

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**QALDIRMA KOMPLEKSİNİN FRIKSİON DÜYÜNLƏRİ
ÜÇÜN YENİ KOMPOZİSİYA MATERIALLARININ
İŞLƏNMƏSİ VƏ İSTİSMAR GÖSTƏRİCİLƏRİNİN
DƏYƏRLƏNDİRİLMƏSİ**

İxtisas: 3313.02 – “Maşınlar, avadanlıqlar və proseslər”

Elm sahəsi: Texniki elmlər

İddiaçı: **Yusubov Fikrət Fəxrəddin oğlu**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
tədqim edilmiş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

Bakı – 2022

Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin “Mexanika” kafedrası və “Nanomaterialılar və Nanotexnologiyalar” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

Texnika elmləri doktoru, professor
Ələsgər Məhərrəm oğlu Əliyev

Rəsmi opponentlər:

1. Texnika elmləri doktoru, professor
Nazim Yusif oğlu İbrahimov

2. Texnika elmləri doktoru, professor
İsa Əli oğlu Xəlilov

3. Texnika elmləri namizədi, dosent
Yaşar Ələsgər oğlu Cəfərov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.02 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor

Mustafa Baba oğlu Babanlı

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent

Tahir Qaffar oğlu Cabbarov

Elmi seminarın sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor

İbrahim Əbülfəz oğlu Həbibov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Maşınqayırma sənayesində müxtəlif daşıma, qaldırma-endirmə mexanizmlərini icra etməyə imkan verən tribotexniki sistemlərdə qurğuların yüksək təzyiq və sürət rejimində işləməsi materialların yeyilməsi ilə nəticələnərək böyük iqtisadi itkilərə gətirib çıxarır. Sürtünmə prosesində mürəkkəb termomexaniki təsirlər nəticəsində təmas materiallarının struktur və səth qatının keyfiyyətinin dəyişməsi triboloji xassələrin kəskin şəkildə aşağı düşməsinə səbəb olur. Friksion materialların yeyilməyə-davamlılığı maşın və avadanlıqların səmərəliliyini təmin edir. Xüsusilə də, əyləc mexanizmləri ilə təchiz olunmuş qurğuların etibarlılıq və təhlükəsizliyinin artırılması birbaşa friksion materialların effektivliyindən asılıdır. Dünyanın müxtəlif ölkələrində bir sıra asbestsiz materiallar artıq istehsalata çoxdan yol tapsa da, hələ ki, bu materiallardan heç biri eyni zamanda həm iqtisadi, həm də texniki cəhətdən effektiv ola bilməmişdir. Bu baxımdan yeni davamlı friksion materialların yaradılmasına böyük tələb vardır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri ağır şərtlər daxilində işləyən tribotexniki sistemlər, o cümlədən neft-qaz quyularının qazılması üçün təyinatlanan qazma qurğusunun bucurqad sisteminin əyləc və mufta düyünləri üçün ekoloji təmiz, iqtisadi cəhətdən səmərəli və davamlı xarakteristikaya malik materialların işlənməsindən ibarətdir. Bu məqsəddə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər öz həllini tapmalıdır:

- Sonlu elementlər üsulu ilə qazma bucurqadının disk-kündə sistemi üçün istilik modelinin qurulması;
- Tərkib komponentlərin xırdalanması, mexaniki qarışdırma və preslənmə rejimlərinin optimal variantlarının müəyyənləşdirilməsi və hissəciklərin bərabər paylanmasının təmin edilməsi;
- Alınmış nümunələrin tribotexniki xassələrinin sürtünmə və yeyilmə maşınında eksperimental tədqiqi;
- Friksion kompozisiyaların termiki stabilliyinin qiymətləndirilməsi və sürtünmə əmsalının temperaturdan asılılığının qurulması;

- Əldə edilmiş nəticələrin çoxamilli təcrübələrin planlaşdırılması metodu ilə statistik təhlili, materialların xassələrinin müasir fiziki-kimyəvi metodlarla öyrənilməsi;

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işinin yerinə yetirilməsində element tərkibi (X-Ray difraksiya analizi - XRD, enerji dispersiv X-Ray detektoru ilə təchiz olunmuş skanedicci elektron mikroskopu - SEM+EDX), termoqravimetriya analizi (TGA) və fiziki-mexaniki (ASTM, ISO, JIS və ГОСТ-a əsasən sürtünmə sınaqları və fiziki xassələr) tədqiqat metodlarından istifadə edilmişdir.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar:

– Qazma qurğusunun əyləc sisteminin disk-kündə cütü üçün friksion istiliyin yaranması və təmas səthi boyunca paylanması prosesinin simulyasiya edilməsi;

– Kompozisiya materiallarının hazırlanmasında fiziki xassələrin texnoloji rejim parametrlərindən asılılıqlarının riyazi modelinin yaradılması;

– Tribotexniki xassələrə təsir göstərən tərkib komponentlərinin müxtəlif sürtünmə rejimlərində rolunun müəyyənləşdirilməsi;

– Kompozisiya materiallarının sürtünmə və yeyilmə xassələrinin sürüşmə sürəti, təmas təzyiqi, sürtünmə yolu və temperatur kimi parametrlərdən asılılıqlarının riyazi modellərinin işlənməsi;

– İşçi səthlərdə friksion təbəqələşmənin sürtünmə və yeyilmə xarakteristikasına təsirlərinin səth quruluşu və element tərkibi analizləri vasitəsilə tədqiqi;

Tədqiqatın elmi yeniliyi aşağıdakılardan ibarətdir:

– İlk dəfə olaraq qazma bucurqadının disk/kündə mexanizmi üçün termomexaniki modelin simulyasiyası işlənməmişdir;

– İlk dəfə olaraq N-metilanilin ilə qələvi mühitində polikondensləşmə üsulu ilə modifikasiya olunmuş fenolformaldehid və elektrokimyəvi metodla alınmış mis-qrafit hissəciklərinin triboloji xarakteristikaya təsirləri öyrənilmişdir;

– Komponentlərin xırdalama və mexaniki qarışdırma rejimləri araşdırılaraq, metal və qeyri-metal elementlərindən ibarət asbestsiz yeni tərkib əsasında iqtisadi səmərəli texnologiyalarla davamlı kompozisiya materialı işlənməmişdir;

– Materialların sürtünmə xassəsinə təsir göstərən üzvi komponentlərin termiki deqradasiya, dekompozisiya mexanizmləri araşdırılmışdır. Temperaturdan asılı olaraq sürtünmə prosesində baş verən dəyişikliklər sistemli olaraq tədqiq edilmişdir;

– Alınmış tərkib əsasında ovuntu hissəciklərinin ölçüsü ilə fiziki-kimyəvi xassələri arasındakı asılılıqlar müəyyən edilmişdir.

İşin praktiki əhəmiyyəti və nəticələrin tətbiqi:

Statistik metodlardan istifadə etməklə kompozisiya materiallarının hazırlanması üçün səmərəli rejimlər işlənmişdir.

Ağır yüklənmiş tribotexniki sistemlər üçün friksion kompozisiya materialına patent üçün iddia verilmişdir (№ a 2020 0100).

Ekoloji təmiz polimer əsaslı metal komponentli yüksək temperaturlarda yeyilməyə davamlı, stabil sürtünmə - yeyilmə xarakteristikasına malik friksion materiallar tədqiq edilmişdir;

Ucuz və asan əldə edilə bilən tərkib komponentləri əsasında iqtisadi səmərəli metodlara əsaslanaraq friksion materialların alınma texnologiyası müəyyən edilmişdir.

İşin aprobasiyası. Dissertasiya işinin əsas nəticələri respublika və beynəlxalq səviyyəli konfranslarda, simpoziumlarda müzakirə edilmişdir, o cümlədən doktorantların və gənc tədqiqatçıların XIX Respublika elmi konfransı, Bakı, 7-8 aprel 2015; 69-я Международная молодежная научная конференция “Нефть и газ” Москва, 14-16 апреля 2015; doktorantların və gənc tədqiqatçıların XX Respublika elmi konfransının materialları, Bakı, 24-25 may 2016; VI Международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы науки XXI века”, Москва, 30 января 2016; “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri” beynəlxalq elmi konfransı, Gəncə, 04-05 may 2017; 3rd International Turkic world conference on chemical sciences and technologies (3rd ITWCCST), Baku, 10-13 september 2017; XII International scientific conference european research, МЦНС «Наука и Просвещение», Пенза, 7 октября 2017; “Koordinasion birləşmələr kimyası: analitik kimyanın aktual problemləri”, Akademik Rəfiqə Əliyevanın 85 illik yubileyinə həsr olunmuş beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 16-17 noyabr 2017; II Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, Краснодар, 31 марта 2018; Международной

научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии”, Курск, 24-26 сентября 2018; III Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, Краснодар 31 марта 2019; “Maqniyımşaq ərintilərin informasiya texnologiyalarında və hərbi sənayedə tətbiqi perspektivləri” adlı beynəlxalq elmi-praktik konfrans, Bakı, 09-10 oktyabr 2019; “Kimya texnologiyası və mühəndisliyinin innovativ inkişaf perspektivləri” adlı beynəlxalq elmi konfrans, Sumqayıt, 28-29 noyabr 2019; “Neft-qaz avadanlıqlarının və texnoloji proseslərin mövcud problemlərinin təhlili, onların aradan qaldırılması üçün nəzəri tədqiqatların və praktiki tədbirlərin işlənməsi” mövzusunda yerinə yetirilmiş ETİ-nin müzakirəsinə həsr olunmuş konfrans, 6 dekabr 2019; IV Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, Краснодар, 31 марта 2020; “Müasir kimyanın problemləri və inkişaf tendensiyaları”, Respublika elmi-praktik konfransı, Bakı, 12 dekabr, 2020.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. İş ADNSU-nun “Mexanika” kafedrasında və “Nanomateriallar və nanotexnologiyalar” ETL-də tematik plana uyğun olaraq yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi 207 səhifədən, girişdən, 71 cədvəl, 26 şəkil və 43 qrafikin daxil olduğu 4 fəsildən, 161 adda ədəbiyyat siyahısından, cədvəlsiz, şəkilsiz və ədəbiyyat siyahısız 232122 işarədən ibarətdir.

Nəşrlər. Yerinə yetirilmiş dissertasiya işi üzrə 49 elmi əsər, o cümlədən 30 məqalə (12 məqalə WoS: SCI/SCIE və Scopus bazasına daxildir, bunlardan 1-i redaksiya tərəfindən qəbul edilmiş, çapdadır), 1 patent (ilkın ekspertizanın müsbət nəticəsi haqqında bildiriş alınmışdır), 18 müxtəlif beynəlxalq konfrans və konqreslərdə müzakirə olunmuş məruzələrin tezisləri nəşr edilmişdir.

İŞİN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiyanın əsas müddəaları verilmiş, dissertasiyanın mövzusu üzrə aparılmış tədqiqatların aktuallığı əsaslandırılmış, işin elmi yenilikləri, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar; işin praktiki əhəmiyyəti və nəticələrin tətbiqi şərh edilmişdir.

Birinci fəsildə qazma qurğusunun qaldırma kompleksinin friksion düyünlərində tətbiq edilən materiallar təhlil olunmuş, hazırda istifadə olunan müasir texnologiyalar araşdırılmışdır. Üç yarım fəsildən ibarət olan fəslin birinci yarım fəslə sənayedə mövcud friksion materialların müqayisəsinə, ikinci yarım fəslə tribo texniki xarakteristikaya təsir göstərən amillərin, o cümlədən müxtəlif yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsinə, üçüncü yarım fəslə isə müasir friksion materialların hazırlanmasında tətbiq edilən mövcud texnologiyaların və ovuntu metallurgiya metodlarında əsas tendensiyaların tədqiqinə həsr edilmişdir.

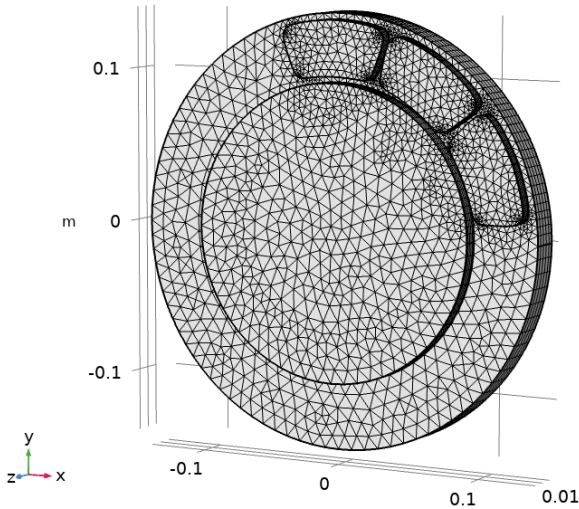
İkinci fəsil qazma qurğusunun qaldırma kompleksinin friksion düyünlərinin termomexaniki yüklənməsi məsələlərinin tədqiqinə həsr edilmişdir. İşçi səthlərdə sürtünmədən yaranan temperaturun dəyişmə mənzərəsi öyrənilmiş, mexaniki və hidravliki əyləc sistemlərində istiliklə bağlı məsələlər araşdırılmışdır. Həmçinin, qazma bucurqadının disk-kündə cütündən ibarət əyləc sistemi üçün təmas səthlərində yaranan friksion istiliyin paylanma mexanizmləri simulyasiya edilmişdir.

Qazma qurğusu qaldırma kompleksinin friksion düyünlərinin termomexaniki yüklənməsinin tədqiqi. Sonlu elementlər üsulu ilə istilik modelin qurulmasında istiliyin bərk cisimlər daxilində ötürülməsi, istilik axını, termiki təmas zamanı baş verən istilik mübadiləsi və istiliyin təmas səthlərindən ətraf mühitə şüalanması kimi fiziki proseslər öyrənilmiş və alınmış nəticələr son modeldə öz əksini tapmışdır. İstilik modeli ZJ30 mobil qazma qurğusunun geometrik ölçülərindən istifadə etməklə COMSOL Multiphysics 5.5 proqramında “Bərk cisimlərdə istiliyin ötürülməsi (ht)” modulu əsasında qurulmuşdur. Tor haqqında əsas məlumatlar cədvəl 1-də və modelin ümumi təsviri şəkil 1-də verilmişdir.

Tor quruluşu haqqında məlumatlar

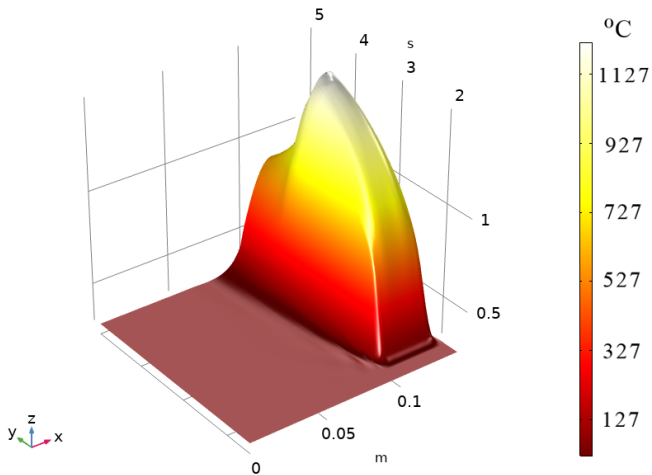
Model	Material	Elementlərin sayı	Torun həcmi (m ³)
Qasnaq	Polad 35XNL	24800	0.001578
Kündə	Retinaks B (FK24A)	4070	$5.776 \cdot 10^{-5}$

Model tərtib edilərkən ətraf mühitin temperaturu 27°C , sürtünmə əmsalı isə 0.35 götürülmüşdür. Başlaması ilk 2 san. və bitməsi 4 san. müddətində baş tutan əyləmə prosesi zamanı istiliyin yaranması və həmçinin əyləmədən sonrakı 11 san. ərzində disk və kündədə baş verən temperaturun dəyişmə xarakteri analiz edilmişdir.



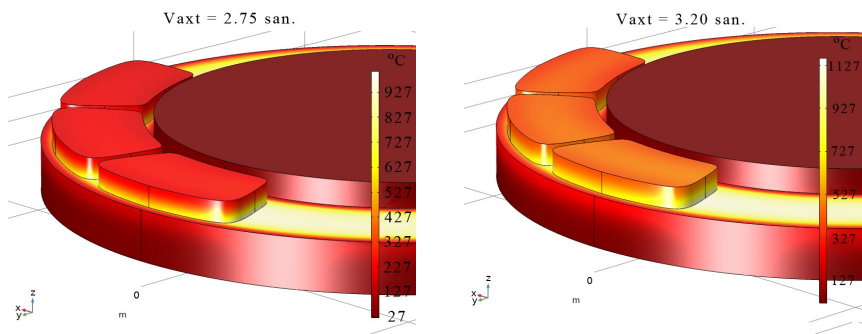
Şəkil 1. Qazma bucurqadının disk-kündə cütünün modeli üçün qurulmuş tor

Fırlanma hərəkətində olan qasnaq üçün əyləc kündəsi ilə təmas sahəsində yaranan temperatur profili qrafik 1.-də verilmişdir. Ümumilikdə, ən yüksək temperatur ilk 2-4 san. müddətində yaranmışdır. Bu zaman temperatur yüksəlməsi $\sim 1127^{\circ}\text{C}$ -dək davam etmişdir.



Qrafik 1. Sürtünmə səthində temperaturun dəyişmə mənzərəsi

Əyləmə prosesi başa çatdıqdan sonra diskin səthində soyuma prosesi baş vermiş və 15 san.-nin sonunda 227-327°C temperatur təşkil etmişdir. Qasnaqla əyləc kündələrinin təmasına daha yaxın profildən nəzər yetirdikdə, istiliyin hər iki friksion elementin kəsişmə nöqtəsindən əks istiqamətə, yəni yuxarı və aşağı istiqamətlərə yönəldiyi görünür (şəkil 2).



Şəkil 2. Təmas səthində istiliyin paylanması

Alınmış termomexaniki model əyləc qasnağının zamandan asılı olaraq işçi səthinin istənilən nöqtəsində temperaturun dəyişmə mənzərəsini araşdırmağa imkan verir.

Üçüncü fəsildə tərkib seçimi müzakirələrinə yer verilmiş, komponentlərin laboratoriya dəyirmanında xırdalanması və mexaniki qarışdırma qurğusunda quru şərtlərlə qarışdırılması üçün rejimlər müzakirə edilmişdir. Eyni zamanda silindrik və düzbucaqlı formasında hazırlanmış nümunələr üçün səthi-aktiv inert sürtgü materialları ilə yanaşı, tərkibə daxil edilmiş bərk sürtgü materiallarının və plastifikatorların formalaşma xüsusiyyətlərinə təsirləri araşdırılmışdır. Çoxamilli təcrübələrin planlaşdırılması metodundan istifadə etməklə texnoloji rejim parametrləri ilə sınaq nümunələrinin fiziki xassələri arasındakı qanunauyğunluq statistik təhlil edilmiş, optimal model qurulmuşdur. Həmçinin sürtünmə və yeyilmə xassələrinə təsir göstərən əsas amillər statistik metodlarla təhlil edilmiş, optimal rejimlər müəyyənləşdirilmişdir.

Kompozisiya materiallarının hazırlanması və sınağı. Material seçimində barit, fenolformaldehid, vollastonit, alüminium oksid, qalay, qurğuşun, silisium dioksid, mis-qrafit, alüminium oksid və az miqdarda maqnezium oksid, molibden disulfid və tunc qırıntılarından istifadə edilmişdir. Ədəbiyyatda olan məlumatlardan istifadə edilərək tərkibə daxil olan materiallar və onların kütlə faizləri cədvəl 2-dəki kimi müəyyənləşdirilmişdir.

Cədvəl 2.

Kompozisiya materiallarının tərkibi

Komponentlər	Funksiyaları	Götürülmüş kt.% aralığı
Barit	Doldurucu	16-35
Fenolformaldehid	Əlaqələndirici	20-30
Qalay	Legirləyici element	6-10
Qurğuşun	Legirləyici element	8-12
Mis-qrafit	Friksion modifikator	5-10
Alüminium oksid	Abraziv	5-7
Silisium dioksid	Abraziv	5-9
Vollastonit	Funksional doldurucu	3-10
MgO, MoS ₂ , tunc qırıntıları	Friksion modifikatorlar	Balans

Nümunələrin hazırlanmasında elektorkimyəvi metodla alınmış mis-grafit hissəciklərdən (80%Cu20%C) istifadə edilmişdir. Fenolformaldehidin əvəzinə isə N-metilanilin ilə qələvi mühitində polikondensləşmə üsulu ilə modifikasiya olunmuş fenol-formaldehiddən istifadə edilmişdir. Həmçinin təbii mineral olan vollastonit əvəzinə sintetik vollastonitdən istifadə edilmişdir.

Müxtəlif ölçüyə malik ovuntu məhsullarının ölçülərinin maksimum səviyyədə eyni ölçü və formaya gətirilməsini təmin etmək üçün tərkib komponentləri MJ-1 markalı laboratoriya dəyirmanında xırdalanmışdır. Xırdalanma silindr formalı paslanmayan metal materialdan hazırlanmış konteynerin (ölçüləri: $h = 50$ mm, $d = 65$ mm) içərisində diametri 6 və 11,3 mm olan paslanmayan polad kürəciklərlə həyata keçirilmişdir. Mexaniki qarışdırma elektrik mühərriki valının fırlanma tezliyi 2700 dövr/dəq olan qurğuda, ölçüləri $d = 50$ mm, $l = 90$ mm olan silindr formalı plastik qabda aparılmışdır. Dövrələrin sayını tənzimləmək üçün laboratoriya transformatorundan istifadə edilmişdir. Aparılmış eksperimentlərdən 16 saat müddətində 60 dövr/dəq. sürətlə aparılan qarışdırma daha effektiv nəticə göstərmişdir.

Kompozitlərin hazırlanması cədvəl 3-də verilmiş parametrlərlə həyata keçirilmişdir. 1-ci mərhələdə ovuntu məhsulları pres-formaya tökülərək soyuq halda 10 MPa təzyiqlə preslənmişdir. Növbəti mərhələdə qızdırılmış pres-materiallar 25.5 MPa təzyiq altında preslənərək həmin təzyiq altında 20-35 dəq. müddətində presdə sıxılmış vəziyyətdə saxlanmışdır.

Cədvəl 3.

Kompozitlərin hazırlanmasında tətbiq edilən əsas parametrlər

Proses parametrləri		
Parametrlər	Qiymətlər	
Qızdırma temperaturu (°C)	120-160	
Qızdırma müddəti (saat)	0.58	
Presdə saxlama müddəti (saat)	0.5	
Bişirmə temperaturu (°C)	160	
Bişirmə müddəti (saat)	5	
Təzyiq (MPa)	Soyuq halda	Qaynar halda
	10 MPa	25.5 MPa

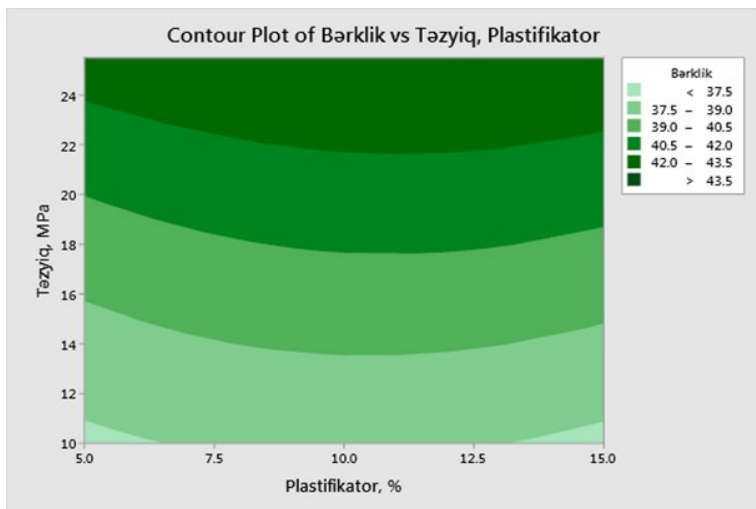
Daha sonra presdən çıxarılan nümunələr yenidən sobaya qoyularaq 160°C temperaturda 5 saat müddətində bişirildikdən sonra otaq temperaturunda soyudularaq tədqiq edilmişdir. Nəticədə hər 1.7840 q ovuntu məhsulundan 13,4 mm uzunluqlu nümunələr alınmışdır. Araşdırmalarda iki cür presformadan istifadə edilmişdir. Sürtünmə sınaqlarının aparılması üçün lazım olan silindrik formalı nümunələr üçün ikitərəfli sxem üzrə hazırlanmış presforma, bərklik sınaqlarının aparılması üçün isə birtərəfli sxem üzrə hazırlanmış presformadan istifadə edilmişdir. Sürtünmə sınaqlarının aparılması üçün tələb olunan silindrik nümunələrin ölçüsü $l = 12,8$ mm və $d = 4.7$ mm olduğundan presqəlibin hazırlanmasında bu ölçülər nəzərə alınmışdır.

Sıxlığın qeyri-bərabər paylanmasının qarşısını almaq üçün tərkibə əlavə olaraq plastifikatorlar qatılmış, pres-formanın divarlarına sürtgü materialları çəkilmişdir.

Səmərəli texnoloji rejimlərin seçilməsi. Texnoloji rejim parametrləriylə sıxlıq və bərklik kimi fiziki xassələr arasında asılılığın öyrənilməsi üçün təcrübələrin planlaşdırılması metodlarına müraciət edilmişdir.

Təcrübələrin planlaşdırılması və statistik analizlərin aparılması Taquçi metodu əsasında MINITAB 19 proqramında yerinə yetirilmişdir. Təcrübələrinin aparılmasında silindrik nümunələrdən istifadə edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, həm sıxlıq, həm də bərklik xassələri üçün ən təsiredici amil təzyiqdır (müvafiq olaraq, 86.79 və 90.50%). Digər kiçik təsirlər arasındakı fərq çox yaxın olsa da, bərkliklə müqayisədə sıxlığın dəyişməsində plastifikatorun rolu daha böyük olmuşdur. Sıxlığın artımı plastifikator 10 %, vaxt isə 35 dəq.-dək olduğu rejimə qədər baş verir, sonra isə azalma müşahidə edilmişdir. Bərkliyin dəyişməsində də eyni qanunauyğunluğu müşahidə etmək mümkündür (qrafik 2.).



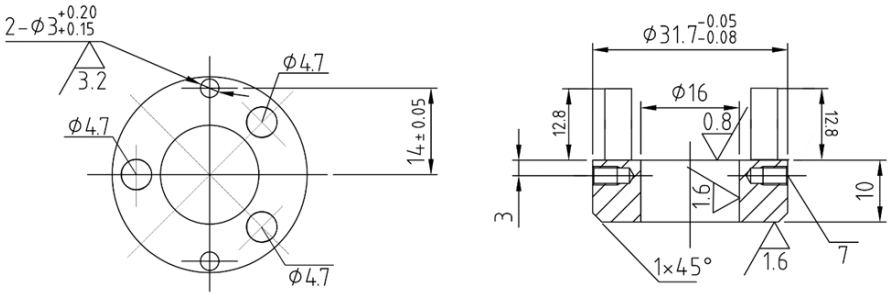
Qrafik 2. Bərkliyin rejim parametrlərindən asılılığının konturlarla ikiölçülü interpretasiyası

Qrafik 2-də bərkliyin təzyiq və plastifikator asılılığının konturlarla ikiölçülü interpretasiyasından hər iki amilin təsirini aydın görmək mümkündür. Belə ki, təzyiqin maksimum qiymətində sıxlıq maksimum qiymət olsa da, plastifikatorun miqdarından və vaxtın qiymətlərindən asılı olaraq bu müəyyən bir nöqtəyə qədər baş verir. Lakin müqayisə etibarilə 35 dəq.-dən çox qızdırılma ilə aparılmış təcrübələrdə, plastifikatorun 10 kt.%-dən artıq istifadəsində sıxlıq və bərkliyin azalması daha yüksək olmuşdur.

Soyuq presləmədən sonra müəyyən bir forma almış nümunənin qızdırılması komponentlərin bir-birinə inteqrasiyasını və formalaşma xüsusiyyətini artırmağa kömək etsə də, həddən artıq istilik altında saxlanması materialın strukturunu dəyişməklə nümunənin keyfiyyətinə ciddi təsir göstərir.

Sürtünmə sınaqlarının aparılması metodu. Kompozisiya materiallarının tribotexniki xassələrinin öyrənilməsi şaquli bloka malik universal sürtünmə maşını “MMW-1”-də ASTM G99 standartı (“barmaqciq-disk” qurğularında yeyilmə sınaqları üçün sınaq metodikası standartı) əsasında aparılmışdır. Avadanlığın iş prinsipi tərپənməz disk üzərində eyni vaxtda 3 ədəd silindrik nümunənin

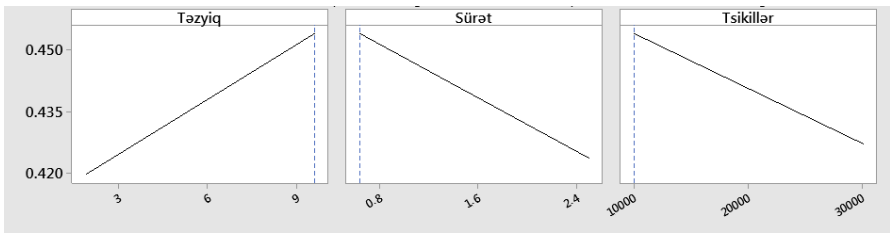
sürtünməsinə əsaslanır. Sınaqlarda bərkliyi 44-46HRC olan tablandırılmış polad disk (səth hamarlığı: 0.2µm) əksicisim olaraq istifadə edilmişdir (ölçüləri: xarici diametri 31.6 mm, daxili diametri 16 mm qalınlığı isə 7,8mm). Sürtünmə əməliyyatı şəkil 3-də təqdim olunan sxemə əsasən qurğunun aşağı hissəsində olan mühərrikin hərəkəti ilə diskə verilən yüklə, yuxarı hissədə saat əqrəbi istiqamətində fırlanan tərtibata yerləşdirilmiş nümunələrlə təması vasitəsilə həyata keçirilir.



Şəkil 3. Nümunə ilə diskin yerləşmə və təmas sxemləri

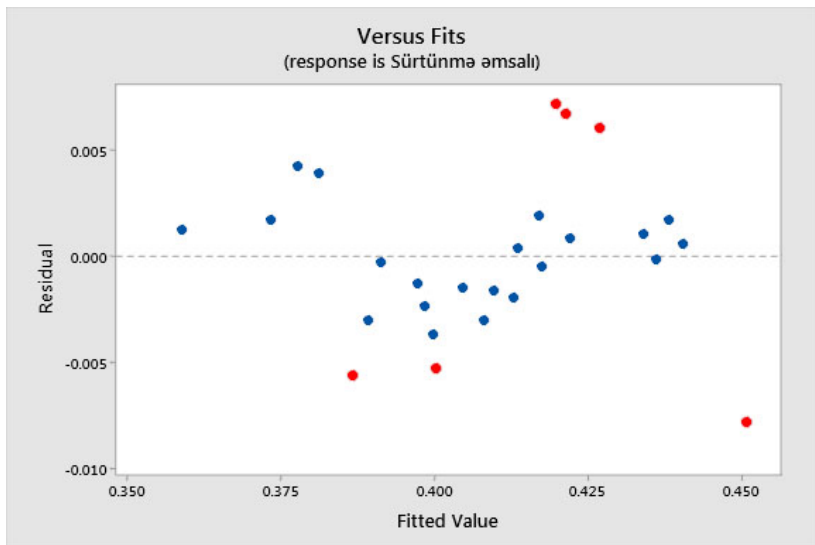
Sürtünmə-yeyilmə xassələrinin statistik təhlili. Kompozisiya materiallarının sürtünmə və yeyilmə fəaliyyətini təcrübələrin planlaşdırılması metodu ilə qiymətləndirmək üçün üç amildən istifadə edilmişdir: təmas təzyiqi, sürüşmə sürəti və tsikllərin sayı. Təcrübə sınaqlarının nəticələrinin dispersiya analizi (ANOVA) vasitəsilə emalı sürtünmə əmsalının dəyişməsinə təsir göstərən əsas amil şərtlərinin təsir faizi belə müəyyənləşdirmişdir: təmas təzyiqi: 39.00%, sürüşmə sürəti: 28.48% və tsikllərin sayı: 24.34%. Yeyilmə intensivliyi üçün isə sürüşmə sürəti: 52.61%, təmas təzyiqi: 30.47% və tsikllərin sayı: 16.01% nəticə vermişdir.

Sürtünmə əmsalı üçün optimallaşdırmanın nəticələri qrafik 3-də verilmişdir. Qrafikdən görüldüyü kimi ən optimal sürtünmə rejimi təmas təzyiqi 9.6 MPa, sürüşmə sürəti 0.64 m/san və tsikllərin sayı 1000 olan rejimdir. Bu rejimdə proqnozlaşdırılan sürtünmə əmsalının qiyməti 0.451898 təşkil edir.



Qrafik 3. Sürtünmə əmsalı üçün optimallaşdırmanın nəticəsi

Xətti regressiya tənliklərinə əsasən alınmış modelin adekvatlığını göstərən qalıq qiymətləri mənfi qiymətlərin 0 xəttindən aşağı, müsbət nəticələrin isə 0 xəttindən yuxarıda şaquli istiqamətdə ordinat oxu boyunca düzülüşü təsvir olunmuşdur (Qrafik 4).



Qrafik 4. Sürtünmə əmsalı üçün təcrübi nəticələrlə proqnozlaşdırma qiymətləri arasındakı qalıqın paylanma qrafikləri

Qəbul olunmuş səpələnmə klasterlərinə görə əldə etdiyimiz nəticələr modelə adekvatlığını sübut edir. Belə ki, adekvat modellərdə adətən qalıq qiymətləri 0 xəttinin yuxarı və aşağı hissəsində müxtəlif istiqamətlərdə səpələnmə ilə xarakterizə olunur. Qrafikdə ən böyük kənarçıxmalar qırmızı nöqtələrlə verilmişdir ki, bu nöqtələr planlaşdırma matrisində təzyiqin yüksək olduğu sıralara aid olan

nəticələrdir. Əldə edilmiş nəticələr sürtünmə əmsalının təzyiğin artması ilə yüksəldiyini göstərmişdir. Lakin bu qanuna uyğunluq friksion istilik təsirindən mikrotəbəqələşmənin yaranması ilə bağlı olduğu üçün yüksək təzyiq altında yalnız aşağı sürüşmə sürət rejimində özünü doğruldur. Çünki daha çox friksion istilik materialın yeyilməsi və sürtünmə xarakteristikasının aşağı düşməsi ilə nəticələnir. Bu səbəbdən təzyiğin 3-cü səviyyəsində olan sıralarda xəta daha yüksək olmuşdur.

Yeyilmə intensivliyi üçün isə ən optimal sürtünmə rejimi hər amilin ən aşağı səviyyəsində, yəni təmas təzyiqi 1.9 MPa, sürüşmə sürəti 0.64 m/san və tsikllərin sayı 10000 olan rejim olmuşdur.

Dördüncü fəsildə triboloji sınaqların nəticələrinə əsasən materialların sürtünmə və yeyilmə xarakteristikası araşdırılaraq tərkib komponentlərinin rolu qiymətləndirilmiş, termogravimetriya metodu ilə analiz edilmiş nümunələrin termiki sabilliyi və istiliklə bağlı məsələlər öyrənilmişdir. Həmçinin temperaturla sürtünmə əmsalı arasındakı asılılıq qurularaq, materialların friksion sabilliyi qiymətləndirilmişdir. SEM və EDX vasitəsilə təhlil aparılaraq, sürtünmə səthində müxtəlif mərhələlərdə mikrotəbəqələşmənin strukturu və kimyəvi tərkibi öyrənilmiş, yeyilmə xarakterinə təsirlərinin analizi verilmişdir.

Sürtünmə əmsalına təsir göstərən tərkib komponentləri. Doldurucu-modifikator rolunda istifadə etdiyimiz (maqnezium oksid, molibden disulfid və tunc qırıntıları) materiallarının təsir effektlərini öyrənmək üçün hamısı birlikdə 2, 6, 14 kt.% olmaqla tərkibə əlavə edilərək müqayisələr aparılmışdı. Nümunələr kt%-lərinə müvafiq olaraq, M1, M3 və M7 adlandırılmışdır. Nəticələr doldurucu-modifikatorların 2 kt.-%-də daha səmərəli olduğunu göstərmişdir. Belə ki, ən yüksək sürtünmə əmsalı məhz bu nümunələrdə qeydə alınmışdır. Tərkibində 14 kt.% doldurucu-modifikatorlar olan nümunədə isə qalan kompozitlərlə müqayisədə sürtünmə əmsalı nisbətən aşağı olsa da, digər mühüm göstərici olan friksion sabillik faizi yüksək olmuşdur. Xüsusilə də, 700 m sürtünmə yoluna qədər olan diapazonda sürtünmə əmsalı qiymətlərində kəskin artma-azalma müşahidə edilməmişdir. Bu halı maqnezium oksidlə və molibden disulfidin birgə yaratdığı friksion qatın təsiri kimi qəbul etmək olar.

Doldurucu-modifikatorların miqdarının yüksək olduğu materiallarda sürtünmə əmsalı aşağı olmaqla yanaşı, yeyilmə faizi də yüksək olmuşdur. Ümumi olaraq, aşağıdakı nəticələr əldə edilmişdir: doldurucu-modifikatorların 2-3 kt% miqdarında istifadəsi triboloji xassələri yaxşılaşdırır, yüksək olduğu halda (7-14 kt.%) isə sürtünmə əmsalını aşağı salmaqla yanaşı, yeyilməni də artırır. Lakin ~14 kt.%-dək doldurucu-modifikatorun material tərkibində olması səthdə friksion qatın formalaşmasına səbəb olaraq sürtünmənin sabillik faizini artırmışdır (Cədvəl 4).

Cədvəl 4.

Nümunələrin tribotexniki göstəriciləri

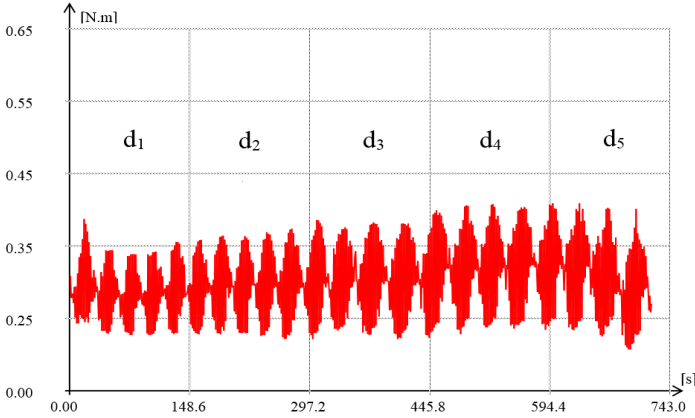
Nümunələr	Sürtünmə əmsalı (μ_{orta})	Friksion sabillik (%)	Xüsusi yeyilmə dərəcəsi ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
M1	0,44	87,8	$5,824 \times 10^{-5}$
M3	0,26	72,4	$6,010 \times 10^{-5}$
M7	0,14	85,2	$7,354 \times 10^{-5}$

Sürtünmə əmsalının dəyişməsinə təsir göstərən tərkib komponentlərini müəyyənləşdirmək üçün barit, mis-qrafit və alüminum oksid kt. %-ləri dəyişdirilmiş, digər komponentlər isə eyni kt. %-də saxlanmışdır.

Tədqiq edilən nümunələrin müxtəlif yük altında triboloji xarakteristikasında baş verə biləcək dəyişikliyi müəyyən edə bilmək üçün sürtünmə yolu və sürəti sabit saxlanılmışdır (müvafiq olaraq, 959,8m və 1068,5 dövr/dəq). Sınaqlar göstərmişdir ki, yükün artması ilə müvafiq olaraq yeyilmə intensivliyi də artır, lakin sürtünmə əmsalı qiymətlərinin dəyişməsində fərqli nəticələr alınmışdır. Alınmış rəqəmlərdən belə nəticəyə gəlmək mümkündür ki, mis-qrafit kt.% 4 və 7 olan nümunələrdə sürtünmə daha yaxşı olmuş və K3 nümunəsində isə bu göstərici ən aşağı səviyyədə olmuşdur. K3 materialında yeyilmə intensivlikləri də digər nümunələrlə müqayisədə yüksək olmuşdur.

Sürtünmənin sabillik qiymətləri aşağı yüklərdə daha yüksək olmuş, yükün artması ilə bu sabillik pozulmuşdur. Ən yüksək sürtünmə sabilliyi K1 materialında qeydə alınmışdır (Qrafik 5).

Qrafikdən göründüyü kimi d1-dən d4-ədək olan diapazonda sürtünmə stabil artımla inkişaf etmişdir. Lakin son mərhələdə 594.4 san.dən sonra sürtünmə zəifləməyə başlamışdır. Ümumi olaraq belə bir nəticəyə gəlinmişdir ki, baritin miqdarı 24 kt.-%-dən yuxarı olan nümunələrdə yeyilmə müqaviməti yüksəlir, mis-qrafitin miqdarı ~7-8 kt.-% olduqda sürtünmə əmsalını artırır, yüksək olduqda səmərəli sayılmır.



Qrafik 5. K1 nümunəsinin 100N yük rejimində sürtünmə prosesində baş verən dəyişikliklər

Barit və mis-qrafit birgə sürtünmə əmsalının sabilliyini təmin edir. Sınaq edilmiş nümunələr içərisində K2 materialı ən yüksək və stabil sürtünmə əmsalına malikdir, K1 nümunəsinin istilik keçiriciliyi aşağı olduğu üçün təmas səthinin qızması nəticəsində formasını dəyişir və beləliklə də tribotexniki xassələrdə qeyri-stabillik yaranır.

Hissəciklərin ölçüsündən asılı olaraq tribotexniki xassələrin səciyyələndirilməsi. Hissəciklərin ölçüsündən asılı olaraq materialın xassələrində baş verən dəyişiklikləri müəyyənləşdirmək üçün ölçüləri $\leq 50 \mu\text{m}$ və $100 \mu\text{m}$ hissəciklərdən istifadə edərək hazırlanmış nümunələrin müqayisəsi aparılmışdır. Termiki analizlərin sonunda çəki itkisi böyük ölçülü hissəciklər üçün 32.86%, kiçik ölçülü hissəciklər üçün isə 29.63% olmuşdur. Sürtünmə sınağının nəticələri 500N yük altında kiçik ölçülü hissəciklərlə hazırlanmış nümunələrin daha yüksək sürtünmə əmsalına malik olmasını göstərmişdir. Lakin

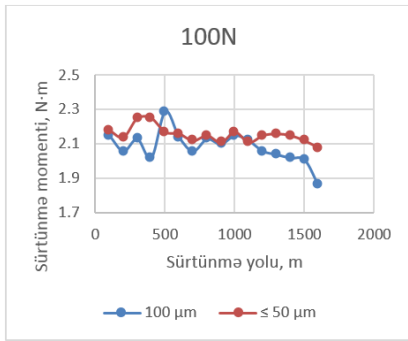
500N yüklə müqayisədə 100N yük altında kiçik ölçülü hissəciklərlə hazırlanmış nümunələrin daha stabil sürtünmə xarakteristikasına malik olması müəyyən edilmişdir (Cədvəl 5).

Cədvəl 5.

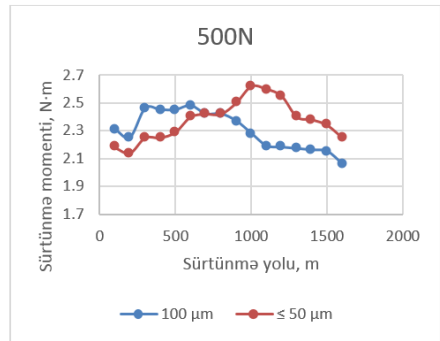
Materialların sürtünmə xassələri

Nümunələr	Sürtünmə əmsalı (μ_{orta})		Friksion stabillik (%)	
	100N	500N	100N	500N
BH (100 μm)	0,36	0.39	87,5	90.2
KH ($\leq 50 \mu\text{m}$)	0,34	0.43	86,9	85.8

Nəticələrin təhlili 500N yük altında KH kompozitinin daha yüksək sürtünmə əmsalına malik olmasını göstərmişdir. Lakin 500N yüklə müqayisədə 100N yük altında KH kompozitinin daha stabil sürtünmə xarakteristikasına malik olmasını göstərmişdir. Qrafik 6-dan görüldüyü kimi 500N yük rejimində KH nümunəsinin sürtünmə əmsalı 200 m sürtünmə yolundan sonra artmağa başlamış, 1000 m-də pik həddə çataraq yenidən azalmağa başlamışdır.



a)

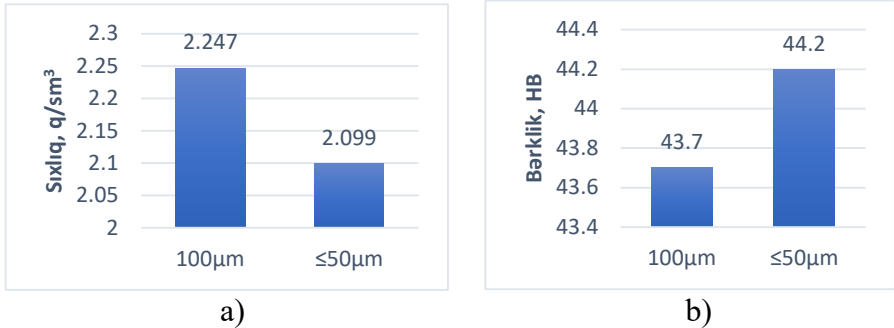


b)

Qrafik 6. Sürtünmə yolundan asılı olmaqla a) 100N və b) 500N yük altında kompozitlərin friksion xarakteristikasının dəyişməsi

Həmçinin araşdırmalar plastifikator qatılmış nümunələrdə sıxlığın yüksək, məsaməliliyin isə aşağı olmasını göstərmişdir. Məsaməlilik nəticə etibarilə, ümumlikdə bütün nümunələrdə çox aşağı səviyyədə olmuşdur ki, bu da friksion materiallara qoyulan tələbləri ödəyir. Çəki

İtkisi hər iki nümunə üçün 2-ci mərhələdə, yəni deqradasiya prosesinin başladığı və bitdiyi mərhələdə yüksək olmuşdur. 1-ci mərhələdə nəzərə çarpacaq çəki itkisi müəyyən edilməmişdir. Deqradasiya temperaturunadək bu rəqəm 1-2% təşkil etmişdir. Sıxlıq ölçmələri BH kompozitinin daha yuxarı sıxlığa malik olduğunu göstərmişdir (Qrafik 7a).

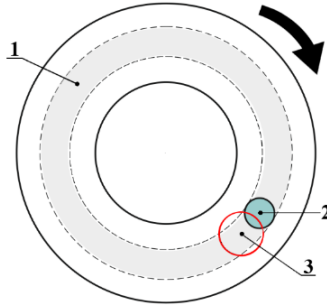


Qrafik 7. Nümunələrin a) sıxlıq və b) bərklik göstəricilərinin müqayisəsi

Sıxlığın KH nümunəsində aşağı olmasının səbəbi hissəciklərin ölçüsü ilə əlaqədardır. Lakin bərklik göstəricilərinə gəldikdə KH kompoziti daha yüksək olmuşdur (Qrafik 7b). Hissəciklərinin ölçüsü kiçik olan nümunələrdə sıxlığın az olması ilə əlaqədar məsələlilik də müqayisədə çox olmuşdur. Lakin hər iki halda məsələliliyin miqdarı ümumi olaraq qənaətbəxş olmuşdur.

Sürtünmə əmsalının temperaturdan asılılığı. Sürtünmə əmsalı ilə temperatur arasındakı asılılığı öyrənmək məqsədilə sürtünmənin müxtəlif mərhələlərində temperatur ölçülərək müqayisələr aparılmışdır. Barit inert doldurucu olduğu üçün balanslaşdırma üçün istifadə edilmiş, fenolformaldehid isə müxtəlif kt.% ilə götürülmüşdür. Digər komponentlər isə bu nisbətdə götürülmüşdür: vollastonit 5 kt. %, alüminum oksid 7 kt. %, qurğuşun 10 kt. %, qalay 10 kt. %, silisium dioksid 7 kt. %, mis-qrafit 8 kt. % və əlavə olaraq hərəsindən 1 kt.% olmaqla tunc qırıntıları, molibden disulfid və maqnezium oksid istifadə edilmişdir. Fenolformaldehidin kt.-%-ə (17, 20, 25, 28) uyğun olaraq nümunələr P19, P22, P25 və P28 adlandırılmışdır.

Diskin temperaturunu ölçmək üçün lazer termometrədən (Zotek: GM550) istifadə edilmişdir. Sınaq müddətində termometr nümunənin disk üzərində sürtünmə trayektoriyasından 6-8 sm məsafədə saxlanılaraq ölçmələr aparılmışdır (Şəkil 4).



Şəkil 4. Lazer termometrin disk üzərində fokuslanma nöqtəsi
1) Sürtünmə yolu, 2) nümunə, 3) fokus nöqtəsi

Sürtünmə sınaqları 2000 dövr/dəq sürətlə, 17,3 MPa təmas təzyiqi ilə yerinə yetirilmişdir. Cədvəl 6-da sürtünmə əmsalının kəskin azalması və yenidən artması ilə bağlı hesablamaların nəticəsi verilmişdir. Göründüyü kimi materiallar arasında sürtünmə əmsalının kəskin azalma dərəcəsinə görə ən üstün xarakteristika P25 kompozitinə aiddir. Fenolformaldehidin kt.%-nin artmasıyla sürtünmə əmsalının kəskin azalma dərəcəsi azalsa da, 25 kt.%-dən artıq olduqda istifadəsi səmərəli olmamışdır.

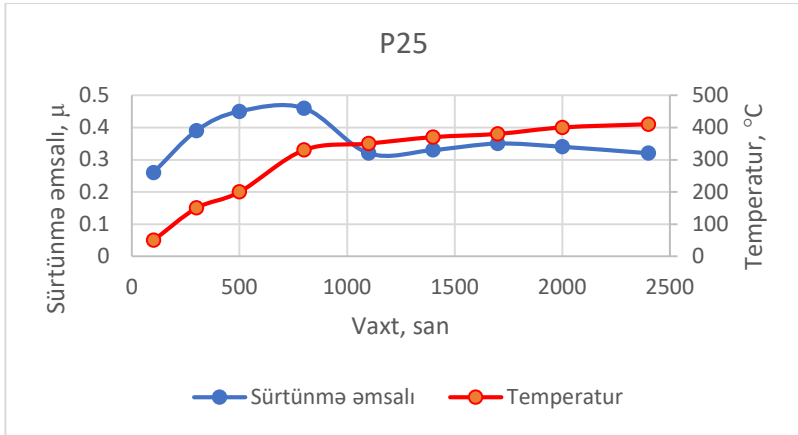
Cədvəl 6.

Sürtünmə əmsalının enmə və qalxma xüsusiyyətləri

Mərhələlər	Parametrlər	P19	P22	P25	P28
Azalma	Azalma (μ)	0.23	0.27	0.32	0.17
	Azalma dərəcəsi (%)	36.1	35.7	30.4	45.2
Artma	Artma (μ)	0.27	0.30	0.35	0.23
	Artma dərəcəsi (%)	81.5	83.3	82.9	73.9

Nəticələr göstərmişdir ki, bütün nümunələrdə sürtünmə əmsalı ilə ~100 san.-dən başlayaraq 500 san.-dək tədricən artır, 500-800 san.

zaman müddətində isə sürtünmə əmsalı maksimum qiymətlər alır (Qrafik 8).

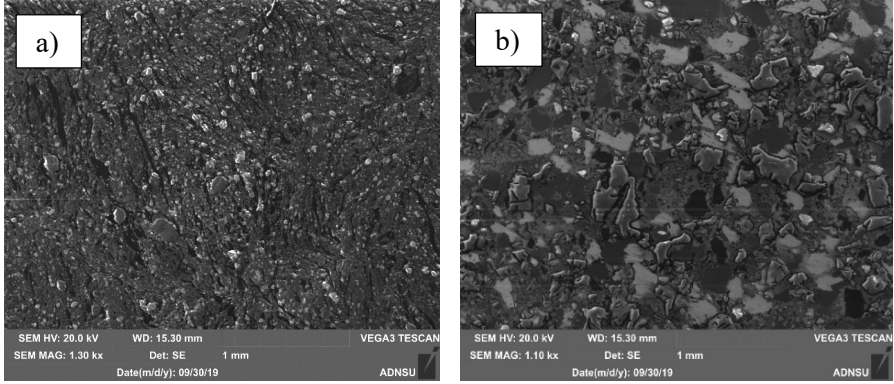


Qrafik 8. P25 kompozitinin sürtünmə əmsalının temperaturdan asılılıq qrafiki

100-500 san. müddətində olan artımı diskə nümunələr arasındakı həqiqi təmas sahələrinin artması ilə əlaqələndirmək olar. Lakin 800 san.dən sonra sürtünmə əmsalı kəskin aşağı düşür ki, bu da deqradasiya prosesinin başladığından xəbər verir. Sürtünmə əmsalının maksimum səviyyəyə çatdıqdan sonra sürətlə azalmağa başlaması fenolformaldehidin termiki deqradasiyaya başladığını göstərir. Bu mərhələdə temperatur $\sim 330^{\circ}\text{C}$ təşkil etmişdir. Artıq 350°C -də sürtünmə əmsalı qiymətlərinin minimuma düşməsi deqradasiya prosesinin sona çatdığını göstərir.

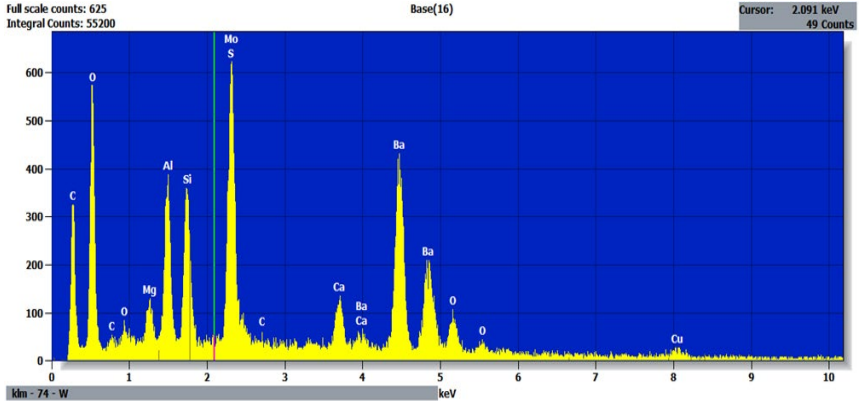
Friksion mikrotəbəqələşmə və yeyilmə mexanizmləri. Şəkil 5-də 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunənin SEM vasitəsilə çəkilmiş səth təsvirləri verilmişdir. Təsvirlərdən görüldüyü kimi sürtünmə səthinin struktur forması ilkin səthdən fərqli olaraq çoxsaylı kiçik sahələrlə zənginləşmişdir. Səthdə olan yeyilmə hissəciklərindən əlavə, daxili zonalardan çıxan fenolformaldehid səthdə yeni sahələr yaratmışdır ki, bu da sürtünmə əmsalının kəskin azalmasına səbəb olur. Eyni zamanda termiki deqradasiya nəticəsində CO , CO_2 , CH_4 və H_2 kimi ayrılmış qazlar sürtünmə səthləri tərəfindən adsorbsiya edilə

bilmədikləri üçün qaz qatı əmələ gətirir. Bu qaz qatı xarici sürtünmə səthində sürtgü rolunu oynayaraq sürtünməni azaldır.



Şəkil 5. Nümunələrin sürtünmə sınaqlarından a) əvvəl və b) sürtünmənin ilkin mərhələsində səth strukturu təsvirləri.

Şəkil 6-da 2500 san. müddətində aparılmış sınaqlardan sonra nümunənin SEM-lə çəkilmiş təsviri verilmişdir. Sürtünmə səthlərinin EDX analizi oksigenlə zəngin sahələrin çoxluğunu göstərmişdir.



Şəkil 6. 2500 san. müddətində aparılmış sınaq üçün sürtünmə səthinin EDX analizi

Həmçinin səthdə CO_2 , Si və Al kimi elementlərə də rast gəlinmişdir. Bu bütün nümunələrdə oksidləşmə yeyilməsinin çoxluq

təşkil etdiyini göstərir. 1400-1700 san. ərzində bütün nümunələrdə sürtünmə əmsalının yenidən artması baş vermişdir. Dövrələrin sayı artıdıqca yeyilmiş hissəciklər getdikcə deformasiyaya: əzilməyə və sıxılmaya məruz qalaraq yeni bir qat formalaşdırır. Yeni qat sürtünmə və yeyilmə prosesinə ciddi təsir göstərir. Növbəti mərhələlərdə ~380-400°C temperatur hədlərində istilik təsirlərindən materialların friksion xarakteristikasında azalma müşahidə edilmişdir və 1700 san.dən başlamaqla sınağın sonunadək olan zaman daxilində sürtünmə əmsalı tədricən azalmağa başlamışdır. Fenolformaldehydın tərkibindəki hidrosil və metilen qrupları arasında baş verən kimyəvi reaksiya 400-600°C temperatur intervalında kömürləşməyə gətirib çıxarır. Bu proses nəticəsində sürtünmə cütləri arasında rabitə əlaqəsi zəifləməyə başlayır və səthdə təmas sahələrini dəyişməklə sürtünmə prosesinə təsir edir.

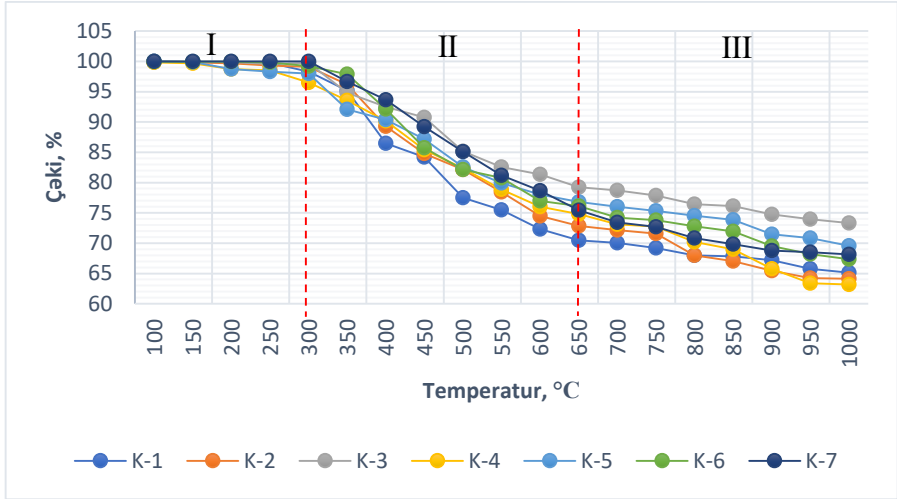
Termiki stabillik və degradasiya mexanizmi. Temperatur artımı ilə friksion kompozitlərin fiziki xassələri arasında yaranan qanunauyğunluğu müəyyənləşdirmək üçün termoqravimetriya metodundan istifadə edilmişdir. Tədqiqat üçün yeddi eyni tərkibli, lakin fərqli kütlə faizli kompozisiya materialından istifadə edilmişdir (Cədvəl 7). Termiki stabilliyi müəyyənləşdirən əsas amil üzvi komponentlər olduğu üçün müqayisələr əsasən fenolformaldehyd görə aparılmışdır.

Cədvəl 7.

Kompozisiya materialların tərkibi, kt.%-lə

№	Barit	Fenol-formal.	Silisiyum dioksid	Mis-qrafit	Digər
K-1	25	25	7	8	29
K-2	30	20	7	8	29
K-3	35	15	7	8	29
K-4	35	20	7	3	29
K-5	30	15	10	10	29
K-6	20	25	10	10	29
K-7	25	25	10	5	29

Oksigen mühitində artan temperatura müvafiq olaraq nümunələrin kütləsində baş verən dəyişiklikləri əks etdirən termoqramimetrik əyrilər qrafik 9-da verilmişdir.



Qrafik 9. Nümunələrin termoqramimetrik əyriləri

Kompozitlərin termiki stabilliyini daha yaxşı qiymətləndirə bilmək üçün temperatur-çəki itkisi əlaqəsinə uyğun olaraq kriteriyalar seçilmiş və həmin kriteriyalara uyğun qiymətlər cədvəl 8-də verilmişdir. Bu kriteriyalar T_0 (dekompozisiyanın başlama temperaturu), T_{10} və T_{20} (müvafiq olaraq 10 və 20% kütlə itkisi üçün temperatur) və T_{mak} (maksimum kütlə itkisi temperatur) ibarətdir. T_0 , T_{10} , T_{20} və T_{mak} qiymətlərinin yüksək olması həmin materialın termiki olaraq daha stabil xarakteristikaya malik olmasını göstərir. Cədvəl 8-dən görüldüyü kimi T_0 , T_{10} , T_{20} və T_{mak} üçün yüksək qiymətlər əsasən K-3 və K-7 nümunələrində olmuşdur. K-7 kompoziti üçün T_{20} və T_{mak} qiymətləri K-3-dən aşağı olsa da 1000°C-də kütlə itkisi K-7 kompozitində daha az olmuşdur. T_{20} və T_{mak} qiymətlərinin aşağı olmasını baritin və mis-qrafitin kt. %-nin az olması ilə, 1000°C-də kütlə itkisinin aşağı olması səbəbini isə silisium dioksid kt. %-nin çox olması ilə izah etmək mümkündür.

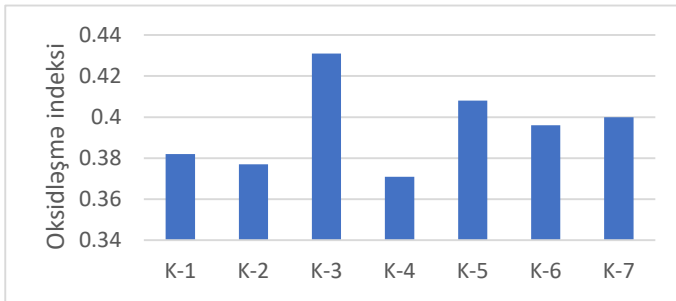
Cədvəl 8.

Çəki itkisinə görə müəyyənləşdirilmiş kritik temperatur nöqtələri

Nümunələr	T ₀ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₂₀ (°C)	T _{mak.} (°C)
K-1	335	363	528	450
K-2	323	367	531	363
K-3	339	352	628	486
K-4	320	398	532	400
K-5	312	399	543	338
K-6	346	423	549	432
K-7	403	419	561	435

Qrafik 8-dəki əyirlərə nəzər salsaq kompozitlərin termiki davamlığı K-3 > K-5 > K-7 > K-6 > K-1 > K-2 > K-4 kimi xarakterizə edilə bilər. Bu isə hansı tərkib komponentlərindən asılı olaraq termiki davamlılığının necə dəyişməsinə aşkara çıxarmağa kömək edir.

Oksidləşmə indeksləri (OI) empirik tənlik əsasında oksigen mühitində 1000°C temperaturadək termoqravimetrik analiz edilmiş nümunələrin yanmış qalıq kütləsinin tərkibindəki karbonlu kömürün miqdarı (K) ilə müəyyənləşdirilmişdir (Qrafik 10).



Qrafik 10. Nümunələrin oksidləşmə indeksləri

Eksperimentlərin sonunda qalıq materialların içərisindən kömürləşən komponentləri təyin etmək çətin olduğundan karbonlu kömürün (K) təqribi qiyməti 25 mq kütləyə uyğun olaraq qrafit, fenolformaldehidin və qliserinin kt. %-lərinə əsasən hesablanmışdır. Fenolformaldehidə kömürləşə biləcək kt. %-i isə molyar kütləyə əsasən hesablanaraq müəyyənləşdirilmişdir. Qrafik 9-dan görüldüyü kimi ən yüksək oksidləşmə indeksləri K-3, K-5 və K-7 nümunəsində olmuşdur.

FK24A (B) materialı ilə təklif olunan kompozisiya nümunəsinin müqayisəsi. Analoji olaraq götürülmüş Retinaks FK-24A (B) (ГОСТ 10851-94) materialından hazırlanmış nümunələrin tribotexniki xassələrini müqayisə etmək üçün sürtünmə sınaqları 300 və 600 N yük rejimlərində aparılmış və sürtünmə əmsalı ilə bərabər xüsusi yeyilmə dərəcəsinin qiymətləri cədvəl 9-da verilmişdir.

Cədvəl 9.

Materialların tribotexniki göstəricilərinin müqayisəsi

Materiallar	Sürtümmə əmsalı (μ_{orta})		Xüsusi yeyilmə dərəcəsi ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)	
	300N	600N	300N	600N
N-1	0.43	0.44	$4,358 \times 10^{-5}$	$5,246 \times 10^{-5}$
Retinaks	0.39	0.32	$4,913 \times 10^{-5}$	$5,876 \times 10^{-5}$

Tribotexniki sınağın nəticələri göstərmişdir ki, Retinaks B (FK-24A) materialı 300 N yük altında daha yüksək sürtünmə əmsalına malikdir. Lakin hər iki halda analoji materialla müqayisədə N-1 nümunəsi daha yüksək triboloji xassələrə malik olmuşdur.

NƏTİCƏ

1. Qazma qurğusunun qaldırma kompleksinin disk-kündə mexanizmindən ibarət əyləc sistemi üçün N-1 markalı yeni friksion kompozisiya materialı alınmışdır.
2. Kompozisiya materialının fiziki xassələrinin artırılmasında əsas amil 25.5 MPa qaynar presləmə təzyiqi, həmçinin sobada qızdırılma vaxtının isə 35 dəq.-dək olması və sürtünmə əmsalının dəyişməsinə təsir göstərən mühüm amil təmas təzyiqi (39%) və sürüşmə sürəti (28.48%), qalanı isə digər amillərdir. Yeyilmə intensivliyi üçün isə ən mühüm amillərin sürüşmə sürəti (52.61%) və təmas təzyiqinin (30.47%) olduğu aşkar edilmişdir.

3. Doldurucu-modifikatorların 2-3 kt.% miqdarında istifadəsi triboloji xassələri yaxşılaşdırdığı, bundan yüksək olduğu halda (7-14 kt.%) isə sürtünmə əmsalını azaltmaqla yanaşı, yeyilməni də artırırıldığı, ~14 kt.%-dək doldurucu-modifikatorun material tərkibində olması səthdə friksion qatın formalaşmasına səbəb olaraq sürtünmə stabilliyi faizini artırdığı sübut olunmuşdur.
4. Tərkibdə baritin miqdarı 24 kt.%-dən yuxarı olan nümunələrdə yeyilmə müqaviməti yüksəlir, mis-qrafitin miqdarı ~7-8 kt.% olduqda, sürtünmə əmsalını yaxşılaşdırır, bundan yüksək olduqda səmərəli sayılmır. Barit və mis-qrafitin birgə qarşılıqlı təsiri sürtünmə əmsalının stabilliyini yaxşılaşdırır. Mis-qrafit 5 kt.% olduğu nümunədə istilik təsirindən təmas səthində yanma-qaralma müşahidə edildiyi halda, 20 kt.% bu effektin özünü göstərməməsi mis-qrafitin istilikkeçiricilik xassəsinin yüksək olması ilə baş verdiyi öyrənilmişdir.
5. 100 µm ölçülü hissəciklərlə hazırlanmış nümunələrlə müqayisədə < 50 µm ölçüdəki hissəciklərlə hazırlanmış kompozitlərdə bərklik, yeyilmə kimi göstəricilərlə yanaşı triboloji göstəricilərin də yüksək olduğu müəyyən edilmişdir.
6. Səthi-aktiv inert sürtgü materiallarından qliserin daha səmərəli hesab edilir və silindrik nümunələr üçün 15-20%, düzbucaqlı nümunələr üçün isə 5-10% intervalında istifadə edildikdə formalaşma prosesini yaxşılaşdırması təsdiq olunmuşdur.
7. Təcrübələr göstərmişdir ki, bütün nümunələrdə sürtünmə əmsalının dəyişməsi ~100 - 500 san. intervalında artan istiqamətdə inkişaf edir. Termiki deqradasiya 330-350°C arasında müşahidə edilmiş, proses bitdikdən sonra 1400-1700 san. ərzində bütün nümunələrdə sürtünmə əmsalının yenidən bərpa olunması effekti baş vermiş, 500-800 san. müddətində sürtünmə əmsalı maksimum qiymətlər almışdır. Fenolformaldehidin kt.%-nin yüksək olduğu P28 (28 kt.%) nümunəsində hər iki xassə: həm sürtünmə əmsalının kəskin azalması, həm də yenidən artması xassəsinin zəif olduğu müəyyən edilmişdir.

8. Temperatur-çəki itkisi əlaqəsi əsasında müəyyən edilmiş meyarlara əsasən fenolformaldehydin 25 kt.% olduğu kompozitlərin termiki stabilliyi ən yüksəkdir. Bütün nümunələr üçün xarakterik olaraq dekompozisiyanın 300-350°C temperaturda baş verdiyi təsdiq edilmişdir.
9. Təklif olunan kompozisiya materialının tribotexniki və termomexaniki göstəricilərinin Retinaks FK24A (B) materialından üstün olduğu sübut olunmuşdur.

Dissertasiya işinin mövzusu üzrə dərc edilmiş elmi əsərlər:

1. Yusubov, F.F. Əliyev Ə.M. Nanotexnologiyalar əsasında hazırlanacaq materialların qaldırma kompleksinin friksion düyünlərində tətbiqinin araşdırılması // Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, - 2015. 2 (96), -s. 53-57.
2. Юсубов, Ф. Ф. Определение оптимального состава фрикционного материала для тормозных колодок буровых установок // - 69-я Международная молодежная научная конференция “Нефть и газ”, – Москва: 14-16 апреля, - 2015. №1, - с.317.
3. Yusubov F.F. Sürtünməyə davamlı kompozisiya materialı // - Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XIX Respublika elmi konfransı, - Bakı: 7-8 aprel, -2015. - s. 177-179.
4. Наибова, Т.М., Аббасова, К.Г., Юсубов, Ф.Ф. Модификация фенолоформальдегидных олигомеров N-метиланилином // Актуальные Проблемы Гуманитарных и Естественных Наук, - Москва: - 2016. 2 (85) - с. 53-56.
5. Юсубов, Ф. Ф. Новый подход изготовления тормозных колодок для буровых установок // VI Международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы науки XXI века”, – Москва: 30 января. – 2016. - с.130-132.
6. Yusubov, F.F. Yeni növ friksion materialların qazma avadanlıqlarında tətbiq imkanları // Doktorantların və gənc

- tədqiqatçıların XX Respublika elmi konfransının materialları, - Bakı; 24-25 may, - 2016., - s.358-360.
7. Yusubov, F.F., Əliyev Ə.M. Metal təbəqələr üçün yarışmayan sürüşkən nanoörtüklərin hazırlaması // “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri” beynəlxalq elmi konfransı, - Gəncə; 04-05 may, - 2017. - s. 70-72.
 8. Yusubov, F.F. Nanoölçülü hissəciklərdən istifadə etməklə friksion materialların davamlılığının artırılması // “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri” beynəlxalq elmi konfransı, - Gəncə; 04-05 may, - 2017. - s. 79-82.
 9. Юсубов, Ф. Ф. Сравнительное исследование выбора состава стойких фрикционных материалов в условиях сухого трения // Наука, Техника и Образование, - 2017. 6 (36), - с.58-62.
 10. Юсубов Ф. Ф., Гулиев А. А. Методы улучшения триботехнических свойств полимерных фрикционных материалов в узлах трения и исследование основных направлений // Нефтегазовые Технологии и Аналитика, - 2017. №8, - с.78-82.
 11. Yusubov, F.F. Effect of nanoparticles on mechanical and tribological properties of composite friction materials // Turkic world conference on chemical sciences and technologies (3rd ITWCCST), - Baku: 10-13 september, - 2017. - p.184.
 12. Yusubov, F., Gasimov, Z., Gayibov, R. [və b.]. Development of surface hardening by fine-particle bombardment method // Turkic world conference on chemical sciences and technologies (3rd ITWCCST), - Baku: 10-13 september, - 2017. - p.183.
 13. Юсубов, Ф. Ф. Характеристика фрикционного износа композиционных материалов с неметаллической матрицей в условиях эксплуатации // XI International Scientific Conference International Innovation Research, - 2017. №1, - Пенза: 12 октября, МЦНС «Наука и Просвещение», - с. 78-81.
 14. Юсубов, Ф. Ф. Влияние теплового режима на триботехнические свойства пар трения нефтяных буровых установок // XII International Scientific Conference European Research, - Пенза: 7 октября, - 2017. - Пенза, МЦНС «Наука и Просвещение», - с. 41-44.

15. Yusubov F.F. Nanohissəciklərin material strukturunda formalaşdırdığı dəyişikliklərin xassələrə təsirinin tədqiqi // Ekoenergetika, - 2017. № 3, - s. 68-75.
16. Юсубов, Ф. Ф., Nəsimov Ş. Lifli struktura malik metal əsaslı nanokompozisiya materiallarında matris xassəsi təsirləri. Koordinasion birləşmələr kimyası: analitik kimyanın aktual problemləri, Akademik Rəfiqə Əliyevanın 85 illik yubileyinə həsr olunmuş beynəlxalq elmi konfrans, BDU, Bakı 2017, səh.258-260.
17. Yusubov, F.F. Effect of nanoparticles on mechanical and tribological properties of composite friction materials. International Journal of Chemistry and Technology // - 2017. 1 (1), - p.30-36.
18. Yusubov, F.F. Friksion düyünlər üçün nanostruktura malik kompozisiya materiallarının triboloji xarakteristikası // Ekoenergetika, - 2018. № 3, - s. 151-157.
19. Юсубов Ф. Ф. Исследование триботехнической эффективности наноструктурных фрикционных материалов для тормозных систем. // II Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, - Краснодар: 31 марта, – 2018. - с.105-107.
20. Юсубов, Ф. Ф. Изучение термомеханических свойств трения пар металл-полимер // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), - 2018. № 2, - с.197-201.
21. Юсубов, Ф. Ф. Разработка безасбестовых фрикционных материалов в тормозных механизмах нефтебуровых лебедок // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии”, - Курск: 24-26 сентября, - 2018. - с.28-33.
22. Юсубов, Ф. Ф. Анализ асбофрикционных материалов для лебёдок буровых установок и подъёмных агрегатов // Журнал Технических Исследований, ИНФРА-М, -2018. 4(3). - с.29-36.
23. Yusubov, F.F. Qazma avadanlığının termomexaniki yeyilməyə məruz qalan hissələrinin davamlılığının artırılması // Azərbaycan Neft Təsərrüfatı, - 2018. №. 9, - s. 56-62.

24. Yusubov, F.F. Sürtünmə prosesində kontakt səthlərində formalaşan mikroqatların analizi // Ekoenergetika, - 2019. № 3 - s. 43-47.
25. Юсубов, Ф. Ф. Определение оптимальных параметров получения гомогенный смесей для твердотельных компонентов // III Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, №5, - Краснодар: 31 марта, - 2019. - с.68-72.
26. Юсубов, Ф. Ф. Изучение процессов в изделиях происходящих при формования и спекания // Теоретический и практический потенциал современной науки. Сборник научных статей, №3, - 2019. - с.80-86.
27. Юсубов, Ф. Ф. Анализ методов изготовления материалов для узлов трения и возможности повышения износостойкости // Журнал Естественныхнаучных Исследований, Academus Publishing, - 2019. 4 (3). - с. 7-13.
28. Əliyev, Ə.M., Yusubov, F.F. Mexanolegirlənmiş kompozitlərin alınması və quru sürtünmə şərtlərində friksion-yeyilmə xarakteristikasının eksperimental tədqiqi // Avadanlıqlar.Tehnologiyalar.Materiallar, - 2019. №,. - s. 32-38.
29. Юсубов Ф. Ф. Влияние технологические параметры прессования на физические свойства многокомпонентный композиты // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник), - 2019. № 3, - с.214-218
30. Yusubov, F.F. Friksion kompozitlərin yeyilmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi // “Kimya texnologiyası və mühəndisliyinin innovativ inkişaf perspektivləri” adlı beynəlxalq elmi konfrans, - Sumqayıt: 28-29 noyabr, - 2019. - s.308-312.
31. Yusubov, F.F. Qazma qurğusunun bucurqad sistemi üçün hazırlanmış əyləc kəndəsi materiallarının tribotexniki tədqiqi // Ekoenergetika, - 2019. № 4, - s. 18-22.
32. Yusubov, F.F., Quliyev, Ç.H., Əmirmətova, K.V. Bərk sürtkü materiallarının friksion kompozitlərin sürtünmə davranışına göstərdiyi təsirlər // “Maqnitiumşaq ərintilərin informasiya texnologiyalarında və hərbi sənayedə tətbiqi perspektivləri” adlı

- beynəlxalq elmi-praktik konfrans, 09-10 oktyabr, - 2019. - s.189-193.
33. Yusubov, F.F. Çoxkomponentli sistemlər üçün mexaniki legirləmə rejimlərinin seçilməsi və bərabər paylanmanın ölçülməsi // Elmi Xəbərlər. Təbiət və Texniki Elmlər Bölməsi, - 2020. 20 (4), - s.46-50.
 34. Yusubov, F. F. Dry friction behavior of barite-containing composites in a pair with steel // Refractories and Industrial Ceramics, - 2020. 60 (6), - p. 595-598
 35. Yusubov, F. F. Influence of surface structure of sintered compositions with copper–graphite particles on their tribotechnical properties // Friction and Wear, - 2020. 41 (2), - p.167-172.
 36. Юсубов, Ф. Ф. Влияние поверхностно-активных смазочных материалов на процесс формования // - IV Международной научно-практической конференция “Булатовские Чтения”, №6, - Краснодар: 31 марта, - 2020. - с.237-240.
 37. Юсубов, Ф. Ф. Исследование термомеханических свойства фрикционных композиций полученных методом порошковой металлургии // - “Müasir kimyanın problemləri və inkişaf tendensiyaları” Respublika elmi-praktik konfransı, - Bakı: 12 dekabr, - 2020. - s.131-135.
 38. Yusubov, F. F. Measurements of friction and wear of the powder composite materials using a Pin-on-Disc mechanism // Refractories and Industrial Ceramics, - 2021. 61 (5), - p. 540-543
 39. Yusubov, F.F., Hurey, I.V. Influence of temperature on the tribological properties of composites for brake pads // Materials Science, -2021, 57(2), - p.221-227.
 40. Yusubov, F. F. Modeling the hardness and porosity of brake pad materials // Equipment, Technologies, Materials, - 2021. 5 (1), - p.28-34.
 41. Yusubov, F. F. Frictional heat simulation of brake composites in a pin-on-disc tribotesting // Nano Hybrids And Composites, - 2021. №32, - p. 63-71.

42. Yusubov, F.F. Influence of particle size on the functional properties of brake-pad composites // Russian Engineering Research, - 2021, 41 (8), - p. 706–709.
43. Yusubov, F. F. Optimum design of brake friction composites // Jurnal Tribologi, Malaysian Tribology Society, -2021, №30, - p.133-148.
44. Yusubov, F.F. Wear studies on phenolic brake-pads using Taguchi technique // Tribology in Industry, -2021, 43 (3), - p. 489-499.
45. Yusubov, F.F. Thermal behavior of N-Methylaniline modified phenolic friction composites // Polymers and Polymer Composites, SAGE, - 2021, - p. 1-8.
46. Yusubov, F.F. Tribological behavior of modified phenolic resin composites for braking applications // Industrial Lubrication and Tribology, Emerald Publishing, -2021, 73 (5), - p. 775-782.
47. Yusubov, F. F., Aliyev A.M. Temperature distribution in a drilling brake contact// Jurnal Tribologi, Malaysian Tribology Society, -2021, №31, - p.28-45.

Həmmüəlliflərinə yerinə yetirilən işlərdə iddiaçının şəxsi əməyi:

[1], [4] – Məsələnin qoyuluşu, alınan nəticələrin təhlili;
[12], [16], [28], [32], [39], [47] – müstəqil yerinə yetirilib.

Dissertasiyanın müdafiəsi « 08 » __04__ 2022-ci il tarixində saat 13⁰⁰-da Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.02 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1010, Bakı şəhəri, Azadlıq prospekti 34.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat « 07 » __03__ 2022-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 06.03.2022

Kağızın formatı: A5

Həcm: 36501

Tiraj: 100 nüsxə