TORMOZ KOLODKALARI KOMPOZIT MATERIALLARINING ISSIQLIK VA MEXANIK XOSSALARINI TAKOMILLASHTIRISH

Bobonazarov Shukurjon O‘ktamjon o‘g‘li
Qo‘qon davlat universiteti o‘qituvchisi

Annotatsiya. Avtomobil diskli tormoz kolodkalari uchun qo‘llaniladigan polimer-matritsali kompozit friksion materiallarning tarkib–tuzilish–xossa bog‘lanishi tahlil qilindi. Fenol-formaldegid smola asosidagi matritsa, aramid va bazalt tolalari, grafit, metall sulfidlar, alyuminiy oksidi, kremniy karbidi, barit hamda elastomer modifikatorlarning issiqlik o‘tkazuvchanligi, siqilish va egilishdagi mustahkamlik, qattiqlik, g‘ovaklik, ishqalanish barqarorligi va yeyilishga ta’siri baholandi. Mahalliy darsliklar, o‘zbek olimlarining polimer kompozitlar va tormoz kolodkalari bo‘yicha ishlari hamda xorijiy tajribalar qiyosiy o‘rganildi. Natijada asbestsiz, mis miqdori cheklangan, gibrid tolalar va mikrokeramik to‘ldirgichlar bilan mustahkamlangan kompozitning konseptual tarkibi taklif qilindi. Taklif etilayotgan yondashuv issiqlikni friksion yuzadan tezroq chiqarish, matritsaning yuqori haroratda yumshashini kamaytirish, strukturaviy yaxlitlikni saqlash va ishqalanish koeffitsiyentining barqarorligini oshirishga qaratilgan. Natijalarni tasdiqlash uchun termogravimetrik tahlil, differensial skanerlovchi kalorimetriya, egilish va siqilish sinovlari, issiqlik o‘tkazuvchanlik o‘lchovi hamda stend tribosinovlarini birlashtirgan eksperimental dastur ishlab chiqildi.

Kalit so‘zlar: tormoz kolodkasi, friksion kompozit, fenol smola, aramid tolasi, bazalt tolasi, grafit, issiqlik o‘tkazuvchanlik, mexanik mustahkamlik, yeyilish, ishqalanish barqarorligi.

Аннотация. В статье проанализирована взаимосвязь «состав–структура–свойства» полимерно-матричных композиционных фрикционных материалов автомобильных дисковых тормозных колодок. Оценено влияние фенолформальдегидной матрицы, арамидных и базальтовых волокон, графита, сульфидов металлов, оксида алюминия, карбида кремния, барита и эластомерных модификаторов на теплопроводность, прочность при сжатии и изгибе, твердость, пористость, стабильность трения и износ. На основе сопоставления отечественных учебных источников, исследований узбекских ученых и зарубежных работ предложен концептуальный состав безасбестового композита с ограниченным содержанием меди, гибридным волокнистым армированием и микрокерамическими наполнителями. Разработана программа экспериментальной проверки, объединяющая термогравиметрический и калориметрический анализ, механические испытания, измерение теплопроводности и стендовые трибологические испытания.

Ключевые слова: тормозная колодка, фрикционный композит, фенольная смола, арамидное волокно, базальтовое волокно, графит, теплопроводность, механическая прочность, износ.

Abstract. This article analyzes the composition–structure–property relationship of polymer-matrix friction composites used in automotive disc brake pads. The effects of a phenolic resin matrix, aramid and basalt fibers, graphite, metal sulfides, alumina, silicon carbide, barite and elastomer modifiers on thermal conductivity, compressive and flexural strength, hardness, porosity, friction stability and wear are evaluated. Local textbooks, studies by Uzbek researchers on polymer composites and brake shoes, and international research are comparatively reviewed. A conceptual asbestos-free formulation with restricted copper content, hybrid fiber reinforcement and microceramic fillers is proposed. The approach is intended to promote heat removal from the friction surface, limit high-temperature softening of the matrix, preserve structural integrity and stabilize the coefficient of friction. An experimental validation program combining thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, mechanical tests, thermal-conductivity measurements and bench tribotesting is proposed.

Keywords: brake pad, friction composite, phenolic resin, aramid fiber, basalt fiber, graphite, thermal conductivity, mechanical strength, wear, friction stability.

KIRISH

Avtomobil tormoz tizimida kolodka va disk orasidagi ishqalanish transport vositasining kinetik energiyasini issiqlikka aylantiradi. Shu sababli tormoz kolodkasi bir vaqtning o‘zida yuqori mexanik yuk, takroriy termik sikl, abraziv ta’sir, namlik va kimyoviy muhit ostida ishlaydi. Mahalliy transport vositalari darsliklarida diskli tormoz mexanizmi aylanuvchi disk va ikki qo‘zg‘almas kolodkadan iboratligi, kolodkalar diskka siqilganda tormoz momenti hosil bo‘lishi, mexanizmning muhim ustunligi esa ishqalanish sharoitlari o‘zgarganda barqaror ishlashi ekani ko‘rsatilgan [1]. Demak, kolodka materialining vazifasi shunchaki katta ishqalanish koeffitsiyentini ta’minlash emas, balki bu ko‘rsatkichni harorat, tezlik va bosim o‘zgarishida me’yoriy chegarada ushlab turishdir.

Tormozlanish jarayonida friksion qatlamda qisqa vaqt ichida katta miqdorda issiqlik ajraladi. Issiqlikning bir qismi disk orqali, bir qismi kolodka, support va atrof-muhit orqali tarqaladi. Kompozitning issiqlik o‘tkazuvchanligi juda past bo‘lsa, ishchi sirt harorati keskin oshib, fenol matritsasi termik parchalanadi, gazsimon mahsulotlar va g‘ovaklar hosil bo‘ladi, ishqalanish koeffitsiyenti pasayishi — “fade” hodisasi kuzatiladi. Issiqlik o‘tkazuvchanlik haddan tashqari yuqori bo‘lsa, issiqlik support va tormoz suyuqligiga tez uzatilishi mumkin. Shuning uchun materialni takomillashtirishda issiqlikni boshqarish va mexanik yaxlitlik o‘rtasidagi muvozanat asosiy masala hisoblanadi [5, 8].

Zamonaviy tormoz kolodkalari odatda bog‘lovchi matritsa, mustahkamlovchi tolalar, ishqalanishni modifikatsiyalovchi komponentlar, qattiq abrazivlar, quruq moylovchilar va hajm to‘ldirgichlaridan tuzilgan ko‘p komponentli kompozitdir. Asbestning salomatlik uchun xavfliligi sababli uning o‘rnini aramid, shisha, bazalt, uglerod va tabiiy tolalar egallamoqda. Mis issiqlikni tarqatish va triboqatlam

shakllanishiga yordam bersa-da, ekologik cheklovlar mis miqdorini kamaytirishni talab etmoqda. Shuning uchun yangi tarkiblar grafit, metall sulfidlar, keramika zarrachalari, gibrid tolalar va issiqlikka chidamli smolalar kombinatsiyasiga tayangan holda ishlab chiqilmoqda [6–10].

Tadqiqotning maqsadi tormoz kolodkasi kompozit materiallarining tarkibiy qismlari bilan ularning issiqlik va mexanik xossalari o‘rtasidagi bog‘lanishni tizimli baholash hamda mahalliy sharoitda sinovdan o‘tkazish mumkin bo‘lgan takomillashtirilgan tarkib va eksperimental metodikani taklif qilishdan iborat. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi: mahalliy va xorijiy manbalarni qiyosiy tahlil qilish; komponentlarning funksional rolini aniqlash; issiqlik va mexanik xossalarga qarama-qarshi ta’sir qiluvchi omillarni ajratish; tarkibning tavsiya etiladigan diapazonlarini shakllantirish; laboratoriya va stend sinovlarining izchil dasturini ishlab chiqish.

ADABIYOTLAR SHARHI

Fayzullayev va hammualliflarning transport vositalari tuzilishiga bag‘ishlangan darsligida friksion tormoz mexanizmlarining samaradorligi, barqarorligi, muvozanatlashganligi va reversivligi asosiy baholash mezonlari sifatida keltiriladi [1]. Ishqalanish koeffitsiyenti qizish, namlanish yoki moylanish natijasida o‘zgarganda tormoz samaradorligi keskin o‘zgarib ketmasligi mexanizmning barqarorligini ifodalaydi. Akilov va hammualliflar tormoz tizimiga texnik xizmat ko‘rsatishda disklar, kolodkalar, qoplama yuzasi va tirqishlar holatini muntazam tekshirish zarurligini ta’kidlaydi [2]. Bu talab materialshunoslik nuqtayi nazaridan kolodkaning yeyilish tezligi, qoldiq qalinligi, yuzadagi yoriqlar va termik shikastlanishlarni nazorat qilish bilan bevosita bog‘liq.

O‘zbek olimlari Inagamov, Djabbarov, Abdullaev va hammualliflar yuk vagoni tormoz kolodkalarida kompozit va cho‘yan materiallarning ishqalanish koeffitsiyentlarini tezlik diapazonida taqqoslab, seksiyali kolodka konstruksiyasining afzalliklarini asoslagan [3]. Tadqiqot temir yo‘l transportiga bag‘ishlangan bo‘lsa-da, ishqalanish juftligida kontakt maydonini boshqarish, issiqlik va yeyilishning notekis taqsimlanishini kamaytirish tamoyillari avtomobil kolodkalari uchun ham metodik ahamiyatga ega. Ziyamukhamedova va hammualliflar termoreaktiv asosli yeyilishga chidamli polimer kompozitlarni 25–600 °C diapazonida termogravimetrik va differensial termik usullar bilan baholagan [4]. Ularning yondashuvi to‘ldirgich turi va massa ulushini termik barqarorlik bilan bog‘lash zarurligini ko‘rsatadi.

Xorijiy tadqiqotlarda fenol smola avtomobil tormoz kolodkalarining eng ko‘p qo‘llaniladigan bog‘lovchisi ekani qayd etiladi. Uning afzalligi narx, texnologik qulaylik va qoniqarli termik xossalardan iborat; kamchiligi esa qotishdagi kirishish, namlikka sezgirlik va yuqori haroratda parchalanishdir [5]. Qisqa uglerod tolasi qo‘shilgan fenol kompozitlar bo‘yicha tadqiqotda tolalar saqlash modulini oshirgani va dampingni kamaytirgani, biroq havo muhitidagi termik barqarorlikka ta’siri tarkib ulushiga bog‘liqligi aniqlangan [6]. Bu natija “ko‘proq mustahkamlovchi doimo yaxshiroq” degan sodda yondashuv noto‘g‘ri ekanini ko‘rsatadi.

Grafit friksion kompozitda quruq moylovchi, issiqlik tarqatuvchi va triboqatlamni barqarorlashtiruvchi komponent vazifasini bajaradi. Sintetik grafit

miqdori optimallashtirilgan elastomer-modifikatsiyalangan fenol kompozitida solishtirma yeyilish tezligi tayanch tarkibga nisbatan taxminan 1,5 marta kamaygani, issiqlik o‘tkazuvchanlik 0,45 dan 0,53 W/(m·K) gacha oshgani bildirilgan [7]. Biroq ortiqcha grafit ishqalanish koeffitsiyentini pasaytirishi va struktura mustahkamligini susaytirishi mumkin. Tabiiy va mineral tolalar bo‘yicha sharhlar esa bazalt, zig‘ir va boshqa tolalar ekologik afzallik bersa-da, namlik yutishi, matritsa bilan adgeziya va xossalar tarqalishini nazorat qilish zarurligini ko‘rsatadi [8, 9].

So‘nggi ishlarda misdan voz kechish va keramika mikrohamda nanozarrachalaridan foydalanish ustuvor yo‘nalishga aylangan. Alyuminiy oksidi qattiq kontakt platformalarini hosil qilib, ishqalanish darajasi va mexanik mustahkamlikni oshiradi; kremniy karbidi esa qattiqligi va issiqlik barqarorligi sabab yeyilishga qarshilikni kuchaytiradi. Ularning miqdori ortib ketganda diskning abraziv yeyilishi, shovqin va mo‘rtlik oshishi ehtimoli mavjud. Strukturaviy va tribologik tahlillar tolalar yo‘nalishi sabab kolodkaning sirpanish yuzasiga parallel va perpendikulyar yo‘nalishdagi mustahkamligi bir xil emasligini ko‘rsatadi [10, 11]. Shuning uchun presslash rejimi va tolalarning bir tekis taqsimlanishi tarkibning o‘zi kabi muhimdir.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqot analitik-qiyosiy va eksperimental loyihalash usullarini birlashtiradi. Birinchi bosqichda mahalliy darsliklar, O‘zbekiston olimlarining ilmiy maqolalari hamda 2016–2026-yillarda e’lon qilingan xorijiy ishlar tarkib, harorat, mexanik xossa, ishqalanish va yeyilish mezonlari bo‘yicha guruhlandi. Ikkinchi bosqichda har bir komponentning kompozitdagi funksiyasi va kutiladigan ijobiy hamda salbiy ta’siri matritsali tahlil qilindi. Uchinchi bosqichda laboratoriyada tayyorlash uchun bazaviy, gibrid tolali va gibrid tolali–keramik modifikatsiyalangan uchta tarkib varianti shakllantirildi. Maqoladagi miqdorlar tayyor mahsulot retsepti emas, balki eksperimental optimallashtirish uchun boshlang‘ich diapazonlardir.

1-jadval.

Tormoz kolodkasi kompoziti komponentlarining funksional vazifasi

Komponent guruhi	Tavsiya etiladigan komponent	Asosiy vazifa	Cheklov yoki xavf
Bog‘lovchi	Issiqlikka chidamli fenol smola	Komponentlarni yaxlit matritsaga biriktirish	Yuqori haroratda parchalanish va gaz ajralishi
Tolali armatura	Aramid + bazalt tolasi	Egilish va siqilish mustahkamligi, yoriqqa qarshilik	Agglomeratsiya va yo‘nalish bo‘yicha anizotropiya
Quruq moylovchi	Grafit va metall sulfidlari	Ishqalanishni barqarorlashtirish, sirtni himoyalash	Ortiqcha miqdorda ishqalanish va mustahkamlik pasayishi
Qattiq friksion modifikator	Al_2O_3 va SiC mikrozarrachalari	Kontakt platformasi, yeyilishga qarshilik	Disk yeyilishi, shovqin va mo‘rtlikning oshishi
Hajm to‘ldirgich	Barit, vermikulit yoki kaolin	Zichlik, texnologik xossa va tannarxni boshqarish	Ortiqcha miqdorda faol komponentlarni suyultirish

ISSN: 3060-4648 | www.eyib.uz

Elastik modifikator	Kauchuk kukuni yoki cashew changi	Zarba, shovqin va tebranishni kamaytirish	Issiqlik barqarorligining pasayishi

Namuna tayyorlashda komponentlarni quritish, massaviy dozlash, bosqichma-bosqich quruq aralashtirish, issiq presslash va post-qotirish amallari bajarilishi ko‘zda tutiladi. Tolalar avval kukunsimon komponentlardan alohida yumshoq rejimda tarqatiladi; keyin smola va qolgan to‘ldirgichlar bilan aralashtiriladi. Bunday ketma-ketlik tolalarning tugunlanishi va lokal g‘ovaklar hosil bo‘lishini kamaytiradi. Presslash bosimi va harorati smola ishlab chiqaruvchisi tavsiyasiga mos tanlanadi, barcha tarkiblar bir xil texnologik rejimda tayyorlanib, tarkib ta’sirini texnologiya ta’siridan ajratish ta’minlanadi.

Issiqlik xossalari termogravimetrik tahlil orqali massa yo‘qotish boshlanishi, asosiy parchalanish sohasi va qoldiq massa bo‘yicha; differensial skanerlovchi kalorimetriya orqali qotish va termik o‘tishlar bo‘yicha; issiqlik o‘tkazuvchanlik esa tekis namuna uchun mos laboratoriya usulida baholanadi. Mexanik xossalar zichlik, ochiq g‘ovaklik, Shore yoki Rockwell qattiqligi, uch nuqtali egilishdagi mustahkamlik, siqilishdagi mustahkamlik va qatlamning tayanch plastinaga kesilishdagi birikish mustahkamligini qamrab oladi. Har bir sinov kamida beshta takror namunada o‘tkazilib, o‘rtacha qiymat, standart og‘ish va ishonch oralig‘i hisoblanishi kerak.

Tribologik sinovning dastlabki bosqichi pin–disk yoki kichik namunali ishqalanish qurilmasida, yakuniy bosqichi esa real disk–kolodka geometriyasiga yaqin stendda bajariladi. Sinovlar sovuq holat, qizdirish, yuqori haroratdagi fade, sovitishdan keyingi tiklanish va nam muhit sikllarini qamrab oladi. Nazorat qilinadigan parametrlar: kontakt bosimi, disk tezligi, sirt harorati, tormoz momenti, ishqalanish koeffitsiyenti, massa va qalinlik yo‘qotilishi. Sinovdan keyin ishchi sirt optik mikroskopiya va imkon mavjud bo‘lsa, skanerlovchi elektron mikroskopiya orqali tekshirilib, abraziv izlar, yopishqoq yeyilish, termik yoriqlar va triboqatlamning uzluksizligi baholanadi.

NATIJALAR VA ULARNING MUHOKAMASI

Qiyosiy tahlil tormoz kolodkasi uchun bitta xossani maksimal darajaga olib chiqish emas, bir-biriga bog‘liq xossalar majmuasini muvozanatlash zarurligini ko‘rsatdi. Mustahkam fenol matritsasi tolalar va zarrachalarni ushlab turadi, ammo matritsa ulushi ortsa yuqori haroratda smola parchalanishidan kelib chiqadigan fade va gaz ajralishi kuchayishi mumkin. Tolalar ulushi yetarli bo‘lmasa yoriqlar tez tarqaladi; haddan tashqari ko‘p bo‘lsa aralashmaning oqishi yomonlashib, presslangan buyumda g‘ovaklik va xossalar notekisligi ortadi. Shu sabab gibrid armaturalashda aramid tola zarbaga va yorilishga qarshilikni, bazalt tola esa haroratga chidamlilik va o‘lcham barqarorligini ta’minlaydigan o‘zaro to‘ldiruvchi tizim sifatida qaraladi.

Grafitning optimal ulushi friksion yuzada uzluksiz, ammo haddan tashqari sirpanchiq bo‘lmagan ikkilamchi qatlam shakllantirishi kerak. Xorijiy tajribada grafit issiqlik o‘tkazuvchanlikni oshirgan va yeyilishni kamaytirgan [7]. Biroq grafitning o‘zi mexanik yuk ko‘taruvchi komponent emas. Shuning uchun grafitni aramid–bazalt karkasi va kam miqdordagi qattiq keramika zarrachalari bilan birga qo‘llash maqsadga muvofiq. Al_2O_3 zarrachalari ishchi sirtning haqiqiy kontakt

nuqtalarini ushlab turadi, SiC esa termik va abraziv barqarorlikni oshiradi. Zarrachalarning juda yirik bo‘lishi diskni tirnashi, juda mayda nanozarrachalarning aglomeratsiyasi esa lokal mo‘rt zonalar hosil qilishi mumkin. Dastlab mikroo‘lchamli fraksiyadan foydalanib, keyingi bosqichda kichik nanoqo‘shimcha bilan tajriba o‘tkazish xavfsizroq ilmiy strategiyadir.

2-jadval.

Eksperimental tarkib variantlarining konseptual diapazonlari, massa %

Komponent	Bazaviy tarkib	Gibrid tolali	Gibrid tolali–keramik	Kutiladigan ta’sir
Fenol smola	18–22	17–21	17–20	Matritsa va termik yaxlitlik
Aramid tolasi	3–5	4–6	4–6	Yoriqqa va zarbaga qarshilik
Bazalt tolasi	—	4–7	4–6	Issiqlik va mexanik barqarorlik
Grafit + metall sulfid	12–18	12–17	11–16	Triboqatlam va ishqalanish barqarorligi
Al_2O_3 + SiC	4–7	4–7	7–11	Qattiqlik va yeyilishga qarshilik
Barit/mineral to‘ldirgich	35–45	30–40	28–38	Zichlik va texnologik xossa
Elastik modifikator	6–10	6–9	5–8	Shovqin va mo‘rtlikni kamaytirish

2-jadvaldagi diapazonlar barcha komponentlar yig‘indisini avtomatik ravishda 100 foiz deb qabul qiladigan tayyor retsept emas. Har bir tajriba tarkibida tanlangan qiymatlar normalizatsiya qilinishi, mineral to‘ldirgich ulushi bilan yakuniy massa muvozanati ta’minlanishi kerak. Uch variantning taqqoslanishi tarkibiy murakkablikni bosqichma-bosqich oshiradi: bazaviy tarkib mavjud fenol kompozitga yaqin nazorat namunasi; gibrid tolali tarkib mexanik va termik karkas ta’sirini; gibrid tolali–keramik tarkib esa tolalar hamda qattiq zarrachalarning birgalikdagi ta’sirini aniqlashga xizmat qiladi.

Takomillashtirilgan tarkibdan kutiladigan asosiy natija issiqlik o‘tkazuvchanlikning nazorat tarkibiga nisbatan mo‘tadil oshishi, yuqori haroratdagi ishqalanish koeffitsiyenti tarqalishining kamayishi va egilishdagi mustahkamlikning pasaymasligidir. Bunda “eng katta qattiqlik” maqsad qilib olinmaydi, chunki haddan tashqari qattiq kolodka disk yeyilishini va shovqinni oshiradi. Qaror ko‘p mezonli baholash asosida qabul qilinishi lozim: ishqalanish koeffitsiyentining o‘rtacha qiymati va variatsiyasi; fade’dan keyingi tiklanish; kolodka va diskning solishtirma yeyilishi; sirt harorati; egilish va siqilish mustahkamligi; g‘ovaklik; shovqin va ekologik xavfsizlik.

Mexanik xossalarning termik sikldan oldin va keyin o‘lchanishi alohida ahamiyatga ega. Faqat xona haroratida yuqori mustahkamlik ko‘rsatgan kompozit ish jarayonida smola parchalanishi yoki tolalar–matritsa chegarasining zaiflashishi natijasida o‘z xossasini yo‘qotishi mumkin. Shu bois namunalar tribosinovdan oldin,

200–300 °C diapazondagi nazoratli termik qaritishdan keyin va tribosinovdan so‘ng solishtiriladi. Qoldiq egilish mustahkamligi va massa yo‘qotish materialning real ekspluatatsiya sharoitiga yaqin termomexanik chidamliligini aniqroq ifodalaydi.

Tavsiya etilgan kompozitning mikrostrukturasi uzluksiz fenol matritsa ichida bir tekis tarqalgan qisqa aramid va bazalt tolalar, issiqlik hamda tribologik barqarorlikni boshqaruvchi grafit qatlamchalari, qattiq kontakt platformalarini hosil qiluvchi Al_2O_3–SiC zarrachalari va g‘ovaklarni nazorat qiluvchi mineral to‘ldirgichlardan tashkil topishi kerak. Sirt ishlaganda yumshoqroq matritsa va moylovchi komponentlar boshqariladigan tezlikda yeyiladi, qattiq zarrachalar hamda tolalar mikroplatformalarni ushlab turadi, ajralgan mayda zarrachalar esa siqilib ikkilamchi triboqatlam hosil qiladi. Barqaror triboqatlam ishqalanish tebranishini va to‘g‘ridan-to‘g‘ri abraziv kontaktni kamaytiradi [10, 12].

TAKOMILLASHTIRISHNING AMALIY YO‘NALISHLARI

Birinchi yo‘nalish — matritsani modifikatsiyalash. Oddiy fenol smolaning bir qismini issiqlikka chidamli modifikatsiyalangan fenol yoki benzoksazin asosli bog‘lovchi bilan almashtirish qotishdagi kirishishni va yuqori haroratdagi parchalanishni kamaytirishi mumkin [5]. Biroq yangi bog‘lovchining narxi, presslash harorati va mavjud ishlab chiqarish liniyasiga mosligi hisobga olinishi zarur. Shu sabab laboratoriya bosqichida 0, 10 va 20 foiz bog‘lovchi almashtirish darajalarini taqqoslash, to‘liq almashtirishga shoshilmaslik maqsadga muvofiq.

Ikkinchi yo‘nalish — tolali karkasni gibridlash. Aramid tolasi yuqori solishtirma mustahkamlik va yoriq uchini to‘xtatish qobiliyatiga ega, bazalt tolasi esa termik barqaror, nisbatan arzon va mineral tabiatli. Ularning uzunligi hamda nisbatini boshqarish mexanik xossalar bilan aralashmaning presslanuvchanligini muvozanatlashtiradi. Tolalarga sirt ishlovi berish yoki mos bog‘lovchi agentdan foydalanish matritsa–tola chegarasidagi adgeziyani oshiradi. Biroq ortiqcha adgeziya ham foydali emas: friksion materialda boshqariladigan mikroajralish va triboqatlam hosil bo‘lishi uchun sirtning yangilanib turishi zarur.

Uchinchi yo‘nalish — grafit va keramik zarrachalar nisbatini optimallashtirish. Grafit issiqlik oqimini va sirt moylanishini, Al_2O_3 va SiC esa mikroqattiqlik hamda kontakt platformalarini boshqaradi. Tajribani to‘liq faktorial reja yoki javob sirtlari metodologiyasi asosida tashkil etib, uchta asosiy omil — grafit ulushi, keramik to‘ldirgich ulushi va gibrid tola ulushi — bo‘yicha ko‘p mezonli optimum aniqlanishi mumkin. Maqsad funksiyasida ishqalanish barqarorligi va yeyilish kamayishi ijobiy, disk yeyilishi, g‘ovaklik va termik massa yo‘qotish salbiy koeffitsiyent bilan hisobga olinadi.

To‘rtinchi yo‘nalish — ishlab chiqarish texnologiyasini xossa shakllantiruvchi omil sifatida boshqarish. Aralashtirish vaqti, presslash bosimi, qolip harorati, bosim ostida ushlab turish va post-qotirish rejimi bir xil tarkibda ham turli g‘ovaklik va mustahkamlik hosil qiladi. Har bir partiyada xomashyo namligi, zarracha o‘lchami, massa dozasi va presslangan buyum zichligini nazorat qilish zarur. Tayanch metall plastinaga qoplamaning birikish mustahkamligi alohida tekshiriladi, chunki yuqori friksion xossali qatlamning plastinadan ajralishi butun tormoz tugunini ishdan chiqaradi.

Beshinchi yo‘nalish — ekologik va mehnat xavfsizligi. Asbestsiz va mis miqdori cheklangan tarkib tanlanishi, aralashtirish hamda mexanik ishlov berishda mayda changning tarqalishi yopiq aspiratsiya tizimi orqali kamaytirilishi kerak. Aramid, mineral va keramika kukunlari bilan ishlaganda respirator, ko‘zoynak va mahalliy so‘rish ventilyatsiyasi zarur. Tayyor mahsulotning ekologik bahosi faqat xomashyo bilan cheklanmasdan, tormozlanish vaqtida ajraladigan zarrachalarning miqdori va o‘lcham tarkibini ham qamrab olishi lozim. Binder turi va sirt harorati zarracha emissiyasiga ta’sir qilishi xorijiy tadqiqotlarda ko‘rsatilgan [13].

XULOSA

Tormoz kolodkasi kompozit materialining issiqlik va mexanik xossalarini takomillashtirish ko‘p komponentli tizimdagi tarkib, mikrostruktura va texnologik rejimni birgalikda boshqarishni talab qiladi. Fenol matritsasi strukturaviy yaxlitlikni ta’minlaydi, ammo uning termik parchalanishi fade va yeyilishning asosiy sabablaridan biridir. Aramid–bazalt gibrid tolalari yoriqqa, egilish va termik siklga qarshilikni oshirishi; grafit ishqalanish hamda issiqlik oqimini barqarorlashtirishi; Al_2O_3 va SiC mikrozarrachalari esa kontakt platformalari va yeyilishga qarshilikni kuchaytirishi mumkin. Har bir komponent uchun optimum mavjud bo‘lib, uning me’yordan ortishi mo‘rtlik, disk yeyilishi, shovqin yoki ishqalanishning pasayishiga olib keladi.

Maqolada asbestsiz, mis miqdori cheklangan, fenol matritsali va gibrid tolali–keramik kompozitning konseptual tarkibi taklif qilindi. Uni amaliy joriy etishdan oldin TGA/DSC, issiqlik o‘tkazuvchanlik, g‘ovaklik, qattiqlik, egilish, siqilish, birikish mustahkamligi hamda ko‘p bosqichli stend tribosinovlari orqali tekshirish zarur. Eng maqbul tarkib eng katta bitta ko‘rsatkich bo‘yicha emas, balki ishqalanish barqarorligi, fade’dan tiklanish, kolodka va disk yeyilishi, termik massa yo‘qotish, mexanik mustahkamlik, shovqin va ekologik xavfsizlikning umumiy muvozanati bo‘yicha tanlanadi. Keyingi tadqiqotlarda taklif qilingan uch tarkib variantini tayyorlash, statistik tajriba rejasida sinash va real avtomobil tormoz stendida validatsiya qilish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Fayzullayev E.Z. va boshqalar. Transport vositalarining tuzilishi va nazariyasi. Darslik. Toshkent: Yangi asr avlodi, 2006.

2. Akilov A.A., Qahhorov S.Q., Sayidov M.H. Avtomobilning umumiy tuzilishi. Toshkent, 2012.

3. Inagamov S., Djabbarov Sh., Abdullaev B., Ruzmetov Y., Inoyatov K., Hurmatov Y. Study of the friction of the brake shoe of a freight car. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 401. 05036. DOI: 10.1051/e3sconf/202340105036.

4. Ziyamukhamedova U., Jalolova Z., Abdulakimov M., Patidinov A., Bakirov L., Ziyamukhamedov J. Investigation of the thermal stability of the compositions of thermoset-based, anti-friction, wear-resistant polymer composite materials. Engineer. 2026. No. 2S. P. 84–87. DOI: 10.56143/3030-3893-2026-2S-84-87.

5. Zaccardi F. et al. Characterization of benzoxazine resins for brake pad friction materials manufacturing. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. P. 767–787. DOI: 10.1007/s10973-022-11789-4.