

SEM Investigation of Microlayer Formation and Study of Wear Mechanism in Friction Composites

F.F. Yusubov

Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave, 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

For correspondence:

Yusubov Fikrat / e-mail: fikratyusub@gmail.com

Abstract

The paper is devoted to the study of wear surfaces of friction composite materials obtained by powder metallurgy. A scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (XRD) is used to study changes in contact surfaces under various friction conditions and the nature of the microlayer. The results show that oxidation wear is characteristic of almost all stages. The sequence of formation of frictional microlayers is also determined.

Keywords: composites, friction, wear, degradation, oxidation, adhesion, microlayers.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_55_63

Received	08.02.2022
Revised	20.06.2022
Accepted	25.06.2022

For citation:

Yusubov F.F.

[SEM investigation of microlayer formation and study of wear mechanism in friction composites]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 55-63 (in Azerbaijani)

Friksion kompozitlərdə mikrotəbəqləşmənin SEM vasitəsilə tədqiqi və yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsi

F.F. Yusubov

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı , AZ1010, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Yusubov Fikrət / e-mail: fikratyusub@gmail.com

Xülasə

Məqalə ovuntu metallurgiya metodları ilə hazırlanmış friksion kompozisiya materialların yeyilmə səthlərinin araşdırılmasına həsr edilmişdir. Müxtəlif sürtünmə rejimlərində təmas səthlərində baş verən dəyişiklikləri və mikrotəbəqləşmənin xarakterini öyrənmək üçün enerji-dispers X-ray spektrometri (XRD) ilə təchiz olunmuş skanedici elektron mikroskopdan (SEM) istifadə edilmişdir. Əldə edilmiş nəticələr oksidləşmə yeyilməsinin təqribən bütün mərhələlər üçün xarakterik olduğunu göstərmişdir. Həmçinin friksion mikrotəbəqləşmənin formalaşma ardıcılığı müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: kompozitlər, sürtünmə, yeyilmə, degradasiya, oksidləşmə, adgeziya, mikrotəbəqləşmə.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_55_63

УДК: 621.891: 622.67

Исследование формирования микрослоев с SEM и изучение механизмов износа во фрикционных композитах

Ф.Ф. Юсубов

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Азадлыг пр. 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Для переписки:

Юсубов Фикрат / e-mail: fikratyusub@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена исследованию поверхностей износа фрикционных композиционных материалов, полученных методом порошковой металлургии. Растровый электронный микроскоп (SEM), оборудованный энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (XRD), был использован для изучения изменений контактных поверхностей при различных режимах трения и природы микрослоя. Результаты показали, что окислительный износ характерен практически для всех этапов. Также была определена последовательность формирования фрикционных микрослоев.

Ключевые слова: композиты, трение, износ, деградация, окисление, адгезия, микрослои.

Giriş

Friksion temperatur sürtünmə əmsalına təsir göstərən əsas faktorlardan biridir [1]. Bərk cisimlər arasında sürtünmə zamanı materialların təmas səthləri arasında elastik və plastik deformasiyanın baş verməsi istiliyin yaranması ilə nəticələnir [2]. Yaranmış yüksək temperatur qradienti səthə perpendikulyar istiqamətdə paylanır. Yüksək temperaturlarda termiki degradasiyanın baş verməsi tətbiq edilən qüvvəni azaldaraq sürtünmə əmsalını aşağı salır. Bunun əsas səbəbi sürtünmə zamanı yaranan enerjinin böyük bir hissəsinin istilik enerjisinə çevrilməsiylə materialların təmas səthinin deformasiya və dağılmasına gətirib çıxarması ilə əlaqədardır [3]. Yüksək təzyiq və temperatur təmas səthlərinin morfologiyası və kimyəvi strukturuna təsir etməklə, sürtünmə prosesinin müxtəlif mərhələlərində yeni qatlar formalaşır və yenidən dağıla bilər [4]. Təbiidir ki, yeyilmə prosesi baş verən müddətdə səthlərin geometriyasının dəyişməsi sürtünmə fəaliyyətinə ciddi təsir göstərir. Nümunələrin səthində baş verən dəyişiklikləri müəyyənləşdirmək üçün sürtünmə səthləri SEM-lə tədqiq edilmiş, formalaşmış friksion qatların kimyəvi tərkibləri enerji dispers X-ray spektroskopiyaya - element tərkibi analizi (XRD) vasitəsilə araşdırılmışdır. Friksion qatların tədqiq edilməsi kompozisiya materiallarının friksion fəaliyyətini, yeyilmə mexanizmlərini qiymətləndirməyə kömək etmişdir. SEM təsvirlərinin alınması üçün $<9.0 \cdot 10^{-3}$ Pa vakuum təzyiqindən istifadə edilmişdir. Araşdırma üçün barıt 25%, fenolformaldehid 25%, vollastonit 5%, aliminum dioksid 7%, qurğuşun 10%, qalay 10%, silisium dioksid 7%, mis-qrafit 8% və əlavə olaraq hərəsindən 1 kt.% olmaqla tunc qırıntıları, molibden disulfid, maqnezium oksid tərkibli və az miqdarda plastifikator (qliserin) qatılmış kompozitdən istifadə edilmişdir.

İşin məqsədi

Sürtünmə prosesində friksion əyləc kündəsi materiallarının təmas səthlərində mikrotəbəqləşmənin formalaşması, onların triboloji xassələrə təsirlərinin müəyyənləşdirilməsi və yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsi.

Məsələnin qoyuluşu

Tədqiq olunan materialların səthlərində baş verən dəyişiklər müxtəlif sürtünmə rejimlərində aparılmış sınaqlara əsasən araşdırılmışdır. Sürtünmə sınaqları “barmaqciq-disk” mexanizmi üzrə (vertikal sürtünmə maşını MMW-1) 2000 dövr/dəq sürətlə, 1000 N yüklə 200, 1100 və 2500 san. müddətlərində aparılmış və alınmış nəticələr müqayisə edilmişdir. 1100 və 2500 san. müddətində aparılan sınaqlarda səth temperaturu müvafiq olaraq ~ 320 və $>360^\circ\text{C}$ təşkil etmişdir. 200 san. müddətində aparılmış sınaqlarda temperatur aşağı olduğundan səthlərdə istilik amili ilə bağlı nəzərə çarpacaq dəyişiklik baş verməmişdir. Seçilmiş sınaq müddətlərində təmas səthlərində baş verə biləcək dəyişikliklər mümkün degradasiya, oksidləşmə və digər termiki proseslərə əsasən seçilmişdir.

Məsələnin həlli

MMW-1 qurğusunda seçilmiş sınaq müddətləri üçün aparılmış triboloji sınaqların nəticələri cədvəl 1-də verilmişdir.

Yeyilmə intensivliyinin hesablanması da aşağıdakı düsturdan istifadə edilmişdir:

$$J = \frac{m_1 - m_2}{\tau}$$

Burada, m_1 və m_2 müvafiq olaraq yeyilmədən əvvəl və sonra olan kütlə (qramla), τ - eksperimentin müddəti (saatla), J - isə yeyilmə intensivliyidir (q/saat).

Cədvəl 1 – Müxtəlif vaxt rejimlərində aparılmış sürtünmə sınaqlarının nəticəsi

Table 1 – Results of friction tests performed at different time modes

Vaxt (san.)	Yeyilmə intensivliyi (q/saat)	Sürtünmə əmsalı (μ)	
		maks.	min.
200	0.002	0.34	0.26
1100	0.007	0.46	0.32
2500	0.010	0.29	0.25

Tribolji sınaqların nəticələri yeyilmə intensivliyinin 1100 san. müddətində sürtünmədə daha yüksək olduğunu göstərmişdir ki, bu da təqribən 350°C-dək baş verən deqradasiya və dekompozisiya ilə bağlıdır. Təbiidir ki, sür-

tünmə müddətinin çox olması yeyilmənin də çoxalması deməkdir. Sürtünmə əmsalının maksimum və minimum qiymətlərinin fərqli olması da, məhz deqradasiya və dekompozisiya mexanizmlərindən asılı olaraq sürtünmə səthlərinin dağılma və formalaşmasıyla əlaqəlidir.

Apardığımız araşdırmalar mühit şəraitlərindən və materialın əyləmə fəaliyyətindən asılı olaraq 3 əsas xarakterik friksion qatın formalaşdığını göstərdi: ilkin mərhələdə formalaşan əlavə qat, deqradasiya nəticəsində yaranan qat və ya qaz qatı və oksidləşmə qatı (cədvəl 2).

Cədvəl 2 – Nümunələrdə aşkar edilmiş friksion qatların mümkün formalaşma mərhələləri

Table 2 – Stages of possible formation of friction layers found in the specimens

Mərhələlər (°C)	İlkin qat	Deqradasiya qatı	Oksidləşmə qatı	Bərk sürtkü qatı	Abraziv qat	Qaz qatı
25-250	+		+	+	+	-
250-350	-	+	+	+	+	+
350-1000	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-

(+ iştirak edir, -iştirak etmir, +/- isə hər iki varinatın mümkünlüyünü bildirir)

Əlavə qat sürtünmənin ilkin mərhələsində mexaniki təsirlərdən formalaşır. Friksion temperaturun artması ilə oksidləşmə və digər qatlar formalaşmağa başlayır [5]. Müşahidə edilən əsas qatlardan əlavə ehtimal olunan digər qatlar da cədvəldə qeyd edilmişdir. Sürtünmə cütləri hava mühiti ilə daim təmasda olduğu üçün oksidləşmə prosesi sürtünmənin ilkin dövründən başlayır. Lakin kövrək olduqları üçün yüksək temperaturlarda bu qatın qalması ehtimalı aşağıdır və bu səbəbdən cədvəldə “+/-” işarəsi ilə verilmişdir. Bərk sürtkü və abraziv komponentlərin yaratdığı qatlar da ilkin mərhələlərdən başlayır, lakin yüksək tem-

peraturlara davam gətirməsi ehtimal edilə bilər.

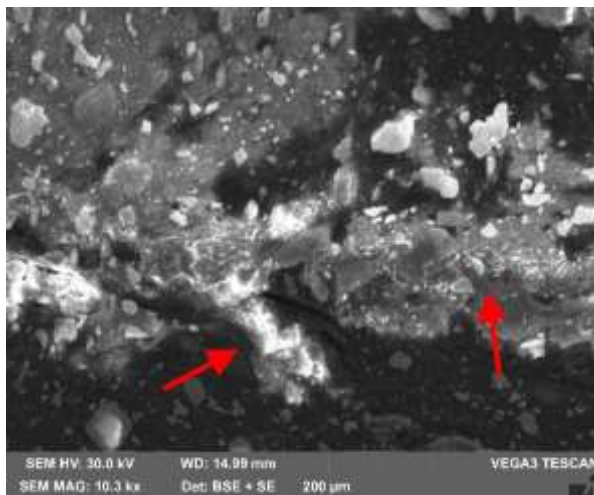
İlkin qatlar. Məlumdur ki, təmas materiallarının səthlərində baş verən yeyilmə və müxtəlif fiziki-kimyəvi proseslərin xarakteri həmin materialların səth hamarlığı ilə əlaqəli olan bir prosesdir. Normal yük verildikcə nümunənin səthi diskin səthinə doğru sıxılır və hər iki səthdə olan nahamarlıqlar bir-birinə keçir [6]. Diskin bərkliyi kompozitin bərkliyindən çox yüksək olduğundan yüksək sürətlə fırlanma hərəkətində nümunənin yeyilməsi baş verir və nümunədən qopmuş hissəciklərin bir çoxu təmas səthində qalaraq yenidən fırlanma hərəkətinə qoşulur. Dövrələrin sayı artdıqca,

yeyilmiş hissəciklər getdikcə deformasiyaya, əzilməyə və sıxılmaya məruz qalaraq yeni bir qat formalaşır.

Yeni sürtünmə və yeyilmə prosesinə ciddi təsir göstərir. Sürtünmə qüvvəsi yalnız həqiqi təmas sahələrinə təsir edir. Nümunələrin səthindəki həqiqi təmas sahələri ümumi sahə ilə müqayisədə çox aşağı olur və disklə təmas əsasən bu sahələrlə baş verir. Diskin fırlanması ilə deformasiya və yeyilmə nəticəsində həqiqi təmas səthlərinin dəyişikliyə uğraması titrəmələrə səbəb olur ki, bu da materialların sürtünmə fəaliyyətində öz əksini tapır. Təzyiq, temperatur, deformasiya və yeyilmənin dəyişməsi həqiqi təmas sahəsinin ölçüsünə təsir göstərir.

Şəkil 1-də kompozitin səth təsvirində həqiqi təmas sahələri qeyd edilmişdir.

Sürtünmənin başlanğıcında hələ kələ-kötür formada olan bu hissələrdə dövrlərin sayı artıqca hamarlaşma başlayır və sürtünmə müəyyən qısa zaman kəsiyində stabil artımla davam edir. Lakin burada, abraziv hissəcik faktoru da müəyyən təsirlərə malikdir.



(Oxlar həqiqi təmas sahələrini göstərir)

Şəkil 1 – Həqiqi təmas sahələrinin SEM görünüşü
Figure 1 – SEM view of real contact areas

Tərkibdə olan Al_2O_3 və SiO_2 kimi abraziv komponentlər sürüşmə yeyilməsinə qarşı müqavimət yaratmaqla yanaşı həqiqi təmas sahələrinin formalaşmasında mühüm rolə malikdirlər. Lakin abraziv hissəciklər sürtünmə xassəsini yaxşılaşdırsalar da yeyilmənin artmasına xidmət edir. Metal qatı ilə disk arasında adgeziya qüvvəsi metal qatı ilə nümunə arasında olan qüvvədən üstün olduqda metal qatı adgeziv və abraziv yeyilmə ilə dağılacaqdır. Nümunənin sürtünmə səthi sahəsinin sərt dənəvərcikləri əyləc diskinin üst səthində cızıqlara yol açır. Polad diskin sürtünmə səthinin sərt zirvələri də həmçinin əyləc kündəsinin incə səthində cızıqlar yaradır. Toqquşma həm də iki sərt birləşmə arasındakı sürtünmə prosesində də yaranır. Sərt dənəvərciklərlə əyləc kündəsinin arasındakı birləşmiş güc diskin sərt nöqtələrini qopardan gücdən zəif olduqda müxtəlif mexaniki təsirlər nəticəsində əlaqənin itirilməsindən növbəti hissə yaranır. Bu isə müvafiq olaraq sürtünmə cütünün, xüsusilə də əyləc kündəsinin yeyilməsini çətinləşdirir. Bu mərhələdə, aşağı temperatur yarandığından, yeyilmə sahəsində üst səth qabığı olur.

Lakin sürtünmə şərtlərindən asılı olaraq abraziv yeyilmə mexanizmi fərqli xarakter də daşıya bilər. Belə ki, funksional doldurucu kimi tərkibə qatılmış vollastonit materialından ibarət hündür nahamar sahələr təmas zamanı diskin daha sərt nahamar hissələri ilə toqquşaraq yeyilir. Yeyilmiş hissəciklər müəyyən bir vaxt müddətində ya diskin səthinə yapışaraq qalırlar, yaxud da disklə kündə arasında qalaraq sürtünmə prosesində iştirak edirlər. Lakin friksion istilik təsirlərindən əlaqələndirici (fenolformaldehid) öz funksiyasını itirdikcə, səthdə qalan komponentlər də yumşalaraq hissəciklərə yarılaraq abraziv yeyilmədə iştirak edirlər [7].

Bərk sürtkü materiallarının yaratdığı qat. Friksion qatın formalaşması səthlərin termiki fəaliyyəti ilə yanaşı tərkib elementlərindən də asılıdır. Yüksək təzyiq və temperatur təsirləri altında friksion qatın formalaşmasında üzvi elementlər, liflər və xüsusilə də bərk sürtkü materialları böyük rola malikdir [8]. Bərk sürtkü materialları həm kompozitin, həm də diskin təmas səthinin həddən artıq yeyilməsinin qarşısını ala bilər. Həmçinin bərk sürtkü materialları əyləmə prosesində yaranan səs-küyün və vibrasiyanın aradan qaldırılmasında əsas vasitələrdən biri hesab olunur. Təklif olunan kompozisiya materiallarında friksion qatın formalaşmasında molibden disulfid, qrafit kimi bərk sürtkü materiallarının da iştirakı ilə yanaşı misin də bərk sürtkü rolunu oynadığı məlumdur. Friksion istilik nəticəsində mis səthdə bərk sürtkü materialı rolunu oynayaraq mis qatı yaradır [9].

Şəkil 2-də 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunənin SEM vasitəsilə çəkilmiş səth təsvirləri verilmişdir. Təsvirlərdən göründüyü kimi sürtünmə səthinin struktur forması ilkin səthdən fərqli olaraq çoxsaylı kiçik sahələrə dolmuşdur. Bu fenolformaldehidin deqradasiyası nəticəsində sərbəst fenolun ayrılması ilə əlaqədardır. Səthdə olan hissələrdən əlavə, daxili zonalardan çıxan formaldehid səthlə yeni sahələr yaratmışdır ki, bu da sürtünmənin kəskin aşağı düşməsinə səbəb olan xassəni formalaşdırır. 1100 san. müddətində aparılmış sınaqlarda sürtünmə əmsalının maksimum və minimum qiymətləri arasındakı kəskin fərq bu səbəbdən olmuşdur (cədvəl 1).

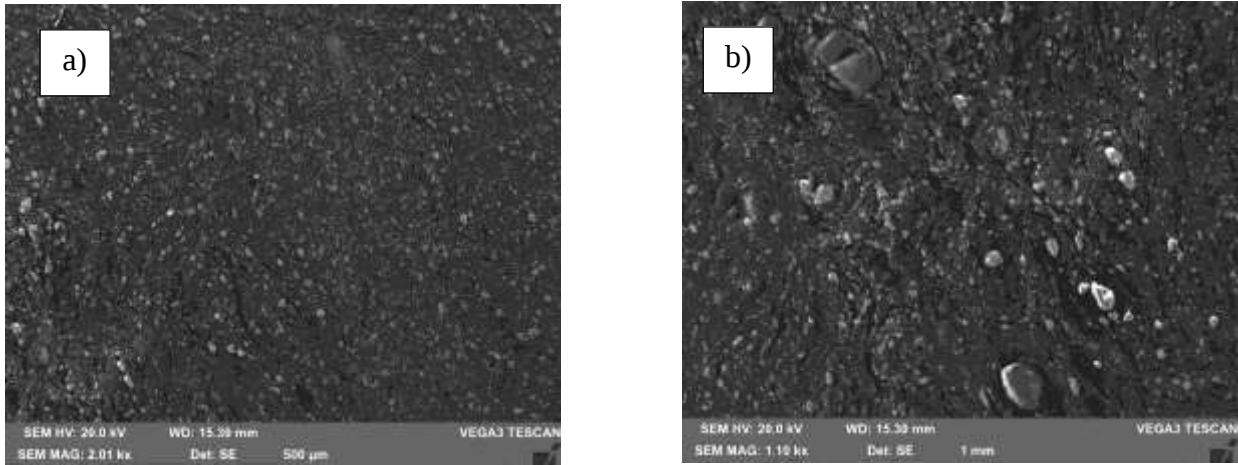
Bütün bunlarla yanaşı sürtünmənin ilkin fazasında, friksion materialların tərkibindəki üzvi komponentlərin termiki deqradasiyası nəticəsində özlərindən qazlar (CO , CO_2 , CH_4 və H_2) buraxırlar. Bu qazlar sürtünmə səthləri tərəfindən adsorbsiya edilə bilmədikləri üçün

qaz qatı əmələ gətirirlər. Bu qaz qatı xarici sürtünmə səthində sürtkü rolunu oynayaraq sürtünməni azaldır [10].

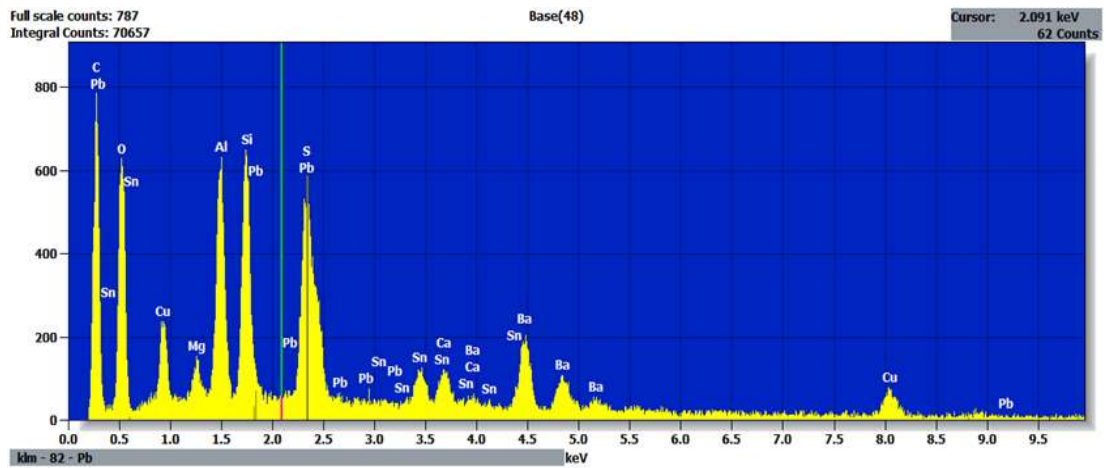
Deqradasiya nəticəsində yaranan qat

Şəkil 3-də müxtəlif rejimlər tədqiq edilmiş nümunələrin səthlərinin kimyəvi quruluşu haqqında məlumatlar verilmişdir. Təmas səthində əmələ gələn istilik təsirindən sürtünmə prosesində friksion qat formalaşır. Buna görə də sürtünmə cütlərinin ilkin səthinin kimyəvi xüsusiyyətləri sürtünmədən sonrakı səthdən fərqli olmuşdur. Şəkildə əsas nəzərə çarpan məqamlardan biri C və O_2 elementlərinin 1100 və 2500 san. sınaq müddətlərində fərqli olmasıdır. Bu sürtünmə səthlərində termiki təsirlərdən baş verən dəyişiklikləri izah etməyə kömək edir. Şəkil 4-də XRD qrafikində şəkil 3-də verilmiş qrafikdən fərqli olaraq karbon fazaların çoxluq təşkil etməsinin əsas səbəbi 400°C -dən sonra formaldehidin karbonlaşması ilə bağlıdır. Sürtünmə əmsalının kəskin enməsi və yenidən yüksəlməyə başlaması, yeyilmə kimi göstəricilər hamısı friksion qatın xarakterindən çox asılıdır.

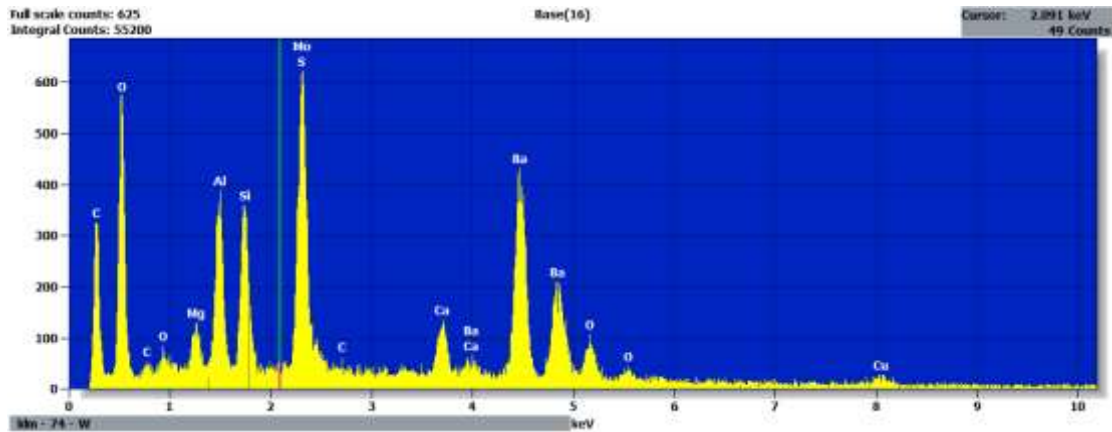
Friksion qatın formalaşmasının ən mühüm xüsusiyyəti isə sürtünmə əmsalının stabilliyini artırmasıdır. Belə ki, yeni qatın formalaşması yeni təmas səthlərini formalaşdıraraq sürtünmə xarakteristikasını stabilləşdirməklə yanaşı, həm yeyilmənin qarşısını alır, həm də səs-küyün aradan qalxmasında da yardımçı olur. Friksion qatın formalaşma prosesi çox mürəkkəb prosesdir və sürtünmə səthlərinin termiki parametrlərindən asılı olaraq müxtəlif xarakterə malik ola bilər. Sürüşmə sürəti, təmas təzyiqi və temperatur amilindən asılı olaraq friksion qatın mikrostrukturunu fərqli ola bilər. 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunənin səthinin element tərkibi sürtünmədən əvvəlki element tərkibindən fərqli çıxmışdır.



Şəkil 2 – Nümunənin sürtünmə sınaqlarından a) əvvəl və b) sürtünmənin ilkin mərhələsində səth təsvirləri.
Figure 2 – Surface images of the sample a) before friction tests and b) at the initial stage of friction.



Şəkil 3 – 1100 san. müddətində aparılmış sürtünmə səthinin XRD analizi
Figure 3 – XRD analysis of the friction surface performed in 1100 sec.



Şəkil 4 – 2500 san. müddətində aparılmış sürtünmə səthinin XRD analizi
Figure 4 – XRD analysis of the friction surface performed in 2500 sec.

Bu dəyişikliyin səbəbini fenolformaldehydin 200-320°C temperaturda deqradasiyaya uğramasıyla izah etmək olar.

Şəkil 5-də verilmiş təsvirdə ayrıca mis qatlarına rast gəlinməyə də, oksigenlə zəngin sahələrdə mis elementinə rast gəlinmişdir. Yüksək temperaturlarda səthdəki nanokristalların yenidən kristallaşması nəticəsində kövrək friksion qat formalaşır ki, bu da bir növ qrafitdə olduğu kimi yeni qat formalaşdıraraq bərk sürtkü rolunu oynayır. Friksion qat sürtünmə əmsalını azaltsa da, nəticə etibarilə disk və kündənin təmas sahəsindən ayrılan digər material hissəciklər ilə qarışaraq, triboloji xassələrin stabilləşməsinə səbəb olur. Bu qatın formalaşması adgeziya yeyilməsini aşağı salır və sürtünmə əmsalını stabilləşdirir.

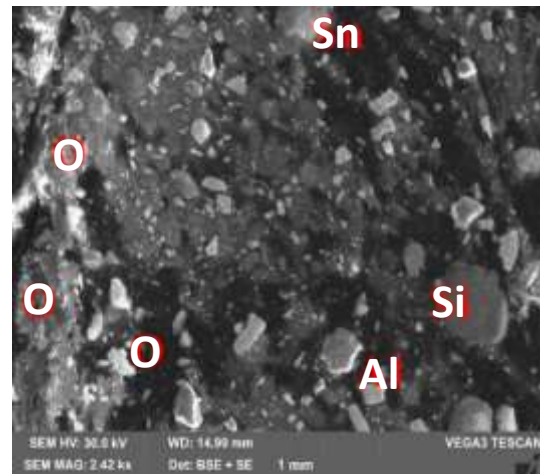
Oksidləşmə qatı

Şəkil-5-də 2500 san. müddətində SEM-lə çəkilmiş təsviri verilmişdir. Sürtünmə səthlərinin XRD analizi oksigenlə zəngin sahələrin çoxluğunu göstərmişdir. Həmçinin səthdə C, O₂, Si və Al kimi elementlərə də rast gəlinmişdir. Bu bütün nümunələrdə oksidləşmə yeyilməsinin çoxluq təşkil etdiyini göstərmişdir (şəkil 4).

Yüksək temperatur və sürət rejimində materialların səthi dərhal havadakı oksigenlə reaksiyaya girərək oksidləşmə qatı əmələ gətirir. Sürtünmə sınaqları zamanı nümunələr açıq hava ilə təmasda olduğundan artıq ilkin mərhələlərdən başlayaraq metal komponentlərinin oksidləşməsi baş verir. Sürtünmə cütlərinin sürtünmə və yeyilmə xarakteristikası, təmas sahələrinin formalaşması, dağılması və inkişafı, forma adaptasiyası, termiki deformasiya kimi proseslərdən çox asılıdır. Friksion istilik materialın oksidləşməsinə, termiki möhkəmliyinə və plastikliyinə təsir göstərir. Bu isə səth strukturunun dəyişməsinə (sürtünmə səthində

atom və ya molekulların diffuziya və adsorbsiyası) və faza çevrilmələrinə səbəb olur.

Dəyişmələr nəticəsində səthlər arasında qarışıqlıqlı təsirin dəyişməsi quru sürtünmə fəaliyyətinə də öz təsirini göstərir. Oksidləşmə qatı çox kövrək olur və sürtünmə qüvvəsinin təsiri ilə çox keçmədən dağılma və yeyilməyə məruz qalır. Oksidləşmə qatının yeyilməsi qatın bərkliyi ilə kompozitin bərkliyi arasındakı asılılıqdan asılıdır.



Şəkil 5 – Yeyilmə səthinin SEM təsviri və çoxluq təşkil edən elementlərin paylanma sahəsi

Figure 5 – SEM images of the worn surface and the area of distribution of the dominant elements

Friksion qatın bərkliyi kompozitin bərkliyindən nə qədər az olarsa, yeyilmə də bir o qədər çox olacaqdır. Oksidləşmə qatı friksion materialın səthini əksicim materialının təmasından qorumaqla yeyilmənin müqavimətini artırmasından əlavə sürtünmənin də azalmasına səbəb olur. Oksidləşmə qatı həm də friksion materialın səthini əksicim materialının təmasından qorumaqla, sürtünmə əmsalını azaldır və yeyilmənin müqavimətini isə artırır. XRD analizinin nəticələrinə əsasən müxtəlif vaxt müddətlərində aparılmış sınaqlara müvafiq olaraq temperatur dəyişməsinə görə yeyil-

mə səthlərinin element tərkibi şəkil 3-də verilmişdir.

Nəticə

Təcrübələr verilmiş tərkib üçün sınaq rejimlərindən asılı olaraq əsasən üç potensial friksion qatın formalaşdığını göstərdi: ilkin mərhələdə formalaşan əlavə qat, degradasiya nəticəsində yaranan qat və ya qaz qatı, oksidləşmə qatı. Yeyilmə intensivliyi 1100 san.

müddətində daha yüksək olmuş və oksidləşmə yeyilməsi təqribən bütün mərhələlər üçün xarakterik olmuşdur. Eyni zamanda, 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunələrdə friksion istiliyin 320-340°C çatmaqla üzvi komponentlərin degradasiyaya uğradığını və 2500 san.-dən sonra 340-400°C həddinə çatmaqla fenolformaldehidin karbonlaşması təsdiq edilmişdir.

REFERENCES

1. **Janahmadov A.Kh., Pirverdiev, E.S., Volchenko A.I. [i dr.].** Uzly treniya v mashinostroenii. Baku: Elm, 2018. - 440 s. (in Russian).
2. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Javadov M.Yu. [i dr.].** Vliyaniye vlazhnosti na ekspluatatsionnye parametry tribospleleniya tormoznykh mekhanizmov i ih udalenie s poverhnostey // *Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii*, 2019. T. 11, №2, s.15-22 (in Russian)
3. **Sugozu K.B.** Friction and wear properties of friction materials containing nano/micro-sized SiO₂ particles // *Industrial Lubrication and Tribology*, 2016. Vol. 68 (2), pp.259–266 (in English)
4. **Piyush C.V., Rodica C., Andrea B.** [et al.]. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material // *Wear*, № 346-347, pp. 56-65 (in English)
5. **Xiao X., Yin Y., Bao J.** [et al.]. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 8(5), 2016. Pp.1-10 (in English)
6. **Guanchen L., Xiaoliang S., Yuchun H.** [et al.]. Effects of friction layer characteristics on the tribological properties of Ni3Al solid-lubricating composites at different load conditions // *Materials Research Express*, 2018. Vol. 5 (5), pp.1-10 (in English)
7. **Jiusheng B., Yan Y., Zhencai Z.**, [et al.]. (2012). Wear Modalities and Mechanisms of the Mining Non-asbestos Composite Brake Material. *Applied Composite Materials*. Vol.20 (4), pp.331-339 (in English)
8. **Filip P., Weiss Z., Rafaja D.** On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications // *Wear*. 2002. Vol. 252 (3–4), P.189-198 (in English)
9. **Sanjeev S., Jayashree B., Mukesh K.** Comparison between nano-and micro-sized copper particles as fillers in nao friction materials // *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2013. Vol. 3(1). Pp.1-9 (in English)
10. **Zhu Z., Bao J., Yin Y., Chen, G.** Frictional catastrophe behaviors and mechanisms of brake shoe for mine hoisters during repetitious emergency brakings, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2013. Vol. 65 (4), pp. 245-250 (in English)