purjinali izolyatorlar «TOSHKENT YO‘LOVCHI VAGONLARINI QURISH VA TA’MIRLASH ZAVODI» AJ da amaliyotga joriy etilgan «TOSHKENT YO‘LOVCHI VAGONLARINI QURISH VA TA’MIRLASH ZAVODI» AJ ning 2026-yil 29-sentabrdagi №1080 son ma’lumotnomasi). Natijada izolyatorlarning xizmat muddati an’anaviy materiallarga nisbatan 1,3-1,5 barobarga oshganligi hamda texnik xizmat ko‘rsatish, ta’mirlash va almashtirish xarajatlarini 20-25 % gacha kamaytirish imkonini bergan;

optimal tarkibli geterokompozit materiallardan ishlab chiqilgan izolyator va rels osti prokladkalarini «OLMALIQ KON-METALLURGIYA KOMBINATI» AJ tassarufidagi «Sanoat temir yo‘l boshqarmasi»da amaliyotga joriy etilgan («OLMALIQ KON-METALLURGIYA KOMBINATI» AJ ning 2026-yil 30-iyuldagi 07-26/01-01180 son ma’lumotnomasi). Natijada ishqalanish hamda siklik yuklanish ta’sirida yuzaga keladigan deformatsiya va yeyilish jarayonlarining salbiy ta’sirini kamaytirish, rels mahkamlash uzelining ekspluatatsion ishonchliligini 1,3-1,8 barobarga oshirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 17 ta, jumladan 11 ta xalqaro, bulardan 5 tasi Scopus bazasiga kirgan jurnallarda e’lon qilingan va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 29 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan 1 ta patent, 2 ta DGU, O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyasining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 16 ta maqola, jumladan, 9 tasi respublika va 7 tasi xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tuzilishi kirish, beshta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 200 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, obyekti hamda predmeti aniqlangan, tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi ko‘rsatilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan. Shuningdek, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi, aprobatsiyasi, nashr etilganligi hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi to‘g‘risida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **«Temir yo‘l transporti tizimlari konstruksiyasi va detallari uchun yuqori ekspluatatsion xossali yangi materiallarni yaratishning zamonaviy tendensiyalari»** deb nomlangan birinchi bobida temir yo‘l transporti tizimlari konstruksiyalari va detallarida qo‘llaniladigan metallopolimer tribojuftliklarining konstruktiv tuzilishi hamda ularning ekspluatatsion ishlash sharoitlari tahlil qilingan. Temir yo‘l transporti konstruksiyalari va detallariga qo‘yiladigan funksional, mexanik, tribologik va ekspluatatsion talablar ilmiy-nazariy jihatdan o‘rganilib, geterokompozit materiallardan foydalanishning zamonaviy tendensiyalari va istiqbolli yo‘nalishlari ko‘rib chiqilgan. Siklik yuklanishlar sharoitida ishlovchi geterokompozit materiallarda mahalliy xomashyo va ikkilamchi resurslardan foydalanish imkoniyatlari baholanib, metall-polimer kontaktlarda yuzaga keladigan ishqalanish, yeyilish, deformatsiya va siklik shikastlanish jarayonlarini hisobga olgan holda temir yo‘l transporti konstruksiyalari va detallarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirishning nazariy asoslari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **«Siklik yuklanish sharoitida ishlovchi temir yo‘l tizimlari detallari va konstruksiyalari uchun geterokompozit materiallar tarkiblarini tanlash va tadqiqot metodlarini asoslash»** deb nomlangan ikkinchi bobida takroriy yuklanishlar hamda metallopolimer tribojuftliklarida ishlovchi temir yo‘l transporti detallari uchun geterokompozit materiallarning boshlang‘ich komponentlari Fuzzy TOPSIS usuli asosida ko‘p mezonli baholash orqali tanlangan.

Bunda har bir alternativ tarkibning musbat ideal yechimga D_i^+ va manfiy ideal yechimga D_i^- masofalari aniqlanib, ularning optimal yechimga yaqinlik koeffitsiyenti quyidagi ifoda orqali baholangan:

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (1)$$

CC_iqiymati 1 ga yaqinlashgan sari alternativ tarkib optimal yechimga yaqin hisoblanadi.

Prujinali va yon izolyatorlarda elektr izolyatsion xossalar detalning funksional yaroqliligini belgilovchi asosiy ko‘rsatkichlardan biri ekanligi hisobga olinib,

klassik Fuzzy TOPSIS yaqinlik koeffitsiyenti izolyatsion xossaning ustuvorligini aks ettiruvchi koeffitsiyent bilan takomillashtirilgan:

$$CC_{i,iz} = CC_i \cdot K_{iz,i}^{\lambda} \quad (2)$$

yoki

$$CC_{i,iz} = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \cdot K_{iz,i}^{\lambda} \quad (3)$$

bu yerda $CC_{i,iz}$- izolyatsion xossa hisobga olingan yakuniy yaqinlik koeffitsienti; $K_{iz,i}$- 0-1 oralig‘ida normallashtirilgan izolyatsion ko‘rsatkich; λ- izolyatsion xossaning ahamiyatini belgilovchi koeffitsiyent.

Taklif etilgan yondashuvda mexanik va tribologik ko‘rsatkichlari yuqori, biroq elektr izolyatsion xossalari talab darajasiga javob bermaydigan tarkiblarning integral bahosi pasaytiriladi. Shu orqali rels osti prokladkalari, prujinali va yon izolyatorlar uchun ularning funksional vazifasiga mos ravishda differensial ko‘p mezonli tanlash imkoniyati yaratilgan. Rels osti prokladkalari uchun izolyatsion mezonning ta’siri nisbatan past, prujinali va yon izolyatorlarda esa dielektrik barqarorlikning funksional ahamiyati yuqori bo‘lganligi sababli λ koeffitsiyenti kattaroq qiymatda qabul qilinadi.

Tadqiqotning maqsad va vazifalaridan kelib chiqib, rels osti prokladkalari uchun termoplastik bog‘lovchi sifatida yuqori zichlikli polietilen (YZPE), elastik-deformatsion xususiyatlarni yaxshilash uchun etilen-vinilatsetat (EVA) va qayta ishlangan rezina, polimer fazalari hamda to‘ldiruvchilar orasidagi moslikni oshirish uchun Stirol-etilen/butilen-stirol (SEBS) tanlangan (1-jadval).

1-jadval.

Tadqiqot obyektlari uchun tanlangan geterokompozit material komponentlari.

№	Komponent nomi	ISO, ГОСТ va TSH	Vazifasi
1	Yuqori zichlikli polietilen (YZPE)	TS 17642168-04:2013	Termoplastik bog‘lovchi
2	Etilen-vinilatsetat (EVA)	TU 2211-211-00203335-2013	Modifikator
3	Stirol-etilen/butilen-stirol (SEBS)	ISO 18064:2022	Kompatibilizator
4	Qayta ishlangan rezina	GOST R 54095-2023	Elastomer komponent
5	Texnik uglerod (saja)	GOST 7885-86	Dispers to‘ldiruvchi
6	E-turdagi shisha tolasi	GOST 32650-2014	Tolali to‘ldiruvchi
7	Epoksid-dian smolasi (ED-20)	GOST 10587-84	Termoreaktiv bog‘lovchi
8	Metil-5-norbornen-2,3-dikarbon angidrid	-	Qotiruvchi
9	Pyridine-4-carboxamide	-	Modifikator
10	AKC-30	O‘z DSt 1056:2004	Dispers to‘ldiruvchi

Tribotexnik, deformatsion va mustahkamlik xossalarini yaxshilash maqsadida qayta texnika uglerod (saja), shisha tolasi va kaolindan funksional to‘ldiruvchilar sifatida foydalanish ilmiy jihatdan asoslandi. Prujinali va yon izolyatorlar uchun termoreaktiv bog‘lovchi sifatida ED-20 epoksid smolasi, qotiruvchi sifatida metil-5-norbornen-2,3-dikarbon angidrid, modifikatsiyalovchi komponent sifatida pyridine-4-carboxamide, mustahkamlovchi komponent sifatida shisha tolasi hamda dispers mineral to‘ldiruvchilar sifatida AKC-30 markali kaolin tanlanildi.

Geterokompozit materiallarning strukturaviy-morfologik, fizik-mexanik, termik, dielektrik va tribotexnik xossalarini baholash uchun zamonaviy eksperimental usullar tanlangan. Metallopolimer tribojuftliklarida ishqalanish, yeyilish va kontakt jarayonlari, shuningdek takroriy yuklanishlarda deformatsion-dinamik xususiyatlar, qoldiq deformatsiya, energiya dissipatsiyasi va siklik barqarorlikni aniqlash metodikalari asoslangan.

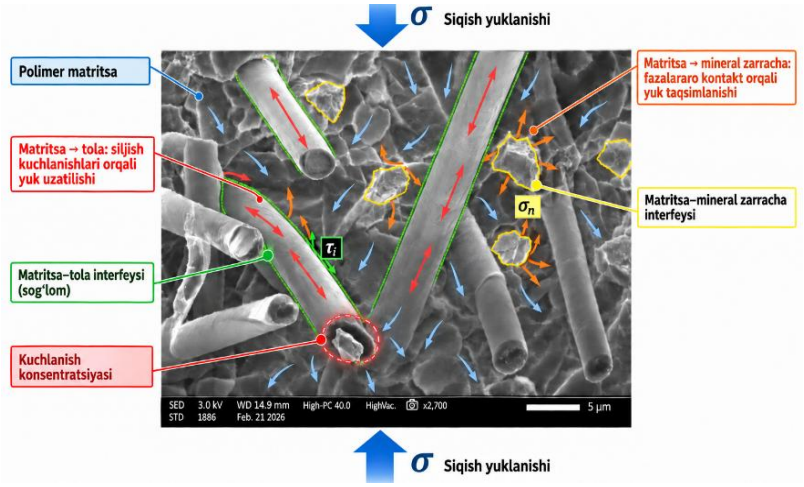
Dissertatsiyaning **«Geterogen tizimlarda strukturalararo o‘zaro ta’sir mexanizmlari va ularning siklik yuklanishlarda ishlovchi temir yo‘l transporti detallarining ekspluatatsion ishonchliligini ta’minlovchi geterokompozit materiallar xossalariga ta’siri»** deb nomlangan uchinchi bobida metallopolimer tribotizimlarda ishlovchi geterokompozit materiallarning strukturaviy shakllanishi va friksion o‘zaro ta’sir mexanizmlari nazariy jihatdan asoslangan. Fazalararo adgeziyaning klassik nazariyasiga asoslangan Dupre tenglamasi geterokompozitlarning ko‘p fazali tuzilishini hisobga olgan holda takomillashtirilib, siklik yuklanishning faqat matritsa-tola interfeysida emas, balki matritsa-tola va matritsa-dispers to‘ldiruvchi fazalararo chegaralari orqali birgalikda taqsimlanish mexanizmi ilmiy asoslangan.

Geterokompozitlarda ikki fazani ajratuvchi geometrik sirt fazalararo chegara (interfeys), uning atrofida tarkibi va xossalari asosiy fazalardan farqlanuvchi hajmiy qatlam esa interfaza sifatida qaralgan. Ko‘p siklli siqilish ta’sirida mikrostrukturaviy degradatsiya elastik deformatsiya, fazalararo sirpanish, qoldiq deformatsiyaning to‘planishi hamda mikrobo‘shliq va mikroyoriqlarning rivojlanishi bilan kechishi aniqlangan.



1-rasm. Geterokompozit material mikrostrukturasining ko‘p siklli siqilish ta’sirida o‘zgarishi.

SEM tahlili sikllar sonining ortishi bilan geterokompozit mikrostrukturasida degradatsion jarayonlarning bosqichma-bosqich rivojlanishini ko‘rsatgan. Dastlab lokal mikrodefektlar va plastik deformatsiyalar kuzatilgan bo‘lsa, keyingi bosqichlarda qoldiq deformatsiyaning to‘planishi, fazalararo sirpanish, mikrobo‘shliq va mikroyoriqlarning rivojlanishi natijasida matritsa-to‘ldiruvchi interfeyslarida adgezion bog‘lanishlarning susayishi aniqlangan. Mazkur mikrostrukturaviy o‘zgarishlar siklik yuklamaning kompozit tarkibiy qismlari o‘rtasida uzatilishi va qayta taqsimlanish mexanizmini nazariy tavsiflash zaruratini asoslagan. Shu asosda tashqi yuklamaning polimer matritsadan tolali va dispers to‘ldiruvchilarga fazalararo interfeyslar orqali uzatilishining strukturaviy sxemasi ishlab chiqilgan



2-rasm. Geterokompozit material mikrostrukturasida siklik yuklanishning matritsa-tola va matritsa-dispers to‘ldiruvchi interfeyslari orqali taqsimlanish sxemasi.

SEM tasvirlari asosida tashqi siqilish yuklanishining polimer matritsadan tolali va dispers mineral to‘ldiruvchilarga uzatilishi, matritsa-tola interfeysida siljish kuchlanishlari hamda matritsa-dispers zarracha chegaralarida lokal kuchlanishlarning shakllanishi ko‘rsatilgan.

Dupre nazariyasiga muvofiq, matritsa va to‘ldiruvchi orasidagi fazalararo adgeziya ularning sirt energiyalari hamda fazalararo energiya bilan belgilanadi. Adgeziya ishining ortishi matritsaning to‘ldiruvchi yuzasini yaxshiroq ho‘llashi, fazalararo bog‘lanishning mustahkamlanishi va tashqi yuklamaning matritsadan tolali hamda dispers to‘ldiruvchilarga samarali uzatilishini ta’minlaydi.

Mazkur strukturaviy holatni matematik ifodalash uchun adgeziyaning klassik Dupre nazariyasiga asoslangan modeldan foydalanildi:

$$W_a = \frac{\sigma_f d_f \delta_i}{2 l_c} \qquad (4)$$

d_f- tola diametri, W_a -fazalararo adgeziya ishi, σ_f- tolaning cho‘zilishdagi mustahkamligi, δ_i-interfeysning samarali ajralish masofasi, l_c- tolaning kritik uzunligi,

Klassik modelda yuk uzatilishi asosan matritsa-tola interfeysi bilan izohlanadi. Biroq ko‘p komponentli geterokompozit mikrostrukturada dispers mineral zarrachalar ham yukni qabul qilish va qayta taqsimlashda faol ishtirok etadi. Shu sababli Dyupre modeli tolali va dispers to‘ldiruvchilarning geometrik hamda interfeys parametrlarini birgalikda hisobga oluvchi ko‘rinishda takomillashtirildi:

$$W_a = \frac{\sigma_f d_f \delta_i}{2 l_c}\left[1 + \frac{3}{2}\sum_{j=1}^{n} \eta_{p,j} \frac{\varphi_{p,j}}{\varphi_f} \frac{d_f}{d_{p,j}}\right] \qquad (5)$$

j- Dispers to‘ldiruvchining tartib raqami, n-Dispers to‘ldiruvchilarning umumiy soni, $\eta_{p,j}$- j-to‘ldiruvchining matritsa bilan interfeys samaradorligi koeffitsiyenti, $\varphi_{p,j}$- j-dispers to‘ldiruvchining hajmiy ulushi, φ_f-Tolali to‘ldiruvchining hajmiy ulushi, $d_{(p,j)}$-j-dispers to‘ldiruvchi zarrachalarining o‘rtacha diametri,

Taklif etilgan model siklik yuklanishning faqat matritsa-tola interfeysida emas, balki matritsa-tola va matritsa-dispers to‘ldiruvchi chegaralari orqali birgalikda taqsimlanishini, shuningdek dispers zarrachalarning hajmiy ulushi, o‘lchami va

interfeys samaradorligining fazalararo adgeziya ishiga ta’sirini miqdoriy baholash imkonini beradi.

Fazalararo yuk uzatilishi va adgezion o‘zaro ta’sirning aniqlangan qonuniyatlari asosida rels osti prokladkasi uchun geterokompozit material tarkibini shakllantirishda polimer matritsa, elastomer komponentlar, tolali hamda dispers to‘ldiruvchilar nisbatini kompleks ravishda optimallashtirish zarurati asoslandi. Shu maqsadda siklik va kontakt yuklanishlar sharoitida ishlashga mo‘ljallangan, komponentlar tarkibi va miqdoriy nisbatlari bilan farqlanuvchi P-1-P-6 geterokompozit namunalari ishlab chiqildi (2-jadval).

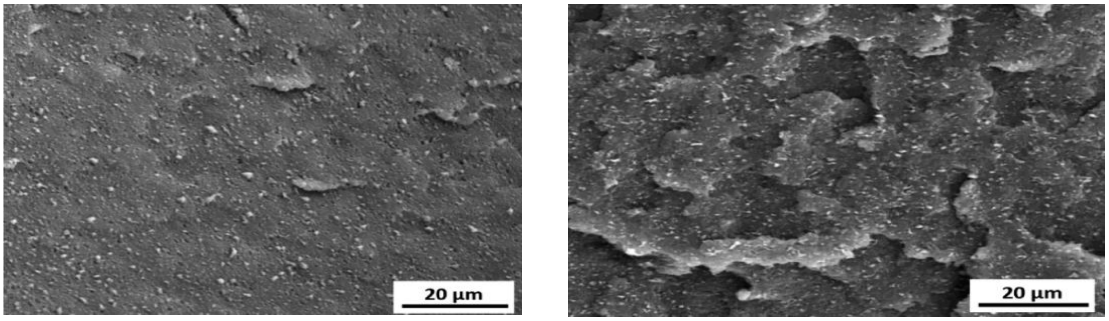
2-jadval.

Rels osti prokladkasi uchun geterokompozit namunalarning tarkibi

Namuna	Polimer matritsa %	EVA (%)	Texnik uglerod (saja) (%)	SEBS (%)	Qayta ishlangan shina (%)	Shisha tola %	Kaolin %
*P-1	HDPE (56%)	15	3	3	10	8	5
P-2	PP (58%)	13	3	3	10	8	5
P-3	HDPE (61%)	10	3	3	10	8	5
P-4	PVC (59%)	10	3	3	12	8	5
P-5	PP (51%) + UHMWPE (5%)	15	3	3	10	8	5
P-6	PP (56%)	10	3	3	15	8	5

*Belgilanishdagi **“P” harfi “prokladka”** so‘zining shartli belgisi sifatida qabul qilingan

Siklik yuklanish sharoitida ishlovchi temir yo‘l rels mahkamlash tizimining rels osti prokladkalari uchun polimer matritsa, elastomer fazalar va dispers to‘ldiruvchilar o‘rtasidagi fazalararo adgezion bog‘lanishni yaxshilash maqsadida SEBS modifikatorining ta’siri tadqiq etildi. SEBS miqdorining mikrostrukturaviy bir jinslilik, fazalararo moslik va mexanik xossalarga ta’siri SEM tahlili hamda cho‘zilishdagi mustahkamlik ko‘rsatkichlari asosida baholandi.



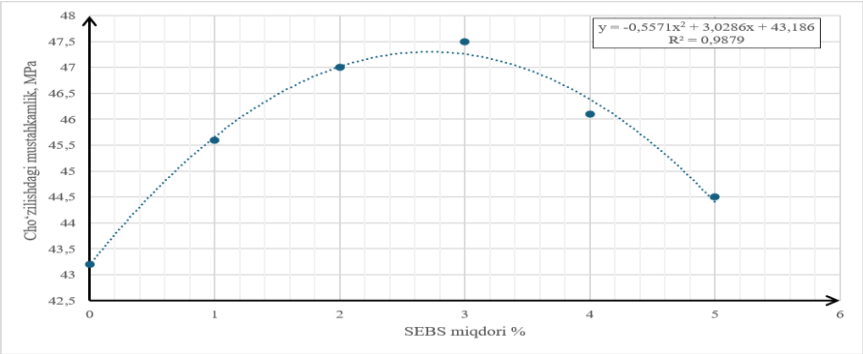
a) **b)**

a - SEBS qo‘shilganda shakllangan zich va bir jinsli mikrostruktura; b - SEBS qo‘shilmaganda kuzatilgan fazaviy ajralish, aglomeratsiya va mikrobo‘shliqlar.

3-rasm. YZPE-EVA tizimining SEM tasvirlari.

SEM tahlili SEBS kiritilishi natijasida polimer fazalar va to‘ldiruvchilar o‘rtasidagi interfeyslarning yaxlitligi ortib, mikrostrukturaning zich va bir jinsli shakllanganligini ko‘rsatdi. SEBS qo‘shilmagan tarkibda esa fazaviy ajralish, lokal aglomeratsiya va mikrobo‘shliqlarning mavjudligi fazalararo adgezion bog‘lanishning sustligini ko‘rsatgan. Bu holat SEBSning kompatibilizator sifatida fazalararo moslikni

yaxshilashi va kuchlanishlarning kompozit hajmi bo‘ylab samaraliroq uzatilishiga sharoit yaratishini ko‘rsatadi. SEM tahlilida aniqlangan ushbu strukturaviy qonuniyatlar mexanik sinovlar natijalari bilan ham tasdiqlangan.



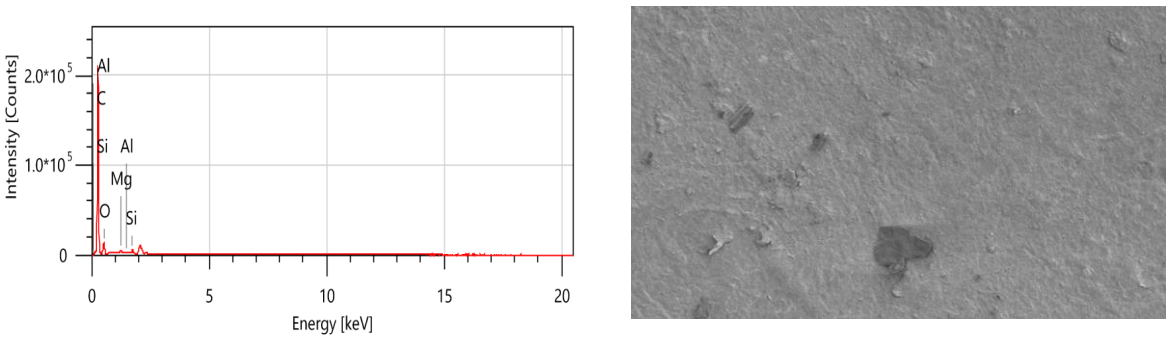
4-rasm. SEBS miqdorining cho‘zilishdagi mustahkamlikka ta’siri.

SEM tahlilida aniqlangan fazalararo moslikning yaxshilanishi mexanik sinovlar natijalari bilan ham tasdiqlangan. SEBS miqdori 0% dan 3% gacha oshirilganda cho‘zilishdagi mustahkamlik 43,2 MPa dan 47,5 MPa gacha, ya’ni qariyb 10% ga ortgan. Ushbu o‘sish SEBSning kompatibilizator sifatida polimer matritsa, elastomer faza va to‘ldiruvchilar orasidagi adgezion bog‘lanishni mustahkamlashi hamda tashqi yuklamaning kompozit struktura bo‘ylab samaraliroq uzatilishi bilan izohlanadi. SEBS miqdorining 3% dan ortishi esa mustahkamlikning pasayishiga olib kelganligi sababli, 3% SEBS miqdori fazalararo moslik va mexanik mustahkamlikni ta’minlovchi maqbul miqdor sifatida qabul qilingan.

Dissertatsiyaning **«Mahalliy xomashyolar asosida olingan geterokompozit materiallarning metallopolimer kontaktlaridagi tribomexanik xossalarini eksperimental tadqiq etish»** deb nomlangan to‘rtinchi bobida mahalliy va ikkilamchi xomashyo komponentlari asosida shakllantirilgan geterokompozit materiallarning strukturaviy-morfologik, fizik-mexanik, termik, dielektrik va tribologik xossalari kompleks eksperimental tadqiq etilgan. Komponentlar tarkibi va ularning miqdoriy nisbatlarining mikrostruktura, fazalararo o‘zaro ta’sir hamda funksional-ekspluatatsion ko‘rsatkichlarga ta’sir qonuniyatlari aniqlangan. Olingan natijalar asosida rels osti prokladkasi, prujinali va yon izolyatorlar uchun maqbul geterokompozit tarkiblarni tanlashning eksperimental mezonlari va ilmiy asoslari ishlab chiqilgan.

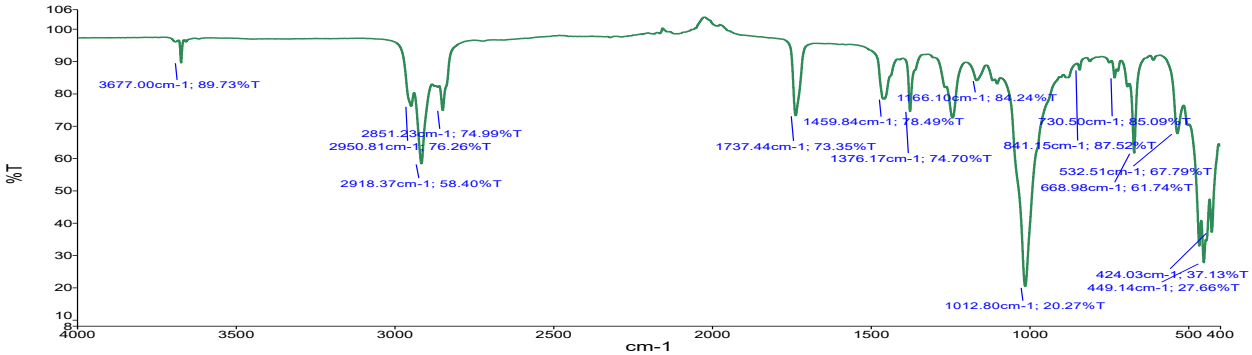
O‘tkazilgan qiyosiy eksperimental tadqiqotlar natijasida P-1-P-6 tarkiblar orasida P-3 namunasi fizik-mexanik va tribotexnik ko‘rsatkichlarning eng maqbul majmuasini namoyon etgani aniqlandi. Mazkur tarkib yuqori mustahkamlik, deformatsion barqarorlik, elastik tiklanish va strukturaviy bir jinslilikning o‘zaro uyg‘unligi bilan ajralib, rels osti prokladkasi uchun keyingi chuqurlashtirilgan tribologik, termik va siklik sinovlarni o‘tkazish uchun maqbul tarkib sifatida tanlab olindi.

SEM-EDS tahlili P-3 namunasida zich, nisbatan bir jinsli va kam nuqsonli mikrostruktura shakllanganini, dispers to‘ldiruvchilarning polimer matritsa bo‘ylab yetarlicha bir tekis taqsimlanganini hamda yirik g‘ovak va fazaviy ajralishlarning keskin namoyon bo‘lmaganini ko‘rsatdi. EDS spektrida Al, Si va Mg elementlarining qayd etilishi mineral to‘ldiruvchilarning kompozit tarkibida mavjudligini tasdiqladi (5-rasm).



5-rasm. P-3 geterokompozit rels osti prokladka namunasining mikrostrukturasi va element tarkibining SEM-EDS tahlili.

Kuzatilgan morfologik xususiyatlar P-3 tarkibida matritsa va dispers fazalar o‘rtasidagi kontaktning nisbatan samarali shakllanganligini ko‘rsatdi. Fazalararo o‘zaro ta’sirning kimyoviy tabiatini aniqlashtirish maqsadida keyingi bosqichda IQ-spektroskopik tadqiqotlar o‘tkazildi.

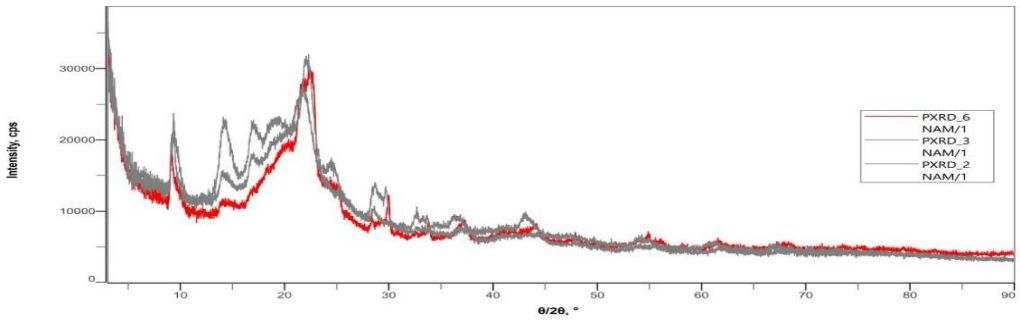


6-rasm. P-3 geterokompozit rels osti prokladka namunasining IQ-spektroskopik tahlili.

IQ-spektroskopik tahlil P-3 geterokompozitida polimer matritsa va funksional komponentlarga xos yutilish polosalarining saqlanganini, ayrim funksional guruhlar sohasida esa intensivlik va spektral shaklning o‘zgarishini ko‘rsatdi. 2916-2961 sm^{-1} diapazondagi alifatik -CH_2/-CH_3 guruhlari, 1737 sm^{-1} atrofidagi karbonil guruhlari hamda 1000-1100 sm^{-1} sohadagi silikatli komponentlarga xos yutilishlar kompozit tarkibiy qismlarining o‘zaro ta’sirini tavsiflaydi. Mazkur spektral o‘zgarishlar matritsa, elastomer faza va mineral to‘ldiruvchilar orasidagi molekulalararo hamda fazalararo o‘zaro ta’sirlarning kuchayganini bilvosita ko‘rsatadi. Shu bilan birga, yangi keskin yutilish polosalarining hosil bo‘lmaganligi fazalararo bog‘lanish asosan fizik va molekulalararo o‘zaro ta’sirlar hisobiga shakllanganini ko‘rsatadi.

SEM va IQ-spektroskopik tahlillarda aniqlangan fazalararo kontaktning yaxshilanishi hamda komponentlar o‘rtasidagi molekulalararo o‘zaro ta’sirlarning strukturaviy holatga ta’sirini aniqlash maqsadida P-3 namunasining rentgen-diffraksion tahlili o‘tkazildi. XRD natijalari polimer matritsaning kristallik xususiyatlari, mineral to‘ldiruvchilarning fazaviy holati va kompozit strukturasidagi tartiblanish darajasini baholash imkonini berdi.

XRD tahlili natijalariga ko‘ra, P-3 namunaning difraktogrammasida $2\theta \approx$ 9-10°, 14-18°, 21-23°, 29-30° va 43-45° sohalarda xarakterli difraksion maksimumlar qayd etilgan.



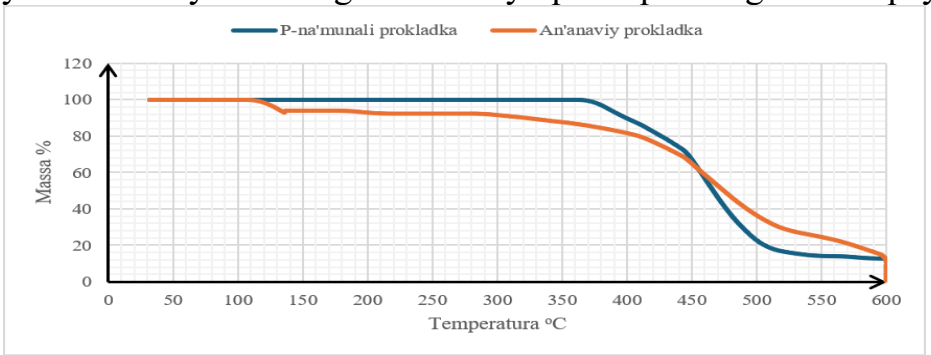
7-rasm. P-1, P-2 va P-3 geterokompozit rels osti prokladka materiallarining XRD difraktogrammalari.

Asosiy kristall maksimumlarning aniq namoyon bo‘lishi bilan birga diffuz amorf fonning saqlanishi polimer matritsada kristall va amorf fazalarning o‘zaro muvozanatlangan strukturasi shakllanganligini ko‘rsatadi. Bunday strukturaviy holatda kristall sohalar materialning qattiqligi, shakl barqarorligi va qoldiq deformatsiyaga chidamliligini ta’minlasa, amorf hamda elastomerik sohalar elastik tiklanish va tebranish energiyasini dissipatsiyalash xususiyatlarini saqlab qolishga xizmat qiladi.

Shu asosda P-3 namuna rels osti prokladkasi uchun zarur bo‘lgan strukturaviy barqarorlik va deformatsion moslashuvchanlikning maqbul uyg‘unligiga ega tarkib sifatida baholandi. Ekspluatatsiya jarayonida material mexanik va siklik yuklanishlar bilan bir qatorda harorat ta’siriga ham uchrashi sababli, uning termik barqarorligi, parchalanish bosqichlari va yuqori haroratdagi strukturaviy yaxlitligini baholash maqsadida keyingi bosqichda TGA/DSC tahlili o‘tkazildi.

P-3 va an’anaviy rels osti prokladka materiallarining TGA/DSC qiyosiy tahlili P-3 tarkibining termik barqarorligi yuqoriroq ekanligini ko‘rsatdi (8-rasm). P-3 namunada 5% va 10% massa yo‘qotilishi mos ravishda 387 va 400 °C da, 50% massa yo‘qotilishi esa 467 °C da kuzatildi. 600 °C da qoldiq massaning 12,8% ni tashkil etishi kompozit tarkibidagi termik barqaror mineral va tolali komponentlarning mavjudligi bilan bog‘liq. An’anaviy prokladka materialida esa yuqori haroratlarda qoldiq massa deyarli saqlanmagan.

DSC egri chiziqlarida kuzatilgan termik effektlar P-3 tarkibida parchalanish jarayonlarining bosqichma-bosqich kechishini ko‘rsatadi. Bu holat polimer matritsa, elastomer faza va mineral to‘ldiruvchilar o‘rtasidagi strukturaviy o‘zaro ta’sir natijasida issiqlik ta’siriga chidamliroq geterogen tuzilma shakllanganini ko‘rsatadi. Olingan natijalar P-3 namunaning termomexanik yuklanishlar sharoitida strukturaviy yaxlitlikni saqlash qobiliyati an’anaviy materialga nisbatan yuqoriroq ekanligini tasdiqlaydi.



8-rasm. P-3 va an’anaviy rels osti prokladka materiallarining termogravimetrik (TGA) qiyosiy tahlili

O‘tkazilgan kompleks strukturaviy, fizik-mexanik, spektroskopik, rentgen-diffraksion va termik tadqiqotlar P-3 geterokompozit namunasida polimer matritsa, elastomer faza, tolali hamda dispers to‘ldiruvchilar o‘rtasida samarali fazalararo adgezion o‘zaro ta’sir shakllanganligini ko‘rsatdi. Mazkur holat mikrostrukturaning bir jinsliligi, fazalararo ajralishlarning kamayishi, tashqi yuklamaning kompozit tarkibiy qismlari o‘rtasida samarali uzatilishi va strukturaviy barqarorlikning ortishini ta’minlagan. Natijada P-3 tarkib fizik-mexanik, termik, kimyoviy-strukturaviy va deformatsion xossalarning maqbul uyg‘unligini namoyon etib, siklik va kontakt yuklanishlar sharoitida ishlovchi rels osti prokladkalari uchun istiqbolli geterokompozit tarkib sifatida asoslangan.

Temir yo‘l rels mahkamlash tizimining prujinali mahkamlagich izolyatori va yon izolyatorlari uchun yuqori dielektrik, mexanik hamda termik barqarorlikni ta’minlash maqsadida termoreaktiv bog‘lovchi sifatida ED-20 epoksid smolasi asosidagi kompozit tarkiblar shakllantirildi (3-jadval).

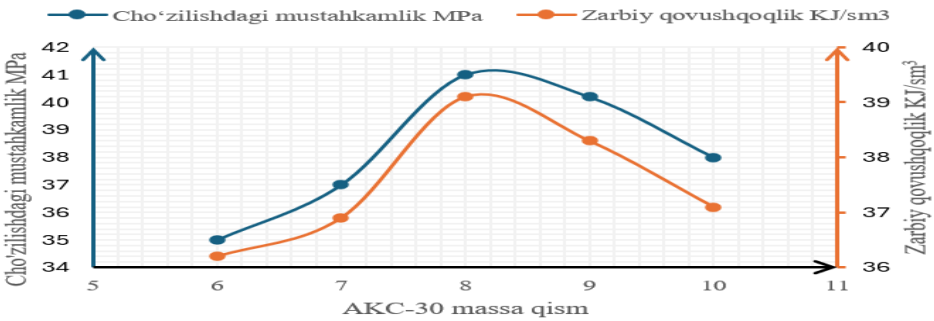
3-jadval.

Yon izolyator va prujinali izolyator uchun ED-20 asosidagi kompozit namunalari tarkibi

Namuna	ED-20 epoksid smolasi, massa qism	Metil-5-norbornen-2,3-dikarbon angidrid, massa qism	Pyridine-4-carboxamide, massa qism	Qisqa E-glass shisha tola, massa qism	Kaolin, massa qism	Uglerod pirolizi, massa qism
I-1	100	7	1	10	6	1
I-2	100	7	1	12	7	2
I-3	100	7	1	15	8	3
I-4	100	7	1	18	9	4
I-5	100	7	1	20	10	5
Izoh: “I” harfi - “izolyator” so‘zining shartli belgisi sifatida qabul qilingan.						

Mazkur kompozit tarkiblar asosida tayyorlangan namunalar strukturaviy, fizik-mexanik, dielektrik va ekspluatatsion ko‘rsatkichlari bo‘yicha kompleks baholanib, yon va prujinali izolyatorlar uchun maqbul tarkibni tanlash mezonlari shakllantirildi. Ushbu detallar ekspluatatsiya jarayonida siqilish, egilish, zarbiy va takroriy yuklanishlar ta’sirida ishlashi sababli, materialdan yetarli mustahkamlik bilan bir qatorda zarbiy qovushqoqlik va strukturaviy yaxlitlikni saqlash talab etiladi. Kompozitda lokal kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi hamda mo‘rt buzilishning cheklanishi mineral to‘ldiruvchi va mustahkamlovchi fazalar miqdoriga bog‘liq ekanligi hisobga olinib, ED-20 asosidagi tizimlarda AKC-30 kaolini miqdorining cho‘zilishdagi mustahkamlik va zarbiy qovushqoqlikka ta’siri eksperimental ravishda tadqiq etildi (9-rasm).

Yon va prujinali izolyatorlar takroriy siqilish, egilish va zarbiy yuklanishlar ta’sirida ishlashi sababli, materialning mustahkamligi bilan bir qatorda zarbiy qovushqoqligi ham muhim hisoblanadi. AKC-30 miqdori 6 dan 8 massa qismgacha oshirilganda cho‘zilishdagi mustahkamlik 35 dan 41 MPa gacha, zarbiy qovushqoqlik esa 36,4 dan 39,1 kJ/m³ gacha ortgan. Bu holat dispers zarrachalarning matritsada samarali taqsimlanishi va yuklamaning fazalararo chegaralar orqali qayta taqsimlanishi bilan izohlanadi.



9-rasm. AKC-30 miqdorining yon izolyator va prujinali izolyator kompozitlarining mexanik xossalariga ta’siri.

8 massa qism AKC-30 da ikkala ko‘rsatkichning maksimal qiymatga erishishi ushbu miqdorni maqbul deb baholash imkonini berdi, undan yuqori miqdorlarda esa aglomeratsiya va lokal kuchlanish konsentratsiyasi sabab xossalarning pasayishi kuzatilgan.

Yon va prujinali izolyatorlar uchun 3-jadvalda keltirilgan tarkiblar asosida ED-20 epoksid smolasi bazasidagi geterokompozit namunalar tayyorlanib, ularning fizik-mexanik va tribotexnik xususiyatlari kompleks eksperimental tadqiq etildi (4-jadval). Texnik uglerod (saja) 3 massa qism bo‘lgan I-3 tarkibda hajmiy solishtirma elektr qarshilik $\rho_v = 3{,}12 * 10^{14}\Omega{\cdot}cm$, sirt elektr qarshiligi esa $\rho_s = 1{,}12 \times 10^{14}\Omega$ ni tashkil etdi. Ushbu qiymatlar materialning yuqori elektr qarshiligini saqlab qolganligini ko‘rsatib, I-3 tarkibning yon va prujinali izolyatorlarda qo‘llash uchun zarur fizik-mexanik va elektr izolyatsion xossalarning uyg‘unligini ta’minlashini asoslaydi.

4-jadval.

ED-20 asosidagi geterokompozit materiallarning fizik-mexanik va tribotexnik xususiyatlari

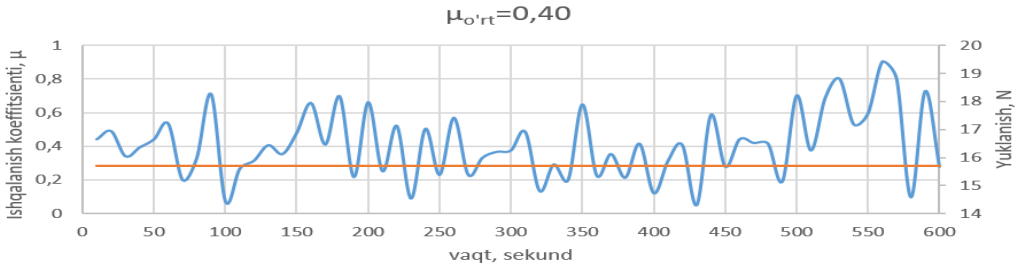
Ko‘rsatkich	Tarkiblar				
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5
Cho‘zilishdagi mustahkamlik chegarasi, MPa	39	37	41	37	35
Uzilishdagi nisbiy cho‘zilish, %	36	38	41	38	39
Issiq suvga chidamlilik (10 sutka), %	6,9	6,3	8,7	6,5	7,1
Termik chidamlilik, °C GOST 25951-83 bo‘yicha	280	275	292	270	265
Suv yutuvchanlik, % GOST 4650-2014 bo‘yicha	0,006	0,007	0,003	0,005	0,005
Polimerlanish (qotish) vaqti, min	50	50	30	50	45
Zarbiy qovushqoqlik, kJ/sm²	33,9	34,2	39,1	35,7	32,4
Qattiqlik, Shore D	78	81	84	87	91
Hajmiy solishtirma qarshilik, Ω·cm	$9{,}17*10^{15}$	$4{,}39*10^{14}$	$3{,}12*10^{14}$	$5{,}3*10^{13}$	$2{,}3*10^{12}$
Sovuqqa chidamlilik, °C	-40	-45	-50	-45	-40
Issiqqa chidamlilik, °C	125	130	140	135	130

O‘tkazilgan kompleks tadqiqotlar natijasida I-3 tarkib fizik-mexanik, termik va dielektrik xossalarning eng maqbul uyg‘unligini namoyon etdi. Ushbu tarkibda matritsa, qisqa shisha tola va dispers to‘ldiruvchilar o‘rtasidagi fazalararo bog‘lanishning samarali shakllanishi yuklamaning bir tekis taqsimlanishi va strukturaviy barqarorlikning ortishiga xizmat qilgan. Shu asosda I-3 namuna yon va prujinali izolyatorlar uchun maqbul geterokompozit tarkib sifatida tanlandi.

Tanlangan P-3 va I-3 tarkiblarning metallopolimer kontakt sharoitidagi

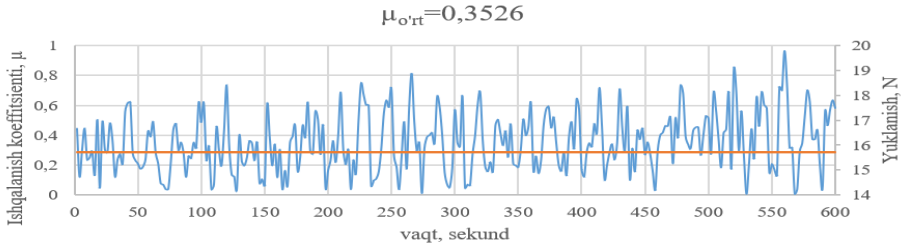
ekspluatatsion samaradorligini baholash maqsadida qiyosiy tribologik tadqiqotlar o‘tkazildi. Bunda P-3 va I-3 namunalari amaldagi materiallar bilan bir xil sinov sharoitlarida ishqalanish koeffitsiyenti, yeyilish intensivligi va kontakt sirtining morfologik o‘zgarishlari bo‘yicha solishtirildi.

P-3 rels osti prokladka namunasining metallopolimer kontakt sharoitidagi ishqalanish jarayoni vaqt bo‘yicha baholandi. Sinov davomida ishqalanish koeffitsiyenti ma’lum tebranishlar bilan o‘zgarib, uning o‘rtacha qiymati $\mu_{o'rt} = 0{,}40$ ni tashkil etdi (10-rasm). Kuzatilgan tebranishlar kontakt zonasida mikrosiljish, sirt notekisliklarining o‘zaro ta’siri va triboqatlamning davriy shakllanishi bilan izohlanadi. Ishqalanish koeffitsiyentining barqaror o‘rtacha darajada saqlanishi P-3 tarkibning metallopolimer kontakt sharoitida tribologik barqarorligini ko‘rsatadi.



10-rasm. P-3 geterokompozit rels osti prokladka namunasida ishqalanish koeffitsiyentining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi.

Tribologik sinovlar I-3 geterokompozit namunasida o‘rtacha ishqalanish koeffitsiyenti an’anaviy yon va prujinali izolyator materiallariga nisbatan pastroq ekanligini ko‘rsatdi. Bu ED-20 matritsasida qisqa E-glass shisha tola, AKC-30 kaolini va uglerodli fazaning samarali o‘zaro ta’siri natijasida kontakt sirtining barqarorlashishi hamda yeyilishga qarshilikning ortishi bilan izohlanadi.



11-rasm. I-3 geterokompozit izolyator namunasida ishqalanish koeffitsiyentining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi.

Natijada I-3 tarkibda ishqalanish va yeyilishga chidamlilikning maqbul uyg‘unligi shakllanib, uning yon va prujinali izolyatorlar uchun istiqbolli tribologik material ekanligi asoslandi (5-jadval).

5-jadval.

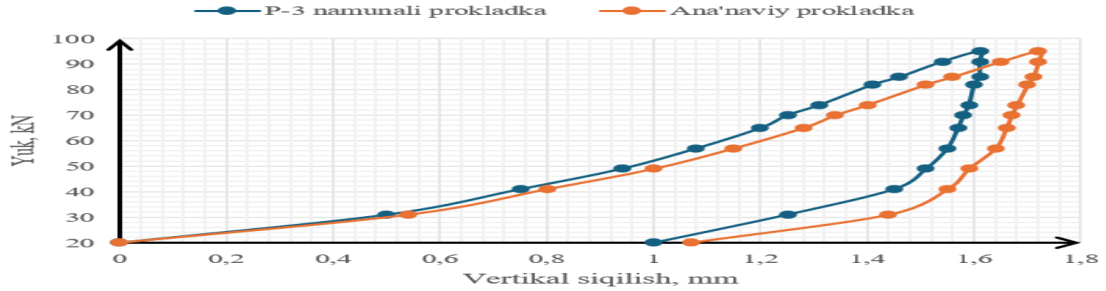
Namunalarning tribotexnik xossalari

Namuna	Ishqalanish yo‘li L, m	Shartli chiziqli yeyilish *h*, mkm	Yeyilish intensivligi I_h , 10^{-8}	Ishqalanish koeffitsiyenti,μ̄
An’anaviy Fastclip prokladkasi	502,65	24,4	4,85	0.5022
P-3 geterokompozit prokladka	502,65	10,3	2,05	0.4093
An’anaviy yon va prujinali izolyator	502,65	20,6	4,10	0.5382
I-3 geterokompozit izolyator	502,65	13,7	2,73	0.3527

O‘tkazilgan eksperimental tadqiqotlar asosida namunalarning asosiy tribotexnik ko‘rsatkichlari qiyosiy baholanib, ularning metallopolimer kontakt sharoitidagi ishqalanish va yeyilish xususiyatlari aniqlangan. Olingan natijalar namunalarning tribologik samaradorligini o‘zaro taqqoslash imkonini beruvchi ko‘rsatkichlar shaklida 5-jadvalda umumlashtirilgan. Kompleks strukturaviy, fizik-mexanik, dielektrik va tribologik tahlillar natijasida rels osti prokladkasi uchun P-3, yon va prujinali izolyatorlar uchun I-3 tarkiblari maqbul variant sifatida tanlab olinib, ularning tarkib-struktura-xossa bog‘liqligi amaldagi materiallar bilan qiyosiy eksperimental tadqiqotlar asosida ilmiy jihatdan asoslangan.

Dissertatsiyaning **«Temir yo‘l rels mahkamlash tizimi elementlarining ekspluatatsion ishonchliligini ta’minlash uchun geterokompozit materiallarni kompleks qo‘llash va samaradorligini baholash»** deb nomlangan beshinchi bobida avvalgi boblarda strukturaviy, fizik-mexanik, termik, dielektrik va tribologik xossalari bo‘yicha maqbul deb topilgan P-3 va I-3 geterokompozit tarkiblarning amaliy samaradorligi baholangan. Bunda rels osti prokladkasining takroriy yuklanishlardagi deformatsion-dinamik barqarorligi, rels mahkamlash tizimi elementlarini tayyorlash texnologiyasi hamda ishlab chiqilgan materiallarni amaliyotga joriy etishning texnik-iqtisodiy samaradorligi aniqlangan.

P-3 tarkibli rels osti prokladkasining siklik yuklanishlardagi deformatsion xususiyatlarini baholash maqsadida u amaldagi an’anaviy prokladka bilan bir xil laboratoriya sharoitida qiyosiy sinovdan o‘tkazildi. Sinovlar 20-95 kN yuklanish oralig‘ida, 4 Hz chastotada va 1000 siklgacha davom ettirildi (12-rasm).



12-rasm. P-3 va an’anaviy rels osti prokladkalarining 20-95 kN yuklanish oralig‘idagi deformatsion-gisterezis xususiyatlari.

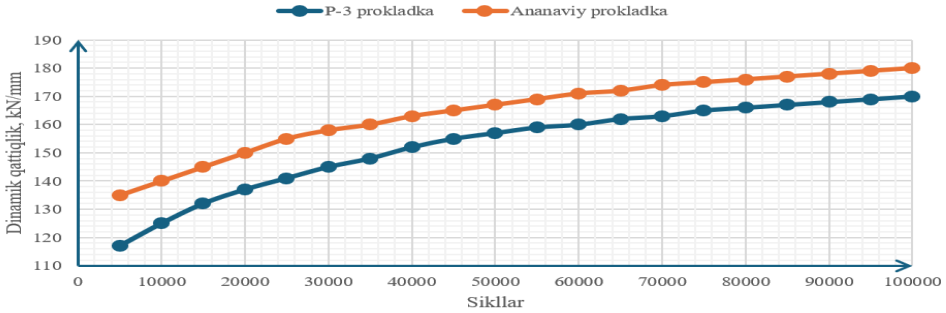
Maksimal 95 kN yukda P-3 prokladkaning vertikal siqilishi 1,62 mm, an’anaviy prokladkaniki esa 1,76 mm ni tashkil etib, P-3 namunada deformatsiya qariyb 8% ga kam bo‘lgan. Mazkur tendensiya oraliq yuklanishlarda ham saqlanib, bu P-3 tarkibda avvalgi strukturaviy va fazalararo tadqiqotlarda aniqlangan mustahkam matritsa-to‘ldiruvchi o‘zaro ta’sirning deformatsion barqarorlikka ijobiy ta’sirini ko‘rsatadi.

Prokladkalarning statik deformatsion javobini miqdoriy baholash uchun statik qattiqlik ko‘rsatkichlari aniqlandi. Yuk 20 dan 95 kN gacha oshirilganda P-3 prokladkaning statik qattiqligi taxminan 46 dan 65 kN/mm gacha, an’anaviy prokladkaniki esa 40 dan 57 kN/mm gacha ortgan. Natijada P-3 namunaning statik qattiqligi ishchi yuk diapazonida an’anaviy materialga nisbatan yuqori bo‘lib, uning shakl va geometrik barqarorligi yaxshilanganligi aniqlangan.

Statik qattiqlikning yuk ortishi bilan nolinear oshishi polimer matritsaning zichlashuvi, strukturadagi bo‘sh hajmlarning kamayishi hamda matritsa-tolali va

matritsa-dispers fazalararo kontaktlarning yuk ko‘tarishdagi ishtiroki ortishi bilan izohlanadi.

Takroriy yuklanishlarda materialning siklik mexanik javobini baholash maqsadida dinamik qattiqlikning sikllar soniga bog‘liq o‘zgarishi o‘rganildi (13-rasm).



13-rasm. P-3 va an’anaviy rels osti prokladkalarining dinamik qattiqligining sikllar soniga bog‘liqligi.

Sinovning boshlang‘ich bosqichida P-3 namunaning dinamik qattiqligi taxminan 117 kN/mm, an’anaviy prokladkaniki esa 135 kN/mm ni tashkil etgan. Sikllar soni ortishi bilan har ikkala materialda dinamik qattiqlik bosqichma-bosqich oshib, 100000-siklda mos ravishda 170 va 180 kN/mm ga yetgan. P-3 namunaning dinamik qattiqligi sinov davomida an’anaviy prokladkaga nisbatan pastroq darajada saqlangan bo‘lib, 100000-siklda farq qariyb 5,6% ni tashkil etgan. Mazkur natija P-3 materialining takroriy yuklanishlarda haddan tashqari qattiqlashmasdan, elastik-deformatsion moslashuvchanlik va strukturaviy barqarorlikni saqlash xususiyatiga ega ekanligini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar P-3 tarkibda avvalgi boblarda aniqlangan fazalararo adgezion bog‘lanish, strukturaviy bir jinslilik va komponentlararo yuk uzatilish mexanizmlarining takroriy yuklanishlardagi deformatsion barqarorlik bilan uzviy bog‘liqligini tasdiqlagan.

P-3 rels osti prokladkasi hamda I-3 yon va prujinali izolyator tarkiblari asosida rels mahkamlash tizimi elementlarini tayyorlashning texnologik jarayonlari ishlab chiqilgan. Mahalliy va ikkilamchi xomashyolardan foydalanish, import komponentlariga ehtiyojni kamaytirish, mahsulot tannarxini pasaytirish hamda detallarni almashtirish va texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlarini qisqartirish hisobiga ishlab chiqilgan materiallarni amaliyotga joriy etishda 1 km temir yo‘l hisobiga 258 mln so‘m iqtisodiy samara aniqlangan.

XULOSALAR

1. Ilk bor temir yo‘l rels mahkamlash tizimining funksional vazifalari turlicha bo‘lgan polimer elementlari uchun geterokompozit materiallarni Fuzzy TOPSIS metodi asosida rels osti prokladkasi uchun qattiqlik-elastiklik-dempferlash-siklik deformatsion barqarorlik, yon va prujinali izolyatorlar uchun esa mexanik mustahkamlik-zarbiy qovushqoqlik-yeyilishga chidamlilik-dielektrik barqarorlik mezonlarining ustuvorligi belgilandi hamda materiallarni «tarkib → fazalararo ta’sir → mikrostruktura → xossa → siklik chidamlilik → ekspluatatsion ishonchlilik» tizimi asosida shakllantirishning ilmiy yondashuvi tavsiya etildi.

2. Metall-geterokompozit kontaktlarda tribomexanik holat normal va tangensial yuklamalarning birgalikdagi ta’siri natijasida shakllanishi asosida, kontakt bosimining notekis taqsimlanishi, bosim gradienti, mikrosiljish amplitudasi hamda bir siklda dissipatsiyalangan energiya metallopolimer kontaktning xavfli holatini belgilovchi asosiy omillar ekanligi aniqlandi.

3. Geterokompozit materiallarning takroriy yuklanishdagi mikrostrukturaviy degradatsiya mexanizmi, uning elastik- moslashuv, qoldiq deformatsiyaning to‘planishi, ichki qizish, fazalararo sirpanish, mikrobo‘shliq va mikroyoriqlarning paydo bo‘lishi hamda ularning makroskopik shikastlanishga birlashishi ketma-ketligida rivojlanishi natijasida, fazalararo chegara yukni matritsadan mineral va tolali komponentlarga uzatuvchi hamda kuchlanishlarni qayta taqsimlovchi faol strukturaviy zona ekanligi asosida, geterokompozitning siklik chidamliligini ta’minlashda fazalararo mustahkamlik bilan deformatsion moslikning muvozanatlashgan holatini shakllantirish aniqlandi.

4. Tolali va dispers to‘ldiruvchilarning geometrik parametrlarini hisobga oluvchi umumlashtirilgan adgeziya modeli asosida yuk uzatilishi hamda strukturaviy barqarorlikni belgilovchi fazalararo o‘zaro ta’sirlar faqat «matritsa-mustahkamlovchi tola» chegarasida emas, balki «matritsa-dispers mineral zarracha» chegarasida va ushbu komponentlarning o‘zaro ta’siri natijasida shakllanadigan ko‘p darajali interfaza zonalarida ham yuzaga kelishi asoslandi.

5. Kaolin, uglerod pirolizi va boshqa dispers komponentlarni vibroplanetar mexanizm yordamida faollashtirish aglomeratlarni parchalash, zarrachalar sirtini yangilash va faol kontakt yuzasini oshirishga imkon berishi, buning natijasida komponentlarning polimer matritsa bo‘ylab bir tekis taqsimlanishi va geterofazali strukturaning gomogenligi yaxshilanishi tavsiya etildi.

6. Termoplastik YZPE matritsali temir yo‘l rels osti prokladkalari tarkibidagi qayta ishlangan shina granulalari va EVA kompozitning elastik-deformatsion xususiyatlarini yaxshilovchi plastifikatorlar sifatida ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.

7. P-3 tarkibli rels osti prokladkasining takroriy yuklanish sharoitidagi deformatsion-dinamik yuk 20-95 kN oralig‘ida, 4 Hz chastotada 1000 siklli sinovlarda uning dinamik qattiqligi 500-sikldagi 117 kN/mm dan 1000-siklda 170 kN/mm gacha o‘zgarishi, dissipatsiyalangan energiyaning 1000-siklda 6,25 kN·mm bo‘lib, an’anaviy prokladkadagi 4,44 kN·mm qiymatdan 40,8 % yuqori saqlanishi natijasida uning «qattiqlik-deformatsiya-energiya dissipatsiyasi» ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi maqbul muvozanat rels tayanchining ortiqcha qattiqlashuvini cheklagan holda dempferlash potensialini saqlashi asoslandi.

8. Mahalliy homashyolar asosida mexanofaollashtirilgan geterokompozit materiallardan funksional vazifalari turlicha bo‘lga temir yo'l transporti elementlarining ekspluatatsion ishonchliligini ta’minlovchi, yuqori tebranish so'ndiruvchiva termik barqaror va siklik yuklanishlarda deformatsion barqarorligi yuqori geterokompozit materiallarning tarkibi hamda olish takomillashtirilgan texnologiyasi tavsiya etildi.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ DSc.10/2025.27.12.T.01.04 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТУРГУНАЛИЕВ ЭЛБЕК ТУХТАНАЗАР УГЛИ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ГЕТЕРОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, УСТОЙЧИВЫХ К ЦИКЛИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ, НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

05.02.01 - Материаловедение в машиностроении. Литейное производство. Термическая обработка и обработка металлов давлением. Металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК (DSc)

Toshkent-2026

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2026.3.DSc/T3923.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации размещен на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) на веб-сайте Научного совета (http://tstu.uz) и информационно-образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	**Зиямухамедова Умида Алижоновна** доктор технических наук, профессор
Rasmiy opponentlar:	**Абдурахмонов Умарбек** доктор физико-математических наук
	Рискулов Алимжон Ахмаджонович доктор технических наук, профессор
	Тураходжаев Нодир Джахонгирович доктор технических наук, профессор
Yetakchi tashkilot:	**Джизакский политехнический институт**

Защита диссертации состоится 24 ноября 2026 года в 10:00 на заседании Научного совета No DSc.10/2025.27.12.T.01.04 при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирйулчи, д. 1. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (зарегистрирована под No 407). (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирйулчи, 1. Тел.: (99871) 299-05-66).

Автореферат диссертации разослан «12» ноября 2026 года.
(реестр протокола рассылки № 3 от «12» ноября 2026 года).

А.В. Умаров
Председатель научного совета
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Э.У. Тешабаева
Ученый секретарь научного совета
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Н.К.Турсунов
Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире для обеспечения устойчивой работы железнодорожной инфраструктуры, повышения безопасности движения поездов и продления срока службы элементов рельсового пути используются прокладки на основе органоминеральных композиций, стабилизирующих трибомеханические процессы, происходящие в системах рельсового скрепления. Вместе с тем, в узле рельсового скрепления, состоящем из стального рельса, металлического пружинного скрепления, полимерной прокладки, пружинных и боковых изоляторов, а также железобетонной шпалы, представляющем собой сложную металлополимерную систему, важно определить закономерные связи между передачей нагрузок, неравномерным распределением контактного давления, упруго-вязкоупругой деформацией, микросдвигами, трением, фрикционным нагревом, усталостью и износом поверхностных слоев, остаточной деформацией, скольжением, поверхностным разрушением и микродефектами в полимерных элементах под воздействием повторных динамических, ударных и вибрационных нагрузок, развитием механизмов адгезионного, абразивного, усталостного и фреттинг-износа, а также упругостью, геометрической стабильностью элементов, контактным давлением, коэффициентом трения, деформационным гистерезисом, фрикционным нагревом, интенсивностью износа и циклическим повреждением.

В мире ведутся научные исследования по созданию нового поколения полимерных, эластомерных, органоминеральных и волокнистых композиционных материалов с высокой циклической долговечностью для железнодорожных конструкций; при выборе элементов системы рельсового скрепления, наряду с их статической прочностью, исследованию их деформационно-релаксационного состояния при длительном циклическом нагружении, трибологических свойств, повреждения контактных поверхностей; созданию гетерокомпозитных материалов, состоящих из полимерной матрицы, минеральных наполнителей, волокнистых армирующих наполнителей, эластификаторов и функциональных модификаторов; определению закономерных связей между их межфазной адгезией, дисперсностью и распределением компонентов, структурным состоянием матрицы, пористостью и внутренними напряжениями, твердостью, упругим восстановлением, износостойкостью и усталостной прочностью, а также составом, структурой, трибомеханическими свойствами и циклической долговечностью, и управлению ими в соответствии с реальными условиями металлополимерного контакта.

В нашей республике реализуются системные меры по модернизации инфраструктуры железнодорожного транспорта, локализации промышленной продукции, эффективному использованию имеющихся сырьевых ресурсов и расширению производства конкурентоспособных материалов с высокой добавленной стоимостью. В Стратегии развития Нового Узбекистана определены задачи «... повышение энергоэффективности экономики на 20

процентов... сокращение потерь в отраслях промышленности и повышение эффективности использования ресурсов... сокращение объема вредных газов, выбрасываемых в атмосферу, на 20 процентов[1]». В связи с этим проведение научно-исследовательских работ по созданию составов гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, трибомеханическим воздействиям и климатическому старению, на основе местного минерального и полимерного сырья, разработке технологии их получения и научному обоснованию их пригодности к эксплуатации в металлополимерных системах имеет важное значение.

Настоящая работа в определенной степени служит реализации задач, определенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, № УП-21 «О дополнительных мерах по последовательному продолжению реформ в рамках приоритетных направлений развития страны до 2030 года и поднятию их на новый уровень» от 16 февраля 2026 года и постановлении № ПП-109 «О приоритетных мерах по реализации реформ в 2024 году по основным направлениям, определенным в Стратегии «Узбекистан - 2030»» от 4 марта 2024 года, а также в других нормативно-правовых актах, относящихся к данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики VI. «Новые материалы и передовые технологии производства, в том числе нанотехнологии, аддитивное производство, робототехника и автоматизированные системы».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации[2]. Исследования в области изучения трибомеханических процессов в металлополимерных системах железнодорожного транспорта и создания гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, ведутся в ведущих высших учебных заведениях и научных центрах мира, в том числе в Rail Transportation and Engineering Center - RailTEC при University of Illinois Urbana-Champaign (США), Birmingham Centre for Railway Research and Education - BCRRE при University of Birmingham, University of Huddersfield (Великобритания), Chang'an University (Китай), Korea Railroad Research Institute - KRRI (Южная Корея), Railway Technical Research Institute - RTRI (Япония), Лозаннском федеральном технологическом институте (Швейцария), University of Southern Queensland и University of Wollongong (Австралия),

[1] Постановление Президента Республики Узбекистан от 3 декабря 2022 года No ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к «зеленой» экономике до 2030 года»

[2] Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации: https://www.sciencedirect.com; https://www.researchgate.net;https://www.nasa.gov/news-release/nasa-tests-game-changing-composite, https://journals.sagepub.com.;https://4spepublications.pericles-prod.literatumonline.com.; www.scholar.google.com; https://www.mdpi.com., https://link.springer.com., https://onlinelibrary.wiley.com., https://cyberleninka.ru., https://www.elibrary.ru., https://neftegaz.ru., https://www.gpntb.ru. https://www.mdpi.com., http://ogi.az и других источников.

Suleyman Demirel University (Турция), Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

В результате проведенных в мире исследований по созданию научно-технологических основ рассмотрения зоны контакта между металлическими элементами (в том числе рельсами и крепежными деталями) и полимерным материалом как отдельной триботехнической системы был получен ряд научных результатов, в частности: глубоко изучены процессы трения, контактного давления, микродвижения (фреттинга) и тепловыделения, возникающие между металлической поверхностью и полимерным элементом (RailTEC при University of Illinois Urbana-Champaign, США); показано, что трибомеханическое поведение металлополимерной пары определяется не только прочностью материала, но и поверхностной твердостью, однородностью микроструктуры и распределением напряжений в зоне контакта (BCRRE при University of Birmingham, University of Huddersfield, Великобритания); установлены закономерности формирования усталостных трещин в поверхностном слое полимерных элементов в условиях циклического динамического нагружения, совместного проявления механизмов адгезионного и абразивного износа, а также изменения коэффициента трения в процессе эксплуатации (Chang'an University, Китай; KRRI, Южная Корея; RTRI, Япония); в зарубежных исследованиях гетерокомпозитных материалов изучено влияние межфазных связей между компонентами различной природы - полимерной матрицей, минеральными и органическими наполнителями, волокнистыми упрочнителями, эластомерными модификаторами и наноразмерными добавками - на формирование структуры (Лозаннский федеральный технологический институт, Швейцария; University of Southern Queensland и University of Wollongong, Австралия; Suleyman Demirel University, Турция; Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан).

В мире, на основе изучения закономерностей трибомеханических процессов в машиностроительных системах, проводится ряд исследований по научному обоснованию разработки составов гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, в том числе по следующим приоритетным направлениям: постоянный фрикционный контакт полимерных элементов с металлическими частями в исследованиях стыковых и боковых изоляторов; сохранение их геометрической формы и обеспечение стабильности диэлектрических свойств при длительных циклических нагрузках; микроизнос, возникающий в результате многократного трения в металлополимерной зоне контакта; истончение изоляционного слоя и последующее снижение электроизоляционных свойств; моделирование в качестве процесса трибомеханической усталости; создание гетерокомпозитных составов, обеспечивающих наряду с диэлектрической прочностью фрикционную стабильность и устойчивость к ударным нагрузкам; создание и внедрение закономерностей циклического разрушения гетерокомпозитов с учетом механических, динамических и

трибомеханических свойств рельсовых скреплений и металлополимерных систем на основе теоретических моделей, стандартов, климатических условий, сырьевой базы, реальных режимов эксплуатационных нагрузок, а также использования трибологических модификаторов.

Степень изученности проблемы. C. Kaewunruen, A.M. Remennikov, D.J. Thompson, R. Lewis, U. Olofsson, M. Steenbergen, D. Oregui, T. Dahlberg, H. Sato и другие ученые внесли большой вклад в изучение трибомеханических процессов, происходящих в металлополимерных системах железнодорожного транспорта, повышение эксплуатационной надежности рельсовых крепежных элементов и создание полимерных композиционных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам. Научно-исследовательские работы по структурному формированию, межфазному взаимодействию, управлению физико-механическими и триботехническими свойствами полимерных и гетерокомпозитных материалов проводили Н.С. Ениколопов, Г.Н. Бартенев, А.А. Берлин, В.А. Белый, Ю.С. Липатов, А.И. Свириденок, М.А. Аскаров, А.Т. Джалилов, С.С. Негматов, С.Ш. Рашидова, профессора А.Б. Джумабаев, Н. Ашуров, А.С. Ибадуллаев, А.В. Умаров, З.А. Таджиходжаев, А.А. Рискулов, У. Абдурахманов, Н.К. Турсунов, А.С. Хасанов, Э.У. Тешабаева, У.А. Зиямухамедова и другие ученые.

Ими разработаны теоретические и практические основы механизмов трения, адгезионного, абразивного и усталостного износа в металлополимерных трибосистемах, упруго-вязкоупругой деформации, релаксации и изменения структуры полимерных материалов под воздействием повторной нагрузки, а также определено влияние межфазной адгезии, дисперсности, кристаллизации, внутренних напряжений и пористости на свойства материалов в гетерокомпозитах, состоящих из полимерной матрицы, минеральных и органических наполнителей, волокнистых упрочняющих веществ, эластомерных модификаторов и трибологических добавок; на основе этих исследований созданы составы композиционных материалов для машиностроения и транспортных средств с высокой прочностью, износостойкостью, упругим восстановлением, термической устойчивостью и диэлектрическими свойствами, а также технологические методы их получения, в исследованиях подрельсовых прокладок и изоляторов усовершенствованы методы оценки их динамической жесткости, деформационного гистерезиса, способности гасить колебания, распределения контактного давления, остаточной деформации и усталостной долговечности.

Вместе с тем, в существующих работах трибомеханические процессы, происходящие в металлополимерных контактах рельс-прокладка-шпала, пружинный скрепитель-изолятор и рельс-боковой изолятор в системе рельсовых скреплений, часто изучались по отдельным показателям. Проводятся научно-исследовательские работы по определению закономерных зависимостей между амплитудой и частотой циклической нагрузки, контактным давлением, микросдвигом, коэффициентом трения, фрикционным нагревом, остаточной деформацией и интенсивностью

изнашивания, механизмов циклического разрушения гетерокомпозитов, созданных на основе местного минерального и полимерного сырья, волокнистых упрочняющих веществ и трибологических модификаторов, в условиях резкого перепада температур, влажности и пылеабразивной среды, закономерностей трибомеханических процессов в металлополимерных системах, научному обоснованию взаимосвязи между составом, структурой, физико-механическими и трибологическими свойствами гетерокомпозитов и циклической выносливостью, а также разработке оптимальных составов материалов для элементов рельсовых скреплений.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках международного прикладного проекта Uzbek-India 2021-85 на тему «Совершенствование механических и триботехнических свойств полимерных композиционных материалов и покрытий, обогащенных нано-термопластами (полипропилен), термореактивными (эпоксидный компаунд) и наноразмерными наполнителями» (2020-2023 гг.), местного проекта на тему «Производство железнодорожных рельсовых прокладок на основе местного сырья и повышение их эксплуатационной надежности» в рамках проекта «Академическая мобильность» № 2025/25/44, а также в рамках научно-исследовательских работ Ташкентского государственного транспортного университета.

Целью исследования является разработка состава гетерокомпозитных материалов на основе термопластичных (ПЭВП) и термореактивных (ЭД-20) связующих, обеспечивающих эксплуатационную надежность элементов рельсовых скреплений системы железнодорожного транспорта.

Задачи исследования:

целенаправленный выбор типа связующего компонента гетерокомпозитов на основе системного анализа факторов, влияющих на эксплуатационную надежность железнодорожных систем рельсовых скреплений;

научное обоснование критериев выбора местных минеральных и органических наполнителей, волокнистых упрочнителей, эластифицирующих модификаторов для подрельсовых прокладок на основе термопластичной (ПЭВП) матрицы, формирование составов гетерокомпозитных материалов с учетом вида, количества и соотношения компонентов;

изучение механизмов формирования микроструктурных изменений и процессов остаточной деформации, деформационного гистерезиса, релаксации и усталости, возникающих в условиях многоциклового сжатия в гетерокомпозитных материалах на основе ПЭВП, и выявление закономерностей их зависимости от параметров нагрузки;

научное обоснование критериев выбора местных минеральных и органических наполнителей, волокнистых упрочнителей и функциональных

модификаторов для пружинных клемм и боковых изоляторов на основе реактопластичной (ЭД-20) матрицы;

теоретическое и экспериментальное определение закономерностей распределения напряжений на межфазных границах «полимерная матрица - наполнитель - упрочнитель - модификатор" гетерокомпозита на основе ЭД-20 в условиях многоциклового сжатия, а также влияния структурных дефектов и внутренних напряжений на циклическую долговечность;

комплексное исследование физико-механических, триботехнических, термических, структурно-морфологических, диэлектрических, вибропоглощающих свойств и климатической стойкости гетерокомпозитных материалов, разработанных на основе матриц ПЭВП и ЭД-20, а также выявление закономерностей взаимосвязи "состав - структура - свойства - циклическая долговечность - эксплуатационная надежность," отражающих влияние компонентного состава и структурообразования на эксплуатационные характеристики;

изготовление опытных образцов элементов рельсовых скреплений из гетерокомпозитных материалов на основе ПЭВП и ЭД-20, разработанных из местного сырья, оценка их эксплуатационной надежности по результатам испытаний в опытно-промышленных условиях и определение технико-экономической эффективности внедрения в производство.

Объектом исследования являются гетерокомпозитные материалы на основе местного сырья, предназначенные для подрельсовой прокладки, изолятора пружинного крепления и бокового изолятора системы железнодорожного рельсового крепления, функциональные элементы, изготовленные из них, а также металлополимерные контактные системы, образуемые ими с металлическими частями.

Предметом исследования являются закономерности взаимосвязи между составом, структурно-морфологическим состоянием и межфазным взаимодействием гетерокомпозитных материалов и их показателями контактного давления, трения, упругой деформации, остаточной деформации, релаксации, износостойкости и усталостной прочности, возникающими под воздействием циклической нагрузки в металлополимерных контактах.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы теоретического анализа, экспериментального исследования, математико-статистического планирования экспериментов, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации. Структурное и фазовое состояние гетерокомпозитных материалов исследовано с помощью SEM, XRD и ИК-спектроскопии, термическая стабильность - методом ТГА, а триботехнические свойства - с помощью трибометрических испытаний. Их твердость, деформация при сжатии, остаточная деформация, деформационный гистерезис, релаксация, стойкость к многоцикловому нагружению и диэлектрические свойства оценивались на основе стандартных методов испытаний.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

научно обоснован принцип выбора материалов на основе метода Fuzzy Topsis для элементов системы железнодорожного рельсового скрепления с различными функциональными задачами;

в результате совместного применения СЭБС в количестве 3% и ЭВА в количестве 10% в гетерокомпозитных материалах на основе ПЭВП выявлена связь между изменением межфазной совместимости и упругого восстановления с остаточной деформацией или изменением динамической жесткости при циклических нагрузках, а также научно обосновано компатибилизирующее действие СЭБС и эластифицирующее действие ЭВА в обеспечении деформационной устойчивости материала;

получил развитие классический подход к межфазной адгезии "матрица-волокно" в гетерокомпозитных материалах с учетом многокомпонентного состава и условий циклического нагружения, научно обосновано, что передача нагрузки и структурная устойчивость определяются взаимосвязанным влиянием интерфазных зон, формирующихся на границах "матрица-волокно" и "матрица-дисперсная минеральная частица";

научно обосновано действие углеродного наполнителя из продуктов пиролиза шин в гетерокомпозитных материалах на основе ЭД-20 на поглощение ультрафиолетовых лучей и ограничение их проникновения в матрицу, в результате чего установлено замедление химического разрушения эпоксидной матрицы под воздействием света и кислорода, а также развития поверхностных микроповреждений;

в гетерокомпозитах на основе эпоксидного связующего ЭД-20 определены закономерности влияния межфазных взаимодействий, степени сшивания, внутренних напряжений и структурных дефектов, образующихся в результате взаимодействия отвердителя, местного минерального наполнителя, волокнистого армирующего наполнителя и функциональных модификаторов, на ударные нагрузки пружинных и боковых изоляторов;

впервые определены закономерности совместного влияния амплитуды и частоты циклического нагружения, контактного давления, микросдвига и скорости скольжения на коэффициент трения, фрикционный нагрев, деформационное состояние и интенсивность износа в металлополимерных контактах рельса и прокладки, пружинного скрепления и изолятора, а также рельса и бокового изолятора;

впервые усовершенствованы состав и технология получения гетерокомпозитных материалов на основе механоактивированного местного сырья, обеспечивающих эксплуатационную надежность элементов железнодорожного транспорта с различными функциональными задачами, высокие виброгасящие свойства и термическую стабильность, а также высокую деформационную устойчивость при циклических нагрузках.

Практические результаты исследования:

на основе местного полимерного и минерального сырья, волокнистых упрочнителей и функциональных модификаторов разработаны составы новых гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, для

подрельсовой прокладки, изолятора пружинного скрепления и бокового изолятора системы железнодорожного рельсового скрепления, а также усовершенствована технология получения из них функциональных элементов;

в результате целенаправленного введения местных минеральных наполнителей и модифицирующих добавок в полимерную матрицу устойчивость разработанных гетерокомпозитных материалов к циклическому сжатию и деформационному повреждению повышена в 1,3-1,5 раза, показатель упругого восстановления - на 18-25 процентов, а также обеспечена стабильность формы и размеров в условиях многоцикловой нагрузки;

за счет оптимизации состава и структурного состояния гетерокомпозитных материалов коэффициент трения в металлополимерных контактах снижен на 20-30%, износостойкость повышена в 1,5-2,0 раза по сравнению с базовым материалом, а показатели термической стабильности улучшены на 25-35%;

в результате применения разработанных подрельсовых прокладок и изоляторов в системе рельсового скрепления технико-экономически обоснована возможность увеличения срока их службы в 1,5-2,0 раза, снижения остаточной деформации и поверхностного износа на 30-40%, сокращения потребности в импортируемых полимерных элементах до 25-30%, а также снижения себестоимости продукции на 15-20%.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием стандартных методов испытаний и современных средств анализа при изучении структуры, физико-химических, механических, триботехнических и технологических свойств гетерокомпозитных полимерных материалов, математико-статистической обработкой результатов экспериментов с помощью компьютерных программ, оптимизацией количественных соотношений компонентов, оценкой неопределенности результатов измерений и сравнительным анализом полученных результатов с существующими научными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что в гетерокомпозитных материалах на основе термопластичных (ПЭВП) и реактопластичных (ЭД-20) связующих установлены закономерности взаимосвязи состава компонентов, структурообразования и межфазного взаимодействия с трибомеханическими процессами в металлополимерных контактах и циклической долговечностью; развиты межфазные связи, объясняющие передачу нагрузки и структурную устойчивость в многокомпонентных системах, а также усовершенствованы научные основы целенаправленного выбора состава материалов для элементов рельсовых скреплений различного функционального назначения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в усовершенствовании составов и технологии получения гетерокомпозитных материалов для подрельсовых прокладок, изоляторов пружинных скреплений и боковых изоляторов на основе местного сырья; создании возможности

управления виброгасящей способностью, термической стабильностью и стойкостью к циклическим нагрузкам элементов в соответствии с их функциональным назначением путем механоактивации наполнителей и выбора соотношения компонентов. Полученные результаты служат основой для производства материалов, направленных на повышение эксплуатационной надежности элементов рельсовых скреплений, локализации импортозамещающей продукции и оценки технико-экономической эффективности их использования.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных по научным основам разработки составов гетерокомпозитных материалов, устойчивых к циклическим нагрузкам, на базе изучения закономерностей трибомеханических процессов в металлополимерных системах железнодорожного транспорта:

внедрены в практику прокладки для систем рельсовых скреплений, изготовленные из гетерокомпозитных материалов на основе местного сырья, в Управлении промышленного железнодорожного транспорта АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» (справка АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» № 07-26/01-01180 от 30 июля 2026 года). В результате это позволило увеличить срок службы прокладок в 1,5-1,8 раза по сравнению с традиционными материалами;

внедрены в практику боковые и пружинные изоляторы из термореактивных гетерокомпозитных материалов, применяемые в системе рельсовых скреплений АО «ТАШКЕНТСКИЙ ЗАВОД ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И РЕМОНТУ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ» внедрены (справка АО «ТАШКЕНТСКИЙ ЗАВОД ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И РЕМОНТУ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ» от 29 сентября 2026 года № 1080). В результате срок службы изоляторов по сравнению с традиционными материалами увеличился в 1,3–1,5 раза, что также позволило снизить затраты на техническое обслуживание, ремонт и замену на 20–25%;

внедрены в практику изоляторов и подрельсовых прокладок, разработанных из гетерокомпозитных материалов оптимального состава, в производственных условиях Управления промышленного железнодорожного транспорта АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» (справка АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» No 07-26/01-01180 от 30 июля 2026 года). Внедрены позволило снизить негативное воздействие процессов деформации и износа, возникающих под действием трения и циклических нагрузок, а также повысить эксплуатационную надежность узла рельсового скрепления в 1,3-1,8 раза.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования представлены в 17 работах, в том числе 11 международных, из которых 5 опубликованы в журналах, входящих в базу данных Scopus, а также были

доложены и обсуждены на 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 29 научных работ, из них 1 патент, 2 свидетельства DGU, 16 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 9 в республиканских и 7 в зарубежных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 200 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость. Также приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, апробации, опубликованности, а также о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации, названной «**Современные тенденции создания новых материалов с высокими эксплуатационными свойствами для конструкций и деталей систем железнодорожного транспорта»** проанализировано конструктивное строение металлополимерных трибопар, применяемых в конструкциях и деталях систем железнодорожного транспорта, а также условия их эксплуатации. Научно-теоретически изучены функциональные, механические, трибологические и эксплуатационные требования к конструкциям и деталям железнодорожного транспорта, рассмотрены современные тенденции и перспективные направления использования гетерокомпозитных материалов. Оценена возможность использования местного сырья и вторичных ресурсов в гетерокомпозитных материалах, работающих в условиях циклических нагрузок, сформированы теоретические основы повышения эксплуатационной надежности конструкций и деталей железнодорожного транспорта с учетом процессов трения, изнашивания, деформации и циклических повреждений, возникающих в металлополимерных контактах.

Во второй главе диссертации под названием **«Выбор составов и обоснование методов исследования гетерокомпозитных материалов для деталей и конструкций железнодорожных систем, работающих в условиях циклических нагрузок»** путем многокритериальной оценки на основе метода Fuzzy TOPSIS были выбраны исходные компоненты гетерокомпозитных материалов для деталей железнодорожного транспорта,

работающих в условиях повторных нагружений и в металлополимерных трибопарах.

При этом были определены расстояния каждого альтернативного состава до положительного идеального решения D_i^+и до отрицательного идеального решения D_i^- а коэффициент их близости к оптимальному решению оценивался с помощью следующего выражения:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (1)$$

По мере приближения значения CC_i, альтернативный состав считается близким к оптимальному решению.

Учитывая, что электроизоляционные свойства пружинных и боковых изоляторов являются одним из основных показателей, определяющих функциональную пригодность детали, классический коэффициент близости Fuzzy TOPSIS был усовершенствован с помощью коэффициента, отражающего приоритет изоляционных свойств:

$$CC_{i,iz} = CC_i \cdot K_{iz,i}^{\lambda} \quad (2)$$

или

$$CC_{i,iz} = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \cdot K_{iz,i}^{\lambda} \quad (3)$$

где $CC_{i,iz}$ - итоговый коэффициент близости с учетом изоляционного свойства; $K_{iz,i}$ -нормированный изоляционный показатель в интервале 0-1; λ - коэффициент, определяющий значимость изоляционного свойства.

В предложенном подходе снижается интегральная оценка составов с высокими механическими и трибологическими показателями, но не отвечающих требуемому уровню электроизоляционных свойств. Таким образом, для подрельсовых прокладок, пружинных и боковых изоляторов создана возможность дифференциального многокритериального выбора в соответствии с их функциональным назначением. Для подрельсовых прокладок влияние изоляционного критерия относительно невелико, а для пружинных и боковых изоляторов коэффициент λ принимается более высоким из-за высокой функциональной значимости диэлектрической стабильности.

Исходя из целей и задач исследования, в качестве термопластичного связующего для подрельсовых прокладок был выбран полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), для улучшения упруго-деформационных свойств - этиленвинилацетат (ЭВА) и переработанная резина, а для повышения совместимости между полимерными фазами и наполнителями - стирол-этилен-бутилен-стирол (СЭБС) (табл. 1).

Таблица 1. Компоненты гетерокомпозитного материала, выбранные для объектов исследования.

№	Название компонента	ISO, ГОСТ va TSH	Назначение
1	Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	TS 17642168-04:2013	Термопластичное связующее
2	Этиленвинилацетат (ЭВА)	TU 2211-211-00203335-2013	Модификатор
3	Стирол-этилен/бутилен-стирол (СЭБС)	ISO 18064:2022	Компатибилизатор

4	Переработанная резина	ГОСТ Р 54095-2023	Эластомерный компонент
5	Технический углерод (сажа)	ГОСТ 7885-86	Дисперсный наполнитель
6	Стекловолокно типа Е	ГОСТ 32650-2014	Волокнистый наполнитель
7	Эпоксидно-диановая смола (ЭД-20)	ГОСТ 10587-84	Термореактивное связующее
8	Метил-5-норборнен-2,3-дикарбоновый ангидрид	-	Отвердитель
9	Пиридин-4-карбоксамид	-	Модификатор
10	АКС-30	O‘z DSt 1056:2004	Дисперсный наполнитель

С целью улучшения триботехнических, деформационных и прочностных свойств научно обосновано использование в качестве функциональных наполнителей переработанного технического углерода (сажи), стекловолокна и каолина. В качестве термореактивного связующего для пружинных и боковых изоляторов выбрана эпоксидная смола ЭД-20, в качестве отвердителя - метил-5-норборнен-2,3-дикарбоновый ангидрид, в качестве модифицирующего компонента - пиридин-4-карбоксамид, в качестве армирующего компонента - стекловолокно, а в качестве дисперсного минерального наполнителя - каолин марки АКС-30.

Для оценки структурно-морфологических, физико-механических, термических, диэлектрических и триботехнических свойств гетерокомпозитных материалов были выбраны современные экспериментальные методы. Обоснованы методики определения процессов трения, износа и контакта в металлополимерных трибопарах, а также деформационно-динамических свойств, остаточной деформации, диссипации энергии и циклической стабильности при повторных нагрузках.

В третьей главе диссертации, названной «**Механизмы межструктурных взаимодействий в гетерогенных системах и их влияние на свойства гетерокомпозитных материалов, обеспечивающих эксплуатационную надежность деталей железнодорожного транспорта, работающих при циклических нагрузках»** теоретически обоснованы механизмы структурного формирования и фрикционного взаимодействия гетерокомпозитных материалов, работающих в металлополимерных трибосистемах. Уравнение Дюпре, основанное на классической теории межфазной адгезии, усовершенствовано с учетом многофазной структуры гетерокомпозитов, и научно обоснован механизм совместного распределения циклической нагрузки не только на интерфейсе «матрица - волокно»б но и через межфазные границы «матрица - волокно» и «матрица - дисперсный наполнитель».

В гетерокомпозитах геометрическая поверхность, разделяющая две фазы, рассматривается как межфазная граница (интерфейс), а объемный слой вокруг нее, состав и свойства которого отличаются от основных фаз, - как

интерфаза. Установлено, что микроструктурная деградация под воздействием многоциклового сжатия сопровождается упругой деформацией, межфазным скольжением, накоплением остаточной деформации и развитием микрополостей и микротрещин.

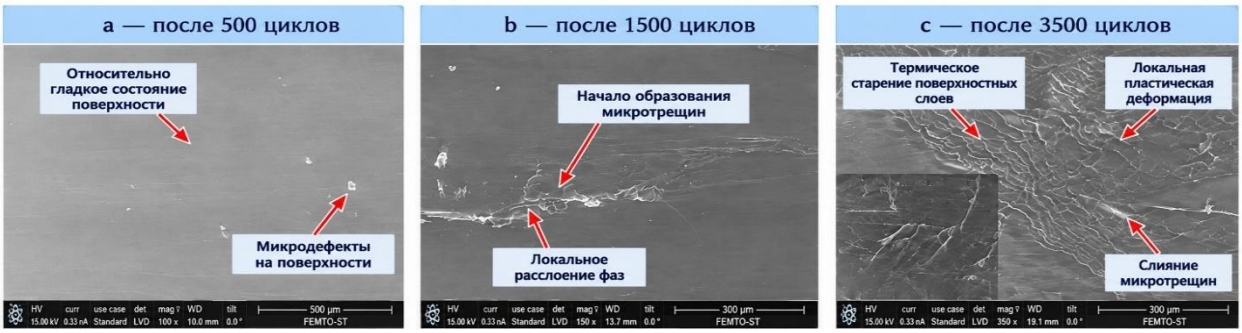


Рис. 1. Изменение микроструктуры гетерокомпозитного материала под воздействием многоциклового сжатия.

SEM-анализ показал постепенное развитие деградационных процессов в микроструктуре гетерокомпозита с увеличением числа циклов. Если на начальном этапе наблюдались локальные микродефекты и пластические деформации, то на последующих стадиях было выявлено ослабление адгезионных связей на границах раздела «матрица-наполнитель” в результате накопления остаточной деформации, межфазного скольжения, развития микропустот и микротрещин. Данные микроструктурные изменения обосновали необходимость теоретического описания механизма передачи и перераспределения циклической нагрузки между компонентами композита. На этой основе была разработана структурная схема передачи внешней нагрузки от полимерной матрицы к волокнистым и дисперсным наполнителям через межфазные границы.

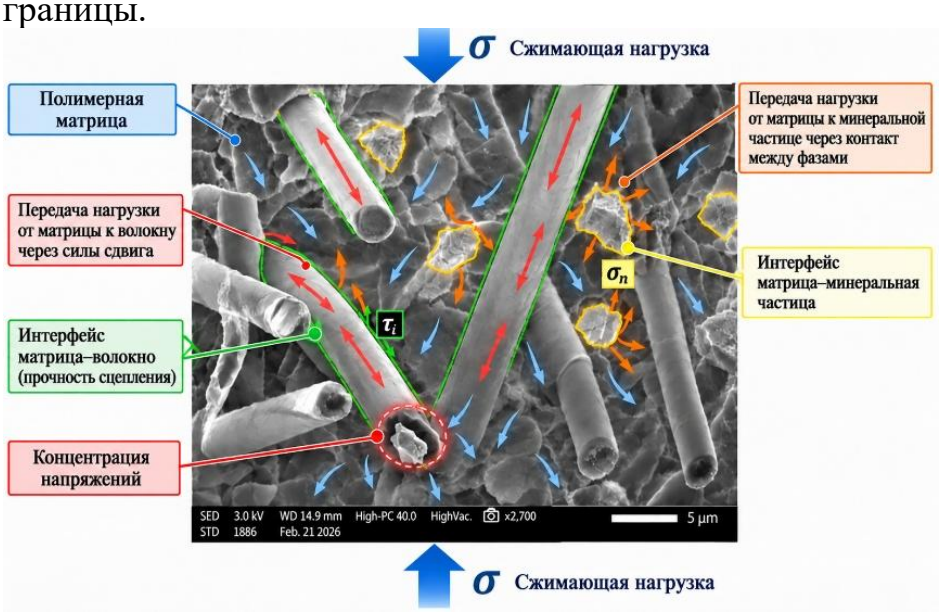


Рис. 2. Схема распределения циклической нагрузки через границы раздела матрица-волокно и матрица-дисперсный наполнитель в микроструктуре гетерокомпозитного материала.

На основе SEM-изображений показана передача внешней сжимающей нагрузки от полимерной матрицы на волокнистые и дисперсные минеральные наполнители, формирование напряжений сдвига на границе раздела матрица-волокно, а также локальных напряжений на границах раздела матрица-дисперсная частица.

Согласно теории дюпре, межфазная адгезия между матрицей и наполнителем определяется их поверхностными энергиями и межфазной энергией. Увеличение работы адгезии обеспечивает лучшее смачивание поверхности наполнителя матрицей, упрочнение межфазных связей и эффективную передачу внешней нагрузки от матрицы к волокнистым и дисперсным наполнителям.

Для математического описания данного структурного состояния была использована модель, основанная на классической теории адгезии дюпре:

$$W_a = \frac{\sigma_f d_f \delta_i}{2 l_c}$$

d_f- диаметр волокна, Wa - работа межфазной адгезии, σ_f- прочность волокна при растяжении, δ_i- эффективное расстояние разрыва интерфейса, l_c - критическая длина волокна,

В классической модели передача нагрузки в основном объясняется интерфейсом матрица-волокно. Однако в многокомпонентной гетерокомпозитной микроструктуре дисперсные минеральные частицы также активно участвуют в восприятии и перераспределении нагрузки. В связи с этим модель дюпре была усовершенствована для совместного учета геометрических и интерфейсных параметров волокнистых и дисперсных наполнителей:

$$W_a = \frac{\sigma_f d_f \delta_i}{2 l_c}\left[1 + \frac{3}{2}\sum_{j=1}^{n} \eta_{p,j} \frac{\varphi_{p,j}}{\varphi_f}\frac{d_f}{d_{p,j}}\right] \quad (5)$$

где j-порядковый номер дисперсного наполнителя, n-общее количество дисперсных наполнителей, , $\eta_{p,j}$,j-коэффициент эффективности j-интерфейса наполнителя с матрицей, $\varphi_{p,j}$,j-объемная доля j-дисперсного наполнителя, φ_f - объемная доля волокнистого наполнителя, $d_{(p,j)}$-j-средний диаметр частиц дисперсного наполнителя,

Предложенная модель позволяет количественно оценить распределение циклической нагрузки не только на границе раздела матрица-волокно, но и совместно через границы раздела матрица-волокно и матрица-дисперсный наполнитель, а также влияние объемной доли дисперсных частиц, их размера и эффективности интерфейса на работу межфазной адгезии.

На основе выявленных закономерностей межфазной передачи нагрузки и адгезионного взаимодействия обоснована необходимость комплексной оптимизации соотношения полимерной матрицы, эластомерных компонентов, волокнистых и дисперсных наполнителей при формировании состава гетерокомпозитного материала для подрельсовой прокладки. С этой целью

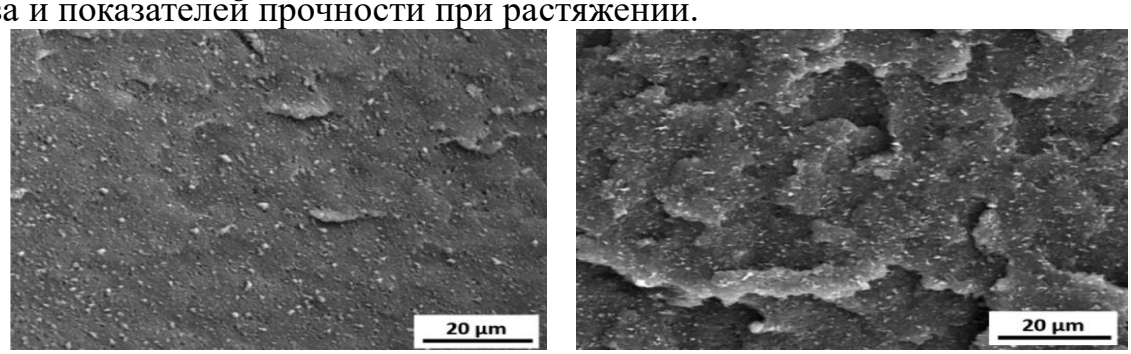
были разработаны образцы гетерокомпозита П-1-П-6, предназначенные для работы в условиях циклических и контактных нагрузок, отличающиеся составом и количественными соотношениями компонентов (табл. 2).

Таблица 2.

Состав гетерокомпозитных образцов для подрельсовой прокладки

Образец	**Полимерная матрица %**	**ЭВА (%)**	**Технический углерод (сажа) (%)**	**СЭБС (%)**	**Переработанная шина (%)**	**стекловолокна%**	**Каолин %**
*П-1	ПЭВП (56%)	15	3	3	10	8	5
П-2	ПП (58%)	13	3	3	10	8	5
П-3	ПЭВП (61%)	10	3	3	10	8	5
П-4	ПВХ (59%)	10	3	3	12	8	5
П-5	ПП (51%) + СВМПЭ (5%)	15	3	3	10	8	5
Р-6	ПП (56%)	10	3	3	15	8	5
*В обозначении буква «П» принята в качестве условного обозначения слова «прокладка.»							

Исследовано влияние модификатора СЭБС с целью улучшения межфазной адгезионной связи между полимерной матрицей, эластомерными фазами и дисперсными наполнителями в подрельсовых прокладках систем железнодорожных скреплений, работающих в условиях циклического нагружения. Влияние количества СЭБС на микроструктурную однородность, межфазную совместимость и механические свойства оценивали на основе сэм-анализа и показателей прочности при растяжении.



а) **б**

а - плотная и однородная микроструктура, сформировавшаяся при добавлении СЭБС; б - фазовое разделение, агломерация и микропустоты, наблюдаемые без добавления СЭБС.

Рис. 3. SEM-изображения системы ПЭВП -ЭВА.

SEM-анализ показал, что в результате введения СЭБС повышается целостность границ раздела между полимерными фазами и наполнителями, а также формируется плотная и однородная микроструктура. В составе же без добавления СЭБС наличие фазового разделения, локальной агломерации и микропустот указывает на слабую межфазную адгезионную связь. Это свидетельствует о том, что СЭБС в качестве компатибилизатора улучшает межфазную совместимость и создает условия для более эффективной передачи напряжений по всему объему композита. Данные структурные закономерности, выявленные при СЭМ-анализе, также подтверждаются результатами механических испытаний.

Улучшение межфазной совместимости, выявленное при СЭМ-анализе, также подтверждается результатами механических испытаний. При увеличении количества СЭБС с 0% до 3% прочность при растяжении увеличилась с 43,2 МПа до 47,5 МПа, т.е. почти на 10%. Этот рост объясняется тем, что СЭБС в качестве компатибилизатора укрепляет адгезионную связь между полимерной матрицей, эластомерной фазой и наполнителями, а также более эффективно передает внешнюю нагрузку по композитной структуре.

Поскольку увеличение количества СЭБС более 3% приводит к снижению прочности, 3% СЭБС принято в качестве оптимального количества, обеспечивающего межфазное соответствие и механическую прочность.

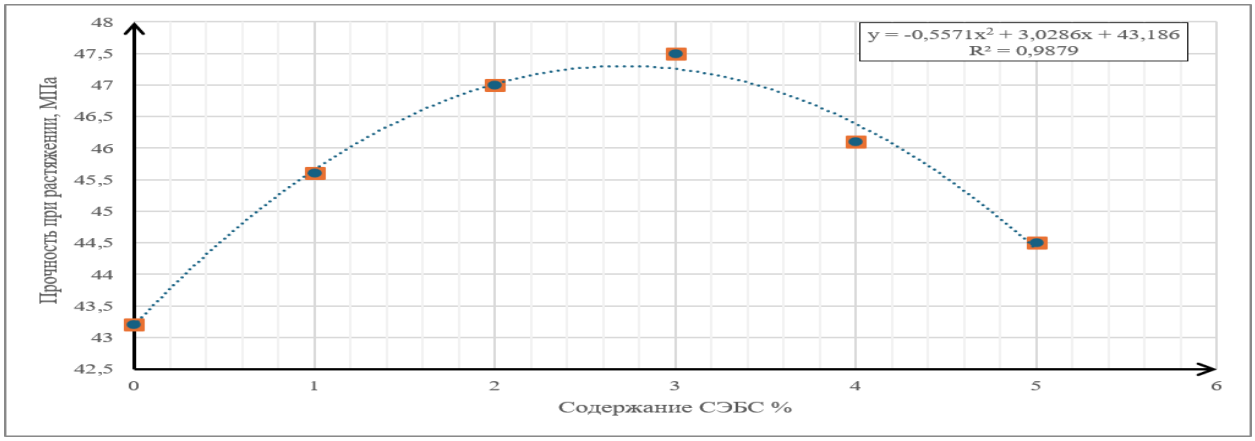


Рис.4. Влияние содержания СЭБС на прочность при растяжении.

В четвертой главе диссертации **«Экспериментальное исследование трибомеханических свойств гетерокомпозитных материалов, полученных на основе местного сырья, в металлополимерных контактах»** комплексно экспериментально исследованы структурно-морфологические, физико-механические, термические, диэлектрические и трибологические свойства гетерокомпозитных материалов, сформированных с использованием местного и вторичного сырья. Установлены закономерности влияния состава компонентов и их количественного соотношения на микроструктуру, межфазное взаимодействие и функционально-эксплуатационные показатели материала. На основании полученных результатов разработаны экспериментальные критерии и научные основы выбора оптимальных составов гетерокомпозитов для подрельсовой прокладки, пружинного и бокового изоляторов.

По результатам сравнительных экспериментальных исследований установлено, что среди составов П-1-П-6 образец П-3 демонстрирует наиболее оптимальный комплекс физико-механических и триботехнических показателей. Данный состав характеризуется сочетанием высокой прочности, деформационной устойчивости, упругого восстановления и структурной однородности и был выбран в качестве оптимального состава для последующих углубленных трибологических, термических и циклических испытаний подрельсовой прокладки.

SEM-EDS-анализ показал формирование в образце П-3 плотной, относительно однородной и малодефектной микроструктуры, достаточно равномерное распределение дисперсных наполнителей в полимерной матрице, а также отсутствие выраженных крупных пор и межфазных расслоений. Регистрация элементов Al, Si и Mg в EDS-спектре подтверждает наличие минеральных наполнителей в составе композита (рис. 5).

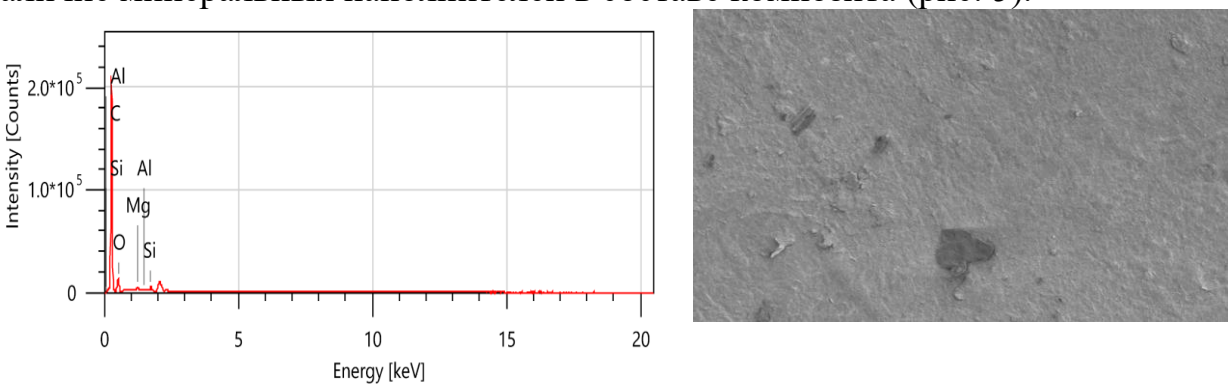


Рис. 5. SEM-EDS-анализ микроструктуры и элементного состава образца гетерокомпозитной подрельсовой прокладки П-3.

Наблюдаемые морфологические особенности свидетельствуют об относительно эффективном формировании контакта между матрицей и дисперсными фазами в составе П-3. Для уточнения химической природы межфазного взаимодействия на следующем этапе проведены ИК-спектроскопические исследования.

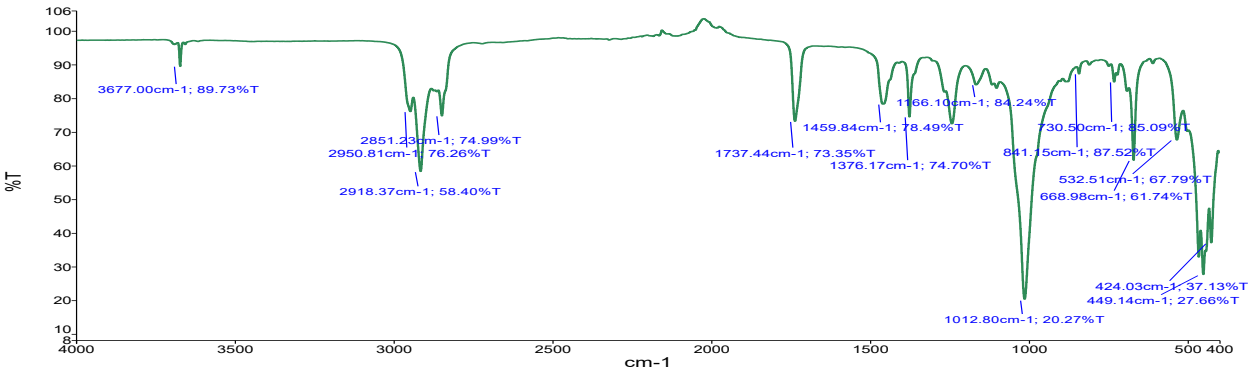


Рис. 6. ИК-спектроскопический анализ образца гетерокомпозитной подрельсовой прокладки Р-3.

ИК-спектроскопический анализ показал сохранение в гетерокомпозите П-3 характерных полос поглощения полимерной матрицы и функциональных компонентов, а также изменение интенсивности и формы спектра в областях отдельных функциональных групп. Полосы в диапазоне 2916-2961 $см^{-1}$ относятся к алифатическим группам -CH_2/-CH_3, полоса около 1737 $см^{-1}$ - к карбонильным группам, а поглощение в области 1000-1100 $см^{-1}$ - к силикатным компонентам. Указанные спектральные изменения косвенно свидетельствуют об усилении межмолекулярного и межфазного взаимодействия между матрицей, эластомерной фазой и минеральными наполнителями. При этом отсутствие новых выраженных полос поглощения

указывает на преимущественно физический и межмолекулярный характер межфазного связывания.

Для оценки влияния улучшенного межфазного контакта, выявленного методами SEM и ИК-спектроскопии, а также межмолекулярного взаимодействия компонентов на структурное состояние выполнен рентгенодифракционный анализ образца П-3. Результаты XRD позволили оценить кристалличность полимерной матрицы, фазовое состояние минеральных наполнителей и степень структурного упорядочения композита.

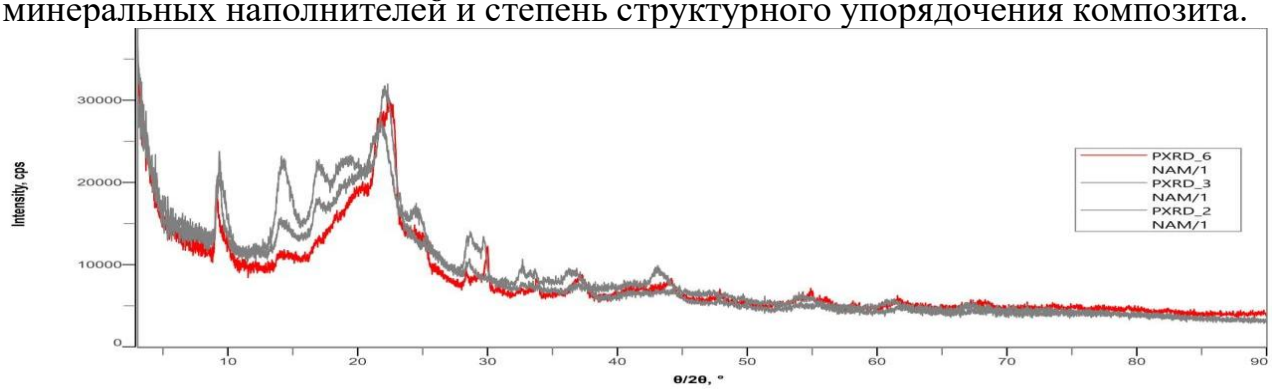


Рис. 7. XRD-дифрактограммы гетерокомпозитных материалов подрельсовых прокладок П-1, П-2 и П-3.

По результатам XRD-анализа на дифрактограмме образца Р-3 зарегистрированы характерные дифракционные максимумы в областях 2θ ≈ 9-10°, 14-18°, 21-23°, 29-30° и 43-45°. Четкое проявление основных кристаллических максимумов при сохранении диффузного аморфного фона свидетельствует о формировании в полимерной матрице относительно сбалансированной кристаллическо-аморфной структуры. При таком структурном состоянии кристаллические области обеспечивают твердость, формоустойчивость и сопротивление остаточной деформации, а аморфные и эластомерные области способствуют сохранению упругого восстановления и способности к диссипации энергии колебаний.

На этом основании образец П-3 оценен как состав с оптимальным сочетанием структурной устойчивости и деформационной адаптивности, необходимых для подрельсовой прокладки. Поскольку в эксплуатации материал наряду с механическими и циклическими нагрузками подвергается температурному воздействию, на следующем этапе для оценки его термической стабильности, стадий разложения и структурной целостности при повышенных температурах проведен TGA/DSC-анализ.

Сравнительный TGA/DSC-анализ П-3 и традиционного материала подрельсовой прокладки показал более высокую термическую стабильность состава П-3 (рис. 8). Для образца П-3 потеря массы 5 и 10 % наблюдалась соответственно при 387 и 400 °С, а потеря 50 % массы - при 467 °С. Остаточная масса при 600 °С составила 12,8 %, что связано с наличием в составе композита термически стабильных минеральных и волокнистых компонентов. У традиционного материала подрельсовой прокладки остаточная масса при высоких температурах практически не сохранялась.

Термические эффекты на кривых DSC свидетельствуют о поэтапном протекании процессов разложения в составе П-3. Это указывает на формирование более термостойкой гетерогенной структуры вследствие структурного взаимодействия полимерной матрицы, эластомерной фазы и минеральных наполнителей.

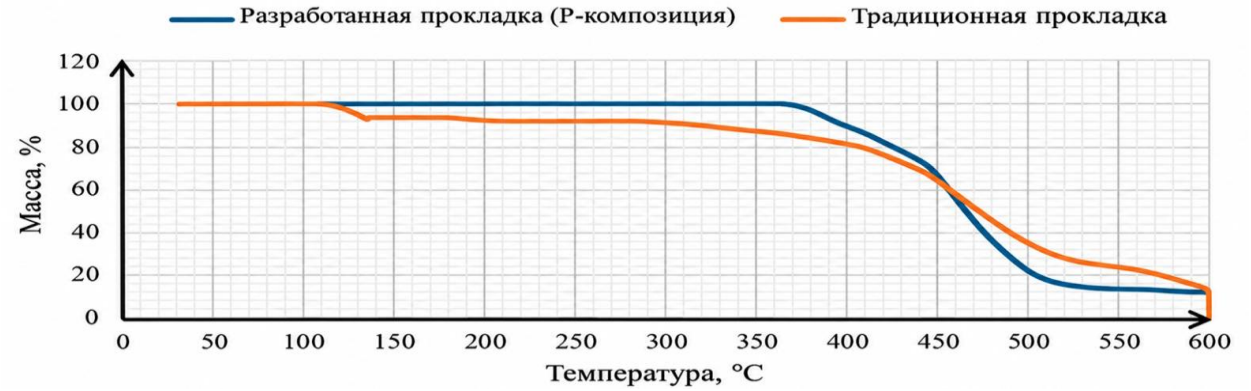


Рис. 8. Сравнительный термогравиметрический (TGA) анализ материала П-3 и традиционной подрельсовой прокладки.

Полученные результаты подтверждают более высокую способность образца П-3 сохранять структурную целостность в условиях термомеханического нагружения по сравнению с традиционным материалом.

Комплексные структурные, физико-механические, спектроскопические, рентгенодифракционные и термические исследования показали формирование в образце П-3 эффективного межфазного адгезионного взаимодействия между полимерной матрицей, эластомерной фазой, волокнистыми и дисперсными наполнителями. Это обеспечивает повышение однородности микроструктуры, снижение межфазного расслоения, эффективную передачу внешней нагрузки между компонентами композита и увеличение структурной стабильности. В результате состав П-3 продемонстрировал оптимальное сочетание физико-механических, термических, химико-структурных и деформационных свойств и обоснован как перспективный гетерокомпозит для подрельсовых прокладок, работающих при циклических и контактных нагрузках.

Для обеспечения высокой диэлектрической, механической и термической стабильности пружинного и бокового изоляторов системы рельсового скрепления сформированы композиционные составы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 в качестве термореактивного связующего (табл. 3).

Таблица 3.

Составы композиционных образцов на основе ЭД-20 для бокового и пружинного изоляторов

Образец	Эпоксидная смола ЭД-20, масс. ч.	Метил-5-норборнен-2,3-дикарбоновый ангидрид, масс. ч.	Пиридин-4-карбоксамид, масс. ч.	Короткое стекловолокно E-glass, масс. ч.	Каолин, масс. ч.	технический углерод, масс. ч.
И-1	100	7	1	10	6	1

И-2	100	7	1	12	7	2
И-3	100	7	1	15	8	3
И-4	100	7	1	18	9	4
И-5	100	7	1	20	10	5
Примечание: Буква «И» принята как условное обозначение слова «изолятор».						

Образцы, изготовленные на основе указанных композиционных составов, комплексно оценены по структурным, физико-механическим, диэлектрическим и эксплуатационным показателям, на основании чего сформированы критерии выбора оптимального состава для бокового и пружинного изоляторов. Поскольку данные детали в эксплуатации работают под действием сжимающих, изгибающих, ударных и повторных нагрузок, материал наряду с достаточной прочностью должен сохранять ударную вязкость и структурную целостность. С учетом зависимости перераспределения локальных напряжений и ограничения хрупкого разрушения от содержания минеральной и армирующей фаз экспериментально исследовано влияние содержания каолина АКС-30 на прочность при растяжении и ударную вязкость композиций на основе ЭД-20 (рис. 9).

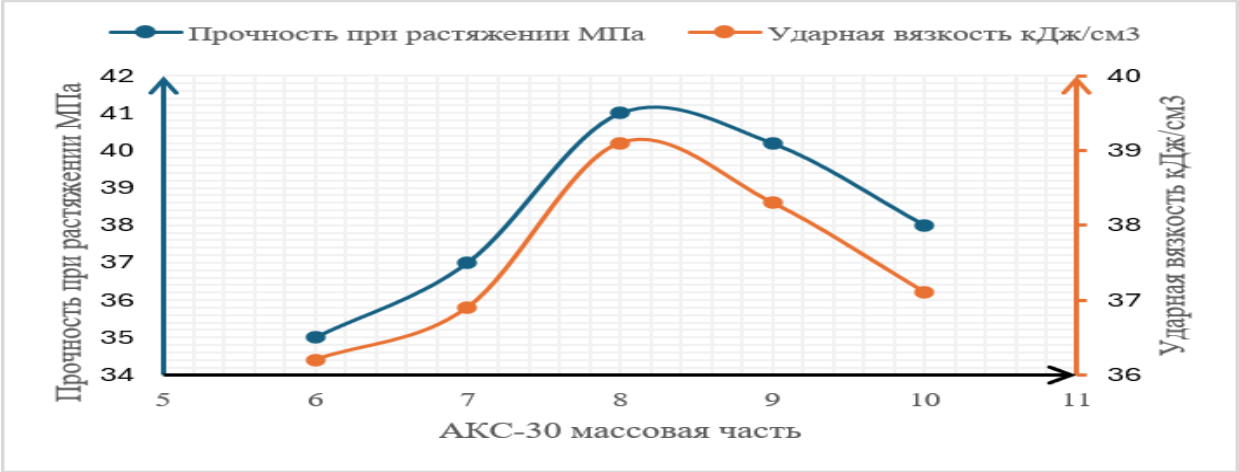


Рис. 9. Влияние содержания АКС-30 на механические свойства композитов для бокового и пружинного изоляторов.

Поскольку боковые и пружинные изоляторы работают при повторном сжатии, изгибе и ударных нагрузках, наряду с прочностью важное значение имеет ударная вязкость материала. При увеличении содержания АКС-30 с 6 до 8 масс. ч. прочность при растяжении возрастает с 35 до 41 МПа, а ударная вязкость - с 36,4 до 39,1 кДж/м³. Это объясняется эффективным распределением дисперсных частиц в матрице и перераспределением нагрузки через межфазные границы. Достижение максимальных значений обоих показателей при 8 масс. ч. АКС-30 позволило принять данное содержание как оптимальное; при дальнейшем увеличении наблюдалось снижение свойств вследствие агломерации и локальной концентрации напряжений.

Для бокового и пружинного изоляторов на основе составов, приведенных в таблице 3, изготовлены гетерокомпозитные образцы на базе эпоксидной смолы ЭД-20 и проведены комплексные экспериментальные

исследования их физико-механических и триботехнических свойств (табл. 4). В составе И-3 при содержании технического углерода (сажи) 3 масс. ч. объемное удельное электрическое сопротивление составило$\rho_v = 3{,}12 * 10^{14}$ Ω·см, а поверхностное электрическое сопротивление $\rho_s = 1{,}12 \times 10^{14}$ - Ω·см. Эти значения свидетельствуют о сохранении высокого электрического сопротивления материала и обосновывают сочетание необходимых физико-механических и электроизоляционных свойств состава И-3 для применения в боковых и пружинных изоляторах.

Таблица 4.

Физико-механические и триботехнические свойства гетерокомпозитных материалов на основе ЭД-20

Показатель	Составы				
	И-1	**И-2**	**И-3**	**И-4**	**И-5**
Предел прочности при растяжении, МПа	39	37	41	37	35
Относительное удлинение при разрыве, %	36	38	41	38	39
Стойкость к горячей воде (10 суток), %	6,9	6,3	8,7	6,5	7,1
Термостойкость, °С, по ГОСТ 25951-83	280	275	292	270	265
Водопоглощение, %, по ГОСТ 4650-2014	0,006	0,007	0,003	0,005	0,005
Время полимеризации (отверждения), мин	50	50	30	50	45
Ударная вязкость, кДж/см²	33,9	34,2	39,1	35,7	32,4
Твердость, Shore D	78	81	84	87	91
Удельное объемное сопротивление, Ω·см	$9{,}17*10^{15}$	$4{,}39*10^{14}$	$3{,}12*10^{14}$	$5{,}3*10^{13}$	$2{,}3*10^{12}$
Морозостойкость, °С	-40	-45	-50	-45	-40
Теплостойкость, °С	125	130	140	135	130

По результатам комплексных исследований состав И-3 продемонстрировал наиболее оптимальное сочетание физико-механических, термических и диэлектрических свойств. Эффективное формирование межфазных связей между матрицей, коротким стекловолокном и дисперсными наполнителями способствует равномерному распределению нагрузки и повышению структурной устойчивости. На этом основании образец И-3 выбран в качестве оптимального гетерокомпозитного состава для бокового и пружинного изоляторов.

Для оценки эксплуатационной эффективности выбранных составов П-3 и И-3 в условиях металлополимерного контакта проведены сравнительные трибологические исследования. Образцы П-3 и И-3 сравнивали с применяемыми материалами в одинаковых условиях испытаний по коэффициенту трения, интенсивности изнашивания и морфологическим изменениям контактной поверхности.

Процесс трения образца подрельсовой прокладки П-3 в условиях металлополимерного контакта оценивали во времени. В ходе испытания

коэффициент трения изменялся с определенными колебаниями, а его среднее значение составило (рис. 10). Наблюдаемые колебания объясняются микроперемещениями в зоне контакта, взаимодействием поверхностных неровностей и периодическим формированием трибослоя. Стабильное сохранение среднего уровня коэффициента трения свидетельствует о трибологической устойчивости состава П-3 в условиях металлополимерного контакта.$\mu_{o'rt} = 0{,}40$

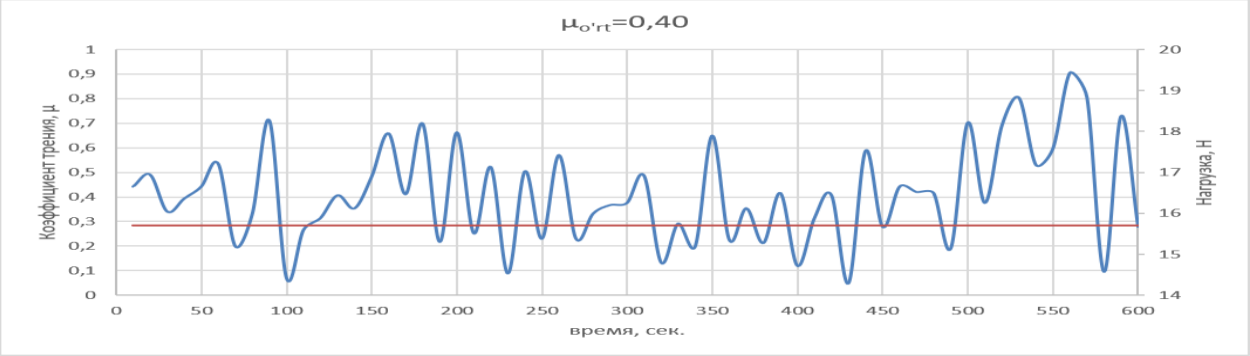


Рис. 10. Изменение коэффициента трения гетерокомпозитного образца подрельсовой прокладки Р-3 во времени.

Трибологические испытания показали, что средний коэффициент трения образца И-3 ниже, чем у традиционных материалов бокового и пружинного изоляторов. Это объясняется стабилизацией контактной поверхности и повышением износостойкости вследствие эффективного взаимодействия короткого стекловолокна E-glass, каолина АКС-30 и углеродной фазы в матрице ЭД-20.

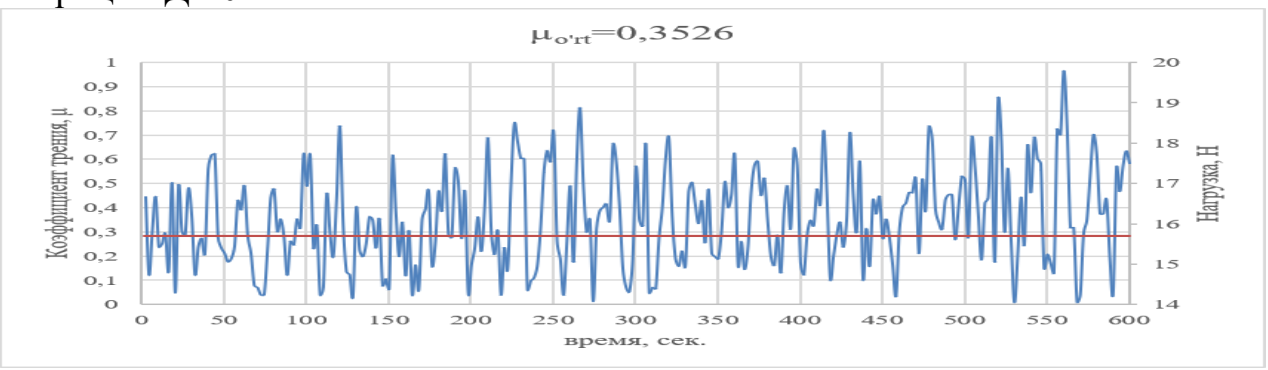


Рис. 11. Изменение коэффициента трения гетерокомпозитного образца изолятора И-3 во времени.

В результате в составе И-3 сформировано оптимальное сочетание трения и износостойкости, что обосновывает его перспективность в качестве трибологического материала для боковых и пружинных изоляторов (табл. 5).

Таблица 5.

Триботехнические свойства образцов

Образец	Путь трения L, м	Условный линейный износ, мкмh	Интенсивность изнашивания Ih, 10^{-8}	Коэффициент трения, $\bar{\mu}$
Традиционная прокладка Fastclip	502,65	24,4	4,85	0.5022
Гетерокомпозитная прокладка Р-3	502,65	10,3	2,05	0.4093

Традиционный боковой и пружинный изолятор	502,65	20,6	4,10	0.5382
Гетерокомпозитный изолятор И-3	502,65	13,7	2,73	0.3527

На основании экспериментальных исследований выполнена сравнительная оценка основных триботехнических показателей образцов и установлены особенности их трения и изнашивания в условиях металлополимерного контакта. Полученные результаты обобщены в таблице 5 в виде показателей, позволяющих сопоставить трибологическую эффективность образцов. По результатам комплексного структурного, физико-механического, диэлектрического и трибологического анализа состав Р-3 выбран как оптимальный для подрельсовой прокладки, а И-3 - для бокового и пружинного изоляторов; взаимосвязь «состав-структура-свойство» научно обоснована сравнительными экспериментами с применяемыми материалами.

В пятой главе диссертации «Комплексное применение и оценка эффективности гетерокомпозитных материалов для обеспечения эксплуатационной надежности элементов системы рельсового скрепления» оценена практическая эффективность составов П-3 и И-3, признанных оптимальными в предыдущих главах по структурным, физико-механическим, термическим, диэлектрическим и трибологическим свойствам. Исследованы деформационно-динамическая устойчивость подрельсовой прокладки при повторном нагружении, технологические процессы изготовления элементов системы рельсового скрепления, а также технико-экономическая эффективность внедрения разработанных материалов.

Для оценки деформационных свойств подрельсовой прокладки состава П-3 при циклическом нагружении проведены сравнительные испытания с традиционной прокладкой в одинаковых лабораторных условиях. Испытания выполнялись в диапазоне нагрузок 20-95 кН, при частоте 4 Гц и до 1000 циклов (рис. 12).

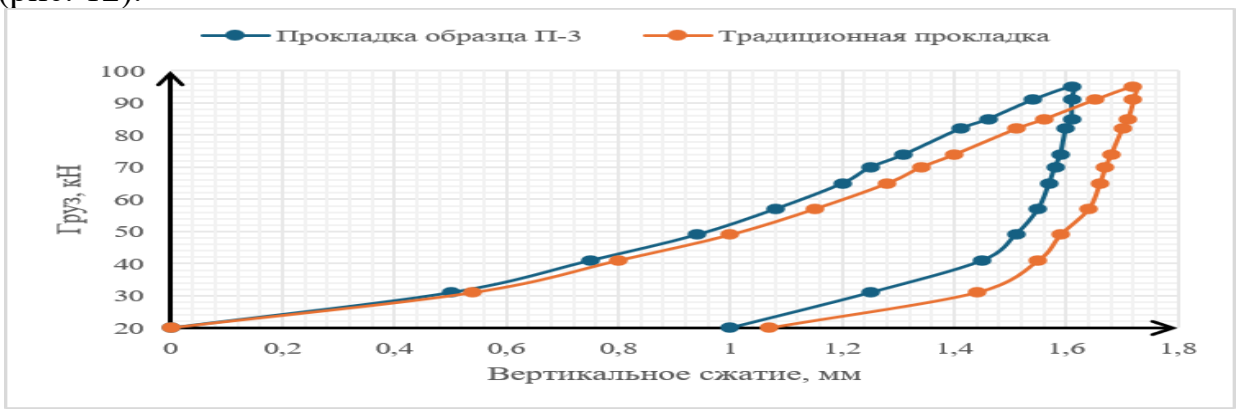


Рис. 12. Деформационно-гистерезисные характеристики подрельсовых прокладок Р-3 и традиционного материала в диапазоне нагрузок 20-95 кН.

При максимальной нагрузке 95 кН вертикальное сжатие прокладки П-3 составило 1,62 мм, а традиционной прокладки - 1,76 мм, то есть деформация образца П-3 была примерно на 8 % меньше. Данная тенденция сохранялась и

при промежуточных нагрузках, что свидетельствует о положительном влиянии прочного взаимодействия матрица-наполнитель, установленного ранее структурными и межфазными исследованиями состава П-3, на деформационную устойчивость.

Для количественной оценки статического деформационного отклика прокладок определены показатели статической жесткости. При увеличении нагрузки от 20 до 95 кН статическая жесткость прокладки П-3 возрастала примерно от 46 до 65 кН/мм, а традиционной прокладки - от 40 до 57 кН/мм. В результате статическая жесткость П-3 в рабочем диапазоне нагрузок была выше, что свидетельствует о повышенной формо- и геометрической стабильности материала.

Нелинейное увеличение статической жесткости с ростом нагрузки объясняется уплотнением полимерной матрицы, уменьшением свободного объема структуры и увеличением участия межфазных контактов матрица-волокно и матрица-дисперсный наполнитель в восприятии нагрузки.

Для оценки циклического механического отклика материала при повторном нагружении исследовано изменение динамической жесткости в зависимости от числа циклов (рис. 13).

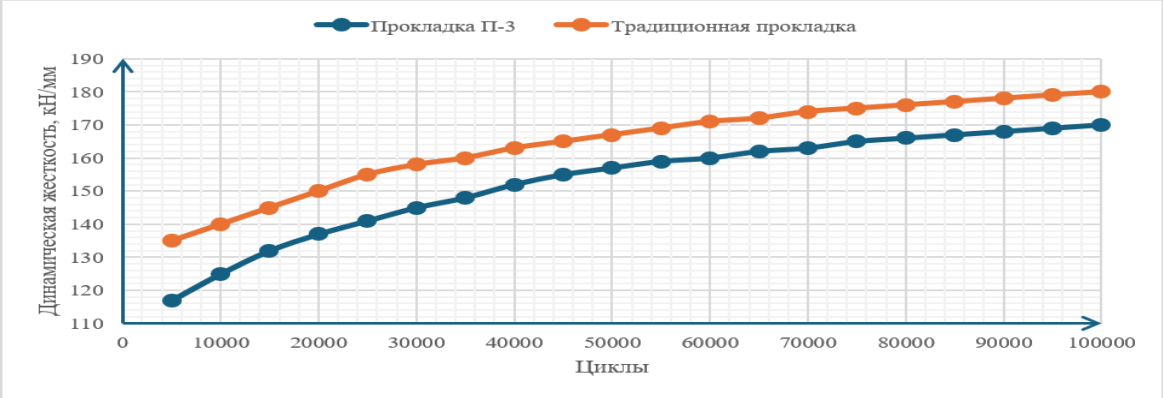


Рис. 13. Зависимость динамической жесткости подрельсовых прокладок П-3 и традиционного материала от числа циклов.

На начальном этапе испытаний динамическая жесткость образца П-3 составляла около 117 кН/мм, а традиционной прокладки - 135 кН/мм. С увеличением числа циклов динамическая жесткость обоих материалов последовательно возрастала и при 100000 циклах достигла соответственно 170 и 180 кН/мм. В течение испытаний динамическая жесткость П-3 сохранялась ниже, чем у традиционной прокладки; при 100000 циклах различие составляло около 5,6 %. Это свидетельствует о способности материала П-3 сохранять упруго-деформационную адаптивность и структурную устойчивость при повторном нагружении без чрезмерного ужесточения.

Полученные результаты подтверждают тесную взаимосвязь ранее установленных для состава П-3 межфазного адгезионного связывания, структурной однородности и механизмов передачи нагрузки между компонентами с деформационной устойчивостью при повторных нагрузках.

На основе составов П-3 для подрельсовой прокладки и И-3 для бокового и пружинного изоляторов разработаны технологические процессы

изготовления элементов системы рельсового скрепления. За счет использования местного и вторичного сырья, снижения потребности в импортных компонентах, уменьшения себестоимости продукции, а также сокращения затрат на замену деталей и техническое обслуживание экономический эффект от внедрения разработанных материалов составил 258 млн сум на 1 км железнодорожного пути.

ВЫВОДЫ

1. Впервые для полимерных элементов системы рельсового скрепления с различным функциональным назначением на основе метода Fuzzy TOPSIS установлена приоритетность критериев «жесткость-эластичность-демпфирование-циклическая деформационная устойчивость» для подрельсовой прокладки и «механическая прочность-ударная вязкость-износостойкость-диэлектрическая стабильность» для бокового и пружинного изоляторов; предложен научный подход к формированию материалов по системе «состав → межфазное взаимодействие → микроструктура → свойство → циклическая долговечность → эксплуатационная надежность».

2. На основе формирования трибомеханического состояния в контактах «металл-гетерокомпозит» под совместным воздействием нормальной и тангенциальной нагрузок неравномерность распределения контактного давления, градиент давления, амплитуда микроперемещений и энергия, диссипированная за один цикл, рекомендованы как основные факторы, определяющие опасное состояние металлополимерного контакта.

3. На основе механизма микроструктурной деградации гетерокомпозитов при повторном нагружении, развивающегося в последовательности «упруго-адаптационная деформация → накопление остаточной деформации → внутренний разогрев → межфазное скольжение → образование микропустот и микротрещин → их объединение в макроскопическое повреждение», обосновано, что межфазная граница является активной структурной зоной передачи нагрузки от матрицы к минеральным и волокнистым компонентам и перераспределения напряжений; для обеспечения циклической долговечности рекомендовано формирование сбалансированного сочетания межфазной прочности и деформационной совместимости.

4. На основе обобщенной модели адгезии, учитывающей геометрические параметры волокнистых и дисперсных наполнителей, обосновано, что межфазные взаимодействия, определяющие передачу нагрузки и структурную устойчивость, формируются не только на границе «матрица-армирующее волокно», но и на границе «матрица-дисперсная минеральная частица», а также в многоуровневых интерфазных зонах, возникающих вследствие совместного взаимодействия указанных компонентов.

5. Установлено, что механическая активация каолина, углеродного продукта пиролиза и других дисперсных компонентов в вибропланетарном механизме обеспечивает разрушение агломератов, обновление поверхности частиц и увеличение активной контактной площади, что способствует более

равномерному распределению компонентов в полимерной матрице и повышению однородности гетерофазной структуры.

6. Установлено, что гранулы переработанной шины и ЭВА в составе термопластичных подрельсовых прокладок с матрицей ПЭВП выполняют функцию пластифицирующих компонентов, улучшающих упруго-деформационные свойства композита.

7. Установлено, что при циклических испытаниях подрельсовой прокладки состава П-3 в диапазоне нагрузок 20-95 кН, при частоте 4 Гц и 1000 циклах ее динамическая жесткость изменялась от 117 кН/мм на 500-м цикле до 170 кН/мм на 1000-м цикле, а диссипированная энергия на 1000-м цикле составила 6,25 кН·мм, что на 40,8 % выше значения 4,44 кН·мм для традиционной прокладки; тем самым обосновано, что оптимальный баланс показателей «жесткость-деформация-диссипация энергии» позволяет сохранять демпфирующий потенциал опоры рельса при ограничении ее чрезмерного ужесточения.

8. Рекомендован состав и усовершенствованная технология получения механоактивированных гетерокомпозитных материалов на основе местного сырья для железнодорожных транспортных элементов различного функционального назначения, обеспечивающих эксплуатационную надежность, повышенную вибродемпфирующую способность, термическую стабильность и высокую деформационную устойчивость при циклическом нагружении.

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY SCIENTIFIC COUNCIL DSc.10/2025.27.12.T.01.04 THE AWARDING SCIENTIFIC DEGREES

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

TURGUNALIEV ELBEK TUKHTANAZAR UGLI

SCIENTIFIC FOUNDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF CYCLIC LOAD-RESISTANT HETEROCOMPOSITE MATERIAL COMPOSITIONS BASED ON THE STUDY OF THE PATTERNS OF TRIBOMECHANICAL PROCESSES IN METAL-POLYMER SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT

05.02.01- Material science in mechanical engineering. Foundry. Thermal and pressure treatment of metals. Ferrous metallurgy, non-ferrous and rare metals.

ABSTRACT OF THE DOCTOR DISSERTATION (DSc) IN TECHNICAL SCIENCES

Tashkent-2026

The topic of the doctoral (DSc) dissertation has been registered at the Supreme Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under number B2026.3.DSc/T3923

The dissertation was prepared at Tashkent State Transport University.

The dissertation abstract has been posted in three languages (Uzbek, Russian, and English (summary)) on the website of the Scientific Council (http://tstu.uz) and on the "Ziyonet" Information and Educational Portal (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	**Ziyamukhamedova Umida Alijonovna** doctor of technical sciences, professor
Rasmiy opponentlar:	**Abdurakhmonov Umarbek** doctor of science in physics and mathematics
	Riskulov Alimjon Akhmadjonovich doctor of technical sciences, professor
	Turakhodjayev Nodir Djakhongirovich doctor of technical sciences, professor
Yetakchi tashkilot:	**Jizzakh polytechnic institute**

The dissertation defense will be held on November 24, 2026, at 10:00 at a meeting of the Scientific Council DSc.10/2025.27.12.T.01.04 at Tashkent State Transport University. (Address: 1 Temir Yulchi Street, Tashkent, 100167. Tel.: (99871) 299-00-01; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz)

The dissertation is available for review at the Information Resource Center of Tashkent State Transport University (registered under No. 407). (Address: 1 Temiryo'lchilar Street, Tashkent 100167. Tel.: (99871) 299-05-66)

The dissertation abstract was distributed on November 12, 2026.
(Registry protocol No. 3 dated September 12, 2026).

A.V. Umarov
Chairman of the scientific council for award degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

E.U. Teshabaeva
Scientific secretary of the scientific council for award of scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

N.K. Tursunov
Chairman of the scientific seminar of the Scientific council awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION
(abstract of the doctor of science (DSC) dissertation)

The purpose of the research: to develop heterocomposite material compositions based on thermoplastic (HDPE) and thermosetting (ED-20) binders that ensure the operational reliability of rail fastening systems for railway transport.

The object of the research comprises heterocomposite materials based on local raw materials intended for rail pads, spring fastening insulators, and side insulators of railway rail fastening systems, the functional elements manufactured from these materials, as well as the metal-polymer contact systems formed between these elements and metallic components**.**

The scientific novelty of the research is as follows:

the principle of selecting materials for railway rail fastening system elements with different functional purposes using the Fuzzy TOPSIS method has been scientifically substantiated;

for HDPE-based heterocomposite materials, the relationship between changes in interfacial compatibility and elastic recovery resulting from the combined use of 3% SEBS and 10% EVA and the variation in residual deformation or dynamic stiffness under cyclic loading has been established; the compatibilizing effect of SEBS and the elastifying effect of EVA in ensuring the deformation stability of the material have been scientifically substantiated;

the classical “matrix-fiber” approach to interfacial adhesion in heterocomposite materials has been further developed by taking into account multicomponent composition and cyclic loading conditions; it has been scientifically substantiated that load transfer and structural stability are governed by the interrelated effects of interphase zones formed at the matrix-fiber and matrix-dispersed mineral particle interfaces;

for ED-20-based heterocomposite materials, the ability of carbonaceous filler obtained from tire pyrolysis to absorb ultraviolet radiation and limit its penetration into the matrix has been scientifically substantiated; as a result, the chemical degradation of the epoxy matrix under the combined action of light and oxygen, as well as the development of surface microdamage, has been shown to slow down;

the influence of interfacial interactions, crosslinking degree, internal stresses, and structural defects arising from the combined action of the curing agent, local mineral filler, fibrous reinforcement, and functional modifiers in ED-20 epoxy-based heterocomposites on the impact-loading behavior of spring fastening insulators and side insulators has been established;

for the first time, the combined effects of cyclic loading amplitude and frequency, contact pressure, microslip, and sliding velocity on the coefficient of friction, frictional heating, deformation state, and wear intensity in rail-pad, spring fastening-insulator, and rail-side-insulator metal-polymer contacts have been established;

for the first time, the composition and manufacturing technology of heterocomposite materials based on mechanically activated local raw materials have been improved for railway transport elements with different functional purposes,

providing enhanced vibration damping, thermal stability, and deformation stability under cyclic loading, thereby ensuring their operational reliability.

Implementation of the research results. Based on the scientific results obtained in developing the scientific foundations for heterocomposite material compositions resistant to cyclic loading through the investigation of tribomechanical processes in metal-polymer systems of railway transport:

rail pads for railway fastening systems manufactured from heterocomposite materials based on local raw materials were implemented in practice at the Industrial Railway Department of JSC «Almalyk Mining and Metallurgical Complex» (Reference №. 07-26/01-01180 dated July 30, 2026, issued by JSC «Almalyk Mining and Metallurgical Complex»). As a result, the service life of the rail pads was increased by 1.5-1.8 times compared with conventional materials;

side and spring insulators for rail fastening systems, manufactured from thermosetting heterocomposite materials, have been put into practice at JSC «Tashkent factory on build and repair of carriages» (Reference №. 1080 of JSC «Tashkent factory on build and repair of carriages» dated September 29, 2026). As a result, the service life of the insulators has increased by a factor of 1.3–1.5 compared to conventional materials, reducing maintenance, repair, and replacement costs by up to 20–25%;

insulators and rail pads developed from optimally formulated heterocomposite materials have been put into practice at the Industrial Railway Department under «Almalyk Mining and Metallurgical Complex» JSC (Reference №. 07-26/01-01180 of «Almalyk Mining and Metallurgical Complex» JSC, dated July 30, 2026). As a result, this made it possible to mitigate the negative effects of deformation and wear caused by friction and cyclic loading, and to increase the operational reliability of the rail fastening assembly by 1.3 to 1.8 times.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 200 pages.

E’LON QILINGAN ISHLAR RO‘YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo‘lim (I част; I part)

1. IAP 8242 O‘zR Patenti “Yeyilish sharoitida ishlaydigan detallar uchun yeyilishga bardoshli kompozitsion polimerli tarkib” Ziyamuxamedova Umida, Bakirov Lutfillo, Djumabayev Dilshod, Nafasov Jasurbek, Turg‘unaliyev Elbek, Ahmedova Dilafruz, To‘ychiyev Xasanboy, Soliyev Axrorbek. 25.10.2025, Byul., № 10(294). https://im.adliya.uz/publications/ONE/2025/10?document=fe9c9620-09ee-4cd7-9bc0-221f52bba314

2. Umida Ziyamukhamedova, Zilola Jalolova, Jasurbek Nafasov, Elbek Turgunaliyev., Investigation of Operational Properties of Heterocomposite Materials for Application in Real-World Conditions// International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 12, Issue 2, February 2025. (05.00.00. №8) https://www.ijarset.com/volume-12-issue-2.html

3. U.A. Ziyamukhamedova, J.H. Nafasov, E.T. Turgunaliev, Sh.U. Abdurakhimov, B.U. Nematov, M.Sh. Abdulakimov., Investigating the influence of local mineral fillers on the properties of epoxy-based composite materials // Journal Engineer Volume:4| Issue:2| 2026 101-105 pp (OAK rayosatining 364/5-sonli qarori 30.11.2024) https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/393

4. U.A. Ziyamukhamedova, L.Y. Bakirov, E.T. Turgunaliev, A.F. Soliev, M.Sh. Abdulakimov., Investigation of Structural Formation Mechanisms in Hybrid Composite Materials Based on Polypropylene (PP) and Polyethylene (PE) // Muhandislik va iqtisodiyot jurnali 2026-yil, iyun. № 6-son (OAK rayosatining 360/5-son 2024.08.28) https://muhandislik-iqtisodiyot.uz/index.php/journal/article/view/3615

5. U.A. Ziyamukhamedova, L.Y. Bakirov, E.T. Turgunaliev, A.F. Soliev, Investigating The Tribological Properties Of Thermoplastic Polymer Composite Materials Based On Local Raw Materials // Journal Engineer Volume:4| Issue:2| 2026 144-151 pp (OAK rayosatining 364/5-sonli qarori 30.11.2024) https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/406

6. U.A. Ziyamukhamedova, J.H. Nafasov, E.T. Turgunaliev, B.U. Nematov, D.A. Akhmedova, Investigation of the tribological properties of modified composite materials used under abrasive wear conditions // Journal Engineer Volume:4| Issue:3| 2026 28-32 pp (OAK rayosatining 364/5-sonli qarori 30.11.2024) https://www.researchgate.net/publication/414949189

7. U.A. Ziyamukhamedova, J.H. Nafasov, E.T. Turgunaliev, Sh.U. Abdurakhimov, B.U. Nematov, M.Sh. Abdulakimov., Investigating the thermal stability of thermoplastic polymer composite materials containing recycled rubber for railway rail pad applications // Journal Engineer Volume:4| Issue:2| 2026 38-43 pp (OAK rayosatining 364/4-sonli qarori 30.11.2024) https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/383

8. U.A. Ziyamukhamedova, J.H. Nafasov, E.T. Turgunaliev, Sh.U. Abdurakhimov, B.U. Nematov, M.Sh. Abdulakimov., Structural and morphological evaluation of hybrid polymer composite for railway rail pad applications // Scientific Journal of Science, Research and Development // 2(16)-son, 2026 139-147 pp (OAK rayosatining 374/5-sonli qarori 25.08.2025) https://ittjournal.uz/article.php?id=161

9. Абдураимов Атамырат, Бабаназарова Рабия, Гелдиева Сувар, Тургуналиев Элбек, Солиев Ахрорбек., Исследование эффективности ультразвуковой экстракции Активных компонентов бурого угля// Universum: технические науки: 2026. 2(143). 5-10 ст. (05.00.00; №1) https://7universum.com/ru/tech/archive/item/21929

10. Ziyamukhamedova U, Torskaya E., Nafasov J. , Turgunaliyev E., Jalolova Z., // Studying the Tribological Properties of Polymer Composite Materials Filled with Production Waste //Material and Mechanical Engineering Technology, 104-109 pp №4 2025 (Scopus Q4) https://mmet.kstu.kz/download/articles/30122025043131_journalFile.pdf

11. Guzal Ruziboyeva, Khayit Turaev, Kuvonch Kholturaev, Dilmurod Saidov, Umid Ruziev, Avazbek Ibragimov, Abror Ruzmetov, Adkhamjon Normamatov, Elbek Turgunaliev, Siyuan Liu, Aziz Ibragimov, Balakrishnan Chellakarungu, //An Oxo-Bridged Trinuclear Nickel(II) Cluster Supported by 1,3,4-Thiadiazole-2,5-Diamine: Crystal Structure, Multitechnique Characterization and Antimicrobial Activity // Journal of Cluster Science (2026) 37-45 pp https://doi.org/10.1007/s10876-026-03014-1 (Scopus Q1)

12. Sadullaeva G. B., Mohamed M. Y. A., Ibragimova M. R., Adinaev K. F., Turgunaliev E., Ibragimov A. B., NormamatovA.S., Sadikova S.B., Eshkaraeva S., Ibragimov A. B., Balakrishnan Chellakarungu, Taha Tarek, Ferjani H., Synthesis, Structural Insights, and Antimicrobial Activity of a Dicopper (II) Paddle-Wheel Complex Based on Pyridine-4-carboxamide. *Journal of Molecular Structure*, 146503. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2026.146503 (Scopus Q1)

13. Gulshoda Toirova, Khayit Turaev,Avazbek Ibragimov, Aditya Prasad, Abrorbek Ruzmetov, Davron Yakubov, Elbek Turgunaliev, Akhat Togasharov, Zhamshid Shukurov, Aziz Ibragimov, Balakrishnan Chellakarungu., Polymorphic packing hierarchy in dichlorido-bis(1,10-phenanthroline)manganese(II): interplay of π-π stacking and C-H···Cl interactions and consequences for lattice stabilization and crystal morphology. *Journal of the Indian Chemical Society,* 102783. https://doi.org/10.1016/j.jics.2026.102783 (Scopus Q2)

14. Ziyamuxamedova U.A., Mamayev Sh.I., Nafasov J.H., Turg‘unaliyev E.T. Raxmatov E.A., // Vibroplanetar mexanizmning geometrik parametrlarini optimallashtirish // Journal of Transport ISSN: 2181-2438 Volume:2 Issue:4 2025 (OAK rayosatining 353/3-sonli qarori 06.04.2024) https://jot.tstu.uz/index.php/jot-journal/article/view/250/219

15. Kavaliova I. N., Dubrovsky V.V., Kavaliova Y.A., Ziyamukhamedova U.A., Podgornaya V.V., Marchenko L.N., Turgunaliyev E.T. , Elena Torskaya Fuzzy topsis for the selection of dispersant and filler in the development of electrotechnical

composites based on polysulfone // Journal Of Technology// Vol 16 Issue 4 272-278 pp https://technologyjournal.net/wp-content/uploads/25-JOT1857.pdf

16. Rakhmatov E., Gadamov D., U. Ziyamukhamedova, J. Nafasov., E. Turgunaliev, Sh. Abdurakhimov., // The influence of dispersed fillers on the mechanical properties of sulfur polymer heterocomposites // Technical science and innovation. - 2025. - T. 2025. - №. 1. - C. 9-15. (05.00.00 №16) https://btstu.researchcommons.org/journal/vol2025/iss1/2/

II-bo‘lim (II-част; II-part)

17. У. Зиямухамедова, Ш. Мамаев, Ж. Нафасов, Э. Тургуналиев, А. Бобоноров // Моделирование нагрузок на железнодорожные шпалы, изготовленные на основе органоминеральных композитных материалов// Herald of Azerbaijan Engineering Academy 2025, vol. 17(2), 16-25 ст. https://www.journal.ama.com.az/index.php/pub/article/view/262?articlesBySimilarityPage=1

18. Ziyamuxamedova U., Turg‘unaliyev E. Nafasov J., Abduraximov Sh., Abdulakimov M., Ahmedova D., Soliyev A., Ne’matov B., Temir yo‘l harakatlanuvchi tarkibi tezligi ta’sirida shpallarga tushadigan dinamik yuklamani hisoblash dasturi № DGU 62996 https://im.adliya.uz/document/check/1fbcfda0-4338-4324-b0fa-11a804942170

19. Ziyamuxamedova U., Turg‘unaliyev E., Nafasov J., Abduraximov Sh., Abdulakimov M., Ziyamuxamedov J., Ahmedova D., Soliyev A., Ne’matov B., Kompozitlarda strukturaviy mustahkamlanish va interfaza barqarorligi koeffitsientlarini hisobga olgan holda abraziv yeyilish intensivligini hisoblash dasturi № DGU 68067 https://im.adliya.uz/document/check/10ec2e49-30d4-4c20-8616-fc1e89e5b4fb

20. Durdiymurad Gadamov; Patma Nurjanova; Jasurbek Nafasov; Elbek Turgunaliyev; Shokhjakhon Abdurakhimov Investigation of obtaining modifiers from industrial waste for polymer composite materials //AIP Conf. Proc. 3447, 030015 (2026)// https://doi.org/10.1063/12.0044131

21. Nurkulov F., Ziyamukhamedova U., Rakhmatov E., Nafasov J., Turgunaliev E., Ziyamukhamedov J., Rustamov M., Abdurakhimov Sh., Akhmedova D., Prospects for utilizing technological waste produced from the purification of sulfur-containing gases at gas fields in the republic of uzbekistan and their targeted application in various sectors // ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ № 2(73) 2025 https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/2022?locale=en_US

22. Turgunaliyev, E., Djumabaev, A., & Miradullaeva, G. (2025, July). Energetic approach to maintaining natural properties of cotton under external friction conditions. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3256, No. 1, p. 050011). AIP Publishing LLC. https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3256/1/050011/3352758/Energetic-approach-to-maintaining-natural

23. Umida Ziyamukhamedova, Sherali Mamayev, Jasurbek Nafasov, Shaozimova Umida, Turgunaliyev Elbek, Abdurakhimov Shokhjakhon

Optimization of geometric parameters of the vibro-planetary mechanism // Journal of International Scientific Publications // Volume 19, 2025 64-72 pp https://www.scientific-publications.net/en/article/1002873/

24. Umida Ziyamukhamedova, Jasurbek Nafasov, Elbek Turgunaliev, Nilufar Maxamadieva, Alimardon Bobonorov // Study of The Properties of Chemically Resistant Hydrophobic Polymer Composite Materials Based on Sulfur // Web of Scholars: Multidimensional Research Journal Volume 04 Number 01 (2025) https://www.researchgate.net/publication/410812866_Web_of_Scholars_Multidimensional_Research_Journal_Study_of_The_Properties_of_Chemically_Resistant_Hydrophobic_Polymer_Composite_Materials_Based_on_Sulfur

25. Ziyamuxamedova Umida., Turgunaliyev Elbek., // Temir yo‘l rels prokladkalarida uchraydigan nosozliklarni tadqiq etish// «Mashinasozlikda fan, ta’lim va ishlab chiqarishning integratsiyasi: tendensiyalar, muammolar va yechimlar» mavzusidagi xalqaro miqyosdagi ilmiy va ilmiy-texnik konferensiya 7-8-noyabr 2025 yil 412-413 bet. https://www.researchgate.net/publication/410814035_12

26. Нафасов Ж., Зиямухамедова У., Рустамов М., Тургуналиев Э. // Исследование модификации органоминиральных композитных материалов наполнителями // Международной научно-практической конференции «ауэзовские чтения-23: феномен абая и новые горизонты познания» посвященная 180-летию великого абая 197-203 ст https://www.researchgate.net/publication/410814039_13_Auezov

27. Умида Зиямухамедова, Элбек Тургуналиев, Алимардон Бобоноров., Влияние дисперсных наполнителей на трибологические свойства полимерных композиционных материалов и покрытий на их основе // Международной научной конференции «Наука, технология и мир: пути к устойчивому развитию» 8-10 ст https://www.researchgate.net/publication/410810571_14_Ashgabat

28. Rustamov M., Ziyamukhamedova U., Turgunaliev E., Nafasov J. (2026). Polifunksional modifikatorning organomineral kompozit materiallarning tribologik xossalariga ta’siri. Zamonaviy dunyoda ilm-fan va texnologiya, Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi *5*(26), 75-77. https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIFT/article/view/58389

29. Ziyamuxamedova U., Nafasov J., Turg‘unaliyev E., Rustamov M. (2026). Geterokompozit materiallari koordinatsion komponentlar bilan modifikatsiyalashda strukturaviy shakllanish mexanizmi. Zamonaviy dunyoda ilm-fan va texnologiya, Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi *5*(26), 78-79. https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIFT/article/view/58390

Avtoreferat «TDTrU axborotnomasi» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib,
o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 $^{1}/_{16}$. «Times New Roman» garniturasi.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 3,75. Adadi 100 dona. Buyurtma № 40/26.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Alisher Navoiy ko‘chasi, 36 uy.
Tel: +99894-600-44-07