TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.10/2025.27.12.T.01.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

OKILOV ZAFAR OMON O‘G‘LI

METALLURGIYA CHIQINDILARI QO‘SHILGAN KOMPLEKS MODIFIKATSIYALANGAN BETON

05.09.05 - “Qurilish materiallari va buyumlari”

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent - 2026

UO‘K: 624.21.055:624.042.7

Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам
Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences

Okilov Zafar Omon o‘g‘li
Metallurgiya chiqindilari qo‘shilgan kompleks modifikatsiyalangan beton 3

Окилов Зафар Омон угли
Комплексно модифицированный бетон с добавлением металлургических отходов 23

Okilov Zafar Omon ugli
Complex-modified concrete with the addition of metallurgical waste 45

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works 49

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.10/2025.27.12.T.01.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

OKILOV ZAFAR OMON O‘G‘LI

METALLURGIYA CHIQINDILARI QO‘SHILGAN KOMPLEKS MODIFIKATSIYALANGAN BETON

05.09.05 - “Qurilish materiallari va buyumlari”

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent - 2026

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.4.PhD/T5167 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat transport universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.tstu.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Shaumarov Said Sanatovich** texnika fanlari doktori (DSc), professor
Rasmiy opponentlar:	**Hasanov Baxriddin Baratovich** texnika fanlari doktori, professor
	Turgunbayev Urinbek Jamalovich texnika fanlari nomzodi, professor
Yetakchi tashkilot:	**Qoraqalpoq davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat transport universiteti huzuridagi DSc.10/2025.27.12.T.01.01 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil «28» noyabr soat 11:00 dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100167, Toshkent sh., Temiryo‘lchilar ko‘chasi, 1-uy. Tel./faks: (99871) 293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat transport universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (395-raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100167, Toshkent sh., Temiryo‘lchilar ko‘chasi, 1-uy. Tel./faks: (99871) 293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil «12» noyabrda tarqatildi.
(2026-yil «12» noyabrdagi 46-raqamli reyestr bayonnomasi).

A.I. Adilxodjayev
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi,
t.f.d., professor

U.Z. Shermuxamedov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash ilmiy kotibi,
t.f.d., professor

A.A. Ishanxodjayev
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar
raisi, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda qurilish sanoatini rivojlantirishning yangi bosqichi bino va inshootlar, avtomobil yo‘llari va piyodalar yo‘laklari qurilishida qo‘llaniladigan betonlarga yuqori talablar qo‘yilishi eng muhim masalalaridan hisoblanadi. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda betonning zichligi, mustahkamligi, sovuqbardoshliligi va suv o‘tkazmasligini oshirish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilib, bunda Germaniyada “ekologik beton”, Xitoyda “kam uglerodli beton” (low-carbon concrete), AQShda uchuvchi kul va silikat changi (silica fume) qo‘llanilgan yuqori samarali betonlarni superplastifikatorlar, mikroto‘ldirgichlar va faol mineral qo‘shimchalar kiritish orqali amalga oshirilmoqda. Shu jihatdan, sanoat chiqindilaridan foydalangan holda strukturasi barqarorlashtirilgan, sement sarfi kamaytirilgan, kompleks modifikatsiyalangan beton tarkiblarini ishlab chiqishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Jahonda qurilish sanoatida energiya sarfi kam bo‘lgan kompozit bog‘lovchilarni ishlab chiqarish, atmosferaga CO_2 emissiyasini kamaytirish va turli funksional xossalarga ega sement kompozitlarini olishga qaratilgan ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada betonning strukturasini mikro- va makrodarajada maqsadli boshqarish, ya’ni ultradispers faol mineral qo‘shimchalar hamda polikarboksilat superplastifikatorlarni kompleks qo‘llash orqali suv-sement nisbatini pasaytirish, qattiq fazalarning zich joylashuvini ta’minlovchi optimal granulometrik tarkibni shakllantirish va kapillyar g‘ovaklikni kamaytirish bo‘yicha keng ko‘lamli tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, putssolan reaksiyasi hisobiga portlanditni qo‘shimcha past asosli kalsiy gidrosilikatlariga (C-S-H) aylantirish, betonning eng zaif bo‘g‘ini hisoblangan “to‘ldiruvchi – sement toshi” kontakt zonasini zichlashtirish, xlorid va sulfat ionlarining diffuziyasini cheklash hamda tajribalarni matematik rejalashtirish asosida sement sarfi kamaytirilgan, yuqori mustahkamlik, suv o‘tkazmaslik, sovuqbardoshlilik va uzoqqa chidamlilikka ega kompleks modifikatsiyalangan beton tarkiblarini ishlab chiqish ustuvor yo‘nalishlardan hisoblanmoqda. Ushbu yo‘nalishda, jumladan, portlandsement klinkerini tejash va sanoat chiqindilaridan foydalanish masalalarini birlashtirgan “ekologik beton” konsepsiyasi doirasida metallurgiya chiqindilarini mikroto‘ldirgich va faol mineral qo‘shimcha sifatida qo‘llash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda qurilish materiallari sohasini rivojlantirish, tabiiy xomashyolarni iqtisod qilish, mahalliy xomashyo va sanoat chiqindilaridan keng foydalanishga qaratilgan keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida qurilish materiallarini ishlab chiqarish hajmini ikki barobarga ko‘paytirish vazifasi belgilangan. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 17-yanvardagi “Suv havzalarida noruda materiallarni qazib olishni tartibga solish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PF-14-son Farmonida “...daryo o‘zanlari, sohil bo‘yi mintaqalari va suvni muhofaza qilish zonalaridan qum-shag‘al materiallari qazib olishni

taqiqlash...”[1] hamda muddatsiz moratoriy joriy etilishi belgilanganligi tabiiy qum o‘rnini bosuvchi muqobil materiallardan foydalanish zaruratini yanada oshirdi. Ushbu vazifalarni amalga oshirish, jumladan, “Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJning mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumini resurstejamkor to‘ldiruvchi, “O‘zmetkombinat” AJ ishlab chiqarish jarayonidan olingan mikrokremnezem chiqindisini esa energiyatejamkor faol mineral qo‘shimcha sifatida qo‘llab, yuqori ekspluatatsion xossalarga ega kompleks modifikatsiyalangan beton tarkibini ishlab chiqish bugungi kunning dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 20-fevraldagi “Qurilish materiallari sanoatini tubdan takomillashtirish va kompleks rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-4198-son, 2019-yil 23-maydagi “Qurilish materiallari sanoatini jadal rivojlantirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi PQ-4335-son qarorlari, 2022-yil 28-yanvardagi “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son Farmoni hamda qurilish sanoati bilan bog‘liq boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. “Energetika, energiya va resurstejamkorlik” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Materiallar va energiya sarfini kamaytirib, zaruriy fizik-mexanik xossalar majmuasiga ega bo‘lgan yuqori mustahkam betonlarni ishlab chiqishda uning strukturasini mineral bog‘lovchilar va kimyoviy qo‘shimchalar bilan modifikatsiyalash bo‘yicha tadqiqotlar alohida ahamiyat kasb etadi.

Bunday qo‘shimchalarni ko‘p komponentli yuqori sifatli betonlarda qo‘llash asoslarini rivojlantirishga taniqli xorijiy olimlar V.I. Solomatov, G.I. Gorchakov, Yu.M. Bajenov, L.I. Dvorkin, P.G. Komoxov, A.V. Voljenskiy, Yu.M. Butt, B.V. Gusev, S.M. Mchedlov-Petrosyan, V.G. Batrakov, A.G. Komar, V.I. Kalashnikov, A.Ye. Sheykin, P.A. Rebinder, V.B. Ratinov, V.S. Ramachandran, B.R. Falikman, X. Teylor, M. Kollepardi, P. Aitcin, M. Schmidt, P. Richard, E. Guneyisi, G. Edward, M. Buil va boshqalar ulkan hissa qo‘shganlar.

O‘zbekiston Respublikasida turli yillarda ko‘p komponentli yuqori sifatli beton kompozitsiyalaridan foydalanish sohasida ilmiy tadqiqotlarni A.I. Adilxodjayev, A.A. To‘laganov, E.U. Qosimov, M.K. Tohirov, N.A. Samig‘ov, B.B. Hasanov, V.M. Soy, I.M. Maxamataliyev, S.S. Shaumarov, A.T. Ilyasov, N.R. Muxammadiyev va boshqa olimlar olib borganlar.

O‘tkazilgan tadqiqotlarda o‘ta yuqori sifatli betonlarni loyihalash masalalari batafsil yoritilgan, ularning texnologik va fizik-mexanik xossalarining kimyoviy modifikatorlar va mineral mikroto‘ldirgichlarning sement toshiga ta’sir mexanizmi bilan o‘zaro bog‘liqligi ochib berilgan.

[1] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 17-yanvardagi “Suv havzalarida noruda materiallarni qazib olishni tartibga solish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PF-14-son Farmoni.

Biroq, bir qator muhim jihatlar hali yetarlicha o‘rganilmagan. Xususan, chiqindi qo‘shimchalar qo‘llanilgan betonning mustahkamligini oshirishda asosiy o‘rin tutadigan sement toshi va to‘ldiruvchi o‘rtasidagi kontakt zonaning tuzilishi, qalinligi va zichligiga, sement kompozitining g‘ovakli strukturasiga kam e’tibor berilgan. Shu munosabat bilan, metallurgiya chiqindilari - mis qazib olish chiqindi qumi va mikrokremnezemni mikroto‘ldirgich sifatida qo‘llab, o‘ta yuqori sifatli va uzoqqa chidamli beton kompozitsiyalarini ishlab chiqish bo‘yicha kompleks tadqiqotlar o‘tkazish vazifalari alohida dolzarblik kasb etadi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat transport universiteti hamda «O‘zbekiston temir yo‘llari» AJ o‘rtasida 2025-yil 15-yanvarda imzolangan K1053209-sonli ilmiy-tadqiqot ishi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezem birgalikda qo‘llanilgan holda klinker sarfi pasaytirilgan, mustahkamligi va ekspluatatsion xossalari yaxshilangan beton tarkibini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

sanoat chiqindilari va faol mineral qo‘shimchalar qo‘llanilgan beton tarkiblari haqidagi zamonaviy qarashlarni mahalliy va xorijiy ilmiy manbalar asosida tahlil qilish;

metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezem birgalikda qo‘llanilgan betonning fizik-kimyoviy xossalari va granulometrik tarkibini tadqiq etish;

kompleks modifikatsiyalangan beton mikrostrukturasini zamonaviy usullar yordamida o‘rganish hamda strukturaviy o‘zgarishlarning beton xossalariga ta’sir qonuniyatlarini aniqlash;

beton tarkibini tajribalarni matematik rejalashtirish usuli asosida optimallashtirish va uni loyihalash jarayonini EHM dasturi yordamida avtomatlashtirish;

tadqiqot natijalarini texnik-iqtisodiy jihatdan asoslash va ishlab chiqarishga joriy qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezem birgalikda qo‘llanilgan kompleks modifikatsiyalangan beton qorishmalari va betonlar olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida superplastifikator, mikrokremnezem va mis qazib olish chiqindi qumi qo‘llanilgan holda tayyorlangan betonning mikrostrukturasi, fizik-mexanik, ekspluatatsion va texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlari qabul qilingan.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida zamonaviy fizik-kimyoviy tahlil usullaridan (rentgenfazaviy tahlil, elektron mikroskopiya), beton qorishmasi va betonning sifat ko‘rsatkichlari va xossalarini o‘rganishning standartlashtirilgan usullaridan, tajribalarni matematik rejalashtirish va tarkibni optimallashtirish usullaridan hamda eksperiment natijalarini statistik tahlil qilish usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

metallurgiya sanoati chiqindi qumini qo‘shish beton strukturasi shakllanishining kimyoviy va granulometrik bosqichlarida “to‘ldiruvchi - sement toshi” kontakt zonasi devorlarini mustahkamlab, mikroyoriqlar hosil bo‘lishini kamaytirishi va betonning fizik-mexanik hamda ekspluatatsion xossalarining yaxshilanishi nazariy va eksperimental tadqiqotlar asosida isbotlangan;

mikrokremnezem chiqindisi yuqori putssolan faolligi hisobiga sement matritsasidagi portlandit $Ca(OH)_2$ kristallari bilan kimyoviy o‘zaro ta’sirlashib, qo‘shimcha past asosli kalsiy gidrosilikatlari (C-S-H geli) hosil qilishi va sement matritsasining zichlashuvini ta’minlashi rentgenfazaviy tahlil natijalari yordamida asoslab berilgan;

kompleks tarzda metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezemni beton tarkibiga qo‘shish betondagi kapillyar g‘ovaklarni to‘ldirib, zich va bir jinsli mikrostruktura hosil bo‘lishini ta’minlashi eksperimental tadqiqotlar va mikrostruktura tahlillari bilan asoslangan;

sanoat chiqindilari miqdoriga bog‘liq holda kompleks modifikatsiyalangan betonning o‘rtacha zichligi va siqilishdagi mustahkamligini ifodalovchi ko‘p omilli matematik modellari va ular asosida betonning ratsional tarkibini loyihalash dasturi yaratilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

oddiy portlandsement asosida metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezemni birgalikda qo‘llash orqali sement sarfi kamaytirilgan, mustahkamligi, suv o‘tkazmasligi va sovuqbardoshliligi oshirilgan B20 sinfli kompleks modifikatsiyalangan beton qorishmalarining maqbul tarkiblarini olish usuli ishlab chiqilgan;

sanoat chiqindilari qo‘llanilgan beton tarkibini tanlash va loyihalash jarayonlarini avtomatlashtiruvchi kompyuter dasturlari ishlab chiqilgan, ularning loyihalash jarayonlaridagi mehnat sarfini 1,5-2 barobarga kamaytirishi baholangan hamda ishlanmaning texnik-iqtisodiy samaradorligi asoslangan;

metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezem asosidagi kompleks modifikatsiyalangan betonning sement sarfini kamaytirish bilan birga uning fizik-mexanik va ekspluatatsion xossalarini yaxshilashi aniqlangan va piyodalar yo‘laklari qoplamalarini qurishda joriy etilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi fizik-kimyoviy tahlilning zamonaviy usullari va fizik-mexanik sinovlar, eksperimentlarni matematik rejalashtirish vositalari va usullaridan foydalanilganligi, nazariy hisoblar va tajribalar qurilish me’yorlari va qoidalariga rioya qilgan holda bajarilganligi, eksperimental natijalarning kompyuter dasturi bo‘yicha hisob natijalariga mos kelishi, shuningdek, ishlab chiqarish sharoitida aprobatsiyadan o‘tkazilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati olingan natijalar sement tizimida polikarboksilat superplastifikatori, mikrokremnezem va mis qazib olish chiqindi qumi ishtirokida kompleks modifikatsiyalangan betonlarning struktura hosil qilish jarayoni haqidagi tasavvurlarni ma’lum darajada chuqurlashtiradi, bu esa betonning

struktura hosil qilish nazariyasi va amaliyotini, texnologiyasi va xossalarini rivojlantirish uchun muhim ahamiyatga ega.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati mahalliy sanoat chiqindilaridan olingan kompleks qo‘shimchalar asosida talab etilgan xossalar majmuasiga ega bo‘lgan kompleks modifikatsiyalangan betonlarni olish va ularni ishlab chiqarishga joriy etish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Metallurgiya chiqindilari qo‘shilgan kompleks modifikatsiyalangan beton tarkibini ishlab chiqish bo‘yicha bajarilgan ilmiy tadqiqotlarning natijalari asosida:

metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezem qo‘llanilgan B20 sinfli kompleks modifikatsiyalangan beton tarkibi “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJda piyodalar yo‘laklari qoplamasini qurishda joriy qilingan (O‘zbekiston Respublikasi Transport vazirligining 2026-yil 24-martdagi 4/E414-son ma’lumotnomasi).Natijada, piyodalar yo‘laklari qoplamasi qurilishidan olingan iqtisodiy samara - 490,056 mln so‘mni tashkil qilgan;

sanoat chiqindilari qo‘llanilgan beton tarkibini loyihalashni avtomatlashtiruvchi kompyuter dasturi “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJda joriy qilingan (O‘zbekiston Respublikasi Transport vazirligining 2026-yil 24-martdagi 4/E414-son ma’lumotnomasi). Natijada, beton tarkibini loyihalash jarayonlaridagi mehnat sarfini 1,5-2 barobarga, sement sarfini 10 % ga, tabiiy qum sarfini 16 % ga kamaytirish imkoni yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiyaning asosiy natijalari 2 ta xalqaro va 2 ta respublika miqyosidagi ilmiy-texnik va ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 19 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, jumladan, SCOPUS bazasiga kiruvchi nashrlarda 1 ta, nufuzli xorijiy jurnallarda 3 ta va respublika jurnallarida 5 ta maqola nashr etilgan. Bundan tashqari, O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligi tomonidan 1 ta ixtiro hamda 5 ta EHM dasturi uchun guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish qismi, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 117 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida dissertatsiya tadqiqotlarining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotlarning maqsad va vazifalari, obyekti va predmeti tavsiflangan, O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar taraqqiyotining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi, tadqiqotlarning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, shuningdek, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinganligi, chop etilgan ilmiy ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi bo‘yicha ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Muammoning holati va tadqiqot vazifalari”** deb nomlangan birinchi bobida ko‘rib chiqilayotgan mavzu bo‘yicha ilmiy tadqiqotlarning tahliliy sharhi keltirilgan.

Adabiyot manbalarini tahlil qilish natijasida ma’lum bo‘ldiki, betonning konglomerat tuzilishga ega kompozitsion material sifatidagi xossalari sement matritsasi, to‘ldiruvchilar hamda ular orasidagi kontakt zonasining holati bilan belgilanadi. Beton strukturasida nuqsonlarning shakllanishiga xomashyo materiallarining sifati, beton tarkibini loyihalash va texnologik jarayonlarning bajarilish xususiyatlari ta’sir ko‘rsatadi.

Piyoda yo‘laklari uchun beton qoplamasi ekspluatatsiya jarayonida mexanik yuklanishlar, harorat va namlikning o‘zgarishi, muzlash-erish sikllari hamda kimyoviy agressiv muhit ta’siriga uchraydi. Ushbu omillarning kompleks ta’siri natijasida beton strukturasida mikroyoriqlar, yemirilish jarayonlari yuzaga kelib, betonning xizmat muddati qisqaradi (1-rasm).



a) b)

1-rasm. Mexanik ta’sirlar natijasida betonlarda hosil bo‘ladigan buzilishlar

Bir qator tadqiqotlar mikrokremnezemning beton strukturasini modifikatsiyalashdagi yuqori samaradorligini ko‘rsatdi. Jumladan, V.M. Malhotra mikrokremnezemni sement vazniga nisbatan 5-10 % miqdorda qo‘llash orqali betonning 28 kunlik mustahkamligini 25-30 % ga oshirish mumkinligini, P.K. Mehta esa putssolan reaksiyasi natijasida kapillyar g‘ovaklar miqdori 50 % ga kamayishini tadqiq etgan. Shuningdek, T. Helland mikrokremnezem qo‘llanilganda xlorid ionlarining o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti 5-10 martagacha pasayishini aniqlagan, V.G. Batrakov esa suv o‘tkazmaslik ko‘rsatkichini W12-W16 gacha oshirish mumkinligini, S.S. Kaprielov siqilishdagi mustahkamlikni 20-40 % ga oshirish imkoniyatlarini, L.I. Dvorkin esa sovuqbardoshlilikni F400-F600 gacha ko‘tarish qobiliyatini o‘rgangan.

Mis ishlab chiqarishdan hosil bo‘lgan chiqindilarni beton tarkibida qo‘llash bo‘yicha T. Chanyal va B.K. Jain tabiiy qumning 40 % ini mis chiqindisi bilan almashtirganda siqilishdagi mustahkamlik 12-15 % ga ortganini, R.R. Onuaguluchi suv o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti 25-30 % ga kamayganini aniqlagan. M. Thomas mikrokremnezemni (5-10 %) sanoat chiqindilari bilan kompleks qo‘llaganda betonning sulfatlarga chidamliligi 1,5-2 barobar ortishini isbotlagan. K.S. Al-Jabri mis shlakini to‘ldirgich sifatida qo‘llab, suv-sement nisbatini 0,40 dan 0,35 gacha tushirgan, M. Mavroulidou egilishdagi mustahkamlik 10-15 % ga oshishini qayd etgan. R. Abdullahi va A. Al-Mattar tadqiqotlarida qumni qisman almashtirish hisobiga beton mustahkamligini 15-30 % ga oshirgani, biroq to‘liq almashtirishda qorishmaning bog‘lanuvchanligi sezilarli kamaygani keltirilgan.

Shu bilan birga, adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, chiqindilar qo‘llanilgan betonda mustahkamlikni belgilovchi sement toshi va to‘ldiruvchi o‘rtasidagi kontakt zonaning tuzilishi, qalinligi va zichligi, sement kompozitining g‘ovakli strukturasi hamda kimyoviy muhit ta’siriga qarshiligi yetarlicha o‘rganilmagan. Bu esa ushbu yo‘nalishda istiqboldagi tadqiqotlarning dolzarbligini tasdiqlaydi.

Adabiy manbalarni tahlil qilish va tadqiqot vazifalaridan kelib chiqib, ishchi gipoteza shakllantirildi. “Sement - sanoat chiqindilari - polikarboksilat superplastifikatori - suv” tizimidagi fizik-kimyoviy o‘zaro ta’sirlar haqidagi zamonaviy tasavvurlarga asoslanib, bir tomondan, mikrokremnezemni sement matritsasini zichlashtiruvchi faol putssolan qo‘shimcha sifatida, ikkinchi tomondan, mis qazib olish chiqindi qumini kontakt zona devorlarini mustahkamlovchi va mikroyoriqlarni kamaytiruvchi texnogen to‘ldiruvchi sifatida qo‘llab, sement sarfi kamaytirilgan, fizik-mexanik va ekspluatatsion xossalari yaxshilangan kompleks modifikatsiyalangan beton tarkibini ishlab chiqish mumkinligi faraz qilinadi.

Dissertatsiya ishining **“Tadqiqot usullari va qo‘llanilgan materiallar tasnifi”** deb nomlangan ikkinchi bobida beton tarkibini ishlab chiqish uchun ishlatilgan dastlabki xomashyo komponentlarining xususiyatlari keltirilgan, shuningdek, eksperimental tadqiqotlarni o‘tkazishda qo‘llanilgan usullar, laboratoriya asboblari va uskunalari tavsiflangan.

Bog‘lovchi sifatida “Ohangaronsement” zavodining CEM I 32,5N markali portlandsementi (GOST 10178-85) qo‘llanildi. Uning qotish vaqtining boshlanishi 1 soat 10 daqiqa, tugashi 6 soat 20 daqiqa, 28 sutkalik siqilishdagi mustahkamligi 21,72 MPa ni tashkil etdi. Portlandsementning kimyoviy tarkibi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Portlandsementning kimyoviy tarkibi

Tarkibiy qism	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
%	24,15	7,64	5,65	59,10	1,17	0,23	0,22	0,42

Faol mineral qo‘shimcha sifatida “O‘zmetkombinat” AJ metallurgiya kombinatining po‘lat eritish ishlab chiqarishidan olinadigan mikrokremnezemi ishlatildi. Uning zarrachalari silliq yuzali va sharsimon shaklga ega bo‘lib, asosiy qismini amorf kremniy dioksidi tashkil etadi (2-jadval). Mikrokremnezem suvli suspenziyasining pH ko‘rsatkichi o‘rtacha 7,74 ni tashkil etadi.

2-jadval

Mikrokremnezemning kimyoviy tarkibi (MK-90)

Tarkibiy qism	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	C	S
%	90,69	0,68	3,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

Yirik to‘ldiruvchi sifatida Piskent karyerining 5-20 mm fraksiyali chaqiq toshi qo‘llanildi; uning donador tarkibi GOST 8267-93 talablariga javob beradi. Mayda to‘ldiruvchi sifatida daryo qumi ishlatildi; to‘kma zichligi 1401 kg/m³, haqiqiy zichligi 2594 kg/m³, changsimon va gilsimon zarralar miqdori 0,5 %. Qumning granulometrik tarkibi 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

Qumning granulometrik tarkibi

Elakdagi qoldiq, %	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16	Yiriklik moduli
Xususiy	2,0	6,5	34,5	41,5	13,0	2,5	2,36
To‘liq	2,0	8,5	43,0	84,5	97,5	100	

Texnogen mayda to‘ldiruvchi sifatida “Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJning mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi qo‘llanildi (4-jadval). Kombinat chiqindixonalarida yiliga 34,5 mln tonnaga yaqin chiqindi hosil bo‘lib, uning joriy zaxirasi 1 321,5 mln tonnani tashkil etadi (5-jadval). Chiqindi zarrachalari burchakli, notekis shaklga va g‘adir-budur, rivojlangan yuzaga ega.

4-jadval

“Olmaliq KMK” AJ mis qazib olish chiqindisining kimyoviy tarkibi, mas. %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	S	Cu	Mo	SO_3	TiO_2	Re
31,42	3,63	31,29	1,43	0,96	1,14	0,5	0,1	1,4	0,2	0,00001

5-jadval

OKMK chiqindilarining hajmi va zaxirasi

Chiqindi saqlash joyi	Yillik hosil bo‘lishi, mln t/yil	Joriy zaxira, mln tonna
№1	6,7	546,2
№2	27,8	775,3
Jami	34,5	1 321,5

Kimyoviy qo‘shimcha tanlash uchun respublika bozorida keng qo‘llanilayotgan beshta superplastifikator Hagerman konusi bo‘yicha sement xamirining yoyilishi orqali taqqoslandi (suv-sement nisbati 0,27, qo‘shimcha miqdori sement massasining 0,8 %). Natijalar 6-jadvalda keltirilgan.

6-jadval

Turli superplastifikatorlar ta’sirida sement xamirining yoyilishi, mm

O‘lchash vaqti, daqiqa	Melflux 1641 F (Germaniya)	JK-02 (Xitoy)	POLIMIX (O‘zbekiston)	Plv (FM) (Rossiya)	JK-08 (Xitoy)
0	290	260	340	140	240
5	360	270	360	130	250
25	370	250	380	110	230

Eng yuqori va vaqt bo‘yicha barqaror yoyilish polikarboksilat efirlari asosidagi POLIMIX (ARMENT CONSTRUCTION CHEMICALS) superplastifikatorida qayd etildi. Mahalliy ishlab chiqarilishi va nisbatan arzonligi sababli u import o‘rnini bosuvchi mahsulot sifatida keyingi tadqiqotlar uchun tanlandi.

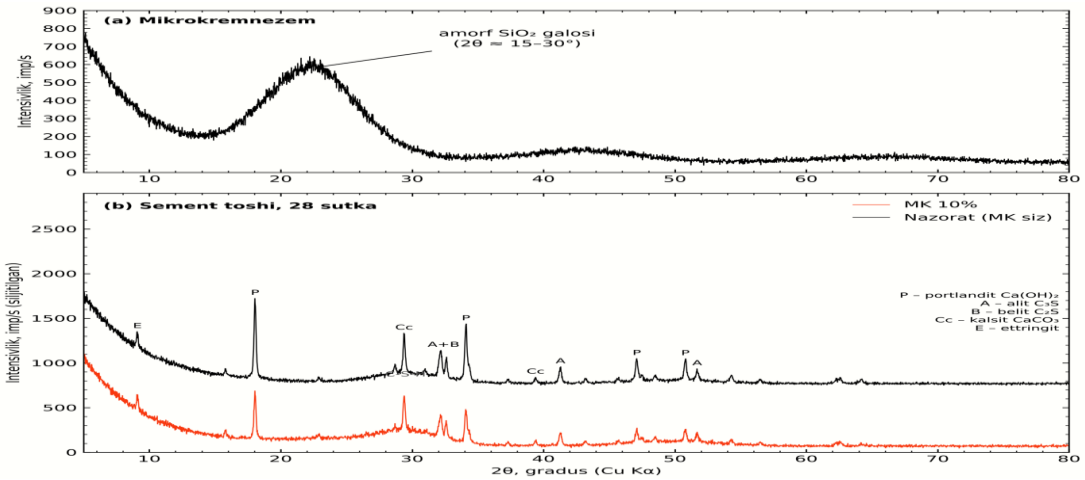
Beton va sement toshining xossalari amaldagi standartlar bo‘yicha aniqlandi: siqilishdagi mustahkamlik - GOST 10180-2012 (100×100×100 mm kub namunalar, yuklanish tezligi 0,6 MPa/s), zichlik - GOST 12730.1-2020, suv o‘tkazmaslik - GOST 12730.5-2018 («ho‘l dog‘» usuli), sovuqbardoshlilik - GOST 10060-2012, qorishma harakatchanligi - GOST 10181-2014. Mikrostruktura va fazaviy tarkibni

o‘rganishda JIB-4500 JEOL elektron mikroskopi (O‘zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti), XRD-7000 Shimadzu rentgen difraktometri, solishtirma sirtni aniqlash uchun PSX-11A qurilmasi va MicroSizer 201 lazerli granulometri qo‘llanildi. Tajriba-sinov ishlari Toshkent davlat transport universiteti hamda “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJ laboratoriyalarida bajarildi.

Dissertatsiya ishining **“Chiqindilar yordamida hosil qilingan kompleks modifikatsiyalangan beton strukturasi va xossalarini tadqiq etish”** deb nomlangan uchinchi bobi mikrokremnezem, polikarboksilat superplastifikatori va mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumining beton strukturasi hamda xossalarining shakllanishiga ta’sirini o‘rganishga qaratilgan eksperimental tadqiqotlar natijalariga bag‘ishlangan. Bunda beton tarkibini matematik rejalashtirish usuli asosida optimallashtirish, komponentlarning o‘zaro ta’sir qonuniyatlarini aniqlash hamda olingan betonlarning fizik-mexanik va ekspluatatsion ko‘rsatkichlarini baholash natijalari keltirilgan.

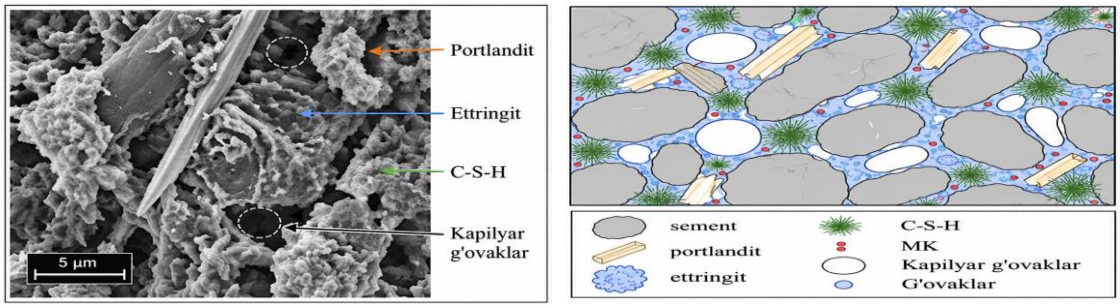
Mikrokremnezem va portlandsementning kimyoviy tarkibi sezilarli farq qiladi: mikrokremnezem tarkibida SiO_2 ustun (92 %), portlandsementda esa asosiy oksidlar CaO (59,10 %) va SiO_2 (24,15 %) hisoblanadi. Mikrokremnezemda CaO juda kam (0,85 %), shuning uchun u sementning kimyoviy analogi emas, balki gidratatsiyada ajraladigan $Ca(OH)_2$ bilan reaksiyaga kirishuvchi faol amorf SiO_2 manbai sifatida sementning bir qismini almashtiradi.

Mikrokremnezem o‘lchami 0,05-0,5 mkm bo‘lgan sferik zarrachalardan iborat bo‘lib, portlandsement donalaridan taxminan 50 marta kichik; uning solishtirma yuzasi 15 000-30 000 m^2/kg ga yetadi. Mikrokremnezemning rentgen difraktogrammasida (2-rasm, a) aniq kristall piklar yo‘q, $2\theta \approx 15$-$30°$ oralig‘ida maksimumi taxminan 22° ga to‘g‘ri keladigan keng amorf SiO_2 galosi kuzatiladi; bu uning yuqori putssolan faolligini ko‘rsatadi. 28 sutkalik sement toshi difraktogrammalarida (2-rasm, b) nazorat namunasida portlandit $Ca(OH)_2$ (P), alit (A), belit (B), kalsit (Cc) va ettringit (E) piklari qayd etilgan. 10 % MK qo‘shilgan namunada portlandit va klinker minerallari piklarining intensivligi kamaygan, $2\theta \approx 25$-$35°$ oralig‘ida C-S-H fazasiga xos amorf ko‘tarilish kuchaygan.



2-rasm. Rentgen difraktogrammalari (Cu Kα): a) mikrokremnezem; b) 28 sutkalik sement toshi (nazorat va 10 % MK). P - portlandit $Ca(OH)_2$; A - alit C_3S; B - belit C_2S; Cc - kalsit $CaCO_3$; E - ettringit

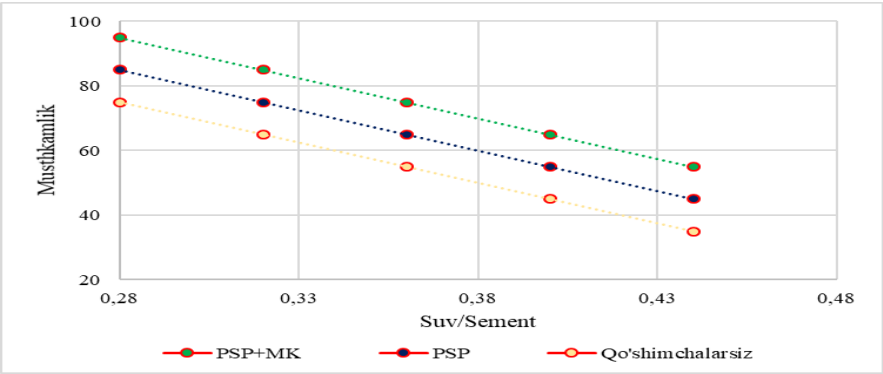
Putssolan reaksiyasi natijasida qo‘shimcha past asosli kalsiy gidrosilikatlari (C-S-H) hosil bo‘ladi, nisbatan past mustahkamlik va yuqori eruvchanlikka ega portlandit miqdori kamayadi. Ultradispers mikrokremnezem zarrachalari sement donalari orasidagi bo‘shliqlarni to‘ldirib, mikroto‘ldiruvchi samarasini beradi: yirik kapillyar g‘ovaklar ulushi kamayadi, g‘ovakli tuzilma mayda gel g‘ovaklari tomon siljiydi, betonning eng zaif elementi hisoblangan “to‘ldiruvchi - sement toshi” o‘tish zonasi (ITZ) zichlashadi (3-rasm).



a) b)

3-rasm. Mikrokremnezem kiritilganda sement toshining zichlanish mexanizmi

Polikarboksilat superplastifikatori (PSP) sement zarrachalari yuzasiga adsorbsiyalanib, elektrostatik itarilish hisobiga sement va mikrokremnezem zarrachalarining aglomeratsiyalanishining oldini oladi, suv-sement nisbatini pasaytiradi va kapillyar g‘ovaklikni kamaytiradi. Suv-sement nisbatining pasayishi barcha tarkiblarda mustahkamlikni oshiradi; eng katta samaraga PSP va mikrokremnezem birgalikda qo‘llanilganda erishiladi (4-rasm). Bu sinergetik ta’sir suvga bo‘lgan ehtiyojning kamayishi, sement matritsasining zichlashishi va qo‘shimcha C-S-H hosil bo‘lishi bilan izohlanadi.



4-rasm. Modifikatsiyalovchi qo‘shimchalarning turli suv-sement nisbatlarida beton mustahkamligiga ta’siri

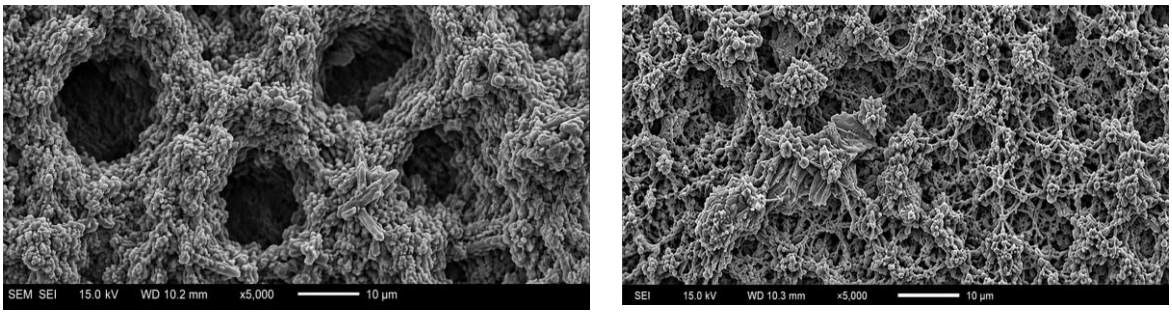
Mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi zarrachalari tabiiy qumdan farqli ravishda burchakli shaklga va rivojlangan g‘adir-budur yuzaga ega bo‘lib, sement matritsasi bilan mexanik ilashishni kuchaytiradi. Mikrokremnezem bilan birgalikda qo‘llanilganda donalararo bo‘shliqlar kamayadi, o‘tish zonasi zichlashadi va beton makrostrukturasi bir jinsli bo‘ladi (5-rasm).



a) b)

5-rasm. Mis qazib olish chiqindi qumi va mikrokremnezemdan foydalangan holda beton makrostrukturasini shakllantirish sxemasi

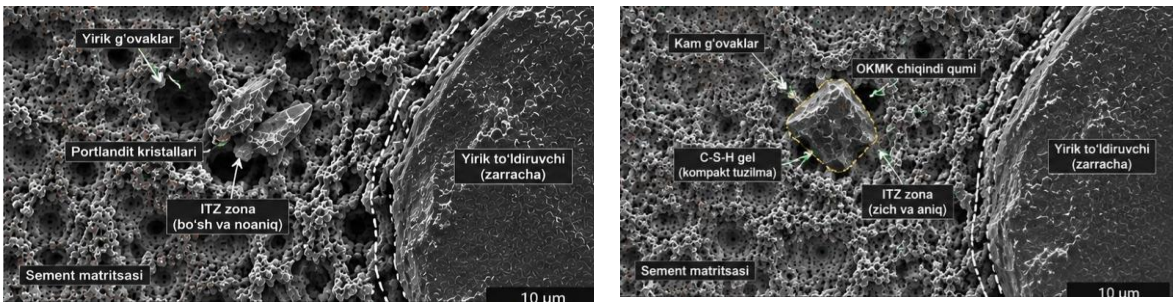
Elektron mikroskopik tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, qo‘shimchasiz etalon betonda kapillyar g‘ovaklar ko‘p, portlandit kristallari yirik va plastinkasimon, C-S-H geli miqdori kam, mikrostruktura nisbatan bo‘sh. 10 % mikrokremnezem qo‘shilgan betonda esa kapillyar g‘ovaklar sezilarli kamaygan, C-S-H geli ko‘p va tolasimon ko‘rinishda, portlandit miqdori putssolan reaksiya hisobiga kamaygan, mikrostruktura zichlashgan va bir jinsli (6-rasm).



a) b)

6-rasm. Beton mikrostrukturasi (×5000): a) etalon beton (MK qo‘shilmagan); b) 10 % mikrokremnezem qo‘shilgan beton

Mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi qo‘shilgan betonda ham shunga o‘xshash o‘zgarishlar kuzatildi (7-rasm): etalon betonda yirik g‘ovaklar va portlandit kristallari, bo‘sh va noaniq ITZ zona aniqlangan bo‘lsa, 16 % mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi qo‘shilgan betonda g‘ovaklar kam, C-S-H geli kompakt tuzilma hosil qilgan, chiqindi zarrachasi atrofidagi ITZ zona zich va aniq chegaraga ega.



a) b)

7-rasm. Beton mikrostrukturasi: a) etalon beton (OKMK chiqindisiz); b) 16 % mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi qo‘shilgan beton

Beton tarkibi B3 rejasi asosida matematik rejalashtirish usulida optimallashtirildi. Omillar sifatida X_1 - PSP miqdori (sement massasidan), X_2 -

mikrokremnezem miqdori (sement massasidan) va X_3 - mis qazib olish chiqindi qumi miqdori (qum massasidan) qabul qilindi; optimallashtirish mezoni - normal sharoitda 28 sutka qotgan betonning siqilishdagi mustahkamligi. Reja D-optimal rejalarga yaqin bo‘lib, 15 ta kuzatuvni o‘z ichiga oladi (7-jadval).

7-jadval

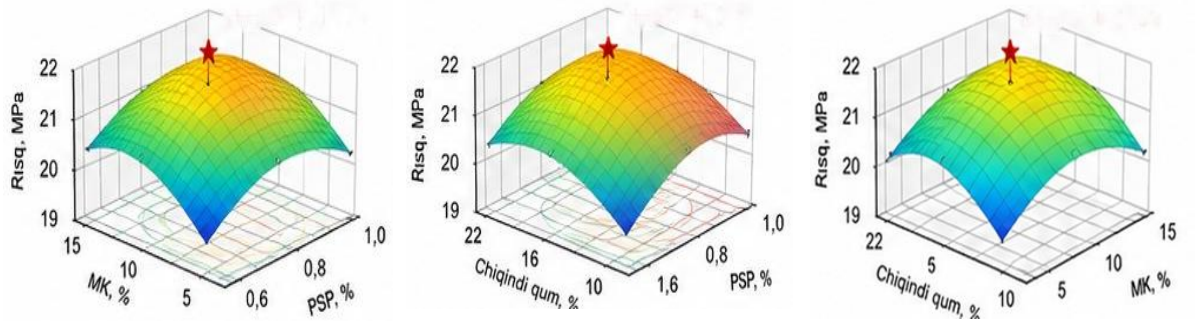
Omillar va ularning o‘zgarish intervallari

Omillar	O‘lchov birligi	Kod	-1	0	+1
PSP (superplastifikator)	%	X_1	0,6	0,8	1,0
MK (mikrokremnezem)	%	X_2	5,0	10,0	15,0
Mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi	%	X_3	10,0	16,0	22,0

Tajriba natijalari asosida B20 sinfli beton mustahkamligini tavsiflovchi matematik-regressiya tenglamasi olindi:

$$Y = 21,57 + 0,15x_1 + 0,10x_2 + 0,08x_3 + 0,10x_1x_2 + 0,05x_1x_3 + 0,05x_2x_3 - 0,35x_1^2 - 0,65x_2^2 - 0,55x_3^2$$

Ushbu matematik regressiya tenglamasida har uchala omilning beton mustahkamligiga ta’siri keltirilgan (8-rasm). Bunda matematik-regressiya tenglamasiga eng katta ta’sir etish omili sifatida – mikrokremnezem ($b_{22} = -0,65$) ni ko‘rish mumkin. Shundan so‘ng, mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumining ta’siri ($b_{33} = -0,55$) kuzatiladi. Keyingi omil sifatida superplastifikator ($b_{11} = -0,35$) ni qayd etish mumkin (8-jadval).



a) b) c)

8-rasm. Beton mustahkamligining omillarga bog‘liqligi: a) PSP va MK-90; b) PSP va chiqindi qum; c) mikrokremnezem va chiqindi qum

8-jadval

Matematik-regressiya tenglamasi bo‘yicha beton mustahkamligi, MPa

a) MK, % \ PSP, %	0,6	0,8	1,0	b) Chiqindi qum, % \ PSP, %	0,6	0,8	1,0
5	20,41	20,82	20,52	10	20,48	20,94	20,70
10	21,07	21,3	21,38	16	21,06	21,32	21,38
15	20,42	21,03	20,93	22	20,55	21,11	20,97
c) Chiqindi qum, % \ MK, %	**5**	**10**	**15**				
10	20,22	20,94	20,37				
16	20,81	21,72	21,06				
22	20,30	21,13	20,65				

Matematik-regressiya tenglamasining maksimumi PSP ≈ 0,8 %, MK ≈ 10,5 % va mis chiqindi qumi ≈ 16,5 % miqdorida beton tarkibiga kiritilganda 21,72 MPa mustahkamlikni ta’minlaydi.

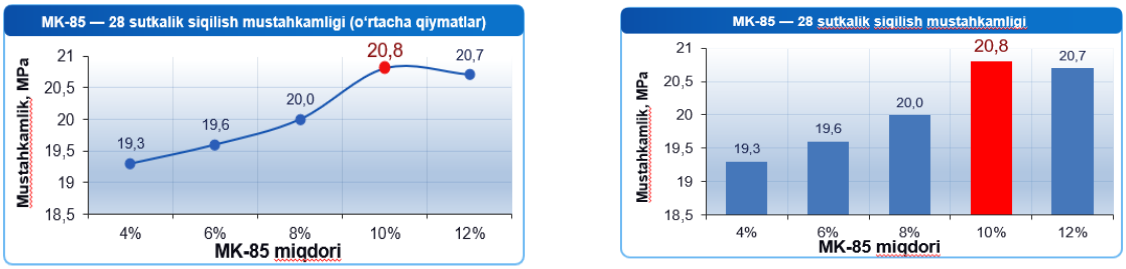
Eksperimental tadqiqotlarning birinchi bosqichida an’anaviy B20 sinfli beton tarkibi (sement - 320 kg, qum - 680 kg, shag‘al - 1200 kg, suv - 175 litr) o‘rganildi; uning 28 sutkalik mustahkamligi 18,8-19,1 MPa ni tashkil etdi. Keyin tarkibga PSP 0,6; 0,8 va 1,0 % miqdorda qo‘shilganda mustahkamlik mos ravishda 19,8; 20,3 va 20,1 MPa ga teng bo‘ldi; PSP ning maqbul miqdori 0,8 % deb qabul qilindi.

Ikkinchi bosqichda sementning 4-12 % i mikrokremnezem bilan almashtirildi (9-jadval, 9-rasm). Mikrokremnezem miqdori 4 % dan 10 % gacha oshirilganda 28 sutkalik mustahkamlik 19,3 MPa dan 20,8 MPa gacha ortib, eng maqbul natija 10 % tarkibda qayd etildi. Bunda mikrokremnezem miqdori 12 % ga oshirilganda mustahkamlikning sezilarli darajada ortmasligi ayrim hollarda esa kamayishi (20,7 MPa) qayd etildi.

9-jadval

Mikrokremnezem qo‘shilgan namunalarning 28 sutkalik siqilishdagi mustahkamligi

№	Mikrokrem-nezem miqdori	R_{28-1}, MPa	R_{28-2}, MPa	R_{28-3}, MPa	R_{28} o‘rt., MPa
1	4 %	19,23	19,35	19,47	19,3
2	6 %	19,46	19,58	19,70	19,6
3	8 %	19,80	19,90	19,97	20,0
4	10 %	20,70	20,80	20,92	20,8
5	12 %	20,68	20,69	20,70	20,7



a) b)

9-rasm. Beton mustahkamligining mikrokremnezem miqdoriga bog‘liqligi: a) diagramma; b) grafik

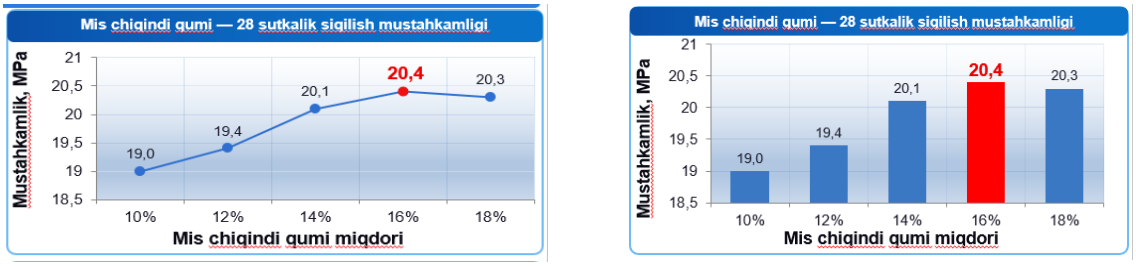
Eksperimental tadqiqotlarning uchinchi bosqichida mis qazib olish jarayonida hosil bo‘lgan chiqindi qumining beton tarkibiga qo‘shilgan miqdori qum massasiga nisbatan 10-18 % oralig‘ida qo‘llanildi (10-jadval, 10-rasm). Bunda miqdori 10 % dan 16 % gacha qo‘shilganda o‘rtacha mustahkamlik 19,0 MPa dan 20,4 MPa gacha ortdi. Bu holat chiqindi qumning mikroto‘ldiruvchi ta’siri natijasida sement toshining zichlashishi va kontakt zonaning yaxshilanishi bilan izohlanadi.

Chiqindi qumi miqdori 18 % qo‘shilganda esa mustahkamlik 20,3 MPa ga teng bo‘lib, uning qiymati biroz pasayishi kuzatildi. Shuning uchun chiqindi qumning optimal miqdori 16 % deb belgilandi.

10-jadval

Mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi qo‘shilgan namunalarning 28 sutkalik siqilishdagi mustahkamligi

№	Qo‘shimcha miqdori	R_{28-1}, MPa	R_{28-2}, MPa	R_{28-3}, MPa	R_{28} o‘rt., MPa
1	10 %	19,18	19,30	19,42	19,00
2	12 %	19,36	19,48	19,60	19,40
3	14 %	19,90	20,10	20,20	20,10
4	16 %	20,40	20,50	20,53	20,40
5	18 %	20,18	20,10	20,32	20,30



a) b)

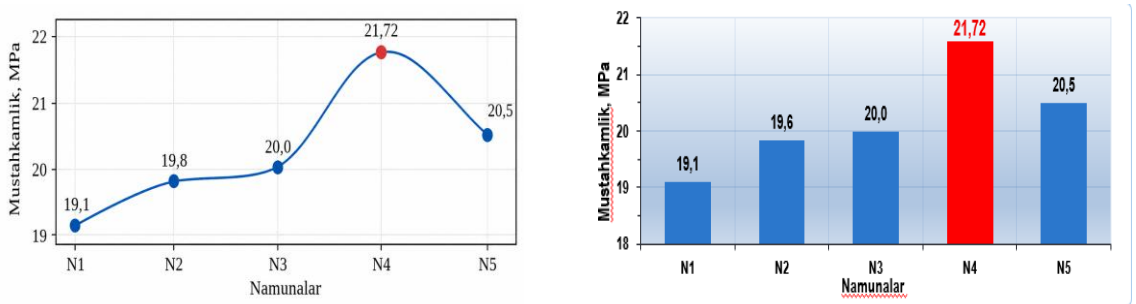
10-rasm. Beton mustahkamligining mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi miqdoriga bog‘liqligi: a) diagramma; b) grafik

Ilmiy tadqiqotlarning to‘rtinchi bosqichida mikrokremnezem va chiqindi qumi birgalikda qo‘llanilgan tajriba-sinov namunalari tayyorlanib, uning natijalari 11-jadval va 11-rasmda keltirilgan.

11-jadval

Tajriba namunalarining tarkibi va xossalari (1 m³ uchun)

Namuna	Sement, kg	MK-90, kg	Shag‘al, kg	Suv, l	PSP, %	Oddiy qum, kg	Mis chiqindi qumi, kg	ρ, kg/m³	R_{siq}, MPa
N1	320	-	1200	175	-	680	-	2375	19,1
N2	300,8	19,2	1200	175	0,4	598,4	81,6	2406	19,8
N3	294,4	25,6	1200	175	0,6	584,8	95,2	2408	20,0
N4	288	32	1200	175	0,8	571,2	108,8	2410	21,72
N5	281,6	38,4	1200	175	1,0	557,6	122,4	2412	20,5



a) b)

11-rasm. Taklif etilayotgan tarkiblarning mustahkamlik ko‘rsatkichlari:

a) grafik; b) diagramma

Eng yuqori natija N4 tarkibda qayd etilib, bunda beton tarkibiga sement - 288 kg, mikrokremnezem - 32 kg, mis chiqindi qumi - 108,8 kg miqdorida qo‘shilganda beton mustahkamligi 21,72 MPa ga, zichlik esa 2410-2412 kg/m³ ekanligi aniqlandi. Mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumidan ikkilamchi xomashyo

sifatida foydalanish tabiiy qum sarfini kamaytirish va sanoat chiqindilarini qayta ishlash imkoniyatini yaratadi.

Taklif etilayotgan va etalon (an'anaviy) beton tarkiblarining ekspluatatsion ko'rsatkichlarini qiyosiy tahlili 12-jadvalda keltirilgan.

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, taklif etilayotgan beton tarkibi etalonga nisbatan sement sarfini 10 % ga, qum sarfini 16 % ga iqtisod qilish imkoniyati yaratildi. Shu bilan birga, betonning mustahkamligi 13 % ga ortishi kuzatilib, suv o'tkazmasligi bo'yicha W6, sovuqbardoshlilik bo'yicha esa F150 gacha yaxshilanishi qayd etildi.

12-jadval

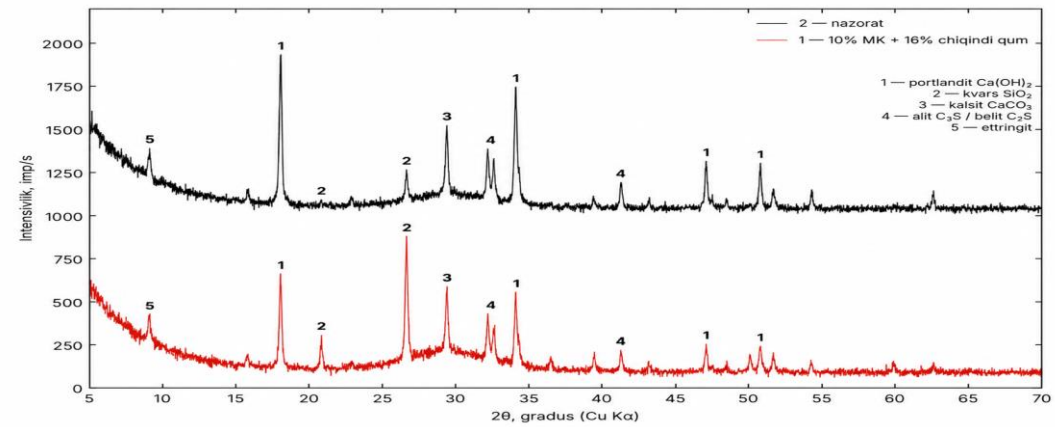
Etalon va taklif etilayotgan betonlarning ekspluatatsion ko'rsatkichlari

Tarkib	Sement, kg	MK-90, kg	Qum, kg	Chiqindi qum, kg	PSP, %	W	F	R_{siq}, MPa
Etalon	320	-	680	-	-	W4	F100	19,1
Taklif etilayotgan	288	32	571,2	108,8	0,8	W6	F150	21,72

Izoh: ikkala tarkibda chaqiq tosh - 1200 kg, suv - 175 l.

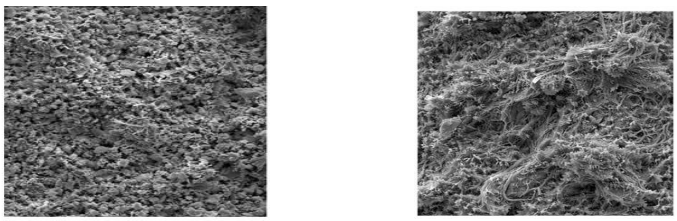
Dissertatsiyaning **"Betonning mikro va makrostrukturasini tadqiq qilish, tadqiqot natijalarini ishlab chiqarishga joriy qilish va texnik-iqtisodiy samaradorligini aniqlash"** deb nomlangan to'rtinchi bobida taklif etilayotgan betonning mikro va makrostrukturasini tadqiq etish, ishlab chiqilgan tarkibni amaliyotga joriy etish va uning texnik-iqtisodiy samaradorligini aniqlash bo'yicha tadqiqot natijalari keltirilgan.

Beton tarkibiga 10 % mikrokremnezem va 16 % mis qazib olishdan hosil bo'lgan chiqindi qumi qo'llanilgan namunaning rentgenogrammasida (12-rasm) etalon namunaga nisbatan portlandit $Ca(OH)_2$ (1) piklarining intensivligi sezilarli kamaygan: $2\theta \approx 18°$ dagi asosiy pikning fonga nisbatan balandligi qariyb 1,6 marta kichik. Bu mis qazib olishdan hosil bo'lgan chiqindi qumi va mikrokremnezemning putssolan faolligi hisobiga $Ca(OH)_2$ ikkilamchi reaksiyalarga sarflanib, qo'shimcha C-S-H fazalari hosil bo'lishini tasdiqlaydi; $2\theta \approx 25\text{-}35°$ oralig'idagi diagrammadagi ko'tarilish ham shundan dalolat beradi. Kremnezem miqdorini tavsiflovchi SiO_2 (2) piklarining ($2\theta \approx 20{,}9°$ va 26,6°) kuchayishi kuzatilgan. Diagrammadagi kalsit (3), alit va belit (4) hamda ettringit (5) piklari ikkala namunada ham mavjud.



12-rasm. Tadqiq etilayotgan namunalarning rentgenogrammasi: 1 - 10 % MK + 16 % chiqindi qum; 2 - nazorat. Piklar: 1 - portlandit $Ca(OH)_2$; 2 - kvars SiO_2; 3 - kalsit $CaCO_3$; 4 - alit C_3S / belit C_2S; 5 - ettringit

Taklif etilayotgan tarkib asosida olingan namunalarning elektron mikrostrukturalarida (13-rasm) matritsaning mayda va zich joylashgan zarrachalardan tashkil topgani hamda ular orasini to‘ldiruvchi tolasimon va plastinkasimon C-S-H gel fazalarining rivojlangan tarmog‘i kuzatiladi. Bu esa kompozit strukturasining zich, bir jinsli va kam g‘ovakli ekanligini ko‘rsatadi.



a) b)

13-rasm. Taklif etilayotgan tarkibli namunalarning mikrosuratlari

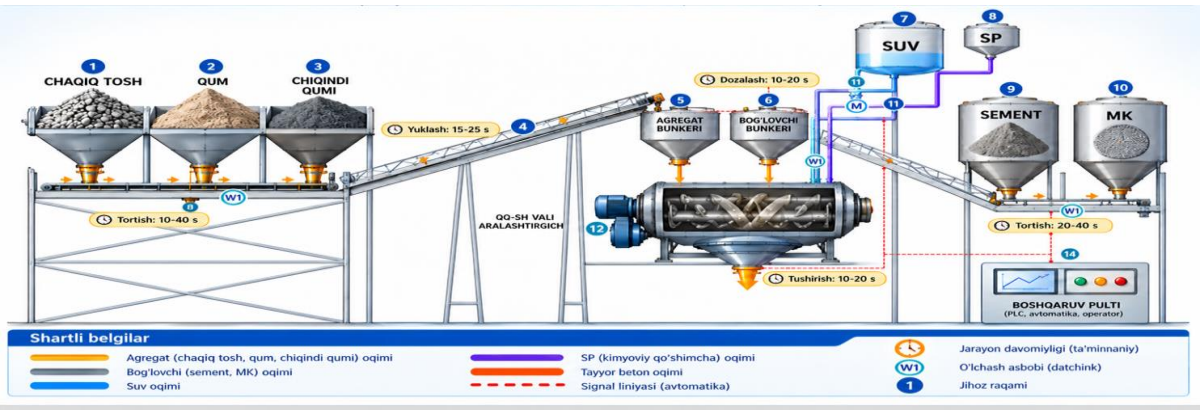
Tadqiqot natijalari “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJda ilmiy tadqiqot, ishlanma, sanoat sharoitida sinov va amaliyotga joriy etish bosqichlarida joriy etildi. Texnologik yo‘riqnomaga muvofiq taklif etilayotgan beton tarkibida “O‘zmetkombinat” AJning mikrokremnezemi (10 %) va “Olmaliq KMK” AJning chiqindi qumi (16 %) qabul qilingan. Har bir tarkibdan 100×100×100 mm o‘lchamli 12 tadan kub namuna tayyorlanib, 28 sutkadan so‘ng o‘tkazilgan sinov natijalari 13-jadvalda keltirilgan.

13-jadval

Tajriba-sinovlari natijalari

Mahsulot nomi	Beton tarkibi	Beton sinfi	KCh, sm	R_{siq}, MPa	W, marka	F, marka
Beton qorishmasi	Etalon	B20	8	19,1	W4	F100
Beton qorishmasi	Taklif etilayotgan	B20	9	21,72	W6	F150

Taklif etilayotgan tarkib asosida beton olish texnologiyasi 14-rasmda keltirilgan. Ushbu texnologiyada mavjud texnologiyaga nisbatan chiqindi qumi bunkeri (3), superplastifikator dozator idishi (8) hamda mikrokremnezem bunkeri (10) qo‘shimcha ravishda kiritildi. Shuningdek, ushbu texnologiyani avtomatlashtirish hisobiga betonni tayyorlash jarayonidagi sarf etilayotgan vaqt 1,5-2 barobarga qisqartirilishiga erishildi.



14-rasm. Taklif etilayotgan beton tarkibini ishlab chiqarish texnologik sxemasi

Natijada taklif etilayotgan tarkib va texnologik sxema “Yuqori tezlikdagi yo‘lovchi poyezdlar harakatlanuvchi temir yo‘l uchastkalarida (Dashtobod, G‘allaorol, Raximov, O‘taovul bekatlarida) piyodalar o‘tish yo‘laklarini tashkil etish va yo‘l o‘tkazgichlar qurilishi” loyihalarida amaliyotga joriy etildi (15-rasm).



a) b)

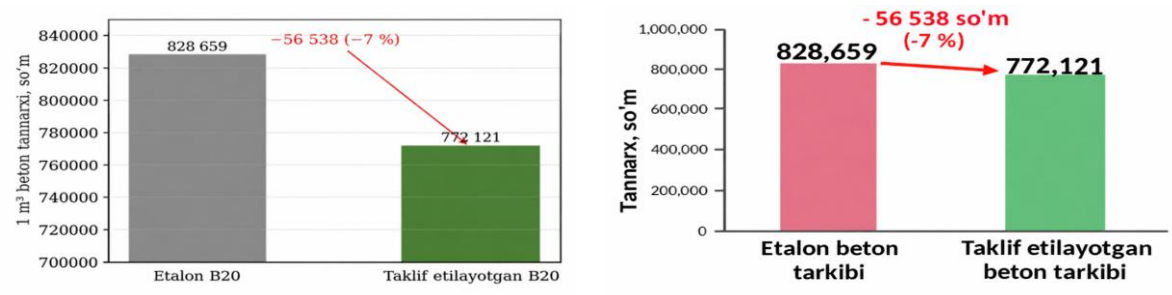
15-rasm. Piyodalar yo‘lagi uchun tayyorlangan tajriba beton qoplamasining umumiy ko‘rinishi

Texnik-iqtisodiy samaradorlik 1 m³ B20 sinfli beton ishlab chiqarish xarajatlarini taqqoslash asosida baholandi (14-jadval, 16-rasm).

14-jadval

Tarkiblar va tannarx solishtirmasi (1 m³ uchun)

Nomlanishi	Birligi	An’anaviy B20: sarf	An’anaviy B20: summa, so‘m	Taklif etilayotgan B20: sarf	Taklif etilayotgan B20: summa, so‘m
Sement	kg	320	256 000	-	-
Sement + MK	kg	-	-	320	220 000
Qum	kg	680	68 000	-	-
Qum + chiqindi qum	kg	-	-	680	55 760
Shag‘al	kg	1200	144 000	1200	144 000
Suv	l	175	525	175	525
Materiallar jami			468 525		420 285
Ish haqi	so‘m		146 554		146 554
Frontal yuklagich	so‘m		34 817		34 817
Statsionar (mobil) aralashtirgich	so‘m		57 151		57 151
Ishlab chiqarish xarajatlari jami			707 047		658 807
Boshqa xarajatlar (17,2 %)			121 612		113 314,7
1 m³ beton tannarxi			**828 659**		**772 121**



a) b)

16-rasm. 1 m³ beton tannarxining solishtirmasi: a) diagramma; b) grafik

Taklif etilayotgan beton tarkibi amaldagi tarkibga nisbatan iqtisodiy jihatdan samaraliroq bo‘lib, “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJ tomonidan foydalanib kelinayotgan etalon tarkib B20 sinfli betonning 1 m³ uchun 56 538 so‘mga (7 %) arzonroq hisoblanadi. Ushbu texnologiyani piyodalar yo‘laklari va boshqa beton qoplamalarni tayyorlashda qo‘llash maqsadga muvofiq.

XULOSA

“Metallurgiya chiqindilari qo‘shilgan kompleks modifikatsiyalangan beton” mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar natijalari asosida quyidagi xulosalar shakllantirildi:

1. Metallurgiya sanoati chiqindi qumi va mikrokremnezemni kompleks tarzda beton tarkibiga qo‘shish natijasida yaxshilangan strukturaga ega bo‘lgan beton olish imkoniyati nazariy va eksperimental tadqiqotlar yordamida isbotlandi. Bunda betonning fizik-mexanik va ekspluatatsion xossalarining yaxshilanishiga, xomashyo bazasining kengayishiga, mahsulot tannarxining kamayishiga hamda ekologik vaziyatning barqarorlashishiga erishildi.

2. Beton tarkibiga qo‘shilgan sanoat chiqindilari eng maqbul miqdorini tavsiflovchi matematik regressiya tenglamasi ishlab chiqilgan. Bunda faol mineral qo‘shimchalar mavjud bo‘lgan mis qazib olishdan hosil bo‘lgan chiqindi qumi 16 % va mikrokremnezem 10 % miqdorida birgalikda qo‘llanilishi natijasida yaxshilangan fizik-mexanik va ekspluatatsion xossalarga ega bo‘lgan beton olish imkoniyati asoslandi.

3. Mikrokremnezemning beton tarkibidagi yuqori putssolan faolligi hisobiga sement matritsasidagi portlandit kristallariga kimyoviy ta’sir etishi natijasida qo‘shimcha C-S-H gelining hosil bo‘lishi orqali sement matritsasining zichlashuvini oshirishi bilan bir qatorda sement sarfini 10 % gacha tejash imkoniyati yaratildi.

4. Taklif etilayotgan tarkib asosida olingan betonda kontakt zona devorlarining mustahkamlanishi hisobiga mikroyoriqlarning kamayishiga erishilib, betonning mustahkamligi 11-13 foizga yaxshilanishiga erishildi. Bu jarayon betonning mustahkamligi va ekspluatatsion xossalarini yaxshilashga xizmat qiladi.

5. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, ishlab chiqilgan zamonaviy dasturiy majmua sanoat chiqindilari qo‘llanilgan beton tarkibini loyihalash jarayonlarini avtomatlashtirish imkonini berdi, takomillashtirilgan texnologiya asosida esa betonni tayyorlash jarayonida sarflanadigan vaqt 1,5-2 barobarga qisqartirildi.

6. Ishlab chiqilgan texnologiya “Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish” MChJ korxonasida joriy etildi (O‘zbekiston Respublikasi Transport vazirligining 2026-yil 24-martdagi 4/E414-son ma’lumotnomasi). Joriy etish sement sarfini 10 % ga, qum sarfini 16 % ga kamaytirish va 1 m³ beton tannarxini 56 538 so‘mga (7 %) arzonlashtirish imkonini berdi. Bir chorakda kutilayotgan iqtisodiy samara 122,514 mln so‘mni, avtomatlashtirilgan usulni qo‘llashdan bir yilda kutilayotgan iqtisodiy samara esa 490,056 mln so‘mni tashkil etadi.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.10/2025.27.12.T.01.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ОКИЛОВ ЗАФАР ОМОН УГЛИ

КОМПЛЕКСНО МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН С ДОБАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

05.09.05 - «Строительные материалы и изделия»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент - 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан за номером B2025.4.PhD/T5167.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.tstu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Шаумаров Саид Санатович** доктор технических наук (DSc), профессор
Официальные оппоненты:	**Хасанов Бахриддин Баратович** доктор технических наук, профессор
	Тургунбаев Уринбек Джамалович кандидат технических наук, профессор
Ведущая организация:	**Каракалпакский государственный университет**

Защита диссертации состоится «28» ноября 2026 г. в 11:00 часов на заседании Научного совета DSc.10/2025.27.12.T.01.01 при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирйулчилар, 1. Тел./факс: (99871) 293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (регистрационный номер - №395). (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирйулчилар, 1. Тел./факс: (99871) 293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

Автореферат диссертации разослан «12» ноября 2026 года.
(протокол реестра № 46 от «12» ноября 2026 года).

А.И. Адилходжаев
Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

У.З. Шермухамедов
Учёный секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

А.А. Ишанходжаев
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире одной из важнейших задач нового этапа развития строительной индустрии является предъявление высоких требований к бетонам, применяемым при строительстве зданий и сооружений, автомобильных дорог и пешеходных дорожек. В настоящее время в развитых странах ведутся научные исследования по повышению плотности, прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона: в Германии – «экологический бетон», в Китае – «низкоуглеродный бетон» (low-carbon concrete), в США – высокоэффективные бетоны с применением золы-уноса и микрокремнезёма (silica fume) получают путём введения суперпластификаторов, микронаполнителей и активных минеральных добавок. В связи с этим особое внимание уделяется разработке составов комплексно модифицированного бетона со стабилизированной структурой и пониженным расходом цемента с использованием промышленных отходов.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на производство композиционных вяжущих с низкой энергоёмкостью, сокращение выбросов CO_2 в атмосферу и получение цементных композитов с различными функциональными свойствами. В этой связи проводятся широкомасштабные исследования по целенаправленному управлению структурой бетона на микро- и макроуровне, т. е. по снижению водоцементного отношения за счёт комплексного применения ультрадисперсных активных минеральных добавок и поликарбоксилатных суперпластификаторов, формированию оптимального гранулометрического состава, обеспечивающего плотную упаковку твёрдых фаз, и снижению капиллярной пористости. В частности, приоритетными направлениями являются преобразование портландита в дополнительные низкоосновные гидросиликаты кальция (C-S-H) за счёт пуццолановой реакции, уплотнение контактной зоны «заполнитель – цементный камень», являющейся наиболее слабым звеном бетона, ограничение диффузии хлорид- и сульфат-ионов, а также разработка на основе математического планирования эксперимента составов комплексно модифицированного бетона с пониженным расходом цемента, высокой прочностью, водонепроницаемостью, морозостойкостью и долговечностью. В этом направлении, в частности, в рамках концепции «экологического бетона», объединяющей вопросы экономии портландцементного клинкера и использования промышленных отходов, одной из актуальных задач является применение металлургических отходов в качестве микронаполнителя и активной минеральной добавки.

В нашей республике осуществляются широкомасштабные меры, направленные на развитие отрасли строительных материалов, экономию природного сырья, широкое использование местного сырья и промышленных отходов. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлена задача увеличения объёмов производства строительных материалов в два раза. Указом Президента Республики Узбекистан от 17 января 2024 года № УП-14 «О мерах по упорядочиванию добычи нерудных

материалов в водоемах» установлен «...запрет добычи песчано-гравийных материалов в руслах рек, прибрежных полосах и водоохранных зонах...»[1] и введён бессрочный мораторий, что ещё более повысило необходимость использования альтернативных материалов, заменяющих природный песок. Для реализации этих задач одной из актуальных задач сегодняшнего дня является разработка состава комплексно модифицированного бетона с высокими эксплуатационными свойствами, в том числе с применением отходного песка, образующегося при добыче меди на АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», в качестве ресурсосберегающего заполнителя, а отхода микрокремнезёма, получаемого в производственном процессе АО «Узметкомбинат», – в качестве энергосберегающей активной минеральной добавки.

Данная диссертация в определённой степени служит выполнению задач, предусмотренных постановлениями Президента Республики Узбекистан от 20 февраля 2019 года № ПП-4198 «О мерах по коренному совершенствованию и комплексному развитию промышленности строительных материалов», от 23 мая 2019 года № ПП-4335 «О дополнительных мерах по ускоренному развитию промышленности строительных материалов», Указом от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также другими нормативно-правовыми документами, касающимися строительной отрасли.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. При разработке высокопрочных бетонов, обладающих необходимым комплексом физико-механических свойств при сниженных затратах материалов и энергии, особое значение приобретают исследования по модифицированию их структуры минеральными вяжущими и химическими добавками.

Значительный вклад в развитие основ применения таких добавок в многокомпонентных высококачественных бетонах внесли известные зарубежные учёные В.И. Соломатов, Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов, Л.И. Дворкин, П.Г. Комохов, А.В. Волженский, Ю.М. Бутт, Б.В. Гусев, С.М. Мчедлов-Петросян, В.Г. Батраков, А.Г. Комар, В.И. Калашников, А.Е. Шейкин, П.А. Ребиндер, В.Б. Ратинов, V.S. Ramachandran, Б.Р. Фаликман, Х. Тейлор, М. Коллепарди, P. Aitcin, M. Schmidt, P. Richard, E. Guneyisi, G. Edward, M. Buil и другие.

В Республике Узбекистан в разные годы научные исследования в области применения многокомпонентных высококачественных бетонных композиций проводили А.И. Адилходжаев, А.А. Тулаганов, Э.У. Касимов, М.К. Тахиров, Н.А. Самигов, Б.Б. Хасанов, В.М. Цой, И.М. Махаматалиев, С.С. Шаумаров, А.Т. Илясов, Н.Р. Мухаммадиев и другие учёные.

[1] Указ Президента Республики Узбекистан от 17 января 2024 года № УП-14 «О мерах по упорядочиванию добычи нерудных материалов в водоемах».

В выполненных исследованиях подробно освещены вопросы проектирования сверхвысококачественных бетонов, раскрыта взаимосвязь их технологических и физико-механических свойств с механизмом воздействия химических модификаторов и минеральных микронаполнителей на цементный камень.

Однако ряд важных аспектов ещё недостаточно изучен. В частности, мало внимания уделено строению, толщине и плотности контактной зоны между цементным камнем и заполнителем, играющей основную роль в повышении прочности бетона с добавлением отходов производства, а также поровой структуре цементного композита. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи проведения комплексных исследований по разработке сверхвысококачественных и долговечных бетонных композиций с применением в качестве микронаполнителя металлургических отходов – отходного песка медедобычи и микрокремнезёма.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы № K1053209, договор о выполнении которой подписан 15 января 2025 года между Ташкентским государственным транспортным университетом и АО «Узбекистон темир йуллари».

Целью исследования является разработка состава бетона с пониженным расходом клинкера, улучшенными прочностными и эксплуатационными свойствами при совместном применении отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма.

Задачи исследования:

анализ современных представлений о составах бетона с применением промышленных отходов и активных минеральных добавок на основе отечественных и зарубежных научных источников;

исследование физико-химических свойств и гранулометрического состава бетона при совместном применении отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма;

изучение микроструктуры комплексно модифицированного бетона современными методами и установление закономерностей влияния структурных изменений на свойства бетона;

оптимизация состава бетона на основе метода математического планирования эксперимента и автоматизация процесса его проектирования с помощью программы для ЭВМ;

технико-экономическое обоснование результатов исследования и их внедрение в производство.

Объектом исследования являются комплексно модифицированные бетонные смеси и бетоны при совместном применении отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма.

Предметом исследования являются микроструктура, физико-механические, эксплуатационные и технико-экономические показатели

бетона, изготовленного с применением суперпластификатора, микрокремнезёма и отходного песка мededобычи.

Методы исследования. В процессе исследования использованы современные методы физико-химического анализа (рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия), стандартизированные методы изучения показателей качества и свойств бетонной смеси и бетона, методы математического планирования эксперимента и оптимизации состава, а также методы статистической обработки результатов эксперимента.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе теоретических и экспериментальных исследований доказано, что введение отходного песка металлургической промышленности на химической и гранулометрической стадиях формирования структуры бетона упрочняет стенки контактной зоны «заполнитель – цементный камень», снижает образование микротрещин и улучшает физико-механические и эксплуатационные свойства бетона;

на основе результатов рентгенофазового анализа обосновано, что отход микрокремнезёма за счёт высокой пуццолановой активности химически взаимодействует с кристаллами портландита $Ca(OH)_2$ в цементной матрице с образованием дополнительных низкоосновных гидросиликатов кальция (гель C-S-H) и обеспечивает уплотнение цементной матрицы;

экспериментальными исследованиями и анализом микроструктуры обосновано, что комплексное введение в состав бетона отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма обеспечивает заполнение капиллярных пор бетона и формирование плотной и однородной микроструктуры;

разработаны многофакторные математические модели, описывающие среднюю плотность и прочность при сжатии комплексно модифицированного бетона в зависимости от содержания промышленных отходов, и на их основе создана программа проектирования рационального состава бетона.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан способ получения оптимальных составов комплексно модифицированных бетонных смесей класса В20 на основе рядового портландцемента с пониженным расходом цемента, повышенными прочностью, водонепроницаемостью и морозостойкостью за счёт совместного применения отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма;

разработаны компьютерные программы, автоматизирующие процессы подбора и проектирования состава бетона с применением промышленных отходов, оценено снижение ими трудоёмкости процессов проектирования в 1,5-2 раза и обоснована технико-экономическая эффективность разработки;

установлено, что комплексно модифицированный бетон на основе отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма наряду со снижением расхода цемента обладает улучшенными физико-

механическими и эксплуатационными свойствами; бетон внедрён при устройстве покрытий пешеходных дорожек.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных методов физико-химического анализа и физико-механических испытаний, средств и методов математического планирования эксперимента, выполнением теоретических расчётов и экспериментов с соблюдением строительных норм и правил, согласованностью экспериментальных результатов с результатами расчётов по компьютерной программе, а также апробацией в производственных условиях.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что полученные результаты в определённой степени углубляют представления о процессе структурообразования комплексно модифицированных бетонов в цементной системе в присутствии поликарбоксилатного суперпластификатора, микрокремнезёма и отходного песка мededобычи, что имеет важное значение для развития теории и практики структурообразования, технологии и свойств бетона.

Практическая значимость результатов исследования заключается в получении комплексно модифицированных бетонов с требуемым комплексом свойств на основе комплексных добавок из местных промышленных отходов и их внедрении в производство.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов научных исследований по разработке состава комплексно модифицированного бетона с добавлением металлургических отходов:

состав комплексно модифицированного бетона класса В20 с применением отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма внедрён в ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish» при устройстве покрытия пешеходных дорожек (справка Министерства транспорта Республики Узбекистан от 24 марта 2026 года № 4/Е414). В результате экономический эффект от устройства покрытия пешеходных дорожек составил 490,056 млн сум;

компьютерная программа, автоматизирующая проектирование состава бетона с применением промышленных отходов, принята к использованию в ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish» (справка Министерства транспорта Республики Узбекистан от 24 марта 2026 года № 4/Е414). В результате обеспечена возможность снижения трудоёмкости процессов проектирования состава бетона в 1,5-2 раза, расхода цемента – на 10 %, расхода природного песка – на 16 %.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации обсуждены на 2 международных и 2 республиканских научно-технических и научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 19 научных работ, из них в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики

Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD), в том числе в изданиях, входящих в базу SCOPUS, – 1 статья, в авторитетных зарубежных журналах – 3 и в республиканских журналах – 5 статей. Кроме того, Агентством по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан выданы 1 патент на изобретение и 5 свидетельств на программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 117 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность проведённых исследований, описаны цель и задачи, объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние проблемы и задачи исследования»** приведён аналитический обзор научных исследований по рассматриваемой теме.

В результате анализа литературных источников установлено, что свойства бетона как композиционного материала конгломератного строения определяются состоянием цементной матрицы, заполнителей и контактной зоны между ними. На формирование дефектов в структуре бетона влияют качество сырьевых материалов, проектирование состава бетона и особенности выполнения технологических процессов.

В процессе эксплуатации бетонное покрытие пешеходных дорожек подвергается воздействию механических нагрузок, изменений температуры и влажности, циклов замораживания-оттаивания и химически агрессивной среды. В результате комплексного воздействия этих факторов в структуре бетона возникают микротрещины и процессы разрушения, и соответственно срок службы бетона сокращается (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. Разрушения, возникающие в бетонах в результате механических воздействий

Ряд исследований показал высокую эффективность микрокремнезёма при модифицировании структуры бетона. В частности, В.М. Малхотра показал возможность повышения 28-суточной прочности бетона на 25-30 % при применении микрокремнезёма в количестве 5-10 % от массы цемента, а П.К. Мехта доказал снижение количества капиллярных пор на 50 % в результате пуццолановой реакции. Кроме того, Т. Хелланд установил, что при применении микрокремнезёма коэффициент проницаемости хлорид-ионов снижается в 5-10 раз, В.Г. Батраков изучил возможность повышения водонепроницаемости до W12-W16, С.С. Каприелов – возможность повышения прочности при сжатии на 20-40 %, а Л.И. Дворкин – повышения морозостойкости до F400-F600.

По применению отходов медного производства в составе бетона T. Chanyal и B.K. Jain установили, что при замене 40 % природного песка медным отходом прочность при сжатии возрастает на 12-15 %, а R.R. Onuaguluchi – что коэффициент водопроницаемости снижается на 25-30 %. M. Thomas доказал, что при комплексном применении микрокремнезёма (5-10 %) с промышленными отходами сульфатостойкость бетона повышается в 1,5-2 раза. K.S. Al-Jabri, применяя медный шлак в качестве заполнителя, снизил водоцементное отношение с 0,40 до 0,35, M. Mavroulidou отметила повышение прочности на растяжение при изгибе на 10-15 %. В исследованиях R. Abdullahi и A. Al-Mattar показано, что частичная замена песка повышает прочность бетона на 15-30 %, однако при полной замене связность смеси значительно снижается.

Вместе с тем анализ литературы показывает, что строение, толщина и плотность контактной зоны между цементным камнем и заполнителем, определяющей прочность бетона с применением отходов, поровая структура цементного композита, а также его стойкость к воздействию химической среды изучены недостаточно. Это подтверждает актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

На основе анализа литературных источников и задач исследования сформулирована рабочая гипотеза. Исходя из современных представлений о физико-химических взаимодействиях в системе «цемент – промышленные отходы – поликарбоксилатный суперпластификатор – вода», предполагается возможность разработки состава комплексно модифицированного бетона с пониженным расходом цемента и улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами при применении, с одной стороны, микрокремнезёма в качестве активной пуццолановой добавки, уплотняющей цементную матрицу, а с другой – отходного песка мededобычи в качестве техногенного заполнителя, упрочняющего стенки контактной зоны и снижающего образование микротрещин.

Во второй главе диссертационной работы **«Методы исследования и характеристика применяемых материалов»** приведены характеристики исходных сырьевых компонентов, использованных для разработки состава бетона, а также описаны методы, лабораторные приборы и оборудование, применяемые при проведении экспериментальных исследований.

В качестве вяжущего применён портландцемент марки CEM I 32,5N завода «Ахангаранцемент» (ГОСТ 10178-85). Начало схватывания составило 1 ч 10 мин, конец – 6 ч 20 мин, прочность при сжатии в возрасте 28 суток – 21,72 МПа. Химический состав портландцемента приведён в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав портландцемента

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
%	24,15	7,64	5,65	59,10	1,17	0,23	0,22	0,42

В качестве активной минеральной добавки использован микрокремнезём, получаемый при сталеплавильном производстве металлургического комбината АО «Узметкомбинат». Его частицы имеют гладкую поверхность и сферическую форму, основную часть составляет аморфный диоксид кремния (табл. 2). Водородный показатель (pH) водной суспензии микрокремнезёма в среднем составляет 7,74.

Таблица 2

Химический состав микрокремнезёма (МК-90)

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	C	S
%	90,69	0,68	3,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

В качестве крупного заполнителя применён щебень Пскентского карьера фракции 5-20 мм, зерновой состав которого отвечает требованиям ГОСТ 8267-93. В качестве мелкого заполнителя использован речной песок: насыпная плотность – 1401 кг/м³, истинная плотность – 2594 кг/м³, содержание пылевидных и глинистых частиц – 0,5 %. Гранулометрический состав песка приведён в табл. 3.

Таблица 3

Гранулометрический состав песка

Остаток на сите, %	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16	Модуль крупности
Частный	2,0	6,5	34,5	41,5	13,0	2,5	2,36
Полный	2,0	8,5	43,0	84,5	97,5	100	

В качестве техногенного мелкого заполнителя применён отходный песок, образующийся при добыче меди на АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (табл. 4). В хранилищах комбината ежегодно образуется около 34,5 млн т отходов, их текущий запас составляет 1 321,5 млн т (табл. 5). Частицы отхода имеют угловатую, неправильную форму и шероховатую, развитую поверхность.

Таблица 4

Химический состав отхода мededобычи АО «Алмалыкский ГМК», мас. %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	S	Cu	Mo	SO_3	TiO_2	Re
31,42	3,63	31,29	1,43	0,96	1,14	0,5	0,1	1,4	0,2	0,00001

Таблица 5

Объём и запасы отходов АГМК

Хвостохранилище	Ежегодное образование, млн т/год	Текущий запас, млн т
№1	6,7	546,2
№2	27,8	775,3
Итого	34,5	1 321,5

Для выбора химической добавки пять суперпластификаторов, широко применяемых на рынке республики, сравнивались по расплыву цементного теста на конусе Хегерманна (водоцементное отношение – 0,27, дозировка добавки – 0,8 % от массы цемента). Результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расплыв цементного теста под действием различных суперпластификаторов, мм

Время измерения, мин	Melflux 1641 F (Германия)	JK-02 (Китай)	POLIMIX (Узбекистан)	Plv (FM) (Россия)	JK-08 (Китай)
0	290	260	340	140	240
5	360	270	360	130	250
25	370	250	380	110	230

Наибольший и стабильный во времени расплыв зафиксирован у суперпластификатора POLIMIX (ARMENT CONSTRUCTION CHEMICALS) на основе эфиров поликарбоксилатов. Благодаря местному производству и сравнительно низкой стоимости он выбран для дальнейших исследований как импортозамещающий продукт.

Свойства бетона и цементного камня определяли по действующим стандартам: прочность при сжатии – ГОСТ 10180-2012 (образцы-кубы 100×100×100 мм, скорость нагружения 0,6 МПа/с), плотность – ГОСТ 12730.1-2020, водонепроницаемость – ГОСТ 12730.5-2018 (метод «мокрого пятна»), морозостойкость – ГОСТ 10060-2012, подвижность смеси – ГОСТ 10181-2014. Для изучения микроструктуры и фазового состава использованы электронный микроскоп JIB-4500 JEOL (Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз), рентгеновский дифрактометр XRD-7000 Shimadzu, прибор ПСХ-11А для определения удельной поверхности и лазерный гранулометр MicroSizer 201. Экспериментальные работы выполнены в лабораториях Ташкентского государственного транспортного университета и ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish».

Третья глава диссертационной работы **«Исследование структуры и свойств комплексно модифицированного бетона, полученного с применением отходов»** посвящена результатам экспериментальных исследований влияния микрокремнезёма, поликарбоксилатного суперпластификатора и отходного песка мededобычи на формирование структуры и свойств бетона. В ней приведены результаты оптимизации состава бетона на основе метода математического планирования, установления закономерностей взаимодействия компонентов, а также оценки физико-механических и эксплуатационных показателей полученных бетонов.

Химический состав микрокремнезёма и портландцемента существенно различается: в микрокремнезёме преобладает SiO_2 (92 %), а в

портландцементе основными оксидами являются CaO (59,10 %) и SiO_2 (24,15 %). Содержание CaO в микрокремнезёме очень мало (0,85 %), поэтому он является не химическим аналогом цемента, а замещает часть цемента в качестве источника активного аморфного SiO_2, вступающего в реакцию с $Ca(OH)_2$, выделяющимся при гидратации.

Микрокремнезём состоит из сферических частиц размером 0,05-0,5 мкм, примерно в 50 раз меньших зёрен портландцемента; его удельная поверхность достигает 15 000-30 000 м²/кг. На рентгеновской дифрактограмме микрокремнезёма (рис. 2, а) чёткие кристаллические пики отсутствуют, в области $2\theta \approx 15\text{-}30°$ наблюдается широкое аморфное гало SiO_2 с максимумом около 22°, что свидетельствует о его высокой пуццолановой активности. На дифрактограммах цементного камня в возрасте 28 суток (рис. 2, б) в контрольном образце зафиксированы пики портландита $Ca(OH)_2$ (P), алита (A), белита (B), кальцита (Cc) и эттрингита (E). В образце с 10 % МК интенсивность пиков портландита и клинкерных минералов снизилась, а в области $2\theta \approx 25\text{-}35°$ усилился аморфный подъём, характерный для фазы C-S-H.

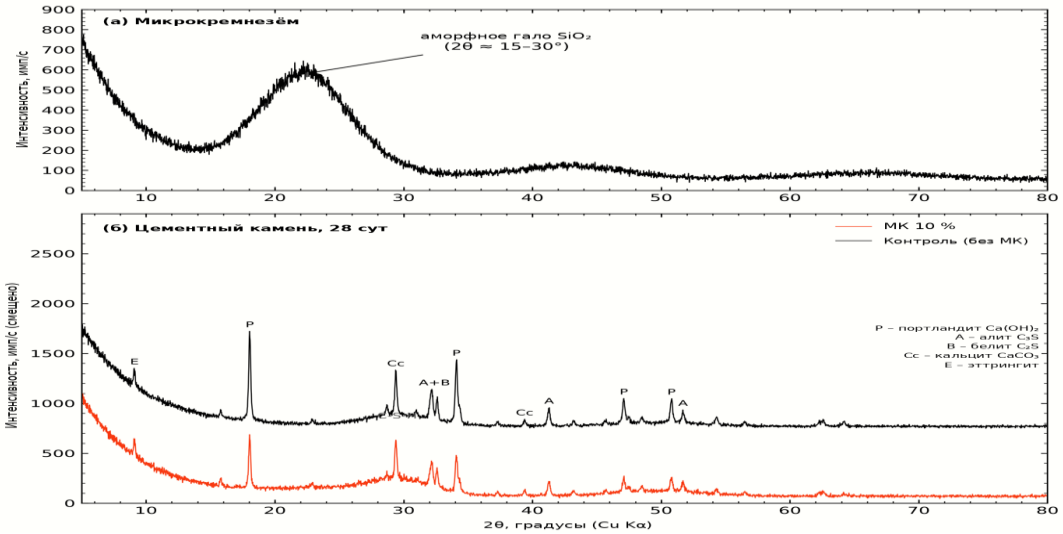
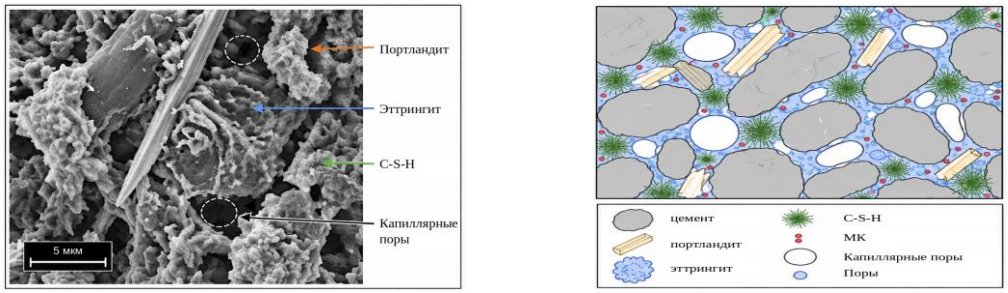


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы (Cu Kα): а) микрокремнезём; б) цементный камень в возрасте 28 суток (контрольный и с 10 % МК). P – портландит $Ca(OH)_2$; A – алит C_3S; B – белит C_2S; Cc – кальцит $CaCO_3$; E – эттрингит

В результате пуццолановой реакции образуются дополнительные низкоосновные гидросиликаты кальция (C-S-H), уменьшается содержание портландита, обладающего сравнительно низкой прочностью и высокой растворимостью. Ультрадисперсные частицы микрокремнезёма заполняют пустоты между зёрнами цемента, обеспечивая эффект микронаполнителя: доля крупных капиллярных пор уменьшается, поровая структура смещается в сторону мелких гелевых пор, уплотняется переходная зона «заполнитель – цементный камень» (ITZ), являющаяся самым слабым элементом бетона (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. Механизм уплотнения цементного камня при введении микрокремнезёма

Поликарбоксилатный суперпластификатор (ПКС), адсорбируясь на поверхности частиц цемента, за счёт электростатического отталкивания предотвращает агломерацию частиц цемента и микрокремнезёма, снижает водоцементное отношение и капиллярную пористость. Снижение водоцементного отношения повышает прочность всех составов; наибольший эффект достигается при совместном применении ПКС и микрокремнезёма (рис. 4). Этот синергетический эффект объясняется снижением водопотребности, уплотнением цементной матрицы и образованием дополнительного C-S-H.

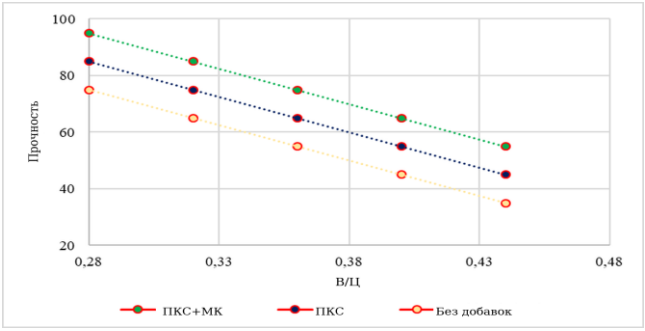
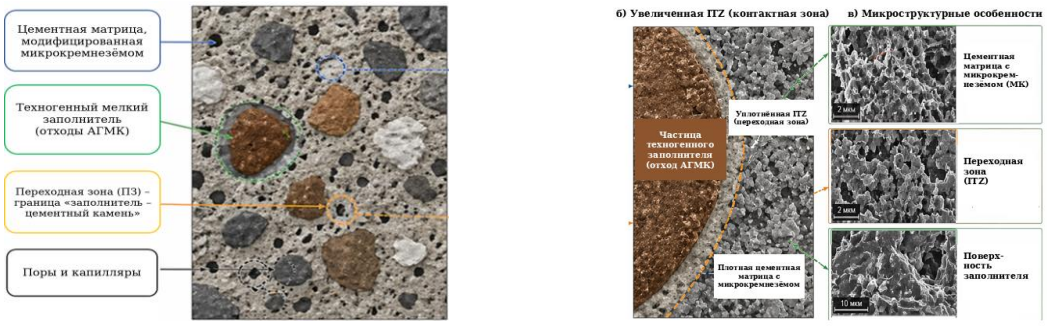


Рис. 4. Влияние модифицирующих добавок на прочность бетона при различных водоцементных отношениях

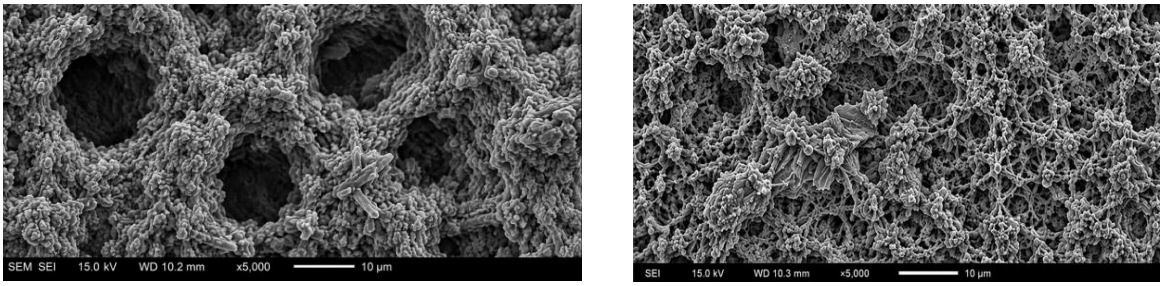
Частицы отходного песка мededобычи, в отличие от природного песка, имеют угловатую форму и развитую шероховатую поверхность, что усиливает механическое сцепление с цементной матрицей. При совместном применении с микрокремнезёмом межзерновые пустоты уменьшаются, переходная зона уплотняется, а макроструктура бетона становится однородной (рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Схема формирования макроструктуры бетона с применением отходов мededобычи и микрокремнезёма

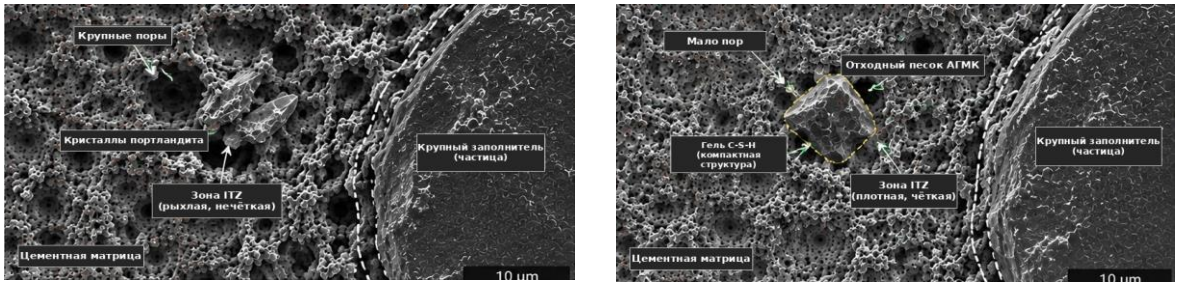
Электронно-микроскопические исследования показали, что в эталонном бетоне без добавок много капиллярных пор, кристаллы портландита крупные и пластинчатые, содержание геля C-S-H невелико, микроструктура относительно рыхлая. В бетоне же с 10 % микрокремнезёма капиллярных пор значительно меньше, гель C-S-H обильный и имеет волокнистый вид, содержание портландита снизилось за счёт пуццолановой реакции, микроструктура уплотнилась и стала однородной (рис. 6).



а) б)

Рис. 6. Микроструктура бетона (×5000): а) эталонный бетон (без МК); б) бетон с 10 % микрокремнезёма

Аналогичные изменения наблюдались и в бетоне с отходным песком мededобычи (рис. 7): если в эталонном бетоне выявлены крупные поры и кристаллы портландита, рыхлая и нечёткая зона ITZ, то в бетоне с 16 % отходного песка мededобычи пор мало, гель C-S-H образует компактную структуру, зона ITZ вокруг частицы отхода плотная и имеет чёткую границу.



а) б)

Рис. 7. Микроструктура бетона: а) эталонный бетон (без отхода АГМК); б) бетон с 16 % отходного песка мededобычи

Состав бетона оптимизирован методом математического планирования на основе плана B3. В качестве факторов приняты X_1 – содержание ПКС (от массы цемента), X_2 – содержание микрокремнезёма (от массы цемента) и X_3 – содержание отходного песка мededобычи (от массы песка); критерий оптимизации – прочность при сжатии бетона после 28 суток твердения в нормальных условиях. План эксперимента близок к D-оптимальным планам и включает 15 опытов (табл. 7).

Таблица 7

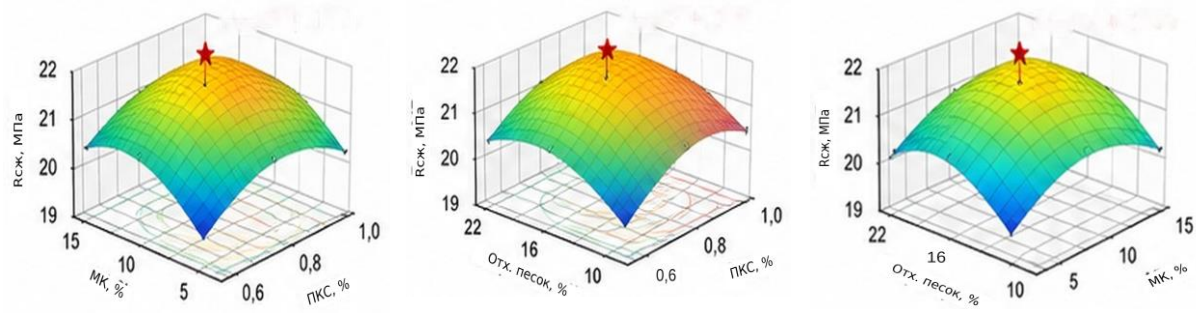
Факторы и интервалы их варьирования

Факторы	Единица измерения	Код	-1	0	+1
ПКС (суперпластификатор)	%	X_1	0,6	0,8	1,0
МК (микрокремнезём)	%	X_2	5,0	10,0	15,0
Отходный песок мededобычи	%	X_3	10,0	16,0	22,0

По результатам эксперимента получено математическое уравнение регрессии, описывающее прочность бетона класса В20:

$$Y = 21,57 + 0,15x_1 + 0,10x_2 + 0,08x_3 + 0,10x_1x_2 + 0,05x_1x_3 + 0,05x_2x_3 - 0,35x_1^2 - 0,65x_2^2 - 0,55x_3^2$$

В данной математической модели регрессии отражено влияние всех трёх факторов на прочность бетона (рис. 8). При этом наибольшее влияние в уравнении регрессии оказывает микрокремнезём ($b_{22} = -0,65$). Далее следует влияние отходного песка мededобычи ($b_{33} = -0,55$). Следующим по значимости фактором является суперпластификатор ($b_{11} = -0,35$) (табл. 8).



а) б) в)

Рис. 8. Зависимость прочности бетона от факторов: а) ПКС и МК-90; б) ПКС и отходный песок; в) микрокремнезём и отходный песок

Таблица 8

Прочность бетона по математическому уравнению регрессии, МПа

а) МК, % \ ПКС, %	0,6	0,8	1,0	б) Отх. песок, % \ ПКС, %	0,6	0,8	1,0
5	20,41	20,82	20,52	10	20,48	20,94	20,70
10	21,07	21,3	21,38	16	21,06	21,32	21,38
15	20,42	21,03	20,93	22	20,55	21,11	20,97
в) Отх. песок, % \ МК, %	**5**	**10**	**15**				
10	20,22	20,94	20,37				
16	20,81	21,72	21,06				
22	20,30	21,13	20,65				

Максимум математического уравнения регрессии (прочность 21,72 МПа) обеспечивается при введении в состав бетона ПКС ≈ 0,8 %, МК ≈ 10,5 % и отходного песка мededобычи ≈ 16,5 %.

На первом этапе экспериментальных исследований изучен традиционный состав бетона класса В20 (цемент – 320 кг, песок – 680 кг, щебень – 1200 кг, вода – 175 л); его прочность в возрасте 28 суток составила 18,8-19,1 МПа. Затем при введении в состав ПКС в количестве 0,6; 0,8 и 1,0 %

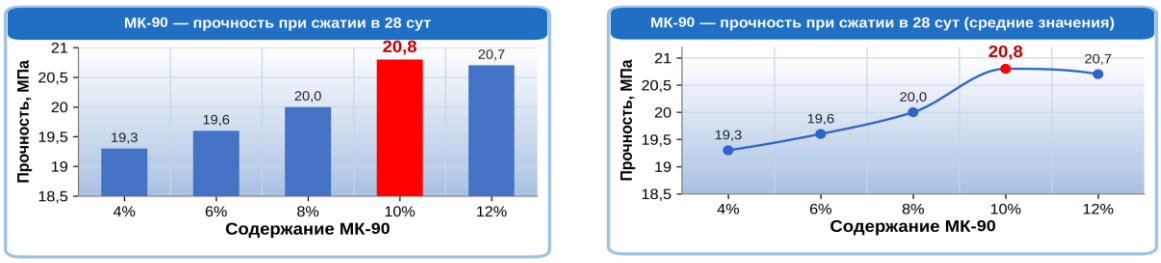
прочность составила соответственно 19,8; 20,3 и 20,1 МПа; оптимальная дозировка ПКС принята равной 0,8 %.

На втором этапе 4-12 % цемента заменяли микрокремнезёмом (табл. 9, рис. 9). При увеличении содержания микрокремнезёма с 4 до 10 % прочность в возрасте 28 суток возросла с 19,3 до 20,8 МПа, наилучший результат зафиксирован при 10 %. При увеличении содержания микрокремнезёма до 12 % прочность существенно не возрастала, а в отдельных случаях снижалась (20,7 МПа).

Таблица 9

Прочность при сжатии образцов с микрокремнезёмом в возрасте 28 суток

№	Содержание микрокрем-незёма	R_{28-1}, МПа	R_{28-2}, МПа	R_{28-3}, МПа	R_{28} ср., МПа
1	4 %	19,23	19,35	19,47	19,3
2	6 %	19,46	19,58	19,70	19,6
3	8 %	19,80	19,90	19,97	20,0
4	10 %	20,70	20,80	20,92	20,8
5	12 %	20,68	20,69	20,70	20,7



а) б)

Рис. 9. Зависимость прочности бетона от содержания микрокремнезёма: а) диаграмма; б) график

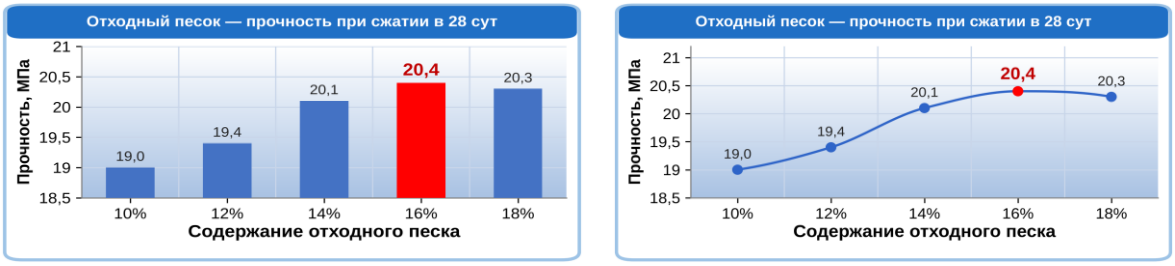
На третьем этапе экспериментальных исследований отходный песок, образующийся при добыче меди, вводили в состав бетона в количестве 10-18 % от массы песка (табл. 10, рис. 10). При увеличении его содержания с 10 до 16 % средняя прочность возросла с 19,0 до 20,4 МПа. Это объясняется уплотнением цементного камня и улучшением контактной зоны в результате микронаполняющего действия отходного песка.

При содержании отходного песка 18 % прочность составила 20,3 МПа, т. е. наблюдалось её снижение. Поэтому оптимальное содержание отходного песка принято равным 16 %.

Таблица 10

Прочность при сжатии образцов с отходным песком медедобычи в возрасте 28 суток

№	Содержание добавки	R_{28-1}, МПа	R_{28-2}, МПа	R_{28-3}, МПа	R_{28} ср., МПа
1	10 %	19,18	19,30	19,42	19,00
2	12 %	19,36	19,48	19,60	19,40
3	14 %	19,90	20,10	20,20	20,10
4	16 %	20,40	20,50	20,53	20,40
5	18 %	20,18	20,10	20,32	20,30



а) б)

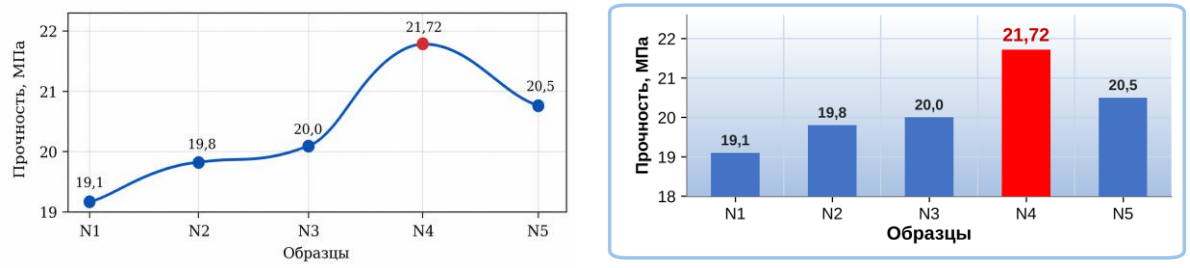
Рис. 10. Зависимость прочности бетона от содержания отходного песка мededобычи: а) диаграмма; б) график

На четвёртом этапе научных исследований изготовлены опытные образцы с совместным применением микрокремнезёма и отходного песка, результаты испытаний которых приведены в табл. 11 и на рис. 11.

Таблица 11

Составы и свойства опытных образцов (на 1 м³)

Образец	Цемент, кг	МК-90, кг	Щебень, кг	Вода, л	ПКС, %	Обычный песок, кг	Отходный песок мededобычи, кг	ρ, кг/м³	$R_{сж}$, МПа
N1	320	-	1200	175	-	680	-	2375	19,1
N2	300,8	19,2	1200	175	0,4	598,4	81,6	2406	19,8
N3	294,4	25,6	1200	175	0,6	584,8	95,2	2408	20,0
N4	288	32	1200	175	0,8	571,2	108,8	2410	21,72
N5	281,6	38,4	1200	175	1,0	557,6	122,4	2412	20,5



а) б)

Рис. 11. Показатели прочности предлагаемых составов: а) график; б) диаграмма

Наилучший результат зафиксирован для состава N4: при введении в состав бетона цемента – 288 кг, микрокремнезёма – 32 кг, отходного песка мededобычи – 108,8 кг прочность бетона составила 21,72 МПа, а плотность – 2410-2412 кг/м³. Использование отходного песка мededобычи в качестве вторичного сырья позволяет сократить расход природного песка и перерабатывать промышленные отходы.

Сравнительный анализ эксплуатационных показателей предлагаемого и эталонного (традиционного) составов бетона приведён в табл. 12.

Таблица 12

Эксплуатационные показатели эталонного и предлагаемого бетонов

Состав	Цемент, кг	МК-90, кг	Песок, кг	Отходный песок, кг	ПКС, %	W	F	$R_{сж}$, МПа
Эталонный	320	-	680	-	-	W4	F100	19,1
Предлагаемый	288	32	571,2	108,8	0,8	W6	F150	21,72

Примечание: в обоих составах щебень – 1200 кг, вода – 175 л.

Как видно из таблицы, предлагаемый состав бетона по сравнению с эталонным позволяет сэкономить цемент на 10 %, песок – на 16 %. Вместе с тем отмечено повышение прочности бетона на 13 %, а также повышение марки по водонепроницаемости до W6 и по морозостойкости – до F150.

В четвёртой главе диссертации **«Исследование микро- и макроструктуры бетона, внедрение результатов исследования в производство и определение технико-экономической эффективности»** приведены результаты исследования микро- и макроструктуры предлагаемого бетона, внедрения разработанного состава в практику и определения его технико-экономической эффективности.

На рентгенограмме образца с 10 % микрокремнезёма и 16 % отходного песка мededобычи (рис. 12) по сравнению с эталонным образцом значительно снижена интенсивность пиков портландита $Ca(OH)_2$ (1): высота основного пика при $2\theta \approx 18°$ над фоном примерно в 1,6 раза меньше. Это подтверждает расход $Ca(OH)_2$ во вторичных реакциях за счёт пуццолановой активности отходного песка мededобычи и микрокремнезёма и образование дополнительных фаз C-S-H; об этом свидетельствует и подъём на дифрактограмме в области $2\theta \approx 25\text{-}35°$. Отмечено усиление пиков SiO_2 (2) ($2\theta \approx 20{,}9°$ и $26{,}6°$), характеризующих содержание кремнезёма. Пики кальцита (3), алита и белита (4), а также эттрингита (5) присутствуют в обоих образцах.

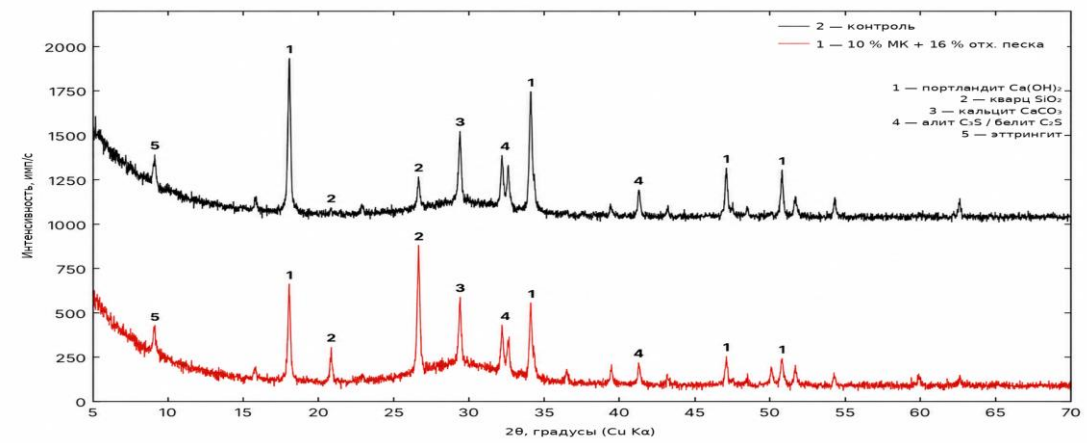
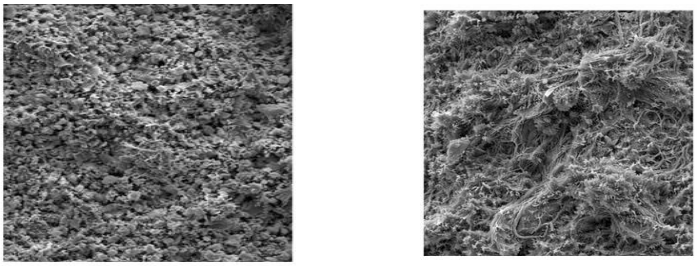


Рис. 12. Рентгенограмма исследуемых образцов: 1 – 10 % МК + 16 % отходного песка; 2 – контрольный. Пики: 1 – портландит $Ca(OH)_2$; 2 – кварц SiO_2; 3 – кальцит $CaCO_3$; 4 – алит C_3S / белит C_2S; 5 – эттрингит

На электронных микрофотографиях образцов предлагаемого состава (рис. 13) видно, что матрица состоит из мелких плотно упакованных частиц, промежутки между которыми заполнены развитой сеткой волокнистых и пластинчатых гелевых фаз C-S-H. Это свидетельствует о плотной, однородной и малопористой структуре композита.



а) б)

Рис. 13. Микрофотографии образцов предлагаемого состава

Результаты исследования внедрены в ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish» на этапах научного исследования, разработки, опытно-промышленных испытаний и внедрения в практику. Согласно технологической инструкции, в предлагаемом составе бетона приняты микрокремнезём АО «Узметкомбинат» (10 %) и отходный песок АО «Алмалыкский ГМК» (16 %). Из каждого состава изготовлено по 12 образцов-кубов размером 100×100×100 мм; результаты испытаний, проведённых через 28 суток, приведены в табл. 13.

Таблица 13

Результаты опытно-промышленных испытаний

Наименование продукции	Состав бетона	Класс бетона	ОК, см	$R_{сж}$, МПа	W, марка	F, марка
Бетонная смесь	Эталонный	B20	8	19,1	W4	F100
Бетонная смесь	Предлагаемый	B20	9	21,72	W6	F150

Технология получения бетона на основе предлагаемого состава приведена на рис. 14. В данную технологию по сравнению с существующей дополнительно включены бункер отходного песка (3), ёмкость-дозатор суперпластификатора (8) и бункер микрокремнезёма (10). Кроме того, за счёт автоматизации данной технологии время, затрачиваемое на приготовление бетона, сокращено в 1,5-2 раза.

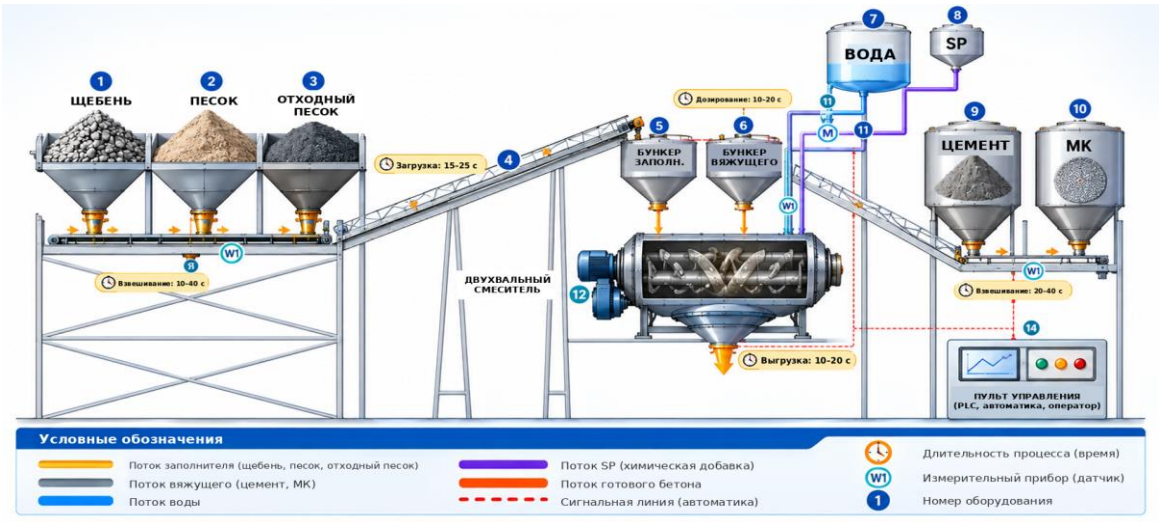


Рис. 14. Технологическая схема производства бетона предлагаемого состава

В результате предлагаемый состав и технологическая схема внедрены в практику в проектах «Устройство пешеходных переходов и строительство путепроводов на участках железной дороги с движением высокоскоростных пассажирских поездов (станции Даштобод, Галляарал, Рахимов, Утаовул)» (рис. 15).



а)



б)

Рис. 15. Общий вид опытного бетонного покрытия пешеходной дорожки

Технико-экономическая эффективность оценена на основе сопоставления затрат на производство 1 м³ бетона класса В20 (табл. 14, рис. 16).

Таблица 14

Сопоставление составов и себестоимости (на 1 м³)

Наименование	Ед. изм.	Традиционный В20: расход	Традиционный В20: сумма, сум	Предлагаемый В20: расход	Предлагаемый В20: сумма, сум
Цемент	кг	320	256 000	-	-
Цемент + МК	кг	-	-	320	220 000
Песок	кг	680	68 000	-	-
Песок + отходный песок	кг	-	-	680	55 760
Щебень	кг	1200	144 000	1200	144 000
Вода	л	175	525	175	525
Итого материалы			468 525		420 285
Заработная плата	сум		146 554		146 554
Фронтальный погрузчик	сум		34 817		34 817
Стационарный (мобильный) смеситель	сум		57 151		57 151
Итого производственные затраты			707 047		658 807
Прочие затраты (17,2 %)			121 612		113 314,7
Себестоимость 1 м³ бетона			**828 659**		**772 121**



а)



б)

Рис. 16. Сопоставление себестоимости 1 м³ бетона: а) диаграмма; б) график

Предлагаемый состав бетона экономически эффективнее действующего: по сравнению с эталонным составом бетона класса B20, используемым ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish», стоимость 1 м³ ниже на 56 538 сум (7 %). Применение данной технологии целесообразно при устройстве пешеходных дорожек и других бетонных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований, проведённых по диссертации доктора философии (PhD) на тему «Комплексно модифицированный бетон с добавлением металлургических отходов», сформулированы следующие выводы:

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказана возможность получения бетона с улучшенной структурой за счёт комплексного введения в его состав отходного песка металлургической промышленности и микрокремнезёма. При этом достигнуты улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств бетона, расширение сырьевой базы, снижение себестоимости продукции и стабилизация экологической ситуации.

2. Разработано математическое уравнение регрессии, описывающее оптимальное содержание промышленных отходов, вводимых в состав бетона. При этом обоснована возможность получения бетона с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами при совместном применении в качестве активных минеральных добавок отходного песка мededобычи в количестве 16 % и микрокремнезёма в количестве 10 %.

3. Микрокремнезём за счёт высокой пуццолановой активности химически взаимодействует в составе бетона с кристаллами портландита цементной матрицы с образованием дополнительного геля C-S-H, что повышает плотность цементной матрицы и наряду с этим позволяет экономить до 10 % цемента.

4. В бетоне предлагаемого состава за счёт упрочнения стенок контактной зоны достигнуто снижение образования микротрещин и повышение прочности бетона на 11-13 %. Это способствует улучшению прочностных и эксплуатационных свойств бетона.

5. Исследования показали, что разработанный современный программный комплекс обеспечивает автоматизацию процессов проектирования состава бетона с применением промышленных отходов, а на основе усовершенствованной технологии время, затрачиваемое на приготовление бетона, сокращено в 1,5-2 раза.

6. Разработанная технология внедрена на предприятии ООО «Temiryo‘linfratuzilma maxsus qurilish» (справка Министерства транспорта Республики Узбекистан от 24 марта 2026 года № 4/E414). Внедрение позволило снизить расход цемента на 10 %, песка – на 16 % и себестоимость 1 м³ бетона – на 56 538 сум (7 %). Ожидаемый экономический эффект за один квартал составляет 122,514 млн сум, а ожидаемый годовой экономический эффект от применения автоматизированного метода – 490,056 млн сум.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc.10/2025.27.12.T.01.01 ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

OKILOV ZAFAR OMON UGLI

COMPLEX-MODIFIED CONCRETE WITH THE ADDITION OF METALLURGICAL WASTE

05.09.05 - “Building materials and products”

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON TECHNICAL SCIENCES

Tashkent - 2026

The theme of the doctor of philosophy (PhD) dissertation was registered at the Higher Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under number B2025.4.PhD/T5167.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Transport University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council (www.tstu.uz) and on the "ZiyoNet" Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	**Shaumarov Said Sanatovich** Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor
Official opponents:	**Khasanov Bakhriddin Baratovich** Doctor of Technical Sciences, Professor
	Turgunbayev Urinbek Jamalovich Candidate of Technical Sciences, Professor
Leading organization:	**Karakalpak State University**

The defense will take place on «28» November 2026 at 11:00 at the meeting of the Scientific Council DSc.10/2025.27.12.T.01.01 at Tashkent State Transport University. (Address:1,Temiryo'lchilar str., Tashkent 100167,Uzbekistan.Tel./fax:(99871)293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of Tashkent State Transport University (registered under No395.) (Address: 1, Temiryo'lchilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Tel./fax: (99871) 293-57-54, e-mail: tashiit_rektorat@mail.ru).

The abstract of the dissertation was distributed on «12» November 2026.
(Registry protocol No. 46 dated «12» November 2026).

A.I. Adilkhodjayev
Chairman of the Scientific Council for
awarding scientific degrees, DSc, Professor

U.Z. Shermukhamedov
Scientific Secretary of the Scientific Council for
awarding scientific degrees, DSc, Professor

A.A. Ishankhodjayev
Chairman of the Scientific Seminar under the Scientific Council
for awarding scientific degrees, DSc, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research is to develop a concrete composition with reduced clinker consumption and improved strength and performance properties through the combined use of metallurgical industry waste sand and microsilica.

The tasks of the research:

analysis of modern views on concrete compositions with industrial waste and active mineral admixtures on the basis of domestic and foreign scientific sources;

research into the physical-chemical properties and particle size distribution of concrete with the combined use of metallurgical industry waste sand and microsilica;

study of the microstructure of complex-modified concrete by modern methods and establishment of the regularities of the influence of structural changes on the properties of concrete;

optimization of the concrete composition by mathematical design of experiments and automation of its design process by means of a computer program;

technical and economic justification of the research results and their implementation in production.

The object of the research is complex-modified concrete mixtures and concretes with the combined use of metallurgical industry waste sand and microsilica.

The subject of the research is the microstructure and the physical-mechanical, performance and technical-economic indicators of concrete made with a superplasticizer, microsilica and copper mining waste sand.

Research methods. Modern methods of physical-chemical analysis (X-ray phase analysis, electron microscopy), standardized methods for studying the properties and quality indicators of concrete mixtures and concretes, mathematical methods of experimental design and composition optimization, and statistical methods for processing experimental results were used.

The scientific novelty of the research is as follows:

it has been proved on the basis of theoretical and experimental studies that the introduction of metallurgical industry waste sand at the chemical and granulometric stages of concrete structure formation strengthens the walls of the "aggregate - cement stone" contact zone, reduces the formation of microcracks and improves the physical-mechanical and performance properties of concrete;

it has been substantiated on the basis of X-ray phase analysis results that microsilica waste, owing to its high pozzolanic activity, chemically interacts with portlandite $Ca(OH)_2$ crystals of the cement matrix to form additional low-basic calcium hydrosilicates (C-S-H gel), ensuring densification of the cement matrix;

it has been substantiated by experimental studies and microstructural analyses that the complex introduction of metallurgical industry waste sand and microsilica into concrete fills its capillary pores and ensures the formation of a dense and homogeneous microstructure;

multifactor mathematical models describing the average density and compressive strength of complex-modified concrete as a function of the industrial

waste content have been developed, and a computer program for designing a rational concrete composition has been created on their basis.

Implementation of the research results. Based on the results of scientific research on the development of complex-modified concrete with the addition of metallurgical waste:

the composition of class B20 complex-modified concrete with metallurgical industry waste sand and microsilica has been implemented at "Temiryo'linfratuzilma maxsus qurilish" LLC in the construction of pedestrian walkway pavements (reference No. 4/E414 of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan dated March 24, 2026). As a result, the economic effect of constructing the pedestrian walkway pavements amounted to 490.056 million soums;

a computer program for automating the design of concrete compositions with industrial waste has been adopted for use at "Temiryo'linfratuzilma maxsus qurilish" LLC (reference No. 4/E414 of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan dated March 24, 2026). As a result, it became possible to reduce the labor input of concrete mix design processes by 1.5-2 times, cement consumption by 10 % and natural sand consumption by 16 %.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 117 pages.

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

I bo‘lim (I часть; I part)

1. Okilov Z.O., Shaumarov S.S., Kandakhorov S.I. Determination of industrial waste-based properties of structural heat protection aerated concrete // The scientific journal “Vehicles and roads” (Tashkent State Transport University) - 2024. - №1. - P. 8-12. https://transportjournals.uz/index.php/vihles/article/view/174 (05.00.00, №14)

2. Окилов З.О., Шаумаров С.С., Кандахаров С.И. Металл буюмлари ишлаб чиқариш жараёнида ҳосил бўладиган шлакларни қўшиш орқали пиёдалар йўл тўшамаси бетонлари хусусиятларини яхшилаш // “Vehicles and roads” илмий журнали -2024. - №1. - Б. 23-28.https://transportjournals.uz/index.php/vihles/article/view/176 (05.00.00, №14)

3. Okilov Z.O., Shaumarov S.S., Kandakhorov S.I. Methods of increasing the strength of aerated concrete // The scientific journal “Vehicles and roads”. - 2023. - №1. - P. 160-166. https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/7 (05.00.00, №14)

4. Okilov Z.O., Shaumarov S.S., Kandakhorov S.I., Gulomova A.A. Improvement of pavement concrete by industrial waste microfillers // Journal “Engineer”. ISSN 3030-3893. - 2025. - Vol. 3, Issue 1. - P. 5-7. https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/38 (05.00.00, №14)

5. Okilov Z.O., Shaumarov S.S., Mukhammadiyev N.R., Zafarov O., Kandakhorov S.I. Engineering and geological investigations for construction and rehabilitation in saline soil regions of Uzbekistan // Journal “Engineer”. ISSN 3030-3893. - 2025. - Vol. 3, Issue 2. - P. 102-104. https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/88 (05.00.00, №16)

6. Okilov Z.O., Shaumarov S.S., Mukhammadiyev N.R., Zafarov O., Kandakhorov S.I. Assessment of the influence of strength and deformation characteristics of saline soils on the foundations of buildings and structures // Journal “Engineer”. ISSN 3030-3893. - 2025. - Vol. 3, Issue 2. - P. 105-109. https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/89 (05.00.00, №16)

7. Okilov Z.O., Ravshanov J. Parameters of physical properties of saline soils along highways // International scientific journal “Global science and innovations 2025: Central Asia”. ISSN 2664-2271. - Nur-Sultan, 2025. - № 1(12), Vol. I. - P. 16-19.

8. Okilov Z.O., Abdulaxatov Sh.U., Zafarov O., Kandaxarov S.I. Magniy ortosilikati bilan modifikatsiyalangan g‘ovakbetonning fizik-mexanik xususiyatlarini tadqiq etish // JizPI xabarnomasi. ISSN 3060-4966. - 2026. - №3. - B. 260-268. https://slib.uz/article/46685 (05.00.00, №16)

9. Okilov Z.O., Abdulaxatov Sh.U., Zafarov O., Kandaxarov S.I. Issiq iqlim sharoitida g‘ovakbetonning issiqlik-fizik va ekspluatatsion ko‘rsatkichlarini yaxshilash texnologiyasi // JizPI xabarnomasi. ISSN 3060-4966. - 2026. - №3. - B. 347-355. https://slib.uz/article/46687 (05.00.00, №16)

10. Shaumarov S.S., Kandaxorov S.I., Zafarov O., Abdulaxatov Sh.U., Okilov Z.O. Avtoklav bo‘lmagan gazobetonni tayyorlash uchun xom-ashyo

aralashmasi // O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligi. Ixtiro patenti № IAP 8326. - 26.12.2025.

II bo‘lim (II часть; II part)

11. Okilov Z.O. Basic parameters of physical properties of the saline soils in roadside of highways // Scientific ideas of young scientists: International scientific and practical conferences. - Warsaw, Poland, 2025. ISBN 978-83-66401-84-6. - P. 55-58.

12. Shaumarov S.S., Karakulov X.M., Kandakhorov S.I., Yusupov J.M., Okilov Z.O. Composition of aerated concrete using local raw materials // AIP Conference Proceedings. - 2025. - Vol. 3256(1). - 030047. https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3256/1/030047/3352656/Composition-of-aerated-concrete-using-local-raw?redirectedFrom=fulltext.

13. Okilov Z.O. Using composite materials in the construction of buildings, structures, and roads // «Zamonaviy tadqiqotlar, innovatsiyalar, texnika va texnologiyalarning dolzarb muammolari va rivojlanish tendensiyalari» Respublika ilmiy-texnik anjumani materiallari, 1-qism. - Jizzax, 8-9 aprel 2025. - P. 136-139.

14. Okilov Z.O., Keldiyorova F.A. Tabiiy tog‘ jinslaridan olinadigan zamonaviy qurilish materiallari // «Zamonaviy tadqiqotlar, innovatsiyalar, texnika va texnologiyalarning dolzarb muammolari va rivojlanish tendensiyalari» Respublika ilmiy-texnik anjumani materiallari, 1-qism. - Jizzax, 8-9 aprel 2025. - B. 161-163.

15. Okilov Z.O. Metall buyumlari ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan shlaklarni qo‘shish orqali beton tarkibini avtomatlashtirish // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma № DGU 35398. - 19.03.2024.

16. Okilov Z.O., Xudoyberdiyev J.Z. Sanoat va metallurgiya sohasida hosil bo‘layotgan chiqindilarni sement-beton tarkibiga qo‘shgan holda piyodalar yo‘l to‘shamasini mustahkamlash // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma № DGU 38258. - 12.05.2024.

17. Ganiyev I.G., G‘ulomov D.I., Zafarov O., Okilov Z.O. Sanoat chiqindi shlaki asosidagi piyoda yo‘l to‘shamalari uchun materiallar // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma № DGU 28568. - 15.10.2023.

18. Abdulaxatov Sh.U., Zafarov O., Muxammadiyev N.R., Kandaxorov S.I., Okilov Z.O. Issiq iqlim sharoitida magniy ortosilikatli g‘ovakbetonning uzoq muddatli ekspluatatsion chidamliligini oshirish texnologiyasini ishlab chiqish // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma № DGU 68749. - 17.09.2026.

19. Abdulaxatov Sh.U., Zafarov O., Muxammadiyev N.R., Kandaxorov S.I., Okilov Z.O. Magniy ortosilikat modifikatsiyasi asosida g‘ovakbetonning issiqlik-fizik xossalarini yaxshilash uchun mo‘ljallangan dastur // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma № DGU 68750. - 17.09.2026.

Avtoreferat “TDTrU axborotnomasi” ilmiy-amaliy jurnal tahriryatida tahrirdan
o‘tkazildi va matnlarning mosligi tekshirildi
(11.11.2026 yil)

Qog‘oz bichimi 60x80 1/16 .Rizograf bosma usuli Times garniturasi
Shartli bosma tabog‘i: 2,6 b.t Adadi 70 nusxa. Buyurtma № 46-11/2026
Nashrga ruxsat etildi: 11.11.2026

Toshkent davlat transport unversiteti bosmaxonasida chop etilgan
Bosmaxona manzili:100167, Toshkent sh.Temiryo‘lchilar ko‘chas, 1-uy