

გვენცაძე ლია

მაღალტექნოლოგიური ტრიბოლოგიური დანიშნულების
პოლიმერული კომპოზიტების შემუშავება და მათი ცვეთის
სტრუქტურული ასპექტების კვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური
ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
30 აპრილი, 2011 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ღია გვენცადის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “მაღალტემპერატურული ტრიბოლოგიური დანიშნულების პოლიმერული კომპოზიტების შემუშავება და მათი ცვეთის სტრუქტურული ასპექტების კვლევა” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი: 30 აპრილი 2 სთ

ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი, ფიზიკა-მატემატიკის
მეცნიერებათა დოქტორი, ელგუჯა ქუთელია -----
რეცენზენტი: ფიზიკა-მატემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
ნუგზარ დოლიძე -----
რეცენზენტი: ფიზიკა-მატემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
თამაზ მარსაგიშვილი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
2011 წელი

ავტორი: გვენცაძე ლია

დასახელება: “მაღალტექნოლოგიური ტრიბოლოგიური დანიშნულების პოლიმერული კომპოზიტების შემუშავება და მათი ცვეთის სტრუქტურული ასპექტების კვლევა”.

ფაკულტეტი: ინფორმატიკისა და მართვის სისტემები

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 30 აპრილი, 2 სთ

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ახალი ტრიბოლოგიური დანიშნულების, განსაკუთრებით უაზბესტო ფრიქციული კომპოზიციური მასალების შექმნა დღესაც აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს. სამწუხაროდ, აზბესტი, როგორც საქართველოში, ისე დსთ ქვეყნებში, ახლაც ავტომობილების სამუხრუჭე მასალების ძირითადი კომპონენტია (40 მას.%-ზე მეტი). მიუხედავად იმისა, რომ წარმოების მიერ დღემდე გამოშვებული უაზბესტო სამუხრუჭე ხუნდები აკმაყოფილებენ ძირითად ტექნიკურ მოთხოვნებს, მათ უმრავლესობას მაინც გააჩნიათ გარკვეული ნაკლოვანებები, რომლებსაც მიეკუთვნებიან: წრიპინი დაბალ სიჩქარეებზე დამუხრუჭებისას, ხმაური მაღალი სიჩქარით მოძრაობისას, დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება სამუხრუჭე სისტემის 350°C-ის ზევით გაცხელებისას, ხახუნის კოეფიციენტის მაღალი მაჩვენებლის არასტაბილურობა მშრალიდან სველ ხახუნზე გადასვლის მომენტში და სამუხრუჭე დისკოს ცვეთის მაღალი ინტენსივობა.

ერთ-ერთ შესაძლებელ გზას არსებული სამუხრუჭე ზესადებების ამ ნაკლოვანებების აღმოფხვრისათვის წარმოადგენს სამუხრუჭე ზესადებების ისეთი ფოროვანი მასალის შექმნა, რომელსაც ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებების მოთხოვნების დონეზე გააჩნდეს მაღალი დემპფირების უნარი ბგერის რხევით დიაპაზონში ან სრულად არიდებდეს თვით ბგერითი ხმაურის წარმოქმნას ხახუნისას.

ნაშრომში გაანალიზებული და ნაჩვენებია ტრიბოლოგიური დანიშნულების ფოროვანი კომპოზიციური მასალების წამყვანი როლი მათი საექსპლუატაციო თვისებების გაუმჯობესების საქმეში, სადაც მასალის ფორიანობა მიღწეულია უპირატესად ტექნოლოგიური ხერხების გამოყენებით და ნაკლებად შესწავლილია ბუნებრივი ფორიანობის მქონე ინგრედიენტების გავლენა ამავე თვისებებზე.

ნაშრომში ნაჩვენებია ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე ახალი თაობის ფრიქციული ნანოფოროვანი კომპოზიციური მასალების შემუშავების შესაძლებლობა, მათი მიღების ტექნოლოგიური პარამეტრების განსაზღვრა, ტრიბოლოგიური თვისებების ოპტიმიზაცია და შემუშავებული მასალების ცვეთის თავისებურებათა სტრუქტურული ასპექტების კვლევა რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპიის (რემ) და ოჟე-სპექტროსკოპიის (ოეს) მეთოდების გამოყენებით.

სადისერტაციო სამუშაოში შემუშავებულია პოლიმერული ფრიქციული მასალები ფოროვანი შემკვების – დიატომიტის გამოყენებით რეზოლური ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის ბაზაზე, რომელიც თერმომედეგობის გაზრდის მიზნით მოდიფიცირებულია სილანით, ხოლო მასალების კომპოზიციები რკინის ფოსფატით, ტექნიკური ნახშირბადით და ადგილობრივი წარმოების უწყვეტი ბაზალტის ბოჭკოთი. შემუშავებულ ფრიქციულ მასალებში საწყისი კომპონენტების რაოდენობა არ აღემატებოდა ექვსს.

გამოკვლევულ იქნა ამ მასალების ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებები ორი სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით: ა) ხახუნის მანქანა ИМ-58-ზე მასალათა ფრიქციული სითბომედეგობის განსაზღვრის მეთოდით, სადაც მოხახუნე წყვილების ხახუნის ზედაპირების გადაფარვის კოეფიციენტი K 1-ის ტოლია და ბ) მოდიფიცირებულ ღერო-დისკურ ხელსაწყოზე შემუშავებული

მასალების ტრიბო-წყვილის ხახუნისას ცვეთის ნაწილაკების ზომის, ფორმის და ელემენტური შედგენილობის ფიქსირებით, სადაც გადაფარვის კოეფიციენტი K მიისწრაფვის 0-ისაკენ.

ნაშრომში შესწავლილ იქნა გამოყენებული მოდიფიკატორების გავლენა შემუშავებული ფოროვანი ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. გამოვლინდა, რომ ყველა მოდიფიკატორი აუმჯობესებს მასალათა სიმტკიცეს კუმშვაზე, განსაკუთრებით ეს მიიღწევა ერთდროულად სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებულ მასალაზე, რომლის სიმტკიცე გაიზარდა 40%-ით. დაფიქსირდა მოდიფიცირებული მასალების კუთრი წონების ზრდა, და გამოირკვა, რომ მათი წყალშთანთქმა არ აღემატება 0,35%-ს და აკმაყოფილებს სტანდარტით წაყენებულ მოთხოვნებს.

შემუშავებული ფრიქციული მასალების ტრიბოლოგიური თვისებების შესწავლამ 2 სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით აჩვენა: 1) ხახუნის მანქანა IM-58-ზე ხახუნის კოეფიციენტის სტაბილური მნიშვნელობები (0,3-0,45) როგორც მშრალი, ისე სველი ხახუნის პირობებში, ფრიქციული სამუშაო პარამეტრების (ხახუნის კოეფიციენტის და ცვეთამედგობის) სტაბილურობა მაღალ ტემპერატურებზე 500-600°C ჩათვლით, თუჯის კონტრსხეულის ცვეთამედგობის გაზრდა 3-4-ჯერ, მასალათა უხმაურო მუშაობა წრიპინის გარეშე. ამასთანავე დადასტურდა ფრიქციული მასალის კომპოზიციაში მცირე რაოდენობის (5-6) ინგრედიენტის შემცველობის საკმარისობა, 2) მოდიფიცირებულ დერო-დისკურ ხელსაწყოზე: შემუშავებული ფრიქციული მასალების, განსაკუთრებით ტექნიკური ნახშირბადით და ტექნიკური ნახშირბადითა და ბაზალტის ბოჭკოთი მოდიფიცირებული ორი ნანოფოროვანი კომპოზიტის უპირატესობა, რომლებიც ქმნიან გარემოში 3-დან 7-ჯერ ნაკლები რაოდენობის ცვეთის ნაწილაკებს, ვიდრე შესაბამისად ევროპული მცირე-მეტალური (LM) სამუხრუჭე მასალა და უაზბესტო ორგანული სამუხრუჭე (NAO) მასალა აშშ-დან. ასევე ნაჩვენებია იყო ნანოფოროვანი კომპოზიციური მასალებისგან დამზადებული დეროების ხახუნისას კონტრსხეულის – რუხი თუჯის დისკოს ცვეთის შემცირება დაახლოებით 4-6-ჯერ LM და NAO მასალებისგან დამზადებულ დეროებთან მოხახუნე დისკოებთან შედარებით.

ნაშრომში კომპლექსურად შესწავლილ იქნა რემ და ოეს მეთოდების საშუალებით შემუშავებული ფრიქციული მასალების თუჯის დისკოსთან ხახუნის წყვილში წარმოქმნილი ზედაპირების სტრუქტურული გარდაქმნებისა და ელემენტთა განაწილება, ცვეთის პროდუქტები და ცვეთის მექანიზმი, როგორც შემუშავებული, ასევე LM და NAO მასალებისათვის.

რემ და ოეს მეთოდებით ნანოფოროვანი კომპოზიციებისგან დამზადებული სამუხრუჭე ზესადებსა და სამუხრუჭე დისკოს შორის ტრიბოწყვილის სასაზღვრო მოვლენების გამოკვლევამ გამოავლინა ე.წ. “მესამე ფაზის” განმსაზღვრელი როლი, რომელიც ფორმირდება ნანოფხვნილური შეწებებული “ფირის” სახით, როგორც “თხევადი” (დენადი) კომპონენტა ფრიქციული მასალისა და დისკოს მოხახუნე ზედაპირებს შორის.

ნაშრომში მოცემულია მოხახუნე ტრიბო-წყვილის სამფაზა მოდელის საფუძველზე ნანოფოროვანი კომპოზიციისაგან

დამზადებული სამუხრუჭე ზესადებების მოქმედების, ცვეთის
მექანიზმისა და მათი ტრიბოლოგიური ეფექტურობის ახსნა.

Resume

The problem of development of composite materials with new tribological functions, particularly non-asbestos ones continues to be actual. Unfortunately, asbestos in Georgia as well as in CIS countries is the main component of car friction material (more than 40 %). In spite the fact that non-asbestos brake pads fabricated by industry are in correspondence with the main technical demands, the most of them possess definite flaws which are as follows: the squeaking at low velocities while breaking, noise during a high speed move, decrease of braking effectiveness at heating of breaking system above to 350^oC, instability of high values of friction factor in the moment of transition from wet to dry friction and a high intensity of brake disk wear.

One of possibilities to avoid the existing flaws of braking linings is the creation of such porous materials which would be on the level of requirements to physical-mechanical and tribological properties, have the large damping capacity in the range of sound waves or be completely soundless during friction.

In this work it was analyzed and shown the leading role of porous composites for tribological means and their role in the improvement of the exploitation properties for which the porosity of materials are reached mainly using technological methods and it is less known the influence on these properties of ingredients possessing the natural porosity.

In the work it is shown the possibility of the development of a new generation of nano-porous friction materials on the basis of local raw materials, along with the determination of technological parameters for their production and optimization of tribological properties, as well as the investigation of structural aspects of wear peculiarities of elaborated materials using the scanning electron microscopy (SEM) and Auger electron spectroscopy (AES) methods.

In the dissertation work the polymer friction materials were developed on the basis of the phenol-formaldehyde resin using the porous diatomite filler modified by silane with the aim to improve the thermal stability, while the composition was modified by iron phosphate, technical carbon and basalt fibre of local production. In the developed friction materials the number of starting components was not more than six.

The physical-mechanical and tribological properties of these materials were studied using two different methods, as follows: a) on the IM-58 friction machine by the method of materials friction thermal stability study of the friction pair with overlapping factor K of the order of unit and b) on the modified pin-on-disc machine with the overlapping factor K aiming to zero, it was fixed the size, shape and elemental composition of particles during the wear process of tested tribo-pairs.

It was studied in the work the influence of applied modifier on the physical-mechanical properties of developed friction materials. It was established that the modifier improves the firmness of materials on pressing and it is better achieved by simultaneous modification of material with silane and technical carbon, when firmness was increased by 40 %. The increase of specific weight of modified materials was fixed and it was found out that their water absorption capacity didn't exceed 0,35% and comply with standard requirements.

The study of tribological properties of developed friction materials using two different methods showed:

1) on friction machine IM-58: the stable value of friction factor (0,23-0,45) both in dry and wet friction conditions, the friction working parameters (friction factor and

wear stability) stability up to 500-600^oC temperatures, the wear stability increase of gray cast-iron disk in 3-4 times, the soundless operation of materials without squeaking, herewith it was proved that small amount (5-6) ingredients are enough.

2) on modified pin-on-disk machine: the elaborated friction materials advantage, particularly the advantage of two nano-porous composites modified by technical carbon and technical carbon with basalt fibre, which generate from 3 to 7 times less amount of airborne wear particles than, correspondingly, European low-metallic (LM) pad material and non-asbestos organic (NAO) material from USA. It was also shown that the nano-porous composites base materials cause the wear gray iron-cast disc while friction about 4 and 6 times less in comparison with the LM and NAO composition pins respectively.

By the methods of SEM and AES study of interface phenomena between non-porous composition base brake lining materials and brake disk surface worked in the tribo-pair, there was determined the advantageous role of so-called “the third phase” which forms in the form of sticking “film” of the nano-powder as a flowing component between the disc and lining friction surface.

On the basis of the triple phase model of the tribo-pair there is given the explanation to the mechanism of the action of nano-porous composition base brake lining materials and its tribological efficiency.

შ ი ნ ა ა რ ს ი

| | |
|---|-----------|
| შესავალი | 88-15 |
| 1. ლიტერატურული მიმოხილვა | 20 |
| 1.1 თანამედროვე წარმოდგენები ხახუნის ძალების წარმოქმნის მაკროსკოპიული და მიკროსკოპიული მექანიზმების შესახებ | 20 |
| 1.2 ფრიქციული მასალების ცვეთის მექანიზმები და მათი კვლევის მეთოდები: | 22 |
| 1.2.1 ცვეთის სახეები | 22 |
| 1.2.2 ფრიქციული გადატანის მოვლენა | 26 |
| 1.2.3 გაცვეთა | 29 |
| 1.2.4 ცვეთის პროდუქტები | 30 |
| 1.3. სამუხრუჭე ფრიქციული მასალების ტიპები და მათი დამზადების ტექნოლოგიები | 32 |
| 1.3.1. უაზბესტო ფრიქციული პოლიმერული მასალების ტექნოლოგია | 35 |
| 1.4. ფოროვანი ფრიქციული მასალების შესახებ წარმოდგენების განვითარება | 41 |
| 1.5 ახალი თაობის სამუხრუჭე ხუნდების შესადები მასალების განვითარების თანამედროვე ტენდენციები. | 48 |
| 2. შედეგები და მათი განსჯა | 51 |
| 2.1. ამოცანის დასმა, კვლევისათვის კომპოზიციების შემუშავება და მათი ტესტირების მეთოდების შერჩევა | 51 |
| 2.1.1. ფიზიკურ-მექანიკური გამოცდებისა და სტრუქტურული კვლევებისათვის ნიმუშების მომზადების პროცედურები | 52 |
| 2.1.1.1 საცდელი ნიმუშების დამზადების ტექნოლოგია | 52 |
| 2.1.1.2. სიმტკიცის ზღვრის განსაზღვრა კუმშვაზე | 54 |
| 2.1.2. ფრიქციული მასალების ხახუნის კოეფიციენტის, ცვეთის სიდიდის, განვითარებული ტემპერატურისა და ცვეთის პროდუქტების კვლევის მეთოდიკა. | 57 |
| 2.1.3. კომპოზიციური ფრიქციული მასალების საწყისი კომპონენტების და ტრიბოწყვილში ნამუშევარი ზედაპირების რემ კვლევის მეთოდიკა | 63 |
| 2.1.4. ფრიქციული მასალა-კონტრსხეული ტრიბოწყვილში ნამუშევარი ზედაპირებისა და ზედაპირქვეშა ფენების ოჟე-სპექტრული კვლევების მეთოდიკა | 64 |
| 2.2. ნანოფოროვანი კომპოზიციების დამზადების ტექნოლოგია | 67 |
| 2.2.1. საწყისი კომპონენტების კვლევა და შემკვრელი ფისის მოდიფიცირება თერმომედეგობის გაზრდის მიზნით | 67 |
| 2.2.2. ფრიქციული კომპოზიტების კომპაქტირების (დამზადების) ტექნოლოგია | 78 |
| 2.3. ხახუნის კოეფიციენტის მოდიფიკატორების გავლენა შემუშავებული მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ და ტრიბოლოგიურ თვისებებზე | 83 |
| 2.4. ნანოფოროვანი ფრიქციული მასალების ღერო-დისკურ ხელსაწყოზე ტესტირება და ორ ხახუნის მეთოდზე დაყრდნობით ტრიბო-წყვილების ცვეთის თავისებურებანი | 92 |
| 2.4.1. ცვეთის პროდუქტების კვლევა. | 97 |
| 2.4.2. ფოროვანი მასალის ცვეთის მიკროსკოპიული მექანიზმის თავისებურებანი. | 101 |

| | |
|--------------------|-----|
| დასკვნები ----- | 115 |
| ბიბლიოგრაფია ----- | 118 |

ცხრილების ნუსხა

გვ.

| | |
|---|----|
| ცხრილი №1. ფრიქციული კომპოზიციების ინგრედიენტების ზოგადი შესაძლო შედგენილობები. ----- | 40 |
| ცხრილი №2. შემუშავებული ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებები. ----- | 83 |
| ცხრილი №3. კონტრსხეულის ცვეთის ინტენსივობა. ----- | 91 |

ნახაზების ნუსხა

| | | |
|---------|--|-----------|
| ნახ.1 | ჰიდრაულიკური წნეხი პერსფორმით. ----- | ბმ. 53 |
| ნახ.2. | უნივერსალური გამჭიმავი მანქანა 2054P5.----- | 55 |
| ნახ.3. | დამხმარე მოწყობლობა ნიმუშების კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარის გასაზომად.----- | 56 |
| ნახ.4 | ხახუნის მანქანა ИМ-58.----- | 57 |
| ნახ.5. | ხახუნზე გამოსაცდელი ნიმუშის და კონტრსხეულის ჩასაჯდომი ბუდეები. ----- | 59 |
| ნახ.6. | მოდულიზირებული დერო-დისკური ხელსაწყო სქემა. ----- | 62 |
| ნახ.7 | რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის მუშაობის სქემა.----- | 66 |
| ნახ.8. | ქისათიბის საბადოდან (ახალციხე) აღებული დიატომიტის ნიმუშის შემადგენელი ნაწილაკების რემ გამოსახულება. ----- | 69 |
| ნახ.9. | დიატომიტის ფხვნილის დაფქვილი ნაწილაკების რემ გამოსახულება: ა) საბადოს ბუნებრივ ნიმუშში დაფქვამდე ბ) პლანეტარულ წისკვილში დაფქვილი და გაცრილი ფხვნილის ნიმუშში.----- | 80 |
| ნახ.10. | ნანოფოროვანი ზესადების 600°C-მდე ნამუშევარი ზედაპირების რემ გამოსახულებები.----- | 87 |
| ნახ.11. | ხახუნის კოეფიციენტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება; 1 – არამოდულიზირებული მასალა. 2 – რკინის ფოსფატით მოდიფიცირებული მასალა.----- | 88 |
| ნახ.12. | ხახუნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე: 1 – არამოდულიზირებული მასალა. 2 – სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალა. ----- | 89 |
| ნახ.13. | ხახუნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე 1 – სილანით მოდიფიცირებული მასალა. 2 – სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალა. ----- | 90 |
| ნახ.14. | GRIMM (C _{GRIMM}), P-Trak (C _{P-Trak}), DustTrak (C _{Dust-Trak}) ხელსაწყოებით გაზომილი ცვეთის ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაციები მიმუშავების შემდეგ.----- | 94 |
| ნახ.15. | ჰაერში ცვეთის შედეგად გაჩენილი ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაცია გაზომილი DustTrak (C _{dustTrak}) მოწყობილობით, დისკოს მასის დანაკარგი (Δm_{disc}), ხახუნის საშუალო კოეფიციენტი და დეროს საშუალო ტემპერატურა (T _{pin}) მუშაობის შემდეგ. ----- | 96 |

| | |
|--|-----|
| ნახ.16 LM ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (20.000x გადიდება).----- | 98 |
| ნახ.17. NAO ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (20.000x გადიდება).----- | 99 |
| ნახ.18. I ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (6300x გადიდება). ----- | 99 |
| ნახ.19. II ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (49.000x გადიდება).----- | 100 |
| ნახ.20. III ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (4450x გადიდება).----- | 100 |
| ნახ.21. ზედაპირების რემ გამოსახულებები ტრიბო-წყვილის 370°C ტემპერატურამდე მუშაობის შემდეგ; ----- | 102 |
| ნახ.22. დიფერენციალური ელექტრონული ოჟე სპექტრები, მიღებული ფრიქციული წყვილის ზედაპირებისაგან, რომლებიც ნაჩვენებია იყო ნახ. 21-ზე. ----- | 104 |
| ნახ.23. ზედაპირების რემ გამოსახულებები ტრიბო-წყვილის მუშაობის შემდეგ; ----- | 106 |
| ნახ.24. ფრიქციული ზედაპირის რემ გამოსახულებები სამუხრუჭე ნანოფოროვანი ზესადების (III კომპოზიცია) 600°C ტემპერატურამდე მუშაობის შემდეგ ტრიბო-წყვილში რუს თუჯთან ერთად.----- | 107 |
| ნახ.25. დიფერენციალური ელექტრონული ოჟე სპექტრები, მიღებული ზესადების ზედაპირებისაგან, რომლებიც გამოსახული იყო ნახ.24-ზე.--- | 108 |
| ნახ.26. სამუხრუჭე დისკოს და სამუხრუჭე ზესადების წყვილის სამფაზიანი მოდელის განივი ჭრილის სქემატური ნახაზი. ----- | 110 |
| ნახ.27. ნანოფოროვანი ზესადებებიანი სამუხრუჭე ხუნდების საცდელი ნიმუშის დამუხრუჭების ეფექტურობა გადახურებისას.----- | 114 |

მადლიერება

გაწეული შრომისათვის დიდ მადლობას ვუხდი ჩემს ხელმძღვანელს პროფესორ ბატონ ელგუჯა ქუთელიას. მან ყველაფერი გააკეთა იმისათვის, რომ მიზანდასახულად დაეუფლებოდი სამუშაოს თეორიულ და პრაქტიკულ საკითხებს, ამასთანავე ამეთვისებინა კვლევის თანამედროვე მეთოდები.

მადლობას ვუხდი სათანადო გაწეული დახმარებისათვის პროფესორ ულფ ოლაფსონს დერო-დისკურ ხელსაწყოზე ჩატარებული სამუშაოებისათვის და პროფესორ ომარ მუკბანიანს სილოქსანური აპრეტებით ფენოლოგორმალდეჰიდური ფისის მოდიფიცირების საკითხებში.

შ ე ს ა ვ ა ლ ი

ტრიბომასალათმცოდნეობის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს ისეთი მასალების შერჩევა და შექმნა, რომლებიც ფლობენ ოპტიმალურ მახასიათებლებს მოცემული ხახუნის კვანძებისათვის საჭირო რესურსის უზრუნველსაყოფად. ამასთანავე აუცილებელი საექსპლოატაციო თვისებების მიღწევისას საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას საბაზრო პირობებიდან გამომდინარე ეკონომიკური მოსაზრებები. ამიტომ ტრიბომასალათმცოდნეობას ბევრ შემთხვევაში უწევს გადაწყვიტოს კომპრომისული ამოცანები, რომლებიც შეესაბამებიან საექსპლოატაციო თვისებების დონის მიზანშეწონილ შეჯერებას მასალის თვითღირებულებასთან.

ამასთან დაკავშირებით საჭიროა, რომ ხახუნის კვანძების მასალები შემუშავდეს მისაწვდომი იაფი კომპონენტებისაგან და ისეთი ტექნოლოგიის გამოყენებით, რომელიც არ თხოულობს არასტანდარტულ დანადგარებს, მაღალ ვაკუუმს, კრიოგენულ ტემპერატურებს და ძვირადღირებული დონისძიებების გატარებას.

ხახუნის კვანძების ყველა მასალა შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად: ანტიფრიქციული და ფრიქციული. ანტიფრიქციული მასალები გამოიყენებიან მოძრავი შეერთებების შექმნისას დაბალი ხახუნით და მაღალი ცვეთამდეგობით: გორვის და სრიალის საკისრებში, სახსრულ შენაერთებში, ცოციების მიმმართველებში, ექსცენტრიკულ და მრუდხარა მექანიზმებში და ა.შ.

ფრიქციული მასალები გამოიყენებიან მუხრუჭებში, ფრიქციულ გადაცემებში და ქუროებში. მათ უნდა გააჩნდეთ არა მარტო მაღალი და სტაბილური ხახუნის კოეფიციენტი, არამედ მაღალი ცვეთამდეგობაც და სიმტკიცეც. ისინი უნდა გამოირჩეოდნენ ტემპერატურული ცვალებადობისადმი, აბრაზივისა და აგრესიული გარემოსადმი მდგრადობით. კერძოდ, მუხრუჭებისა და გადაბმულობის ქუროების მასალები უნდა უზრუნველყოფდნენ სისტემის მდორე ამოქმედებას ავტოფრიქციული რხევების გარეშე, რომელიც წრიპინის სახით გამოვლინდება დამუხრუჭებისას, ან წაბუქსავებით და უზრუნველყოფდნენ გამოსადეგობის მაღალ ვადას. სატრანსპორტო საშუალებების მთელი კინეტიკური ენერგია მუხრუჭებში

დამუხრუჭებისას განიზრახვა სითბოდ. ამიტომ დამუხრუჭების მომენტში მოხახუნე ზედაპირების ტემპერატურა, მაგალითად თვითმფრინავის მუხრუჭში აღწევს 1200°C-ს, მის სამუხრუჭე ზესადების მოცულობაში კი 600°C-ს. ავტომობილების მუხრუჭებში და გადაბმულობის ქუროებში ეს ტემპერატურები შესაბამისად შეიძლება აღწევდნენ 400°C და 200°C. თუმცა თანამედროვე ავტომობილების მოძრაობის სიჩქარეების გაზრდა მათი ძრავების სიმძლავრეების გაზრდის შესაბამისად, მოითხოვს მუხრუჭების მუშა ტემპერატურების გაზრდას 600°C-მდე.

საზღვარგარეთ აღიარებულია, რომ გარემოს გატუჭყიანების ერთ-ერთ ძირითად წყაროს წარმოადგენდა ავტომობილისა და სხვა სატრანსპორტო საშუალებების ფრიქციული კვანძები, რომელთა მუხრუჭებისა და გადაბმულობების ქუროების ზესადებების ფრიქციული მასალების შემადგენლობაში ძირითადი კომპონენტი იყო აზბესტი – კანცეროგენული თვისებების მქონე ნივთიერება. აზბოფრიქციული მასალების ცვეთის შედეგად გამოყოფილი მტკერი, რომელიც შეიცავს აზბესტის ბოჭკოს თითქმის უხილავ ნაწილაკებს, განიზრახვა ჰაერში და ადამიანის ორგანიზმში მოხვედრისას შესაძლოა, გამოიწვიოს კანცეროგენული ზემოქმედება. ეს გარემოება კიდევ უფრო ამძიმებდა დიდი ქალაქებისა და საერთოდ გარემოს ეკოლოგიურ სიტუაციას, რასაც ქმნის ავტომობილების მიერ გამოყოფილი მავნე აირები.

მსოფლიოს ყველა წამყვანი ფირმები, როგორებიცაა “ბერალი”, “ტექსტარი” (გერმანია), “მინტექს დონი”, “ფეროდო” (ინგლისი), “რეიტექსი”, “რეიმარკი” (აშშ), “ვალეო” (საფრანგეთი) და სხვები ავტომობილების დასაკომპლექტებლად დღეისათვის თავისი პროდუქციის 100%-ს უშვებენ აზბესტის გარეშე. მათ აზბესტის შემცველებად გამოიყენეს სხვადასხვა სახის ხელოვნური და ბუნებრივი ბოჭკოები - მინის, ფოლადის, ნახშირბადისა და ბაზალტის ბოჭკო, არამიდული (კეველარის ტიპის) და ცელულოზას ბოჭკო და სხვა.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ აზბესტის შეცვლის პრობლემის გადასაწყვეტად საზღვარგარეთის ფირმებს დასჭირდათ 10-15 წელი და

საკმაო მატერიალური დანახარჯები. მაგალითად ფირმა “რეიმარკმა” უაზბესტო ფრიქციულ ნაკეთობათა შექმნის მიზნით დახარჯა 30 მილიონ დოლარზე მეტი.

ახალი უაზბესტო ფრიქციული (სამუხრუჭე) კომპოზიციური მასალების შექმნა დღესაც აქტუალურ ამოცანად ითვლება. სამწუხაროდ, აზბესტი, როგორც საქართველოში, ისე დსთ ქვეყნებში, ახლაც კი მექანიკური სატრანსპორტო საშუალებების (ავტომობილების) სამუხრუჭე მასალების ძირითადი კომპონენტია (50 მას.%-ზე მეტი). მიუხედავად იმისა, რომ წარმოების მიერ დღემდე გამოშვებული უაზბესტო სამუხრუჭე ხუნდები აკმაყოფილებენ ძირითად ტექნიკურ მოთხოვნებს (მაღალი ხახუნის კოეფიციენტი, სტაბილური სამუხრუჭე რეჟიმი, მაღალ ტემპერატურებზე, $\sim 350^{\circ}\text{C}$, ხახუნის კვანძის მუშაუნარიანობის შენარჩუნება), მათ უმრავლესობას მაინც გააჩნიათ გარკვეული ნაკლოვანებები, რომლებსაც მიეკუთვნებიან: წრიპინი დაბალ სიჩქარეებზე დამუხრუჭებისას, ხმაური მაღალი სიჩქარით მოძრაობისას, დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება სამუხრუჭე სისტემის 350°C -ის ზევით გაცხელებისას, ხახუნის კოეფიციენტის მაღალი მაჩვენებლის არასტაბილურობა (ვარდნა) მშრალიდან სველ ხახუნზე გადასვლის მომენტში და სამუხრუჭე დისკოს ცვეთის მაღალი ინტენსივობა; ამასთანავე ავტომობილის ბორბლებზე სამუხრუჭე კვანძის ნაცვეთის მოშავო ფერის პროდუქტების წარმოქმნა, რომელიც არაესთეტიკურია და რომლის თავიდან აცილება სხვა ზემოთ ხსენებულ ნაკლოვანებებთან ერთად, თანამედროვე მოთხოვნებით ასევე სასურველია.

წარმოების (მსოფლიოს სხვადასხვა ფირმების) მიერ გამოშვებული სამუხრუჭე ზესადებების ფრიქციული მასალები წარმოადგენენ მარავალკომპონენტიან კომპოზიციებს (7-დან 15-მდე და მეტი კომპონენტის). ეს კომპოზიციები მზადდება სტანდარტული ფხვნილოვანი ტექნოლოგიით, რომელიც ითვალისწინებს კომპონენტების შერჩეული თანაფარდობით შერევის გზით ჰომოგენური კაზმის მომზადებას, მიღებული კაზმის პორციის მოთავსებას პრესფორმაში ლითონის სადებთან ერთად, წნევის ზემოქმედებით ცხელ კომპაქტირებას და შემდგომ თერმოდამუშავებას.

ამჟამად სერიულად გამოშვებული სამუხრუჭე ხუნდების წარმოებაში არსებული ტექნოლოგია კარგად არის ათვისებული. გაუმჯობესებული ტრიბოტექნიკური მახასიათებლების და დაბალი თვითღირებულების მქონე ახალი პროდუქციის დანერგვისას მწარმოებლები ცდილობენ არ შეცვალონ ეს ტრადიციული ტექნოლოგია, ხოლო ამ პროდუქციის აუცილებელი მახასიათებლების რეალიზაცია განახორციელონ თვისებების მოდიფიცირებით და შიხტას საწყისი მასალების კომპონენტების რაოდენობის შემცირების გზით.

ცნობილია, რომ კომპოზიციების შემდგენლების ტიპისა და რაოდენობის, მათი ნაწილაკების ფორმისა და ზომების ოპტიმალური შერჩევით შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაიზარდოს ხახუნის კვანძის ცვეთამედგობა, ხახუნის კვანძის დანიშნულებისდა მიხედვით ფართო დიაპაზონში ვცვალოთ ხახუნის კოეფიციენტი, ამასთანავე კონტროლი გაეუწიოთ მიღებული ფრიქციული კომპოზიციური ნაკეთობების თბოფიზიკურ, მექანიკურ და სხვა თვისებებს. უნდა აღინიშნოს, რომ უმრავლეს, სერიულად გამოშვებულ სამუხრუჭე ხუნდებს ახასიათებთ სხვადასხვა ხარისხის ზემოთაღნიშნული ნაკლოვანებები და აზბესტშემცველ სამუხრუჭე ხუნდებთან შედარებით ისინი უფრო ძვირადღირებულია.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, აგრეთვე იმის გამო, რომ აზბესტშემცველი სამუხრუჭე ხუნდების წარმოება გარემოს დაცვითი ორგანოების მიერ აკრძალულია, სამუხრუჭე ზესადებების წარმოებისათვის ახალი უაზბესტო იაფი კომპოზიციური მასალების შექმნის გზების ძიება დღესაც წარმოადგენს აქტუალურ სამეცნიერო-ტექნიკურ ამოცანას.

ჩვენის აზრით ერთ-ერთ შესაძლებელ გზას არსებული სამუხრუჭე ზესადებების ისეთი ნაკლოვანებების აღმოფხვრისათვის, როგორცაა წრიპინი, ხახუნის კოეფიციენტის არასტაბილურობა მშრალიდან სველ ხახუნზე გადასვლისას და დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება მაღალ ტემპერატურებზე, წარმოადგენს სამუხრუჭე ზესადებების ისეთი ფოროვანი მასალის შექმნა, რომელსაც ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებების მოთხოვნების დონეზე გააჩნდეს მაღალი დემპფირების უნარი ბგერის რხევით

დიაპაზონში ან სრულად არიდებდეს თვით ბგერითი ხმაურის წარმოქმნას ხახუნისას.

მოცემული სამუშაოს ძირითად მიზანს შეადგენს სამუხრუჭე ხუნდის ზესადების კომპოზიციაში ნანოფოროვანი ინგრედიენტის შეყვანის ზეგავლენის შესწავლა მისი ხახუნისა და ცვეთის მახასიათებლებზე, შემდგომში შიხტის ახალი იაფი კომპოზიციის შემუშავების მიზნით მისგან სამუხრუჭე ზესადებების დასამზადებლად სამუხრუჭე ხუნდების წარმოების ტრადიციული ტექნოლოგიის გამარტივებული სქემის გამოყენებით.

სადოქტორო ნაშრომში ნაჩვენებია ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე ახალი თაობის ფრიქციული ნანოფოროვანი კომპოზიციური მასალების შემუშავების შესაძლებლობა, მათი მიღების ტექნოლოგიური პარამეტრების განსაზღვრა, ტრიბოლოგიური თვისებების ოპტიმიზაცია და შემუშავებული მასალების ცვეთის თავისებურებათა სტრუქტურული ასპექტების კვლევა რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპიის და ოქუ-სპექტროსკოპიის მეთოდების გამოყენებით.

სამუშაოს მიზანს პრაქტიკულ ნაწილში შეადგენდა ახალი პოლიმერული ფრიქციული მასალების მიღება შემდეგი გაუმჯობესებული პარამეტრებით:

1. ხახუნის კოეფიციენტის სტაბილური (0,3-0,45) მნიშვნელობით, როგორც მშრალი, ისე სველი ხახუნის პირობებში.
2. ფრიქციული სამუშაო პარამეტრების სტაბილურობით 500-600°C-მდე.
3. სამუხრუჭე ხუნდების ზესადებების წრიპინის გარეშე უხმაურო მუშაობით.
4. სამუხრუჭე დისკოს ცვეთამედეგობის გაზრდით 2-3-ჯერ.
5. ფრიქციული მასალის კომპოზიციაში მცირე რაოდენობის (5-6) ინგრედიენტების შემცველობით.
6. სხვა არსებულ უაზბესტო პროდუქციასთან შედარებით 20-45%-ით დაბალი თვითღირებულებით.

1. ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1 თანამედროვე წარმოდგენები ხახუნის ძალების წარმოქმნის მაკროსკოპიული და მიკროსკოპიული მექანიზმების შესახებ

თანამედროვე მანქანების და მექანიზმების ხანგამძლეობის გაზრდა დღესაც აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს და ის მჭიდროდ არის დაკავშირებული მათი ცვეთამედველობის გაზრდასთან. რაც უფრო საპასუხისმგებლოა მანქანა ან მექანიზმი, მით უფრო რთულ პირობებში უხდება მუშაობა დანადგარების ხახუნის კვანძებს და აქედან გამომდინარე საუკეთესო ტრიბოლოგიური თვისებების მქონე უნდა იყოს ხახუნის მასალების შერჩეული წყვილი და თავიდანვე ფუნდამენტალურად უნდა იყოს გაანალიზებული და შესწავლილი ხახუნის დროს მიმდინარე პროცესები.

იდეალურია პრაქტიკული ამოცანა, როდესაც ხახუნის კვანძში მოხახუნე წყვილების ზედაპირებზე არ ფიქსირდება მაკროსკოპიული დაზიანებები და ამავე დროს ცვეთა არის მინიმალური. ამ რთული ამოცანის გადაწყვეტას რამდენიმე ასეული წელი მოანდომეს პრაქტიკოს-მკვლევარებმა და დღესაც გრძელდება ასეთი მუშაობა, რადგან სულ უფრო და უფრო იზრდება წაყენებული მოთხოვნები ხახუნის მასალებისადმი.

დატვირთვისას და ხახუნისას მასალაში ხდება ზედაპირული მუშა ფენის მნიშვნელოვანი ცვლილებები დრეკად-პლასტიკური დეფორმაციისა და სითბოს შედეგად, რომელიც ვითარდება მექანიკური ენერგიების სითბურში გადასვლისას და სხვა სტრუქტურულ გარდაქმნებთან დაკავშირებული პროცესების მიმდინარეობისას. მუშა ზედაპირულ შრეში მიღებული გარდაქმნები შეიძლება დაიყოს, როგორც მაკროსკოპიული და მიკროსკოპიული, სხვანაირად, როგორც დ.მური აღნიშნავს /1/ ორ სხეულს შორის აღძრული ხახუნის ძალის მექანიზმი, რომლებიც ასრულებენ ერთმანეთის მიმართ ტანგენციალურ მოძრაობას, შესაძლებელია განხილულ იქნას მაკროსკოპიულ ან მიკროსკოპიულ დონეზე მკვლევარის ინტერესებიდან და ამოცანებიდან გამომდინარე. მაკროსკოპიულებს მიეკუთვნება ისეთები, რომელთა დროსაც იცვლება ურთიერთმოქმედი ხახუნის ზედაპირების

მიკროგეომეტრია და რელიეფი, როდესაც წარმოიქმნება კორძები, ამოიფხვნება მცირე და დიდი ნაწილაკები, ხახუნის ზედაპირზე ვითარდება მასალის მეტ-ნაკლებად თანაბარი ცვეთა, რომელიც იწვევს თხელი ზედაპირული ფენის თანდათანობით მოცილებას. მიკროსკოპიულს მიეკუთვნება სტრუქტურის და სუბტრუქტურის ცვლილებები. ამას, თავის მხრივ, მიყვავართ მასალის მუშაუნარიანობის დარღვევასთან, რომელიც გამიზნულია ხახუნის კვანძის დასამზადებლად /2/.

ნაშრომში /1/ აღნიშნულია, რომ მიკროსკოპული ანუ მოლეკულური მექანიზმი, შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც მიზეზობრივი, რადგანაც ხახუნის წყვილის ზედაპირების მოლეკულური ურთიერთქმედება დეტალურად განხილულია მრავალი ექსპერიმენტალური პირობებისათვის ხახუნის ჭეშმარიტი მიზეზის დადგენის მიზნით. მეორეს მხრივ, მაკროსკოპიული მექანიზმი ხშირად განიხილება, როგორც რეზულტატი, რომელიც დაფუძნებულია ხახუნის მოვლენის შედარებით უხეშ მოდელირებასთან. პირველი მიდგომა თუ უფრო საინტერესოა ფიზიკოსისათვის, მეორე მიდგომა უფრო ინჟინერის ინტერესების სფეროში ექცევა. თუმცა აქვე აღინიშნება /1/, რომ ორივე მექანიზმი უნდა განხილულ იქნას ერთდროულად და სადაც შესაძლებელია მათ უნდა შეავსონ ერთმანეთი.

მოვლენათა მასშტაბურობის გარდა, მაკროსკოპიული მიდგომის ძირეულ განსხვავებას მიკროსკოპიულისაგან წარმოადგენს განსხვავება კონტინუუმსა და რეალურ პირობებს შორის. ხახუნის ზედაპირის მიდამოში ზედაპირის თითოეული მოლეკულა იკავებს მოცულობას, რომელთა მახასიათებელი დიამეტრიც ატომების ზომებზე დიდია და ფლობს რა თბურ ენერგიას, განუწყვეტლივ ირხევა და ბრუნავს. მოლეკულების ურთიერთცვლა, რომლის დროსაც ერთ-ერთი ზედაპირიდან ხდება დაჭერა და ამავე დროს მოლეკულის გაცემა მომიჯნავე ზედაპირიდან, წარმოადგენს იმ რეალობას, როდესაც ხახუნი იძენს ადჰეზიური ხახუნის ხასიათს. საერთო დასკვნა არის ის, რომ ხახუნის პროცესის მიკროსკოპიულ გაგებას აქვს ფასდაუდებელი მნიშვნელობა მაკროსკოპიული მოდელის სამართლიანობის დადგენის მიზნით.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ დღეისათვის სტრუქტურის თანამედროვე საკვლევი აპარატურა, როგორებიცაა რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპი, ოჟე-სპექტრომეტრი, ელექტრონოგრაფი, ტალღა დისპერსიული სპექტომეტრი და სხვა იძლევა საშუალებას ვაწარმოოთ მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე ხახუნის ზედაპირების შესწავლა მათი ცვეთის მექანიზმების ახალი ასპექტების გამოვლენის მიზნით.

12. ფრიქციული მასალების ცვეთის მექანიზმები და მათი კვლევის მეთოდები

12.1 ცვეთის სახეები

მოხახუნე მასალების გაცვეთილი ზედაპირის ფორმირება ხდება მასალის სხვადასხვა ინტენსივობისა და სახის ელემენტარული რღვევის აქტებისა და მექანიკური და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების შეჯამების შედეგად გარეშე ფაქტორების ზემოქმედებით (გარემო, ტემპერატურა, წნევა, ხახუნის სახეობა, ზედაპირების ფარდობითი გადაადგილების სიჩქარე და სხვა). ხახუნის პროცესში მოვლენათა ერთობლიობა განსაზღვრავს ცვეთის სახეს და მის ინტენსივობას. ხახუნის წყვილის დეტალების საწყისი მასალების მრავალფეროვნებისა და მათი მსახურობის პირობების შედეგად ცვეთის სახეები მნიშვნელოვნად სხვადასხვანაირია. ამასთანავე, თუ გამოვტოვებთ ერთეულ ცალკეულ შემთხვევაში არამნიშვნელოვან შემთხვევებს, შესაძლებელია დეტალების ცვეთა დავიყვანოთ სახეების მცირე რიცხვამდე ე.ი. მოვახდინოთ მათი კლასიფიკაცია, რაც აუცილებელია ცვეთის საწინააღმდეგო შესაბამისი ბრძოლის მეთოდების შემუშავებისას /3/.

ცვეთის სახე შესაძლებელია პირველი მიახლოებით დადგინდეს ხახუნის ზედაპირის გარეგანი სახით. სრული მსჯელობისთვის საჭირო იქნება თხელი ზედაპირული ფენების სტრუქტურის, შედგენილობის, ფიზიკური და მექანიკური თვისებების ანალიზი.

მანქანათა მუშა ორგანოების და დეტალების მუშა ზედაპირების რღვევები, რომლებიც გამომდინარეობს ხახუნის პროცესისგან

შესაძლებელია მოვახდინოთ მათი კლასიფიცირება სახეებით, რომლებიც ჩამოთვლილია ქვემოთ /3,4/:

- ა) ადჰეზიური ცვეთა
- ბ) დაღლითი ცვეთა
- გ) აბრაზიული ცვეთა
- დ) პლასტიკური დეფორმაციით გამოწვეული ცვეთა
- ე) წყალბადური ცვეთა
- ვ) ჟანგვითი ცვეთა
- ზ) დისპერგირებით გამოწვეული ცვეთა
- თ) კოროზიული, კავიტაციური ეროზიული ცვეთა
- ი) ფრეტინგ-კოროზია
- კ) გამოფხვნიტ გამოწვეული ცვეთა
- ლ) ანაგლეჯით და ჩაჭეჭვით გამოწვეული ცვეთა
- მ) ზედაპირზე ნაპრალების წარმოქმნით გამოწვეული ცვეთა
- ნ) შერჩევითი გადატანა და სხვა.

აქვე უნდა აღინიშნოს, ხახუნის და ცვეთის პრობლემებზე მომუშავე მეცნიერები თავის დროზე აქვეყნებდნენ მათ მიერ შემუშავებულ ცვეთის კლასიფიკაციებს. ამ მეცნიერების რიცხვს მიეკუთვნებიან მ.ხრუშჩოვი, ბ.კოსტეცკი, ი.კრაგელსკი, ი.ლანკასტერი, დ.ტეიბორი, გ.ფლაიშერი, დ.მური, ნ.სუ და სხვა. მაგალითად, ი.კრაგელსკი ცვეთას აკლასიფიცირებს ფრიქციული კავშირის რღვევების სახეების მიხედვით, რომელიც აღიძვრება ორი სხეულის ზედაპირზე ნორმალური და ტანგენციალური ძალების მოქმედებისას და რომელიც ქრება ამ ძალების მოხსნის შემდეგ: 1) მასალის დრეკადი მიჭყლეტვა 2) პლასტიკური მიჭყლეტვა 3) ჩანერგილი მასალის მიკროჭრა 4) აფსკების შეკვრა, რომლებიც ფარავენ მყარი სხეულის ზედაპირებს და მათი რღვევა 5) ზედაპირების შეკვრა, რომელთაც თანახლავთ მასალის სიდრმითი ამოგლეჯა. აღნიშნული ფრიქციული კავშირის დარღვევის სახეები დამოკიდებულია, როგორც კონტაქტირების გეომეტრიაზე, ასევე მასალის თვისებებზე /4/. ი.ლანკასტერი და სხვა მეცნიერები იყენებდნენ ტერმინებს “ძლიერი ცვეთა” და “თანაბარი ცვეთა”. ასეთი კლასიფიკაცია გამოიყენება მშრალი ხახუნისთვის. ლანკასტერი თვლის, რომ გადასვლები ძლიერი

ცვეთიდან თანაბარ ცვეთამდე ან პირიქით, ხდება სრიალის პირობების ცვლილებებით, როდესაც კონტაქტირებისას ახალი ზედაპირის წარმოქმნის სიჩქარეს და ზედაპირის ცალკეული ფრანგმენტების გადასვლას აწონასწორებს აფსკების წარმოქმნის სიჩქარე ლითონსა და გარემოს შორის /5/.

მეტად საინტერესოა დაღლითი ცვეთის თეორია, რომელიც პირველად წამოაყენა ლ.ბარტენევა და ვ.ლავერენტიევა ელასტომერების ხახუნის შესწავლისას /6/, შემდეგ განავითარეს სხვა მეცნიერებმა. დაღლით ცვეთას აკუთვნებენ ისეთ შემთხვევებს, როდესაც ხახუნის კვანძების მუშაობისას არ ფიქსირდება ანომალური დაზიანებები (ანაგლეჯები, შეკვრები, მიკროჭრები, ზედაპირის მოწვა და ა.შ.), ხახუნი მიმდინარეობს ნორმალურ პირობებში, შეიძლება იყოს შეზეთვაც, მაგრამ მიუხედავად ამისა ყველა შემთხვევაში ხახუნის შედეგად ზედაპირული ფენის მასალა “იღლება” და იწვევს ცვეთის ნაწილაკების სახით მოცილებას.

დაღლითი ცვეთის ერთგვარი განვითარებაა ნ.სუს მიერ წამოყენებული ცვეთის თეორია აშრეების (შრეებად აცლის) საშუალებით, რომელიც ემყარება მრავალჯერადი დატვირთვისა და გაფუჭებულობების აკუმულირების პრინციპებს ზედაპირის ქვედა შრეში. ნ.სუს ეს თეორია განავითარა ლითონ-ლითონის წყვილის ხახუნის შესწავლისას, თუმცა მიუთითა მისი გამოყენების შესაძლებლობაზე ყველა მყარი სხეულის მიმართ, მათ შორის პოლიმერული კომპოზიციური მასალების მიმართაც, სადაც მათი ცვეთა შეიძლება იყოს ზედაპირზე ზედაპირისქვეშა ნაპრალების ზრდისა და ზედაპირზე გამოსვლის რეზულტატი /7/. აქვე უნდა აღინიშნოს ამ მოსაზრებას არ იზიარებენ ნაშრომის /8/ ავტორები, რომლებიც თვლიან რომ პოლიმერული კომპოზიციური მასალების ცვეთის ნაწილაკების წარმოქმნა ხახუნისას მიმდინარეობს სხვა მექანიზმით. ისინი თვლიან, რომ ამ სფეროში შემდგომი სამუშაოები დაკავშირებული უნდა იყოს ხახუნისას მიმდინარე მიკროსტრუქტურულ ცვლილებებთან, პოლიმერებში მათი ფრიქციულ დატვირთვისას ზედაპირულ და ზედაპირქვეშა ნაპრალების ზრდის კინეტიკასთან,

ცვეთის ინტენსივობის კავშირის დაზუსტებასთან დადებითი ნაპრალების ზრდის სინქარესთან და სხვა.

აღჭეზიური ცვეთა წარმოიქმნება აღჭეზიური ურთიერთქმედების შედეგად, რომელსაც იწვევს ატომურ-მოლეკულური ბუნების ძალების ქმედება. ლითონებისათვის ეს ძალებია – ლითონური კავშირები, კერამიკისთვის – ვალენტური კავშირების ძალები, პოლიმერებისათვის – ელექტროსტატიკური ძალები, ვან-დერ-ვაალსის ძალები და წყალბადური კავშირები. ხახუნისას განვითარებულ ტემპერატურებს შეუძლიათ გამოიწვიონ, როგორც დამაზუსტებელი, ასევე განმამტკიცებელი მოქმედება კონტაქტური დიფუზიის გაძლიერებიდან გამომდინარე. აღჭეზიის მოქმედების შედეგად ხდება შედარებით რბილი ან “სუსტი” უბნების ამოგლეჯა, უფრო მაგარი მასალისაგან. აღჭეზია შესაძლებელია აღიძრას არა მარტო შემზეთი მასალების არარსებობისას, არამედ იმ ზედაპირებს შორისაც, რომლებიც დაფარულია ადსორბირებული და ქიმიური ბუნების აფსკებით და სითხეებით, თუ ლოკალურ პირობებს მიყვავართ დამცავი აფსკის დაზიანებასთან. ამავე დროს აღჭეზიური ცვეთის კოეფიციენტები შესაძლებელია განსხვავდებოდეს რამდენიმე რიგით, როდესაც ამ მასალების ხახუნის კოეფიციენტები შეიძლება იყოს ერთმანეთთან ძალიან ახლოს /9/.

ჟანგვითი ცვეთა დაკავშირებულია მოხახუნე ზედაპირების ზედაპირული ფენების ჟანგვითი პროცესების აქტივაციასთან პლასტიკური დეფორმაციის, მაღალი ტემპერატურისა, ციკლური დატვირთვების მოქმედების და გარემომცველ გარემოში ჟანგბადის არსებობის შედეგად. ჟანგვითი ცვეთის დროს პირველად, როდესაც ჟანგეულების აფსკები ძალიან თხელი და ელასტიურებია, ისინი თამაშობენ დადებით როლს და იცავენ ზედაპირებს დაზიანებებისაგან. გაზრდისას, ისინი სქელდებიან, მყიფე ხდებიან და დატვირთვისას იშლებიან. შემდეგ წარმოიქმნიებიან ახალი აფსკები და ისევ იცავენ ცვეთისგან ძირითად მასალას. ამრიგად, ჟანგვითი ცვეთა- ეს არის პროცესი, რომლის დროსაც იშლება არა ცვეთადი დეტალის მასალა, არამედ მისი მეორადი სტრუქტურები – ოქსიდები, რომლებიც წარმოიქმნიებიან ხახუნის პროცესის დროს.

დასასრულს, შეიძლება ითქვას, რომ სუფთა სახით არცერთი ზემოდ ჩამოთვლილი და განხილული ცვეთის მექანიზმი პრაქტიკულად არ გვხვდება, უფრო მეტად გამოვლინდება ცვეთის წამყვანი მექანიზმი და მისი თანმხლები ფორმები, რომლებიც დამოკიდებულია ხახუნის კვანძის მუშაობის პირობებზე.

შეიძლება დავასკვნათ, რომ ცვეთის იდიალური და სრული თეორია არ არსებობს და ყოველი კონკრეტული მასალის, განსაკუთრებით პოლიმერული კომპოზიციური მასალების ხახუნის შესწავლისას საჭიროა ზედაპირული ფენების ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების და ამ ფენების თვისებების დეტალური გამოკვლევები, გამომდინარე იქიდან, რომ რეალურ ხახუნის კვანძებში შეუღლებული სხეულების თხელი ზედაპირული შრეების თვისებები იცვლება დროის განმავლობაში და ძირეულად განსხვავდებიან თვისებებისაგან სიდრმისეულ შრეებში, განსაკუთრებით პოლიმერულ მასალებში.

1.2.2. ფრიქციული გადატანის მოვლენა

ფრიქციული გადატანის მოვლენა მასალების ხახუნისას გამოვლენილ და ახსნილ იქნა გასული საუკუნის 60-იან წლებში. მანამდე ი.კრაგელსკიმ ფორმულირება გაუკეთა “მესამე სხეულის” საერთო გაგებას, რომელიც ფორმირდებოდა მოხახუნე სხეულებს შორის და რომელთაც დრეკადბლანტი თვისებები ახასიათებდათ /4/. რულეიმ და ტეიბორმა ახსნეს ტეფლონისა და პოლიეთილენის ფრიქციული და ცვეთის თვისებების ანომალია, რომელიც გამოირჩეოდა მასალის გადატანის მაღალი უნარიანობით, თვითშეზეთვით და მათი მოლეკულური პროფილის სიგლუვით /9/. პოლიმერული მასალების ხახუნისას მასის გადატანა შეისწავლა ბევრმა მეცნიერმა, მათ შორის ავტორებმა /5,10/. ამ გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ გადატანის აფსკის წარმოქმნა გადამწყვეტ როლს ასრულებს ლითონური და მეტწილად ლითონპოლიმერული მასალების ხახუნის და ცვეთის პროცესებისას, ხოლო გადატანილი აფსკების თვისებები განაპირობებენ ტრიბომასალების საექსპლუატაციო მახასიათებლებს. ხახუნის კვანძების ნორმალური ფუნქციონირებისა-

თვის საჭიროა ფრიქციული გადატანის პროცესის მიმდინარეობის დინამიკის და გადატანის აფსკების მექანიზმის გამოკვლევა რათა, ახალი მასალების შემუშავებისას მეცნიერულად დასაბუთებულად იმართოს მათი თვისებები, რაც მიგვიყვანს ხახუნის კვანძის დეტალების ცვეთამედგობის გაზრდამდე.

არსებობს ფრიქციული გადატანის მოვლენის საანგარიშო მოდელები და რაოდენობრივი შეფასების დამოკიდებულებები. ყველა მათგანს აქ ჩვენ არ განვიხილავთ, მოვიყვანთ ადჰეზიურ-მექანიკური მოდელის მაგალითს, რომელიც გამოიკვლიეს კარმა და ბაჰადურმა /11/. მათ ერთ-ერთმა პირველებმა აჩვენეს თხელი პოლიმერული აფსკების წარმოქმნა ლითონის ინდენტორის სრიალისას პოლიმერულ ზედაპირზე. პოლიმერის გადატანა ლითონის ზედაპირზე ახსნილია ძლიერი ადჰეზიური ურთიერთქმედებით დაკონტაქტებული სხეულების ზედაპირულ შრეებს შორის. დატვირთვის მოქმედების შედეგად ხდება პოლიმერული ფენის ჭრა და მასალის გადატანა, რის შედეგადაც ლითონის ზედაპირზე წარმოიქმნება სრიალის მიმართულებით ორიენტირებული აფსკი. ამავე მეცნიერებმა წარმოადგინეს ადჰეზიურ-ენერგეტიკული მოდელი და განსაზღვრეს პოლიმერული მასალების ცვეთის ნაწილაკების სისქე.

აქვე უნდა ავღნიშნოთ, რომ ცვეთის მექანიზმების, განსაკუთრებით ფრიქციული გადატანის თანამედროვე გამოკვლევების ჩატარება შეუძლებელია ახალი მეთოდებისა და დანადგარების გამოყენების გარეშე. მაგალითად, დიდი პრაქტიკული გამოყენება აქვს რასტრული ელექტრონულ მიკროსკოპს (რემ), რომელიც ინფორმაციას იძლევა მოხახუნე ზედაპირის რელიეფზე და სტრუქტურაზე და რენტგენოსპექტრალური მიკროანალიზის (რსმა) მეთოდს, რომლის საშუალებით ემატება ცნობები ზედაპირულ ფენაში ელემენტების განაწილებაზე. ხშირად ხდება ამ მეთოდებთან ოჟე-ელექტრონული სპექტროსკოპიის (ოეს) და რასტრული ოჟე-მიკროსკოპიის (რომ) მეთოდების კომბინირება.

ფრიქციული გადატანის აფსკების წარმოქმნის მექანიზმი დამოკიდებულია, როგორც მოხახუნე წყვილის მასალის ტიპზე (სიმაგრის, ქიმიური აქტივობის, შემესვრების არსებობით), ასევე

ზედაპირის მდგომარეობაზე (სიმქისეზე, მექანიკური დამუშავების სახეზე, მიმუშავებაზე და სხვა).

პოლიმერული მასალების ფრიქციული და ცვეთის თვისებები ასევე განისაზღვრება გადატანილი აფსკის სისქით, რომელიც იცვლება ტემპერატურასთან დამოკიდებულებით. ტემპერატურა ხელს უწყობს ცვეთის ნაწილაკების აუტოჰეზიის გაზრდას და მონოლითური აფსკის მიღებას. ის ამავე დროს შეიძლება იყოს შემვსებების ზემოქმედების ეფექტურობის ამაღლების კატალიზატორი აუტოჰეზიის გაძლიერებაზე. პრაქტიკულად ყველა პოლიმერულ კომპოზიციურ მასალას შეუძლია წარმოქმნას ხახუნის ზედაპირზე ფრიქციული გადატანის ამა თუ იმ ბუნების აფსკი, რომელიც ფლობს შემხეთი აფსკის ყველა თვისებას. ამავე დროს ამ მასალების აფსკის წარმოქმნის კინეტიკა თითქმის ერთნაირია. მიმუშავების პირველ ეტაპზე ზედაპირები დაფარულია ადსორბირებული აფსკებით, თანაბარი ცვეთის პერიოდში ფორმირდება გადატანის პოლიმერული აფსკი მყარ მდგომარეობაში, შემდეგ გადნება და ინტენსიური ცვეთისას ხდება მისი ექსტრუდირება (გამოსვლა) ხახუნის ზონიდან /12/.

ფრიქციული გადატანის აფსკების თვისებების გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა ვმართოთ როგორც ანტიფრიქციული, ასევე ფრიქციული დანიშნულების ხახუნის წყვილების მაჩვენებლები. ფრიქციული პოლიმერული მასალები (მაგ: სამუხრუჭე ხუნდებში), როგორც წესი მუშაობენ მაღალი ტემპერატურების პირობებში, რომლებიც წარმოიქმნიან სტაციონალური და განმეორებად – მცირე დროში მოქმედი (დამუხრუჭების) ხახუნის პირობებში. დატვირთვის, სინჯარის და დროის გაზრდით (ფაქტიურად ტემპერატურის გაზრდით) ლითონური კონტრსხეულის ზედაპირზე ფრიქციული გადატანის აფსკის სისქე იზრდება. დაბალი ცვეთის ინტენსივობის მიღწევის მიზნით საჭიროა გადატანილ იქნას შეძლებისდაგვარად სქელი (5 მკმ-დე) მონოლითური და კოჰერენტული აფსკი. ინტენსიური ცვეთა იწყება მხოლოდ ფრიქციული გადატანის აფსკის რღვევის შემდეგ, როგორც ეს ხდება ანტიფრიქციული კომპოზიციების შემთხვევაში /13/.

ამრიგად, ფრიქციული გადატანა წარმოადგენს კომპოზიციური მასალების ცვეთის მექანიზმის მნიშვნელოვან ასპექტს, ხოლო

ფრიქციული გადატანის მექანიზმის თავისებურებათა ცოდნა ქმნის ახალი მასალების შემუშავების სამეცნიერო ბაზას და მშრალი ხახუნის კვანძების მიზანმიმართულ კონსტრუირებას.

1.2.3. გაცვეთა

გაცვეთა უნდა ჩაითვალოს ცვეთის ერთ-ერთ სახეობად. ქართულ ტერმინოლოგიაში ცვეთას და გაცვეთას ერთი გაგება აქვს, მაგრამ თუ განვიხილავთ უცხოურ ტერმინოლოგიას, მაგ. ინგლისურს მას შეესაბამება ტერმინი – abrasive wear, scuffin და რუსულს - истирание /14/. დ.მური ასე განსაზღვრავს /1/: გაცვეთა ლითონებთან გამოყენებით განისაზღვრება, როგორც ეროზიული ცვეთის ფორმა, რომელიც გამოწვეულია ზედაპირში მრავალრიცხოვანი წვრილი ნაწილაკების ჩანერგვის მოქმედებით. ამ კუთხით საფანტ-ჭავჭავური და ქვიშაჭავჭავური დამუშავება შესაძლებელია განვიხილოთ, როგორც გაცვეთის ზღვრული შემთხვევა. შეჯახების მექანიზმი ამ დროს შეიძლება იყოს ნაკლებ ძლიერი იმასთან შედარებით, რაც იწვევს ადგილობრივი დაფშვნის ტიპის დაზიანებებს და ამ დროს აბრაზიული ცვეთა იქნება შედარებით თანაბარი და უწყვეტი.

არსებობს ლითონების გაცვეთის (აბრაზიული ცვეთის) რამდენიმე სხვადასხვა მექანიზმი, როგორებიცაა ამოტეხა, ხეხვა და ეროზიული ცვეთა, რომელიც დამოკიდებულია ცვეთის პროდუქტების ზომებისაგან. გაცვეთისადმი მდგრადობა განისაზღვრება მასალის უნარით გაუწიოს წინააღმდეგობა არადრეკად დეფორმაციას. მაგ. ხეხვის დროს ორი ცვეთადი ზედაპირი ეხახუნება ერთმანეთს მარცვლოვან არეში და ეკრობიან ისეთი ძალით, რომელსაც შეუძლია დაამსხვრიოს ზედაპირებს შორის მოხვედრილი მინერალური ნაწილაკები ან სხვა აბრაზიული მასალა. აბრაზივის დამსხვრეული მარცვლებს გააჩნიათ ბასრი ნაწიბურები და უნარი დაკაწროს მაღალი სისალის ფოლადი. დაზიანება ხდება ნაკაწრებისაგან, ადგილობრივი პლასტიკური გაღინებისგან და მიკრონაპრალებისაგან. ხეხვისას ცვეთის სიჩქარეები მცირეა, მაგრამ ცვეთის სიჩქარე კილოგრამებში გამოხატული ერთ ტონა გაცვეთად მასალაზე ძალზედ მაღალია,

რადგან ამ პროცესში მონაწილეობენ დიდი ფართობის მქონე ზედაპირები.

1.2.4 ცვეთის პროდუქტები

ცვეთის სხვადასხვა მექანიზმების განხილვისას აღინიშნა, რომ ცვეთა მეტწილად განისაზღვრება რამდენიმე მექანიზმით, რომლებიც მოქმედებენ ცალ-ცალკე ან ერთად, და ეს განსაკუთრებით შეიძლება ეხებოდეს ლითონებს. დ.მური /1/ აღნიშნავს, რომ ლითონების ცვეთა წარმოადგენს რთულ მოვლენას და დამოკიდებულია ისეთი ფაქტორებისაგან, როგორცაა განმტკიცება და დაუცველი ლითონის დაუხანგვა, ლითონის გადატანა და მისი შემადგენლობის ფაზური ცვლილებები და სხვა. ცვეთის დროს აუცილებლად წარმოიქმნება ცვეთის პროდუქტები და მათ ხასიათს, რაოდენობას, მარცვლების ზომას, შედგენილობას და სხვა თვისებას ბევრად განაპირობებს ცვეთის ხასიათი და მექანიზმი. მაგალითად, განიხილავს რა მური შეუწყვეტელ (უწყვეტ) ცვეთას, აღნიშნავს, რომ ამ ტიპის ცვეთის ძირითადი თავისებურება არის ის, რომ მასალა სცილდება წვრილი ნაწილაკების სახით, რომლებიც შემდეგ ზეთის საშუალებით შორდება და არ იწვევს ზედაპირის შესამჩნევ დაზიანებას. დატვირთვის გაზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს ძლიერ ცვეთაზე გადასვლა, რის შედეგად ზიანდება ზედაპირი და ცვეთის პროდუქტებმა შესაძლოა მიიღოს ლითონური ქერცლის სახე.

სხვა სახეს იღებს ცვეთის პროდუქტები ანაგლეჯის პროცესის განვითარებისას. ანაგლეჯი განსაზღვრავს ისეთ მექანიზმს, რომლის განმასხვავებელ თავისებურებას წარმოადგენს ზედაპირების ლავისებური სიღრმისეული რღვევა. ამის გამომწვევი მიზეზი შეიძლება იყოს მაღალი ტემპერატურა დიდი დატვირთვებისა და სიჩქარის დროს. ამ დროს ხდება ლითონის გადატანა დიდი დისკრეტული ნაწილაკების სახით. ასეთი სახის დაზიანება დამახასიათებელია ჰიპოიდური კბილანური გადაცემებისათვის.

აქედან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ ცვეთის პროდუქტების წარმოქმნა წარმოადგენს ლითონების ცვეთის მექანიზმის

განუყოფელ ნაწილს, მიუხედავად იმისა ამ პროდუქტებს აქვთ ცალკეული “მარცვლების” თუ წვრილი ფხენილის სახე.

ცალკე განხილვის საკითხია სად მიდის წარმოქმნის შემდეგ ცვეთის პროდუქტები. თუ ხახუნის კვანძები იზეთება, მეტწილად ისინი ზეთს გამოაქვს და თანდათანობით ზეთი ბინძურდება. მშრალი ხახუნისას გროვდება ხახუნის კვანძის სიახლოვეს ან განიბნევა ატმოსფერულ ჰაერში. განსაკუთრებით ეს ხდება ტრანსპორტის მოძრაობისას და ცნობილია, რომ ავტომობილების მუხრუჭები წარმოადგენენ ატმოსფეროს დამაბინძურებელ ერთ-ერთ წყაროს, იმის გამო რომ მათი ზესადებები შეიცავდნენ (40 მას.%-მდე) ქრიზოლიტ-აზბესტის ბოჭკოებს – კანცეროგენული თვისებების მქონე ნივთიერებას. აზბესტის გარდა პოლიმერული ფრიქციული მასალები შეიცავენ შემკვრელ ფისებს, ლითონურ და კერამიკულ შემკვსებებს და მათი ცვეთის პროდუქტები რთული შემადგენლობისაა, მაგრამ ადამიანის ჯანმრთელობისათვის ყველაზე საშიშს მაინც აზბესტის ბოჭკოები წარმოადგენს.

ნაშრომის /15/ ავტორებმა შეისწავლეს მუხრუჭების აზბესტშემცველი ზესადებების ცვეთა და ცვეთის პროდუქტები სპეციალურ სტენდზე, სადაც მუხრუჭი მოთავსებული იყო გარსაცმში, სადაც გამორიცხული იყო ატმოსფერული ჰაერის შეღწევა, თუმცა მასში ჰაერი ცირკულირებოდა და სპეციალურ ფილტრებზე ხდებოდა ცვეთის პროდუქტების დაჭერა და ფიქსირება, ცვეთის პროდუქტების ნაწილი ჯდებოდა მუხრუჭის დეტალებზე. ცვეთის პროდუქტების ანალიზმა აჩვენა, რომ აზბესტის ბოჭკოების შემცველობა ჰაერის მიერ წადებულ ცვეთის პროდუქტებში შეადგინა 0,02% მათი 2,38 მგ. წონისას 1 კმ გარბენაზე გაანგარიშებით. ბოჭკოების საშუალო სიგრძე 0,6 მკმ-ის ტოლი იყო. ნაშრომში /15/ ასევე ნაჩვენებია იყო, რომ აშშ-ს ატმოსფერულ ჰაერში გასული საუკუნის 80-იან წლებში მარტო ავტომობილების მუხრუჭების ცვეთის შედეგად 6 ტ-ზე მეტი აზბესტი განიბნეოდა და ეკოლოგიურად მძიმე სურათს ქმნიდა.

ასევე საინტერესოა შესწავლილ იქნას უაზბესტო ფრიქციული მასალების ცვეთის პროდუქტები, რადგანაც ისინი ბევრი ინფორმაციის

შემცველ პროდუქტებს წარმოადგენენ, საინტერესოა მათი ზომები, შემადგენლობა, მათი გავლენა ეკოლოგიურ სიატუაციაზე და სხვა.

შვედმა მეცნიერმა უ.ოლოფსონმა და სხვა /16,17/ შეიმუშავეს მეტად ორიგინალური დერო-დისკური ხელსაწყო, რომელიც საშუალებას იძლევა დისკოზე საცდელი ფრიქციული მასალის დეროს სახით კონტაქტისას და ხახუნისას წარმოქმნილი ცვეთის ნაწილაკები გასუფთავებული ჰაერის საშუალებით დახურული კამერიდან წარიტაცოს, დაგროვდეს ფილტრებზე და შემდეგ გაიზომოს მათი ზომები, ფორმა და ელემენტური შემადგენლობა სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპის და ენერგოდისპერსიული რენტგენოსხივური მიკროანალიზის მეთოდებით. საველე ცდების დროს ძნელი გასარჩევია მუხრუჭის ცვეთის ნაწილაკები და ტრანსპორტის მიერ გამოფრქვეული აეროზოლები. დერო-დისკური ხელსაწყოს საშუალებით ლაბორატორიული ცდების ჩატარებამ საშუალება მისცა მეცნიერებს საცდელი ნიმუშის ცვეთის ნაწილაკებით გარემომცველი ჰაერის დაბინძურების ხარისხის გაკონტროლებისა.

1.3 სამუხრუჭე ფრიქციული მასალების ტიპები და მათი დამზადების ტექნოლოგიები.

ტექნიკის სწრაფი განვითარება მოითხოვს შეიქმნას და განუწყვეტლივ დაიხვეწოს მასალები, რომლებიც შეძლებენ სხავდასხვა მოთხოვნილებების სრულიად დაკმაყოფილებას. ასეთ მასალებს წარმოადგენენ ფრიქციული მასალებიც, რომელთა დანიშნულებაა ისეთ კვანძებში მუშაობა, რომლებიც გადასცემენ ან გაფანტავენ კინეტიკურ ენერგიებს.

ფრიქციული კომპოზიტების მასალების მთელი ჯგუფი იყოფა ორ ძირითად ქვეჯგუფად:

1. მასალები, მომუშავე მუხრუჭებში, რომლებიც მიმართული არიან ხახუნის ხარჯზე შექმნან ხელოვნური მოძრაობის წინააღმდეგობა. მათ მიეკუთვნება სამუხრუჭე ხუნდები, ზესადებები და სამუხრუჭე ლენტები.

2. მასალები მომუშავე გადაბმულობის ქურებში, რომლებიც მიმართული არიან მანქანის ერთი ნაწილიდან მოძრაობის გადაცემისათვის მეორეზე ხახუნის ხარჯზე. მათ მიეკუთვნება გადაბმულობისა და სექტორის ზესადებები.

ასეთი მასალების ეფექტური მუშაობა განისაზღვრება ხახუნის კოეფიციენტის მნიშვნელობით, მისი სტაბილურობით მასალის სხვადასხვა რეჟიმში მუშაობისას და მათი ცვეთამედგობით.

მიღებულია, რომ ფრიქციულ მასალებს მიეკუთვნება ის მასალები, რომელთა ხახუნის კოეფიციენტი კონტრსხეულთან წყვილში მშრალი ხახუნის დროს აღემატება 0,2-ს.

მუშაობის რეჟიმზე დამოკიდებულებით მიღებულია, რომ ფრიქციული მასალები, დაიყოს 5 ჯგუფად: - ძალიან მსუბუქ რეჟიმზე მომუშავე მასალები – მაქსიმალური ტემპერატურა – 100°C; - მსუბუქი - 250°C; - საშუალო – 600°C; - მძიმე – 1000°C; უმძიმესი - 1000°C-ზე ზევით /18/.

თანამედროვე ფრიქციულ მასალებს წაყენება მოთხოვნათა შემდეგი კომპლექსი:

- უნდა უზუნველყოფდნენ ხახუნის კოეფიციენტის აუცილებელ სიდიდეს და სტაბილურობას;
- კარგად უნდა მიმუშავდნენ კონტრსხეულთან, არ უნდა მოხდეს მათი ურთიერთ “მოჭიდება” დასაშვებ დონეზე მაღლა;
- უნდა იყვნენ კოროზიამედგობი და არაწვადი;
- უნდა უძლებდნენ მაღალ შინაგან დაძაბულობას;
- უნდა ფლობდნენ საკმარის მექანიკურ სიმტკიცეს;
- უნდა იყვნენ ცვეთამედგობი მასალები;
- უნდა გაჩნდეთ შესაბამისი თბოფიზიკური თვისებები;
- მასალების მუშაობის ხანგრძლივი ვადა.
- არ წრიპინებდნენ დამუხრუჭებისას და უსაფრთხო ცვეთის პროდუქტები.

როგორც წესი, ხახუნის კოეფიციენტზე ფრიქციულ წყვილებს გააჩნიათ როგორც ქვედა, ასევე ზედა ზღვრული მნიშვნელობები (უფრო ხშირად უნდა იყოს დაცული პირობა $0,2 \div 0,5$). საანგარიშო საშუალო ხახუნის კოეფიციენტი საავტომობილო მუხრუჭებში და გადაბმულობებში მიღებულია 0,3-ის ტოლად.

ფრიქციული მასალები უნდა იყვნენ ტექნოლოგიურად ადვილი მისაღები, უნდა გააჩნდეთ დაბალი თვითღირებულება და უნდა მზადდებოდნენ არადეფიციტური და იაფი ნედლეულიდან.

თანამედროვე ტექნიკაში გამოიყენება ფრიქციული მასალების სხვადასხვა ტიპები:

- ორგანული (კორპო, ტყავი, ხე და სხვა),
- ლითონური (თუჯი და ზოგიერთი მარკის ფოლადი),
- ლითონურკერამიკული (რკინისა და სპილენძის ფუძეზე)
- უაზბესტო პოლიმერულ კომპოზიციური მასალები.

ყველაზე ფართო გავრცელება და გამოყენება დღემდე ჰპოვეს პოლიმერულმა ფრიქციულმა მასალებმა, რომლებიც წარმოადგენენ მრავალკომპონენტო კომპოზიციებს, რომლებიც არ შეიცავენ აზბესტს და შეიცავენ პოლიმერულ შემკვრელს, ფხვნილისებრ არაორგანული და ორგანული ბუნების სხვა შემკვრელებს. პოლიმერულ შემკვრელად გამოიყენებიან კაუჩუკები და ფისები, ზოგჯერ მათი კომბინაციები. ყველაზე მეტად გამოიყენება ბუტადიენური, ბუტადიენ-ნიტრილური, სტიროლური და სხვა სინთეზური კაუჩუკები. ფართოდ იხმარება ფენოლფორმალდეჰიდური და ანილინოფორმალდეჰიდური ფისები, მათი მოდიფიკაციები და სხვა.

კაუჩუკის ბაზაზე მიღებულ ფრიქციულ მასალებს გააჩნიათ მუშაობის უნარი შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე ($200-300^{\circ}\text{C}$). უფრო მაღალ ტემპერატურაზე მათ გააჩნიათ არასაკმარისი თბომდეგობა და შესაბამისად გადიდებული ცვეთა. თერმორეაქტიული ფისები ანიჭებენ ფრიქციულ მასალებს შედარებით მაღალ თბომდეგობას.

ფრიქციულ პოლიმერული კომპოზიტებში წვრილდისპერსიული კომპონენტები (როგორცაა ბარიტი, რკინის სურინჯი, თითბერი,

სპილენძი, გრაფიტი და სხვა) შეჰყავთ იმიტომ, რომ მასალამ მიიღოს ისეთი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები, რომლებიც საბოლოო ჯამში განსაზღვრავენ მასალის ტრიბოტექნიკურ თვისებებს.

დამზადების მეთოდის მიხედვით ასეთი სახის მასალები განირჩევიან:

1. სამუხრუჭე მოწყობილობებისათვის – დაყალიბება-დაწნეხვა (ხუნდები და ზესადებები).

2. გადაბმულობის ქუროებისათვის (რგოლები) – დაყალიბება-დაწნეხვა, მაღალტემპერატურული ქსოვილების ბაზაზე მიღება, -სპირალურად და ელიფსურად დახვეული ზესადებების დამზადება.

დაწნეხვით ფრიქციულ მასალებს და ნაკეთობებს ღებულობენ პრესფორმებში სპეციალურად მომზადებული კომპოზიციებიდან. ამ მეთოდმა, ამჟამად, ყველაზე უფრო ფართო გავრცელება ჰპოვა ფრიქციული მასალების წარმოებაში. აღნიშნული მეთოდის ღირსებას წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის შემკვრელებისა და შემესებების განუსაზღვრელი რაოდენობით პრაქტიკული გამოყენება ფრიქციული მასალების რეცეპტურის დახვეწისათვის.

13.1. უაზბესტო ფრიქციული პოლიმერული მასალების ტექნოლოგია

პირველად უაზბესტო ფრიქციული პოლიმერული მასალები 30-იან წლებში იქნა გამოყენებული ავტომობილების ფრიქციულ ზესადებებში. მათგან აღსანიშნავია სხვადასხვა სახის ტექსტოლიტები, სხვადასხვა პრეს-კომპოზიციები, რომლებიც შეიცავდნენ ბამბის ქსოვილებს და სხვა. ამ მიზნით იხმარებოდა ასევე ხე, ტყავი, თუჯი და სხვა მასალები. შემდეგ ფართო გამოყენება ჰპოვა აზბესტ-შემცველმა ფრიქციულმა მასალებმა, რომლებიც დომინირებდნენ 60-70 წელი. ამჟამად მეტწილ ქვეყანაში ისინი აკრძალულია, თუმცა ზოგიერთ ქვეყანაში დღესაც იხმარება (ძირითადად დაბალი თვითღირებულების გამო).

უაზბესტო ფრიქციულმა პოლიმერულმა მასალებმა ფართო განვითარება და გამოყენება ჰპოვეს მხოლოდ ოთხმოციანი წლების

დასაწყისიდან. ამ საქმის განვითარების დიდი პერიოდი აიხსნება სხვადასხვა მიზეზებით: კვლევის სირთულით, აზბესტის ფართოდ გამოყენებით, მისი შემცველი ნედლეულის კონიუნქტურით, გარემომცველი გარემოს დაცვის ღონისძიებათა გაძლიერებით და სხვა. ფრიქციულ მასალებში აზბესტის გამოყენება აიკრძალა მსოფლიოს ყველა განვითარებულ ქვეყანაში. იმ ქვეყნებში კი, სადაც ჯერჯერობით ასეთი აკრძალვა არ არის, მისგან დამზადებულ ნაკეთობებზე ასვამენ დამღას “A” (საშიშია აზბესტი!) ასეთი ქვეყანაა რუსეთი, სადაც არ არის ოფიციალურად აკრძალული აზბესტის გამოყენება.

მიუხედავად იმისა, რომ აზბესტის შემცველებზე გადასვლა საზღვარგარეთ მიმდინარეობდა ჩქარი ტემპით, ეს საკმაოდ რთულ პროცესს წარმოადგენდა. არცერთ ბოჭკოს არ შეუძლია თვისობრივად მთლიანად შეცვალოს აზბესტის ბოჭკო. გარდა ამისა, არ არსებობს ისეთი შემცველი, რომელიც ფლობს ისეთსავე მახასიათებლებს, როგორსაც აზბესტიანი მასალები. განსხვავებულია ბევრ შემთხვევაში წარმოების ტექნოლოგიური პროცესებიც, რაც თხოულობს სულ ახალ მასალებს.

განვიხილოთ აზბესტის უნიკალური თვისებები, რის გამოც ის დიდი ხნის განმავლობაში წარმოადგენდა ფრიქციული მასალების ერთ-ერთ ძირითად და შეუცვლელ კომპონენტს და რომლის უშუალოდ 100%-ით შემცველი ნივთიერება დღემდე არ არის მოძებნილი და შექმნილი.

აზბესტის ელემენტარული ბოჭკოები წარმოადგენენ სუბმიკრონულ მილაკებს, რომელთა გარე დიამეტრიც 32 ნმ-ია და შიდა 2,6 ნმ, ე.ი. ბოჭკოს განივი მიმართულებით გააჩნია ზომები, რომელიც დამახასიათებელია კოლოიდურ დისპერსიული მასალებისათვის. ელემენტარული ბოჭკოები ჩალაგებულია წნულების (ნართის) სახით რამდენიმე ათეულიდან ასეულ მიკრონის დიამეტრით და წნულში ბოჭკოები კავდება მოლეკულათაშორისო მიზიდულობის ძალებით. ბოჭკოების საშუალო სიგრძე 1÷3 მმ-ია. ქიმიური ბუნებით აზბესტი წარმოადგენს მაგნიუმის წყლიან სილიკატს. მას ახასიათებს გაჭიმვაზე დიდი სიმტკიცე (3 გპა-მდე), რაც ბევრად აღემატება ფოლადის სიმტკიცეს. ბოჭკოების ღრუები ნახევრად ან მთლიანად გაფსებულია

წყლით, რომელიც შიდა ზედაპირზე წარმოქმნის პრაქტიკულად მონომოლეკულარულ შრეს, რომელიც ისეთ თვისებას არ ავლენს, როგორც ჩვეულებრივი ტენი, და რომლის მოშორება შეიძლება მხოლოდ 425°C ზევით გახურებისას. ამ ნივთიერების კრისტალური მესერის სახეობა დღემდე არ არის ზუსტად დადგენილი. აზბესტი ფლობს მაღალი ხახუნის კოეფიციენტს (0,8-მდე), რომელიც მცირედ იცვლება ტემპერატურისაგან დამოკიდებულებით. მისი ბოჭკოების სიმტკიცე მხოლოდ 20%-ით მცირდება 400°C-ზე გაცხელებისას. მხოლოდ 800°C ტემპერატურაზე ხდება ბოჭკოს სტრუქტურის რღვევა. აზბესტი კარგად “სველდება” შემკვრელი ფისებისა და კაუჩუკებისაგან და კარგად “შთანთქავენ” მათ გახსნილ ან გამლღვალ მდგომარეობაში. მას გააჩნია მოქნილობა, მაღალი წინაღობა ჭრაზე და ზედაპირის დიდი ფართი. მიუხედავად ყოველივე ზევით მოყვანილი თვისებებისა, აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ხელოვნურად მიღებულ მინისა და ბაზალტის ტიპის ბოჭკოებს არ გააჩნიათ აზბესტის ისეთი თვისება, როგორცაა ლითონური კონტრსხეულის ზედაპირის გაწმენდა (გასუფთავება) და ამავე დროს ცვეთის პროდუქტების შთანთქმა და შეკვრა.

აზბესტის შემცველების ძეგნისას აშშ-ში გამოყენებულ იქნა ბამბა, მინის, ნახშირის, კერამიკული და არამიდული ბიჭკოები, მინერალი ვოლასტონიტი, ფოლადის ბოჭკო, თიხა, ქარსი და სხვა მრავალი ხელოვნური მასალები. შედეგად, მხოლოდ 50-ზე ცოტა მეტი მასალა იქნა მიჩნეული აზბესტის პოტენციურ შემცველებად განსხვავებული ფასებითა და გავრცელებით /19/.

უნდა აღვნიშნოს, რომ საზღვარგარეთ დღეისათვის შექმნილი ბევრი უაზბესტო ნაკეთობა ფლობს უფრო მაღალ ტექნიკურ მახასიათებლებს, ვიდრე აზბესტიანი. მათ გაჩნიათ დიდი ხანგამძლეობა და პირველადი მახასიათებლების სტაბილურობა. ამერიკული ფირმა “სააბის” მიერ შექმნილი ახალი სამუხრუჭე ზესადებების ხანგამძლეობა სამჯერ მეტია ჩვეულებრივზე, ისინი შეუცვლელად მუშაობენ ავტომობილის გარბენის 80 ათას კილომეტრზე. ამ მასალებში გამოყენებული ნივთიერებების საერთო რიცხვი აღწევს 300-

ს. ეს შესაძლებლობას იძლევა დამზადდეს ზესადებები სხვადასხვა თვისებებით, რომლებიც შეირჩევა კონკრეტული სამუხრუჭე სისტემისათვის წნევასა და ტემპერატურასთან შესაბამისობაში.

ფირმა “ოპელის” ავტომობილებზე უაზბესტო ფრიქციული მასალები, რომლებიც შეიცავენ არამიდულ ბოჭკოებს “კეველარს”, გამოყენებულია 1984 წლიდან. არამიდულ ბოჭკოს ამზადებს ფირმა “დუ პონტი”. დაბალმა სიმკვრივემ, მაღალმა სიმტკიცემ და მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედებისადმი მდგარდობამ გახადა ეს ბოჭკო აზბესტის ბოჭკოს ერთ-ერთ ძირითად შემცველად ფრიქციულ მასალებში. მისი კარგი დამუშავებადობა და ერთგვაროვანი შერევის შესაძლებლობა სხვა კომპოზიტებთან ძირითად ფაქტორებად გვევლინებიან ამ მასალების დამზადებისას. ამასთანავე უნდა აღინიშნოს, რომ “კეველარის” არამიდული ბოჭკო ფრიქციულ მასალებში გამოიყენება სხვადასხვა სახით: მძიმე რეჟიმში მომუშავე გადაბმულობის ქუროს ზესადებებისათვის - დიდი სიგრძის ბოჭკოები; დაჭრილი დაგრეხილი ბოჭკოები - ბარაბნული სამუხრუჭე მექანიზმებისა და გადაბმულობის ქუროს ზესადებებში; ძალიან მოკლე სიგრძის ბოჭკოები - პულპა, რომელიც შეიცავს განსაზღვრული რაოდენობით წვრილ მტვრისებრ ნაწილაკებს. გამოირკვა, რომ პულპის მოცულობითი 2-3% ცვლის 20-30% აზბესტს სამუხრუჭე მექანიზმების ზესადებებში /20/.

საზღვარგარეთული პატენტებისა და სამუშაოების ანალიზის შედეგად ირკვევა, რომ მკვლევართა დასკვნები, თუ რომელი აზბესტის შემცველი ნივთიერებაა საუკეთესო, მეტწილად ერთმანეთს არ ემთხვევა. ზოგიერთი მკვლევარი ბაზალტის ბოჭკოს აძლევს უპირატესობას, ზოგიერთი კი ლითონის ბოჭკოს, არამიდულ ბოჭკოს და ა.შ.

პოლონელმა მეცნიერებმა იანეცკიმ და სხვებმა /21/ გამოიკვლიეს უაზბესტო ფრიქციული მასალები, სადაც აზბესტის შემცველად გამოყენებული იყო ნახშირბადის ბოჭკო, პოლიაკრონიტრილის დანახშირებული ბოჭკო, მინაბოჭკო, ბაზალტის ბოჭკო. ავტორებმა მიიღეს საინტერესო შედეგები, ამ მასალებს ხახუნის კოეფიციენტის 15-20%-ით ნაკლები მნიშვნელობა აქვთ (ბაზალტის გარდა), მაგრამ ეს

ანაზღაურებულია მისი დიდი სტაბილურობით. ამასთანავე, ავტორები აღნიშნავენ, რომ ყველაზე უფრო შესაფერის აზბესტის შემცველად შეიძლება ჩაითვალოს ფოლადის ბოჭკო, რომელიც კომპოზიციაში შეყვანამდე დამუშავებულია სპეციალური მოდიფიკატორით და ის ყველაზე უფრო იაფი ბოჭკოა სხვა აზბესტშემცველ მასალებს შორის. ამ სამუშაოში ყველა მასალისათვის შემკვრელ პოლიმერულ ფისად გამოყენებული იყო ფენოლფორმალდეჰიდური ფისი.

ა.პოლსიანმა და სხვებმა /22,23/ გამოსცადეს შტაპელური ბაზალტისა და მინის ბოჭკოს ფუძეზე მიღებული უაზბესტო პოლიმერული კომპოზიციები (ბაზალტის შტაპელური ბოჭკო წარმოებული იყო სომხეთის საბადოს მინერალური ნედლეულიდან). მათ შეისწავლეს ბოჭკოების თერმოგრაფიკული თვისებები და აჩვენეს, რომ ბაზალტის ბოჭკოების ინტესიური დაშლა (დესტრუქცია) იწყება 750°C ტემპერატურაზე, რაც 150°C-ით მეტია აზბესტის ბოჭკოს თერმიულად დაშლის ტემპერატურაზე ხახუნის პროცესში. ეს დაამტკიცა ტრიბოტექნიკური მახასიათებლების შესწავლამ მაღალ ტემპერატურებზე. ამავე დროს თითქმის ორჯერ შემცირდა ფრიქციული ზესადების ცვეთა და ერთნახევარჯერ გაიზარდა ხახუნის კოეფიციენტი; სამუშაოში ნაჩვენებია, რომ ფრიქციულ მასალებში აზბესტის შემცველად ბაზალტის ბოჭკოს გამოყენება იძლევა ფრიქციული კვანძების ხანგამძლეობისა და მუშაუნარიანობის გაზრდის შესაძლებლობას. ამასთანავე უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთი ტექნიკური ეფექტი მიიღწევა ბაზალტის შტაპელურ ბოჭკოსთან ერთად სხვა სახის ბოჭკოების შეყვანით, როგორცაა მინაბოჭკო და ნახშირბადის ბოჭკო და ისეთი ნივთიერების დამატებით, როგორცაა ტუფი, რკინის ქანგი, გრაფიტი და სხვა /23/.

მეტად საინტერესოა ამერიკული პატენტი /23/, სადაც არასტაბილური ამორფული მინა, გამოიყენება როგორც კომბინირებული ფრიქციულ-მამოდიფიცირებელი და მაარმირებელი კომპონენტი. მინას აქვს ტენდენცია სითბური ზემოქმედების შედეგად სწრაფად გამოკრისტალდეს ბოჭკოსებრ ფორმაში. ხახუნის სითბოს მოქმედებით ამორფული ბოჭკოს ნაწილი თანამიმდევრობით დაკრისტალდება გადნობის და ზედაპირის დამარილიანების გარეშე.

დაკრისტალიზებული ნაწილი გამოეყოფა ზედაპირს ისე, რომ არ ამცირებს ხახუნის კოეფიციენტს, ხოლო ბოჭკოს ამორფული ნაწილი განაგრძობს მართმირებელი ფუნქციის შესრულებას. ამ მინების თავისებურება არის ის, რომ იძლევა შესაძლებლობას მისი ნადნობიდან ბოჭკოსებრი ფორმით მიღებას. ასეთებია სილიკატური, ტიტანური, ფოსფატური და ბორატული მინები და ასევე მათი ნარევები. შესაბამისი ამორჩევით შესაძლებელია კრისტალიზაციის რეალიზაცია ტემპერატურების საჭირო დიაპაზონში, რომელიც განისაზღვრება დამუხრუჭების ენერჯით. კომპოზიტების შემკვრელ ფისად გამოიყენეს ფენოლფორმალდეჰიდური და ფენოლფურფუროლური ფისები, სადაც ბოჭკოები აიღებოდა 70 მას.%-მდე.

სხვადასხვა ფირმების მიერ შემუშავებული სამუხრუჭე ხუნდები, ზესადებები, ლენტები გამოიყენება ავტომობილებში, რკინიგზის ტრანსპორტში, საწარმოო აგრეგატებში და სხვა. უაზბესტო ფრიქციული კომპოზიციები, როგორც ავღნიშნეთ წარმოადგენენ მრავალკომპონენტის სისტემებს, რომლებიც შეიცავენ ბოჭკოვან მასალებს, შემვსებებს, ლითონურ კომპონენტებს, სხვადასხვა დანამატებს და შემკვრელებს. თანამედროვე ფრიქციული მასალების მისაღები კომპოზიციები ძალიან მრავალგვაროვანია. უმეტეს შემთხვევებში ისინი შეიცავენ 15-20-მდე კომპონენტს. როგორც წესი რეცეპტურის ზუსტი შედგენილობა წარმოადგენს ფირმის მიერ დაცულ საწარმოო საიდუმლოს.

ცხრილი №1.

ფრიქციული კომპოზიციების ინგრედიენტების ზოგადი შესაძლო შედგენილობები.

| მ ა ს ა ლ ა | შემადგენლობა მას.% |
|--|--------------------|
| 1. ბოჭკოები: ა) არაორგანული (ბაზალტის, მინის, კერამიკული და სხვა). ბ) ორგანული (ნახშირბადის, არამიდული, ცელულოზის და სხვა.) გ) ლითონური. | 0-60 |
| 2. შემვსებები: ა) არაორგანული (ლითონის ოქსიდები, ბარიტი, შპატი და სხვა.). ბ) ორგანული (გრაფიტი, ტექნიკური ნახშირბადი და სხვა). | 5-30 |

| | |
|---|------|
| 3. ლითონები – სპილენძის, თითბერის, რკინის, თუჯის და სხვა ფხვნილები. | 5-70 |
| 4. მოდიფიკატორები, პლასტიფიკატორები, ზეთები, დამარბილებლები. | 0-5 |
| 5. შემკვრელები – ფენოლური ფისები (ფხვნილები, ხსნარები), კაუჩუკები (ბუტადიენ-სტიროლური, ქლოროპრენული და სხვა.) | 5-35 |

14 ფოროვანი ფრიქციული მასალების შესახებ წარმოდგენების განვითარება

ფოროვანი ფრიქციული მასალების შესახებ წარმოდგენების განხილვამდე საჭიროა იმ ინფორმაციის ანალიზი, რაც არსებობს საერთოდ ფოროვან მასალებზე, ფორიანობაზე, მათ ზომებზე, მათ როლზე ხახუნისას და ა.შ. ასეთი ინფორმაცია მოწოდებულია მონოგრაფიებში /25-28/. გამოირკვა, რომ ხახუნის კვანძების დეტალებში ფოროვანი სტრუქტურის შექმნის იდეა დაპატენტებულ იქნა 1870 წელს საფრანგეთში, ფართო გავრცელება კი ჰპოვა XX საუკუნის 50-იან წლებში. ამოშკოვმა /25/ გაანალიზა, რა იმ წლების ფხვნილოვანი მეტალურგიის მიღწევები ფოროვანი მასალების შექმნაში, გააკეთა შემდეგი დასკვნები: ერთ-ერთი ფაქტორი, რომელიც მოქმედებს ფოროვანი ლითონკერამიკული მასალების თვისებებზე, არის მისი ფორიანობა. მასალის ფორები წარმოქმნიან შეერთებულ კაპილარულ არხებს. ფორიანობა შესაძლოა შეიცვალოს თავისი ფარდობითი სიდიდით და ხასიათდება ასევე ფორების სიდიდით და სისხოთი. ფორების ფარდობითი ფორიანობა და სისხო მთლიანად დამოკიდებულია ფოროვანი მასალის მიღების ტექნოლოგიურ პროცესზე. უმეტეს შემთხვევებში მასალების ფორების სისხო დამოკიდებულია საწყისი ფხვნილების გრანულიმეტრიულ შედგენილობაზე. ფარდობითი ფორიანობა დამოკიდებულია ფხვნილების შემჭიდროვების (გამკვრივების) ხარისხზე ბრიკეტების დამზადების პროცესში. ფორების ზეთით შევსება განაპირობებს მათ ძირითად თავისებურებას – თვითშეზეთვას. საერთოდ ითვლება, რომ ფოროვანი ზედაპირი ანტიფრიქციულია, თუ მას შეუძლია შეიწოვოს საზეთი და შემდეგ გამოყოს ის ფრიქციული დატვირთვისას /29/. ეს

მოსაზრება ვრცელდება, როგორც ტექნიკურ, ასევე ბუნებრივ მასალებზე (ლითონკერამიკა, ძვლოვანი სახსრები, დანაფარები და სხვა). ცნობილია, რომ ფორები ასრულებენ რა სახეთის რეზერვუარის როლს, ერთროულად წარმოადგენენ ხახუნის დროს წარმოქმნილი სტრუქტურის განსხვავებული მიკროდეფექტების შენაკადებს. ისინი აკავებენ ცვეთის პროდუქტებს და ქმნიან ბარიერს მიკრონაპრალების განვითარების გზაზე. უდოვიცი /28/ აღწერს, რა ცვეთის პროდუქტების დაკავებას ფორებში აგრეგატული ნაწილაკების სახით, აღნიშნავს რომ ამას მიყვავართ ხახუნის ხასიათის ხარისხობრივ ცვლილებასთან. ამ დროს შესაძლებელია, რომ სრიალის ხახუნი გადავიდეს გორვის ხახუნში, თუ კი ფორების უბებში შეკავებულ იქნება სფეროსებრი ნაწილაკები, რაც მიუთითებს გამოვლენილი მოვლენის სინერგიულ ხასიათზე. ამასთანავე აღმოჩნდა, რომ ფოროვანი მასალის ფრიქციულ კონტაქტზე წნევის გაზრდისას ის იძენს ახალ თვისებას: იზრდება ფრიქციული კონტაქტის ცალკეული უბნების დრეკადობა, რითაც იქმნება გაძრომის (გაცურების) პირობები, რომლის დროს ანომალურად მცირდება ხახუნის კოეფიციენტი და ცვეთის ინტენსივობა. იგივე ავტორმა იკრაგელსკისთან ერთად /29/ განავითარეს აზრი, რომ თუ მასალების ხახუნისას დომინირებს დადებითი ცვეთის მექანიზმი, მაშინ ამ დროს განვითარებული რღვევის პროცესები ხასიათდებიან სხვადასხვა ეტაპების იერარქიული თანამიმდევრობით, როგორებიცაა მასალაში დეფექტების, მიკროფორების, მიკრობზარების და ა.შ. წარმოქმნა და განვითარება. ასეთი სტრუქტურული ელემენტების რანგი იზრდება ეტაპიდან ეტაპამდე და საბოლოო მდგომარეობამდე, რომელიც წარმოადგენს მასალის ცვეთისას ხახუნის ახალი ზედაპირის წარმოქმნის და ცვეთის პროდუქტებს. ავტორების აზრით საწყისი ფოროვანი მასალის რანგი უფრო მაღალია, ვიდრე არაფოროვანის ე.ი. სტრუქტურული გარდაქმნების შესაძლებლობები (ეტაპების რიცხვით) რღვევამდე, პირველი უფრო ახლოს არის საბოლოო მდგომარეობამდე, ვიდრე მეორე.

ზემოთმოყვანილი მოსაზრებები და ანალიზი ადასტურებს ფოროვანი მასალების უპირატესობებს ხახუნისას, როგორც სახეთის გამოყენებისას, ასევე მის გარეშე.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ სხვადასხვა ფორმების მიერ შემუშავებული ფრიქციული მასალების ინგრედიენტების რაოდენობა 15-20 აღწევს ან ცდილობენ სხვადასხვა ტექნოლოგიური მეთოდებით აზბესტის “მსგავსი” სტრუქტურის შექმნას, მაგ. სხვადასხვა ზომის ფორების სახით და სხვა. რომ გამოვეყოთ ფორების როლი ფრიქციული მასალების ხახუნისას, საინტერესო იქნება მოვიყვანოთ ასეთი მაგალითი. ცნობილია, რომ აზბესტ-შემცველი ფრიქციული მასალების სამუშაო ტემპერატურა არ აღემატებოდა 400°C-ს, მათი შემკვრელის, ძირითადად ფენოლური ფისების, ამ ტემპერატურაზე ინტენსიური დესტრუქციის გამო, რაც იწვევს ხახუნის კოეფიციენტის სწრაფ დაცემას, რაც ასევე მიუღებელი იყო. ამავე დროს გასული საუკუნის 60-იან წლებში შექმნილმა სამგზავრო რეაქტიულმა თვითმფრინავებმა მოითხოვეს ფრიქციული მასალების გაცილებით მაღალი მუშა ტემპერატურები - 1000°C-მდე, თუნდაც დროის მცირე მონაკვეთში. ეს პრობლემა მეცნიერების მიერ გადაწყვეტილ იქნა ფრიქციული მასალის “რეტინაქსის”, მაგ. მარკა ΦK-16Л /30/ შექმნით, რომელიც 1000°C ტემპერატურაზე ფლობდა მაღალ ხახუნის კოეფიციენტს (0,3) და 3-4-ჯერ უფრო მაღალი ცვეთამედეგობით გამოირჩეოდა ასეთ მაღალ ტემპერატურაზე ჩვეულებრივ აზბესტ-შემცველ მასალებისაგან. ამ მასალას გააჩნდა თვისება ლითონური კონტრსხეულის ზედაპირის დამატებითი ხეხვის და იგი მაღალ ტემპერატურებზე არ ჩხაპნიდა და არ კრავდა მას, წარმოქმნიდა ძალზედ ნაკლებ თერმიულ ნაპრალებს, ვიდრე სხვა მასალები. გამოირკვა, რომ ამ ეფექტს მეცნიერებმა მიაღწიეს ძალზედ დაბალ ტემპერატურაზე (70°C) ლღობადი ნივთიერების – კანიფოლის შეყვანით “რეტინაქსის” კომპოზიციაში, რომელიც დამუხრუჭებისას მასალის ზედაპირზე იწვოდა და ქმნიდა ფიჭურ, ფოროვან სტრუქტურას, სადაც შემდგომ მაღალ ტემპერატურებზე “შეიზილებოდა” ცვეთის დაკოქსილი პროდუქტები, რომლებიც შემდგომი დამუხრუჭებისას იცავდა ფენოლურ შემკვრელს დესტრუქციისაგან და აბლაციურ ეფექტს ქმნიდა. რა თქმა უნდა ამით აზბესტს უქმნიდა ექსპლუატაციის უკეთეს პირობებს მაღალ ტემპერატურებზე. ეს არის შედარებით მარტივი ახსნა იმ ეფექტისა,

რასაც იწვევდა კანიფოლის შეყვანა ფრიქციული მასალის კომპოზიციაში, მაგრამ აქ მთავარია ის, რომ შემდგომ წლებში და ამჟამადც მეცნიერებს არ შეუწყვეტიათ მუშაობა ფორიანობის, ფორების როლის შესწავლაზე ხახუნისას და რისი დადასტურებაცაა მოყვანილი სათანადო პატენტები. მაგალითად, ცნობილია Valeo-ს ფირმის ფრანგული პატენტი /31/, სადაც მუხრუჭებისა და გადაბმულობის ქუროების ფრიქციული მასალები შეიცავენ პოლიმერულ მატრიცას, ბოჭკოვან მაარმირებელ კომპონენტებს და შემესებებს და მათი თვისებების გაუმჯობესების მიზნით შემუშავებულია მასალის სტრუქტურაში ფორების (წვრილი კაპილარების) მიღების ტექნოლოგია, რომელთა ზომები – 1-20 მკმ-ია.

იაპონურ პატენტში /32/ აღწერილია უაზბესტო ფრიქციული მასალა მუხრუჭების შესადებებისათვის, სადაც 5-30 მას.% შეყვანილია ნივთიერებები, რომლებიც 200-350°C ტემპერატურაზე თერმოდამუშავებისას 10 საათის განმავლობაში თერმიულად იშლებიან და მასალაში წარმოქმნიან ფორებს, რომლებიც მას იცავენ რღვევისაგან მაღალი დატვირთვების ზემოქმედებისას.

ინგლისურ პატენტში /33/ შემოთავაზებულია უაზბესტო კომპოზიციური ბოჭკოვანი მასალა, სადაც ბოჭკოს სახით გამოყენებულია არამიდული, ცელულოზას, კერამიკული და ბაზალტის ბოჭკოები და სხვადასხვა სახის ხახუნისა და ცვეთის მოდიფიკატორები (შემესებები) და მაღალი ფორიანობის უზრუნველყოფელი მისი მიღების ხერხი. ამ დროს მასალის სიმკვრივე 72%-ზე ნაკლებია თეორიულისგან განსხვავებით და ჩვეულებრივ 65%-ია. კომპონენტების შერევის შემდეგ იწნეხება მასალა ამ სიმკვრივით და შემდეგ ხდება შემკვრელის გამყარების ციკლის დამთავრება ისეთ პირობებში, სადაც გამორიცხულია მასალის სიმკვრივის შეცვლა.

ასევე საინტერესო პატენტებია ფოროვან ფრიქციულ მასალებზე, რომლებიც შემუშავდა რუსეთის ფედერაციაში 1998-2001 წლებში /34-37/. რუსულ პატენტში /34/, ნაჩვენებია შექმნილი ფრიქციული ნაკეთობა, რომელიც შეიცავს პოლიმერულ მატრიცას, ბოჭკოვან მაარმირებელ კომპონენტებს და შემესებებს, რომელიც შესრულებულია მიკროფოროვანი სტრუქტურით ურთიერთდაკავშირებული

სიცარიელებით, რომელსაც ქმნის ძაფები და ამასთანავე ნაკეთობა დამატებით შეიცავს ნაწილაკებს, რომლებსაც აქვთ კაპილარულ-ფოროვანი სტრუქტურა და რომელთა კაპილარული ფორები ურთიერთკავშირშია ნაკეთობის მიკროფოროვან სიცარიელებთან.

მიკროსიცარიელების და კაპილარულ-ფოროვანი ნაწილაკების ურთიერთკავშირი ერთდროულად უზრუნველყოფს ხახუნისას დაშლის პროდუქტების და წყლის თანდათანობით თითქმის მთლიან დესორბციას ნაკეთობიდან ფრიქციული კონტაქტების შუალედებს შორის. ამის შედეგად ხდება ნაკეთობის ფრიქციული თვისებების აღდგენა, ე.ი. იზრდება მისი ფრიქციული მახასიათებლების სტაბილურობა.

პატენტი /35/ ეხება ფრიქციულ ნაკეთობას, სადაც შემკვრელთან, მარმირებელ ბოჭკოვან კომპონენტებთან და შემვსებებთან ერთად გამოყენებულია ნავთობიდან მიღებული კოქსის ნაწილაკები, კარბონიზაციის ან ორგანოზომილებიან მოწესრიგების სტადიაში მყოფი, რომელთაც გააჩნიათ ფოროვანი სტრუქტურა. ეს პატენტი გამორჩეულია, იმით, რომ თითქმის ერთადერთია იმ პატენტებს შორის, სადაც გამოყენებულია ფოროვანი სტრუქტურის მქონე დანამატი, თუმცა ხელოვნურად შექმნილის, რომელიც წარმოადგენს დისპერსიულ სისტემას დისპერსიული და კრისტალების და ფორების სახით. თავისი სტრუქტურული აგებულების ხარჯზე გამოყენებული კოქსის ნაწილაკები ქმნიან ხახუნის ზედაპირზე ჰეტეროგენულ სისტემას და ზრდიან ძვრისადმი და დეფორმაციისადმი წინააღმდეგობას, რის საფუძველზე უმჯობესდება ფრიქციული ნაკეთობის ტრიბოტექნიკური მახასიათებლები და მცირდება ლითონური კონტრსხეულის ცვეთა.

პატენტში /36/ შემუშავებულია ფრიქციული ნაკეთობა, რომელიც შეიცავს ფრიქციულ პოლიმერულ კომპოზიტს, რომელსაც გააჩნია მიკროფოროვანი სტრუქტურა ურთიერთდაკავშირებული მიკროსიცარიელებით და რომელიც დამატებით შეიცავს დისპერსიულ ნაწილაკებს, რომლებიც წარმოადგენილია ისეთი ნივთიერებებისაგან, რომელსაც წყალთან ურთიერთქმედებისას შეუძლია გაჯირჯება და ისეთ ნაწილაკებად დაშლა, რომელთა ზომები თანაზომადია მიკროფორების ზომებთან. ასეთ ნივთიერებას წარმოადგენს

ბენტონიტური თიხის ფხვნილი. გაჯირჯეების შედეგად წარმოქმნილი და დაშლილი ბენტონიტის ნაწილაკები ფრიქციული ნაკეთობის ნესტიან პირობებში ექსპლუატაციისას უზრუნველყოფენ ფორების გადაკეტვას, როგორც მათი მოცულობის გაზრდით გაჯირჯეებისას, ასევე ფორების განიკვეთების ჩაკეტვით მცირე ზომის წარმოქმნილი ნაწილაკებით. ამის შედეგად მცირდება დამუხრუჭების ეფექტურობის ვარდნის ხარისხი და შესაბამისად იზრდება ნაკეთობის საექსპლუატაციო მახასიათებლები.

წინა პატენტის /36/ თითქმის ანალოგიურია პატენტი /37/, სადაც ისეთ დისპერსიულ მასალად, რომლის ნაწილაკებს წყალთან ურთიერთობისას წარმოქმნას სტრუქტურები, რომლებიც ზრდიან დისპერსიული ნაწილაკების მოცულობას, გამოყენებულია ლითონები, ცემენტი, თაბაშირი და სხვა. მაგ. გამოყენებულია რკინის ისეთი შენადნობი, რომელიც სწრაფად იჟანგება წყალში, რის შედეგად მიიღწევა ისეთივე ეფექტი (ფორების ჩაკეტვის), როგორც წინა პატენტში და საექსპლუატაციო თვისებების გაუმჯობესება.

ფოროვანი ფრიქციული მასალების შემუშავების პატენტების განხილვამ აჩვენა, რომ ძირითადად ტექნოლოგიური ხერხების გამოყენებით შექმნილი ფორიანობა აუმჯობესებს პოლიმერული ფრიქციული მასალების საექსპლუატაციო მახასიათებლებს, რომლებიც მუშაობენ მაღალი დატვირთვებისა, თუ ნესტიან პირობებში.

შენიშვნის სახით გვინდა გამოეთქვათ ჩვენი მოსაზრება იმის თაობაზე, რომ რუსულ პატენტში /34/ კაპილარულ-ფოროვანი სტრუქტურის მქონე შემგებად დასახელებულია ბარიტის კონცენტრატი და თეთრი მური – ბორის ნიტრიდი, რასაც შეიძლება არ დავეთანხმეთ. ცნობილია, რომ ბარიტის კონცენტრატი წარმოადგენს თითქმის ყველა პოლიმერული ფრიქციული მასალის (კომპოზიტის) აუცილებელ კომპონენტს, რომელიც ეწინააღმდეგება მასალის გაცვეთას (ის წარმოადგენს ინერტულ შემგებებს, რომელიც შეიცავს 80-98 მას.% უწყლო ბარიუმის სულფატს) და ხელს უწყობს ხახუნის კოეფიციენტის სტაბილიზაციას. ის მძიმე შემგებად (4,5 გრ/სმ³) ითვლება და მას არ გააჩნია ფოროვანი სტრუქტურა /38/, თუმცა შესაძლებელია კონცენტრატის შედგენილობაში დოლომიტის,

კალციუმის კარბონატის, კვარცის და ჰემატიტის გარკვეული რაოდენობით შემცველობა ერთგვარად განაპირობებდეს ფორიანობის შესაძლო არსებობას, თუმცა ამის დამადასტურებელი რაიმე ცნობა ჩვენთვის უცნობია. ასევე შეიძლება ითქვას ბორის ნიტრიდზეც. ცნობილია, რომ თავისი სტრუქტურული აღნაგობით ის მიეკუთვნება მყარ შემზეთებს, როგორებიცაა გრაფიტი, მოლიბდენის დისულფიდი და სხვა და ის უზრუნველყოფს ხახუნის კოეფიციენტის როგორც რეგულირების საშუალებას, ასევე მის სტაბილიზაციას ე.ი. იგი მიეკუთვნება ხახუნის მოდიფიკატორების ჯგუფს.

მიუხედავად იმისა, რომ წარმოების მიერ გამოშვებული აზბესტო სამუხრუჭე ხუნდები აკმაყოფილებენ ძირითად ტექნიკურ მოთხოვნებს (მაღალი ხახუნის კოეფიციენტი, სტაბილური სამუხრუჭე რეჟიმი, მაღალ ტემპერატურებზე $\sim 350^{\circ}\text{C}$ ხახუნის კვანძის მუშაუნარიანობის შენარჩუნება), მათ უმრავლესობას მაინც გააჩნიათ გარკვეული ნაკლოვანებები, რომლებსაც მიეკუთვნებიან: წრიპინი დაბალ სიჩქარეებზე დამუხრუჭებისას, ხმაური მაღალი სიჩქარით მოძრაობისას, დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება სამუხრუჭე სისტემის 350°C -ის ზევით გაცხელებისას, ხახუნის კოეფიციენტის მაღალი მაჩვენებლის არასტაბილურობა (ვარდნა) მშრალიდან სველ ხახუნზე გადასვლის მომენტში და სამუხრუჭე დისკოს ცვეთის მაღალი ინტენსივობა;

ცნობილია, რომ კომპოზიციების შემდგენების ტიპისა და რაოდენობის, მათი ნაწილაკების ფორმისა და ზომების ოპტიმალური შერჩევით შესაძლებელია მნიშვნელოვნად კონტროლი გაუწეოთ მიღებული ფრიქციული კომპოზიციური ნაკეთობების თბოფიზიკურ, მექანიკურ და სხვა თვისებებს.

უნდა აღინიშნოს, რომ უმეტესობა, სერიულად გამოშვებულ სამუხრუჭე ხუნდებს ახასიათებთ სხვადასხვა ხარისხის ზემოთაღნიშნული ნაკლოვანებები და აზბესტშემცველ სამუხრუჭე ხუნდებთან შედარებით ისინი უფრო ძვირადღირებულია. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, აგრეთვე იმის გამო, რომ აზბესტშემცველი სამუხრუჭე ხუნდების წარმოება გარემოს დაცვითი ორგანოების მიერ აკრძალულია, სამუხრუჭე ზესადებების

წარმოებისათვის ახალი უაზბესტო კომპოზიციური მასალების შექმნის გზების ძიება დღესაც წარმოადგენს აქტუალურ სამეცნიერო-ტექნიკურ ამოცანას /39/.

ჩვენის აზრით ერთ-ერთ შესაძლებელ გზას არსებული სამუხრუჭე ზესადებების ზემოთ აღნიშნულ ნაკლოვანებების აღმოფხვრისათვის, წარმოადგენს ისეთი ნანოფორიანი მასალის შექმნა, რომელსაც ექნება გაუმჯობესებული ტრიბოლოგიური თვისებები ხახუნის მაღალი ტემპერატურის (~600°C) პირობებში.

1.5 ახალი თაობის სამუხრუჭე ხუნდების ზესადები მასალების განვითარების თანამედროვე ტენდენციები.

სამუხრუჭე ხუნდების ზესადები მასალების განხილვისას ავლნიშნეთ, რომ როდესაც საუბარია აზბესტის შეცვლაზე ამ მასალებში, თითქმის შეუძლებელია ისეთი უშუალო შემცვლელის მოძებნა ფრიქციული მასალების კომპოზიციებში შესაყვანად, რომელიც უზრუნველყოფდა მათ მაღალ ტრიბოლოგიურ თვისებებს და მინიმუმამდე იქნებოდა დაყვანილი ზემოდ აღნიშნული ნაკლოვანებები. თუმცა ნაკლოვანებები გააჩნდა აზბესტშემცველ ფრიქციულ მასალებსაც და მაშინაც ხდებოდა ამ მასალების თვისებების გაუმჯობესება სხვადასხვა გზებით. ერთ-ერთ მაგალითზე რეგინაქსის სახით ჩვენ უკვე ვისაუბრეთ, სადაც ამ მასალის ტემპერატურამედგობა და მუშაუნარიანობა განაპირობა ზედაპირზე ფიჭისებრი ფორიანი სტრუქტურის წარმოქმნამ ხახუნისას, რამაც უზრუნველყო ამ მასალის საექსპლოატაციო თვისებები 1000°C-მდე. თუმცა დროის მცირე მონაკვეთში (რეაქტიული თვითმფრინავების დამუხრუჭებისას). როგორც ვიცით მუშაობა აზბესტის შეცვლაზე კომპოზიტებში დაწყებულ იქნა გასული საუკუნის 70-80-იან წლებში და როგორც ავლნიშნეთ ლიტერატურულ მიმოხილვაში, გამოიცადა აზბესტის ბევრი შემცველი მასალა, მათ შორის ბოტკოვანი სტრუქტურის მქონე, როგორებიცაა არამიდული (კველარის), ნახშირბადოვანი, მინის და ბაზალტის, ფოლადის, ცელულოზას ბოტკო და სხვა. მიგვაჩნია, რომ ამ ბოტკოების გამოყენებამ უზრუნველყო ფრიქციული მასალის არმირება და გამტკიცება, ბევრად გაზარდა მასალების წინააღმდეგობა ცვეთისადმი და თუ მივუდგებით

ფორიანობის პრინციპით, უნდა ავლნიშნოთ, რომ ამ ბოჭკოების დისკრეტულობამ და არათანაბრად განაწილებამ მასალის მთელ მოცულობაში, გარკვეულ წილად, მაგრამ არასაკმარისად, უზრუნველყო ეს მასალები ფორიანობით, რაც აუმჯობესებს მათ საექსპლოატაციო თვისებებს. თუ გამოვყოფთ ამ ბოჭკოებიდან ყველაზე საუკეთესო ბოჭკოს და ამ პერიოდისათვის ახალი თაობის ფრიქციული მასალებისათვის საუკეთესო თვისებების მინიჭებას, ჩვენის აზრით ეს იყო არამიდული, ე.წ. კველარის ბოჭკო, რომლის 5 მას.%-ის შეყვანა უკვე იწვევდა კომპოზიტების ტრიბოლოგიური თვისებების მკვეთრ გაუმჯობესებას და რომელმაც შეცვალა 40 მას.% აზბესტის ბოჭკო. გამოყენებული კველარის ბოჭკოს დიამეტრი მასალებში მერყეობდა 10-20 მკმ-ის ფარგლებში. ფრიქციულ მასალებში კველარის უწყვეტი მეთოდით მიღებულ ბოჭკოებს იყენებენ დისკრეტული ბოჭკოს (3-5მმ) ან პულპის სახით. მისი ტემპერატურული მდგრადობა 450-500°C, რაც იმ პერიოდისთვის საკმარისი იყო დისკურ მუხრუჭებში ზესადებად გამოყენებისათვის. ასევე ფრიქციულ მასალებში არამიდულმა ბოჭკოებმა ნაწილობრივ წარმატებულად შეითავსა სხვა სახის ბოჭკოებიც, მაგ. მინის და ბაზალტის ბოჭკო და სხვა. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ არამიდულ ბოჭკოებს ახასიათებთ თბური გაფართოების უარყოფითი კოეფიციენტი, რომელიც იზრდება ტემპერატურის ზრდისას. კველარის ბოჭკო ამავე დროს ძნელად იწვის და ერთ-ერთ უმტკიცეს ბოჭკოდ ითვლება მსოფლიოში პოლიეთილენის ბოჭკოს “დენიმას” შემდეგ. მან საუკეთესო მექანიკური თვისებები მიანიჭა ფრიქციულ მასალებს. მოთხოვნებისდამიხედვით მისი შემცველობა კომპოზიტებში 5 მას.%-დან შეიძლება გაიზარდოს 15-20 მას.%-მდე და მეტჯერაც. ნაშრომში /40/ აღნიშნულია, რომ ფირმა Du Pont-ის მიერ წარმოებული კველარის ბოჭკოს გამოყენებამ ფრიქციულ მასალებში განსაზღვრა შემდეგი უპირატესობანი: ცვეთამედეგობა 3-ჯერ მეტია, ვიდრე აზბესტიანი ფრიქციული მასალების შემთხვევაში, უზრუნველყოფენ სტაბილურ ხახუნის კოეფიციენტს მაღალ ტემპერატურებზე, კარგ მუშაუნარიანობას დაბალ ტემპერატურებზე, ამცირებენ ხმაურის დონეს და ვიბრაციებს, სამუხრუჭე სითხის კარგ თბოიზოლაციას და როგორც ავლნიშნეთ, დიდ სიმტკიცეს. მიუხედავად

ბოჭკოს სიძვირისა, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ აღნიშნულ წლებში არამიდული ბოჭკოების გამოყენებამ ფრიქციულ მასალებში შექმნეს ახალი თაობა და დღეისათვის ამ სახის ფრიქციული მასალების თვისებები ბევრად გაუმჯობესებულია შემკვრელი ფისების მოდიფიცირების, შემესებების აპრეტირების, დისპერსიულობის ხარისხის გაზრდით და სხვა სახით. ბევრი წამყვანი ფირმა როგორებიცაა Mintex-Don და Ferodo (დიდი ბრიტანეთი), Tex-star (გერმანია) და სხვა წარმატებით აწარმოებენ არამიდული ბოჭკოს შემცველ ფრიქციულ მასალებს.

ახალი თაობის ფრიქციულ მასალებად დღეისათვის შეიძლება ჩაითვალოს ასევე ნახშირბად-ნახშირბადოვანი კომპოზიციური მასალები, რომელთა მიღება თითქოსდა რთული ტექნოლოგიის რანგს მიეკუთვნება, მაგრამ მათი გამოყენების სფეროები ფართოვდება და კოსმოსურ აპარატებში გამოყენების შემდეგ, შესაძლებელი გახდა მათი გამოყენება სარკინიგზო და საავტომობილო ტრანსპორტშიც. მ მასალების მუშაობის დიაპაზონი 1000°C -მდეა, $400-600^{\circ}\text{C}$ -ის პირობებში ახასიათებთ სტაბილური ხახუნის კოეფიციენტი 0,5-0,6 ფარგლებში და მაღალი ცვეთამედეგობა /41/. ასეთი მასალების მიღების საინტერესო პატენტია /42/, რომელთა ავტორები ამერიკის შეერთებული შტატების მეცნიერებია და მათ მიერ ნაჩვენებია ნახშირბად-ნახშირბადოვანი კომპოზიციური მასალის მიღების ახალი ხერხი, რომელიც მზადდება ღია ფორების მქონე ნახშირბადოვანი ქაფპლასტურ დანამზადისაგან, რომელიც შემდგომში განიცდის გამკვრივებას. ამ ნახშირბადოვან დანამზადში იმიტირებულია ნახშირბადოვანი ბოჭკოს სტრუქტურა, რომელსაც გამკვრივებამდე წნევით შეერევა სქელფისა, რის შემდეგ ამ ნარევეს უტარდება კარბონიზაცია და გრაფიტირება. პატენტის ტექნიკური შედეგია – დამუხრუჭების ძალიან მაღალი ეფექტურობა ხახუნის დინამიკური კოეფიციენტის გაზრდის ხარჯზე და ამასთანავე ფიზიკურ-მექანიკური, ფრიქციული თვისებების, კერძოდ მასალის ცვეთამედეგობის შენარჩუნება.

2. შედეგები და მათი განსჯა.

2.1. ამოცანის დასმა, კვლევისათვის კომპოზიციების შემუშავება და მათი ტესტირების მეთოდების შერჩევა

აღნიშნულ სამუშაოს ლიტერატურული მიმოხილვის გაცნობის შემდგომ ნათელი ხდება, რომ უაზბესტო ფრიქციული მასალების შემუშავების პროცესში კომპოზიციაში აზბესტ-შემცვლელ ინგრედიენტებად გამოყენებული ნივთიერებები: სხვადასხვა სახის ბოჭკოები, ხახუნის მოდიფიკატორები, დანამატები, პლასტიფიკატორები, ლითონური ოქსიდები და სხვა ბევრად აუმჯობესებენ მათ ტრიბოლოგიურ თვისებებს. მაგრამ აღმოჩნდა, რომ წამყვანი ფირმების მიერ გამოშვებულ ფრიქციულ ხუნდებსაც კი ახასიათებთ გარკვეული ნაკლოვანებები და შეზღუდვები ტემპერატურული რეჟიმის მხრივ (~400°C-მდე). ამ ნაკლოვანებების აღმოფხვრის ერთ-ერთ გზას წარმოადგენს გარკვეული სახის ფორიანობის შექმნა ფრიქციულ მასალებში, რომლებიც შემდგომში უზრუნველყოფს ამ მასალების საექსპლოატაციო თვისებების გაუმჯობესებას. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ სამუშაოში განხილული პატენტები ძირითადად აღწერენ მასალათა ფორიანობას, რომელიც ყალიბდება მათ მოცულობაში სხვადასხვა ტექნოლოგიური ხერხის გამოყენებით, ე.ი. მათი შექმნა ხდება ხელოვნურად. მაგალითად, არამიდული ბოჭკოს შეყვანა დისკრეტული სახით არმირების გარდა განაპირობებს გარკვეული ფორიანობის ჩამოყალიბებას, რომელსაც ქმნიან ძაფები ურთიერთდაკავშირებული სიცარიელების ხარჯზე. ნახშირბადოვანი ბოჭკოს გამოყენებამ კიდევ უფრო წარმოაჩინა ფორიანობის დადებითი როლი, რადგან ტექნოლოგიური ფორიანობის ჩამოყალიბებასთან ერთად თვით ეს ბოჭკო სტრუქტურულად ფოროვანი აგებულებისაა, თუმცა ისიც ხელოვნურად შექმნილი სქელფისას გრაფიტიზაციისას. გამოჩნდა, რომ ფრიქციული მასალების შემუშავებისას ნაკლებად ექცეოდა ყურადღება ბუნებრივი ფორიანობის მქონე მასალების გამოყენების საკითხებს და თან ეს მეცნიერულად არ იყო შესწავლილი. ჩვენთვის ცნობილი იყო მხოლოდ დიდი ბრიტანეთის ერთი პატენტი /43/, რომელიც ეხებოდა უაზბესტო ფრიქციული მასალის შემუშავებას,

სადაც ცელულოზის პულპასა და ბამბის ძენთან ერთად გამოყენებული იყო ბუნებრივი ფორების მატარებელი შემესები – დიატომიტი. ამ მასალის სიმკვრივე იყო 400 კგ/მ³ ე.ი. იყო ძალიან მსუბუქი და მისი გამოყენება ხდებოდა ისეთ ხახუნის კვანძებში, სადაც შესაძლებელი იყო მუშა ზედაპირებზე სახეთის ან სხვა სითხეების მოხვედრა. ეს მეტად ფოროვანი ფრიქციული მასალა სამივე შემესების ხარჯზე, ალბათ უზრუნველყოფდა სახეთის შესრუტვას ფორებში, რათა არ მომხდარიყო დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება, მაგალითად, ტრაქტორების სამუხრუჭე სისტემებში. ამ ბუნებრივი ფორების მქონე ნივთიერების - დიატომიტის ფრიქციულ კვანძებში გამოყენების, მისი სტრუქტურული აღნაგობის, მის მიერ ხახუნის ზედაპირზე მიმდინარე პროცესებში მონაწილეობის და ხახუნის მექანიზმის შესწავლის საქმეში დიდი როლი მიუძღვის პროფესორ ელგუჯა ქუთელიას /44,45/. მიუხედავად ამისა, საჭირო იყო დიატომიტის ბაზაზე შემუშავებული ფრიქციული მასალის ტემპერატურული დიაპაზონის გაზრდა შემკვრელი ფისის მოდიფიცირების, სხვადასხვა ფრიქციული მოდიფიკატორების შეყვანის გზით, რაც ასევე მოითხოვდა მოხახუნე ზედაპირების ხახუნისა და ცვეთის თავისებურებათა გამოვლენის შესწავლის გაგრძელებას მიკროსკოპიულ დონეზე, თანამედროვე სტრუქტურული კვლევის აპარატურის გამოყენებით, როგორცაა რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპი, ოქე სპექტრომეტრი და სხვა. საჭირო იყო საბოლოოდ გამოვლენილ და დადგენილ ყოფილიყო ცვეთის ის მექანიზმი, რომელიც უზრუნველყოფდა შემუშავებული ფრიქციული ფოროვანი მასალის გაუმჯობესებულ ტრიბოლოგიურ თვისებებს ხახუნის მაღალ ტემპერატურულ პირობებში.

2.1.1 ფიზიკურ-მექანიკური გამოცდებისა და სტრუქტურული

კვლევებისათვის ნიმუშების მომზადების პროცედურები

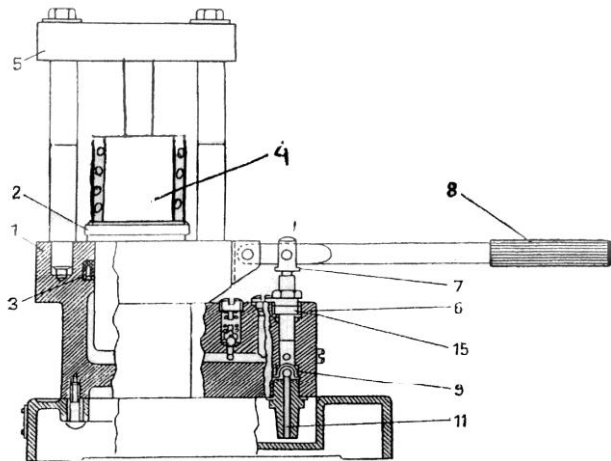
2.1.1.1 საცდელი ნიმუშების დამზადების ტექნოლოგია

კომპოზიციური მასალების მიღების ერთ-ერთ ძირითად მეთოდს წარმოადგენს ცხლად დაწნევის მეთოდი, რომელიც ქარხანა-

საწარმოებში ხორციელდება სწრაფმავალ ჰიდრაულიკურ წნეხებზე ინდივიდუალური ამძრავითა და ავტომატიზირებელი მართვით.

ცხლად დაწნეხვა, რომელსაც უწოდებენ პირდაპირ დაწნეხვას (ზოგჯერ კომპრესიულს) მდგომარეობს იმაში, რომ მასალის კომპოზიციის ფხვნილი ან ტაბლეტი იტვირთება პრესფორმაში და ახორციელებენ დაწნეხვას წნევისა და სითბოს ზეგავლენით.

სამუშაოში პოლიმერული კომპოზიციური მასალების დაწნეხვის პროცესი ხორციელდებოდა ე.წ. „სასკოლო“ ჰიდრაულიკურ წნეხზე (ნახ.1), რომელიც წარმოადგენს მცირე ზომის ხელსაწყოს და მას შეუძლია 4 ტონა დაწოლა განავითაროს. მისი აღწერილობა შემდეგია: დიდ ცილინდრში (1) მოძრაობს დგუში ფილით (2), რომელიც მჭიდროდ არის დაკავშირებული ცილინდრთან შემამჭიდროვებელი ტყავის სამაჯურით (3). დგუშის ფილაზე იდგმება პრესფორმა (4) გამაცხელებელი ღუმელით. დგუშის თავზე ორ სვეტად დამაგრებულია ზედა უძრავი ფილა (5). პრესფორმის პუანსონის მიწოდებით უძრავ ფილაზე სახელურის მოძრაობით ვითარდება წნევა პრესფორმაში მოთავსებულ მასალაზე.



ნახ.1 ჰიდრაულიკური წნეხი პრესფორმით

დაწნეხვები ჰიდრაულიკურ წნეხზე სრულდება შემდეგი თანამიმდევრობით:

1. კომპოზიციური ფხვნილის (ნარევის) ან ტაბლეტების ჩატვირთვა პრესფორმაში.
2. პრესფორმის მოთავსება წნეხის მოძრავი დგუშის ფილაზე.

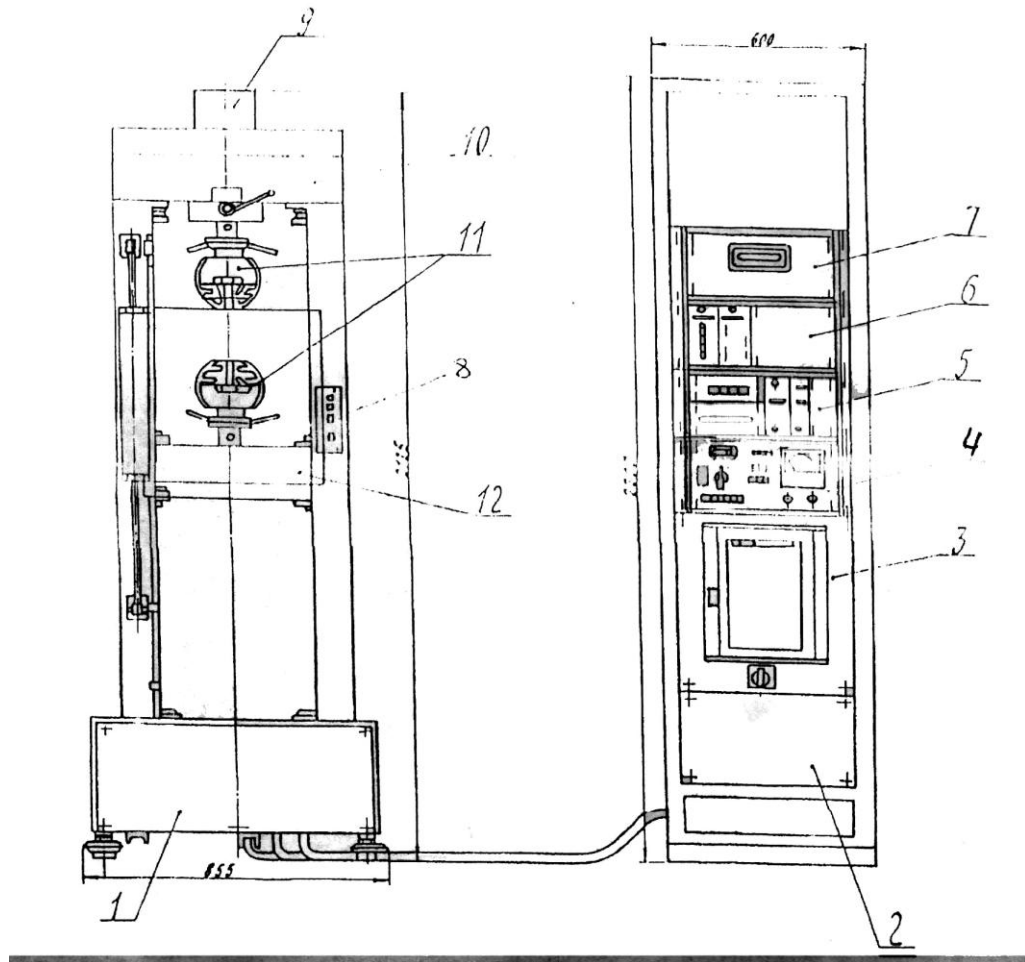
3. პრესფორმის გაცხელება საჭირო ტემპერატურამდე
4. ნიმუშის დაწნეხვა (წნევის ქვეშ გაჩერება, გაცივება, ნიმუშის ამოღება)
5. ნიმუშის შენახვა ექსიკატორში.

პოლიმერული ფრიქციული კომპოზიციური მასალების გამოყენებისათვის ფრიქციულ კვანძებში აუცილებელია ინფორმაცია მათ სიმტკიცეზე. სიმტკიცის ზღვრის განსაზღვრა გაჭიმვასა და კუმშვაზე მიეკუთვნება სტატიკური გამოცდების ჯგუფს და მათი საშუალებით ადვილად შეგვიძლია დაგადგინოთ, როგორი სახის დეფორმაცია ვითარდება მასალების გამოცდისას და რა სახის რღვევასთან გვაქვს საქმე-მყიფესთან თუ პლასტიკურთან.

2.1.1.2 სიმტკიცის ზღვრის განსაზღვრა კუმშვაზე

სიმტკიცის ზღვრის განსაზღვრა კუმშვაზე ხორციელდება გამჭიმავ მანქანაზე (მარკა 2054P5), რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 2-ზე და რომელიც შედგება თვით გამჭიმავ მანქანისა (1) და მართვის პულტისაგან (2) მართვის პულტის კონსტრუქცია შედგება შემდეგი მთავარი ბლოკებისაგან, როგორცაა დიაგრამის ჩამწევი ბლოკი (3), მართვის ბლოკი (4), დატვირთვის ინდიკაციის ბლოკი (5), გარდამქმნელი ბლოკი (6) და აქტიური სატაცის გადაადგილების ინდიკაციის ბლოკი (7). გამჭიმავ მანქანას გააჩნია ძალის გამზომი (9), რომელიც წარმოადგენს ძალის გადამწოდს და რომელიც დაკავშირებულია ბლოკთან (6) მართვის პულტზე. მანქანას ორი ტრავერსა აქვს: უძრავი (1) და მოძრავი (12), რომლებზეც მაგრდება ზედა და ქვედა სატაცები (11).

უნივერსალური გამჭიმავი მანქანა საშუალებას იძლევა ვცვალოთ გაჭიმვის სიჩქარე ფართო დიაპაზონში.



ნახ. 2. უნივერსალური გამჭიმავი მანქანა 2054P5

კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარის განსაზღვრა ტარდება ამ გამჭიმავ მანქანაზე დამხმარე მოწყობილობის (ნახ.2.3) საშუალებით, რომელიც მაგრდება გამჭიმავი მანქანის ტრავერსებს შორის და მოძრავი ტრავერსის გადაადგილებისას მოწყობილობის პარალელური ფილებიდან ზედა ფილა (1) უახლოვდება ქვედა ფილას (2), რომელზეც იდგმება გამოსაცდელი ნიმუშების მრგვალი სადგარი (3) ნიმუშით (4), რომელიც წარმოადგენს ცილინდრული ფორმის ძელაკს ზომით 15 მმ-ის დიამეტრით და რომელთა სიმაღლე 1,5-2-ჯერ მეტია დიამეტრზე.

ნიმუშის კუმშვაზე გამოცდისას შეირჩევა წნევის განვითარების გარკვეული სიჩქარე, რომელიც რეგულირდება მანქანის მართვის ბლოკით. გამოცდის დასასრულად ითვლება ის მომენტი, როდესაც დატვირთვის შემდგომი გადიდებისას ძალის გამზომ ციფრულ

ტაბლოზე რეგისტრირდება ძალის შემცირება და ნიმუშის რღვევისას მეორე ტაბლოზე ფიქსირდება უდიდესი დატვირთვა.

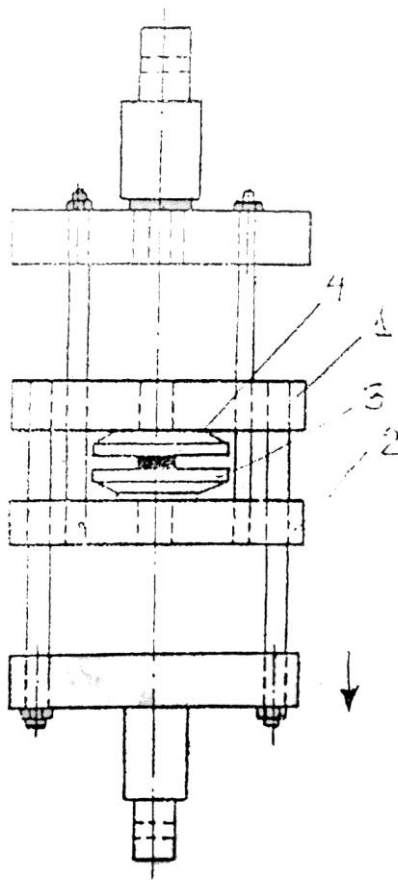
კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარი გამოითვლება ფორმულით:

$$\sigma_{კმ} = \frac{P}{S}$$

სადაც P – არის დამანგრეველი ძალა კგძ-ში,

S – ნიმუშის განივი კვეთის ფართი სმ²-ში.

კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის განსაზღვრისათვის იცდება არა ნაკლებ 3 ნიმუში და აიღება მიღებული შედეგების საშუალო არითმეტიკული.



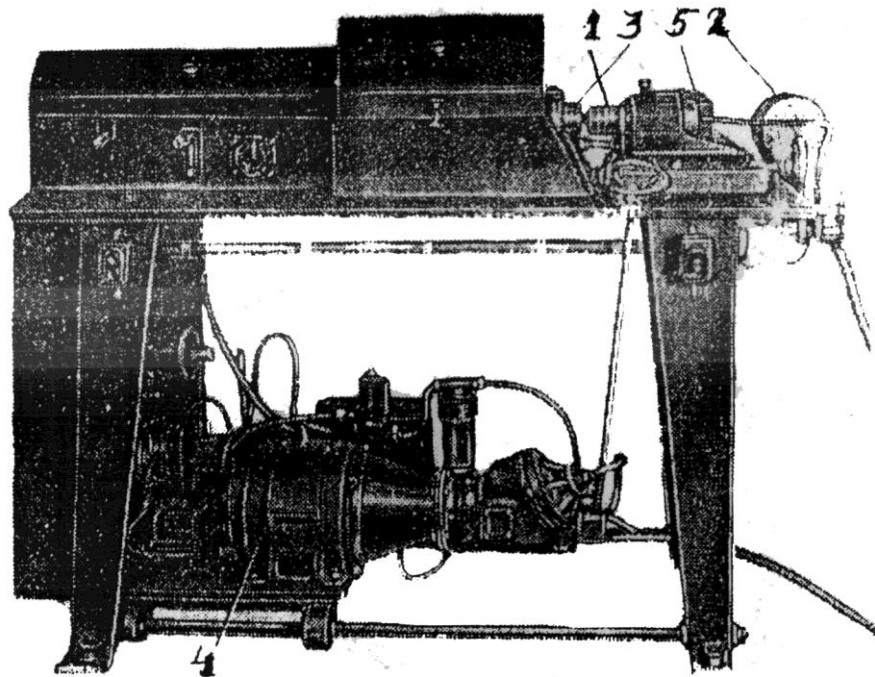
ნახ. 3.

დამხმარე მოწყობლობა ნიმუშების კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარის გასაზომად.

2.12 ფრიქციული მასალების ხახუნის კოეფიციენტის, ცვეთის სიდიდის, განვითარებული ტემპერატურისა და ცვეთის პროდუქტების კვლევის მეთოდика.

პოლიმერული ფრიქციული კომპოზიციური მასალების ენერგეტიკული დანადგარების ხახუნის კვანძებში წარმატებით გამოყენების მიზნით აუცილებელია მექანიკურ თვისებებთან ერთად მათი ტრიბოტექნიკური მახასიათებლების – ხახუნის კოეფიციენტის და ცვეთამდეგობის ცოდნა.

ფრიქციული კომპოზიციური მასალების ხახუნის კოეფიციენტის და ცვეთის განსაზღვრა ტარდებოდა ხახუნის მანქანა ИМ-58-ზე, რომელიც ამავე დროს წარმოადგენს მცირე ინერციულ სტენდს (ნახ.4). ამ მანქანაზე მასალები გამოცდებოდა ფრიქციულ თბომდეგობაზე



ნახ. 4
ხახუნის მანქანა ИМ-58.

(სტანდარტული ГОСТ 23.210.80 „ნაკეთობათა ცვეთამდეგობის უზრუნველყოფა“). მანქანის მოძრაე ვეგოზე (1) დამაგრებულია არამოდრავი თავი ნიმუშის ჩასადებად და დამონტაჟებულია ნიმუშზე წნევის განმასორციელებელი მოწყობილობა (2). არამოდრავ ვეგოში გადის ღერძი, რომელზეც დამაგრებულია მბრუნავი თავი (3), რომლის

ბუდეში ჯდება ფრიქციული კომპოზიციური მასალის ნიმუში. მანქანის ამძრავს წარმოადგენს მუდმივი დენის ელექტროძრავა (4), რომელიც საშუალებას იძლევა მდორედ ვცვალოთ მანქანის ბრუნვათა რიცხვი. ხახუნის მომენტის სარეგისტრაციო კვანძი (5) მოთავსებულია არამძრავი ვეგოს გვერდით და წარმოადგენს მღუნავ კამერტონს ტენზოგადამწოდით.

ნიმუშის ჩამაგრების სქემა მოცემულია ნახ.5-ზე.

გამოსაცდელი ნიმუშები წარმოადგენს მოკლე ზომის მილისას, რომლის გარე დიამეტრია 28 მმ-ია, შიდა დიამეტრი 20 მმ, ხოლო სიგრძე 15-20 მმ. უძრავი ნიმუში (კონტრსხეული) იგივე ზომის თუჯის მილისაა და მზადდება იმ მარკის ლითონისაგან, რომელიც შეესაბამება საკვლევი ხახუნის კვანძს.

ორივე ნიმუში ეხახუნება ერთმანეთს ტორსულად (შუბით), ამიტომ ურთიერთგადაფარვის კოეფიციენტი მიღებულია ერთის ტოლად.

გამოცდის დაწყების წინ ნიმუშები მიემუშავება ერთმანეთს შერჩეულ დატვირთვაზე და ყველაზე დაბალ სიჩქარეზე მანამდის, სანამ არ შეწყდება ხახუნის მთელი ზედაპირის ორივე მოხახუნე წყვილის ცვეთა და ტემპერატურის მატება, რომლის გაზომვა ხდება უძრავი ნიმუშის (კონტრსხეულის) მოცულობაში ხახუნის ზედაპირიდან 1 მმ-ის დაშორებით თერმოწყვილის საშუალებით. ამ დროს არ უნდა იცვლებოდეს ასევე ხახუნის კოეფიციენტი.

ხახუნზე და ცვეთაზე გამოცდების ჩატარება ზემოთ აღნიშნული სტანდარტის მიხედვით გულისხმობს მასალების უნარს, შეინარჩუნონ ხახუნის კოეფიციენტისა და ცვეთის ინტენსივობის მაჩვენებლები უცვლელად ტემპერატურების ფართო დიაპაზონში.

ხახუნის კოეფიციენტი განისაზღვრება ფორმულით:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{F}{P \cdot S}$$

სადაც F – ხახუნის ძალაა კგ-ში,

N – რადიალური (საერთო) დატვირთვაა კგ-ში.

$$N = P \cdot S,$$

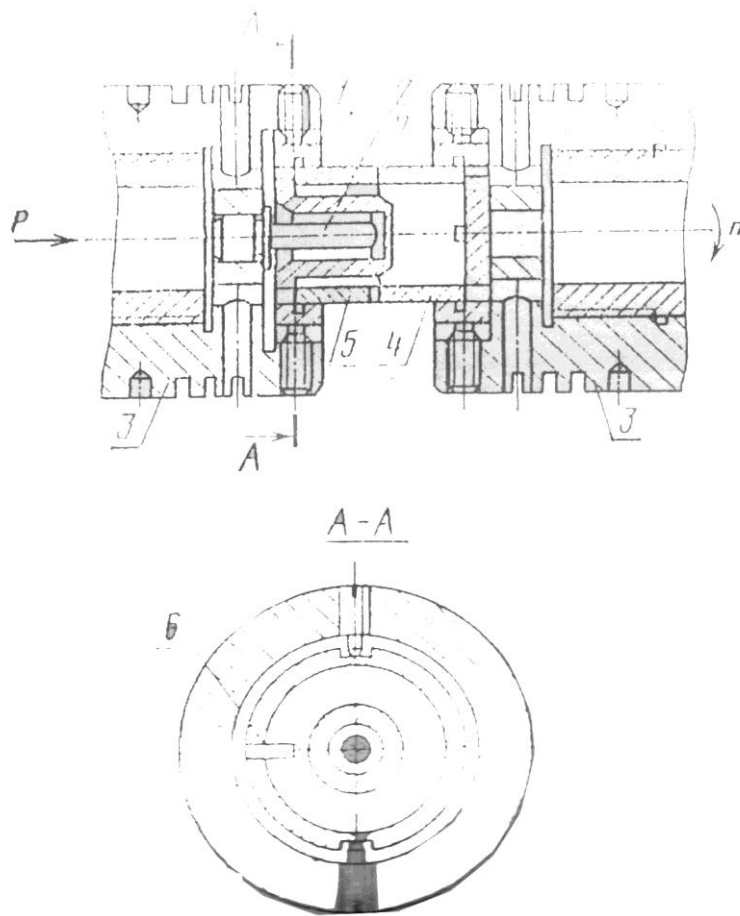
სადაც P – ხვედრითი დატვირთვაა ნიმუშზე, კგ/სმ².

S – ხახუნის ზედაპირის ფართობი, სმ².

ხახუნის ძალა გამოითვლება ფორმულით: $F = \frac{M}{r}$ სადაც

M – ხახუნის მომენტია, კგ. სმ, რომლის მნიშვნელობები განისაზღვრება ხახუნის მანქანის ტარირებით და შესაბამისი გრაფიკის აგებით.

r – მხარის რადიუსია გამზომი ხელსაწყო კარმერტონიდან ხახუნის ზედაპირის ცენტრამდე.



ნახ.5. ხახუნზე გამოსაცდელი ნიმუშის და კონტრსხეულის ჩასაჯდომი ბუდეები. 1 – ნიმუშის ჩასაჯდომი ბუდეები, 2 – ნიმუშის თვითდაყენების სახსრის კვანძი, 3 – ნიმუშის ჩასადები თავი. 4 – მოძრავი ნიმუში, 5 – უძრავი ნიმუში (კონტრ-სხეული), 6 – ნიმუშების ჩასაყენებელი წკირი (შტიფტი).

გამოცდები ტარდება მანქანის სიჩქარის ზრდით ცალკეულ საფეხურზე 0,125-დან 7,5 მ/წმ-მდე. ყოველ საფეხურზე გამოცდის

ხანგრძლივობა შეადგენს 1 საათს დაბალ სიჩქარეებზე, ნახევარ საათს საშუალოზე და 15 წუთს მაღალ სიჩქარეებზე. დროის გარკვეულ პერიოდებში ჩაიწერება ხახუნის მომენტისა და ტემპერატურის მნიშვნელობები. აღნიშნული სიჩქარეების მიღების მიზნით ხახუნის მანქანის ლილვის სიჩქარე იზრდება შემდეგი თანმიმდევრობით: 100, 200, 500, 700, 1000, 1500, 2000, 3000 ბრ/წთ. მშრალი ხახუნისას სიჩქარის ზრდასთან ერთად იზრდება ხახუნის ზონაში ტემპერატურა და მან შეიძლება 600°C-ს გადააჭარბოს. ხახუნის მომენტის გაზომვის შედეგების გამოყენებით იანგარიშება ხახუნის კოეფიციენტი და ტემპერატურის მონაცემების გათვალისწინებით აიგება ხახუნის კოეფიციენტის დამოკიდებულების გრაფიკები ტემპერატურისაგან.

ცვეთამედგობის განსაზღვრის მიზნით გამოიყენება ორი პროგრამა – შემცირებული და სრული. შემცირებული პროგრამით ნიმუშების სისქეს ან წონას ზომავენ ცდის დაწყებამდე და შემდეგ ცდის დამთავრების შემდეგ, როდესაც მიღწეული იქნება საჭირო ტემპერატურა (მაგ. 400°C). სიჩქარის ერთი საფეხურიდან მეორეზე გადადიან მანქანის გაჩერების გარეშე. მასალების ცვეთამედგობის შეფასება ხდება ცვეთის ინტენსივობით, რომელიც წარმოადგენს ცვეთის (ნიმუშების სისქის და წონის შემცირება) შეფარდებას ხახუნის მუშაობასთან გამოცდის მთელი დროის მანძილზე. გამოცდების შემცირებული პროგრამით საზღვრავენ საშუალო ინტენსივობას გამოცდის მთელ ტემპერატურულ ინტერვალში.

გამოცდების სრული პროგრამის შესაბამისად ნიმუშების სისქე ან წონა იზომება სიჩქარის საფეხურის დაწყების და დამთავრების შემდეგ (მანქანას აჩერებენ და ნიმუშებს აცივებენ გაზომვების ჩასატარებლად). ამრიგად, გამოცდების სრული პროგრამის მიხედვით შესაძლოა განისაზღვროს ცვეთის ინტენსივობის დამოკიდებულება ტემპერატურისაგან.

გამოცდების შედეგების მიხედვით ჯერ გამოითვლება ხაზობრივი ცვეთა (მიკრონებში) ფორმულით:

$$\Delta h = \frac{Q_b - Q_w}{\gamma \cdot S}$$

სადაც Q_b და Q_w – ნიმუშის წონაა მილიგრამებში გარკვეულ საფეხურებზე ცდის დაწყებისას და ცდის დასრულების შემდეგ.

γ – მასალის ხვედრითი წონა, მგ/სმ³,

S – ნიმუშის ხახუნის ზედაპირის ფართობი (ნიმუშის ზომების მიხედვით S=3 სმ²).

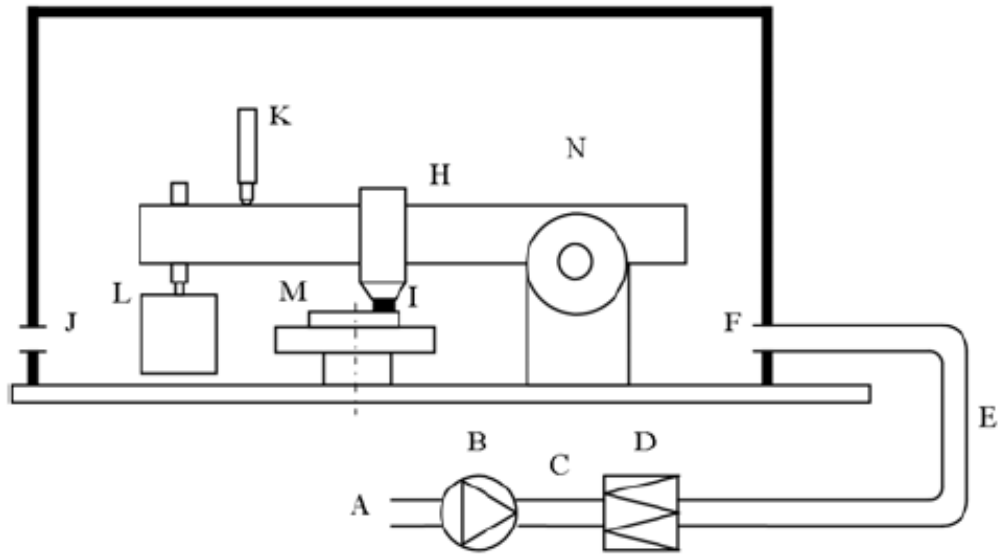
ცვეთის საშუალო ინტენსივობა I გარკვეულ სიჩქარეზე გამოითვლება ფორმულით:

$$I = \frac{\Delta h}{75,4N}$$

N – მოძრავი ნიმუშის გარკვეულ საფეხურზე ბრუნვათა შეჯამებული რაოდენობაა.

ასევე აიგება მთელი ცდის მანძილზე მიღებული ცვეთის ინტენსივობის მნიშვნელობების ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკები.

ცვეთის პროდუქტების შესწავლის და ასევე ტრიბოლოგიური პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით გამოყენებულ იქნა ღერო-დისკური ხელსაწყო, რომელიც წარმოდგენილია ნახ.6-ზე. ხელსაწყო მუშაობს ჩვეულებრივ რეჟიმში, როდესაც მუდმივი ნორმალური მოდებული ძალის სიდიდე 100 ნმ-დეა და მუდმივი მბრუნავი სიჩქარის სიდიდე კი 3000 ბ/წ (55კმ/სთ). დატვირთვის საკანი გამოიყენება ზესადებზე მოქმედი ტანგენსური ძალის გასაზომად. ნომინალური კონტაქტური წნევა- 0.4 მპა, რაც ტიპურია მცირე დამუხრუჭებისათვის, რაც ამცირებს მანქანის სიჩქარეს და არ აჩერებს მას. ხახუნის კოეფიციენტი გამოითვლება გაზომილი ტანგენციალური ძალის სიდიდის გაყოფით მოდებული ნორმალური ძალის სიდიდეზე. ნიმუშები კონტაქტში იყო რუხი თუჯის დისკოსთან 30 წუთის განმავლობაში (შესაბამისი სრიალის მანძილი 13.5კმ), ყოველი მასალის კომბინაცია მოწმდება 2-ჯერ (დისკოს დიამეტრი შეადგენს 63მმ და სისქით 6მმ-ს).



ნახ. 6. მოდიფიცირებული დერო-დისკური ხელსაწყო სქემა. A: ოთახის ტემპერატურა; B: ვენტილატორი; C: ღინების გამზომი სისტემა; D: ფილტრი; E: დრეკადი მილი; F: სუფთა ჰაერის მიმწოდ; G: დახურული საკანი; H: დერო-დისკური ხელსაწყო; I: ზესადების ნიმუში; J: ჰაერის გამომშვები, გაზომვის წერტილები; L: საკუთარი წონა; M: დისკის ნიმუში; N: ჰაერი საკნის შიგნით.

ამ ცდებში დახურული კამერა გამოიყენება ტესტის ნიმუშების გარშემო ჰაერის სისუფთავის კონტროლისთვის. ვენტილატორი (B) ოთახის ჰაერს (A) მომართავს კამერაში (G) ნაკადის გასაზომი სისტემის (C) და ფილტრის (D) გავლით ჰაერის შემშვების ღიობში (F). ჰაერი კამერაში (N) კარგად აირევა დერო-დისკური ხელსაწყო (H) რთული შიდა მოცულობის და ჰაერის ცვლის მაღალი სიჩქარის გამო. ჰაერს კამერაში გადააქვს წარმოქმნილი ნაწილაკები ჰაერის გამომშვებისკენ (J), სადაც განლაგებულია ნაწილაკების გაზომვის საცდელი წერტილები. ვენტილატორის სიჩქარეა 7.7 მ³/საათში. H13 კლასის ფილტრი (D) უზრუნველყოფს ნაწილაკებისგან თავისუფალი ჰაერის შევსებას.

ძირითად გამოყენებულ ხელსაწყოს, რომლითაც ცვეთის ნაწილაკები იზომება, წარმოადგენს პირველი **GRIMM** ხელსაწყო ოპტიკური ნაწილაკების მთვლელი (Grimm Aerosol Technik, Ainring, Germany), რომლითაც იზომება ნაწილაკები ზომით 0.25-32 მკმ, 31 ზომის

ინტერვეალში. მეორე ხელსაწყოა **P-Trak** კონდენსირებული ატომების მთვლელი (TSI, Shoreview, NM, USA), რომლთაც იზომება 0.02-1 მკმ სიდიდის ნაწილაკების ჰაერში კონცენტრაციის რაოდენობა. მესამე ხელსაწყოა **Dust Trak** აეროზოლის მონიტორი (TSI, Shoreview, NM, USA), რომელიც აღრიცხავს 0.1-10 მკმ სიდიდის ნაწილაკების მასურ კონცენტრაციას მგ/მ³-ში.

ექსპერიმენტის დროს ტუმბოს საშუალებით ცვეთის ნაწილაკები ჰაერიდან ფილტრებზე გროვდება. დაახლოებით 6 ღმ³ ჰაერი ჩაიტუმბება Nuclepore პოლიკარბონატის ფილტრებში, რომელთა ფორების სიდიდეა 0.4 მკმ (Whatman, Maidstone, UK). შეგროვებული ნაწილაკების ანალიზი ხდება რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის და ენერგოდისპერსიული რენტგენო-სხივური სპექტროსკოპიის გამოყენებით.

2.13 კომპოზიციური ფრიქციული მასალების საწყისი კომპონენტების და ტრიბოწყვილში ნამუშევარი ზედაპირების რემ კვლევის მეთოდიკა

სტრუქტურული გამოკვლევები ტარდებოდა რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის DSM-960 (ფირმა "OPTON", გერმანია) და ოქე-ელექტრონული სპექტომეტრიის (ოეს) LAS-2000 (ფირმა "RIBER", საფრანგეთი) საშუალებით. ორივე ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა შესწავლილ და გამოვლენილ იქნას მოხახუნე ზედაპირების ძალიან თხელ ფენებში მიმდინარე პროცესები მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე. ამ მიზნით ხახუნზე ტესტირების შემდეგ მოხახუნე წყვილიდან (როგორც ფრიქციული მასალისგან, ასევე კონტრსხეულიდან) ხდებოდა გარკვეული ზომის (2-3მმ სისქის) ფირფიტების ამოჭრა, მათი შენახვა ექსიკატორში და შემდგომი კვლევისათვის მოთავსება პოლიეთილენის პაკეტებში.

რასტრული იგივე მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპის (რემ) მარტივი სქემა ასეთია: ამ მიკროსკოპში ელექტრონების წვრილი სხივი (კონის დიამეტრი 10 ნმ) შემოუბრუნეს საკვლევ ნიმუშს (ასკანირებს) ჰორიზონტალურ მწკრივზე, წერტილიდან წერტილზე და სინქრონულად გადასცემს სიგნალს კინესკოპზე. ელექტრონების წყაროს წარმოადგენს ვოლფრამი, რომლიდანაც გახურებისას

თერმოელექტრონული ემისიის შედეგად გამოიფრქვევა ელექტრონები, ელექტრონების გავლისას (ზემოქმედებისას) ნიმუშზე მიმდინარე პროცესები რეგისტრირდება სპეციალური დეტექტორების საშუალებით და გარდაქმნილი სახით გამოჰყავთ ეკრანზე, როგორც შესასწავლი ნიმუშის გადიდებული სურათი.

ამ შემთხვევაში გადიდება ნიშნავს ეკრანზე გამოსახულების სიდიდის შეფარდებას იმ არეს სიდიდესთან, რომელსაც შემოურბენს კონა ნიმუშზე. იმის გამო, რომ ელექტრონის ტალღის სიგრძე, რამდენიმე რიგით ნაკლებია ფოტონისაზე, თანამედროვე მემ-ზე მუშაობისას აუცილებელია ვაკუუმი, რადგანაც მიკროსკოპის კამერაში რაიმე გაზის არსებობისას შესაძლებელია მისი ატომების იონიზაცია და მიღებული შედეგების დიდი ცდომილება.

რემ მეთოდი ეფექტურად გამოიყენება ისეთ შემთხვევებში, როდესაც აუცილებელია გაირკვეს საკვლევი მასალების ფრიქციული გადატანის ფიზიკური მექანიზმი ან დავაკვირდეთ გადატანილი ნაწილაკების და ცვეთის პროდუქტების მორფოლოგიას. ნახ.2.8-ზე წარმოდგენილია რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის მუშაობის სქემა.

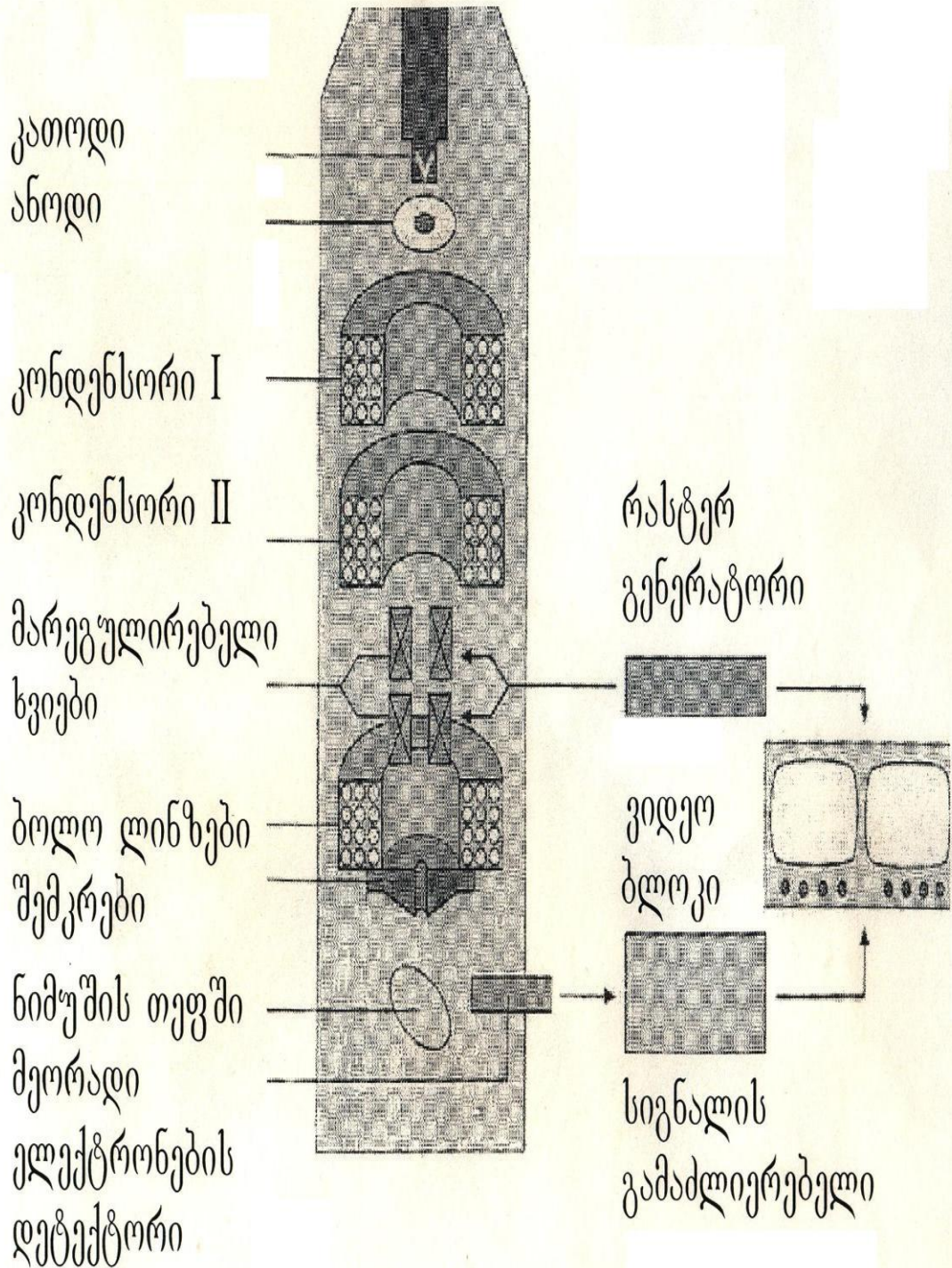
2.1.4. ფრიქციული მასალა-კონტრსხეული ტრიბოწყვილში ნამუშევარი ზედაპირებისა და ზედაპირქვეშა ფენების ოჟე-სპექტრული კვლევების მეთოდика

საკვლევი მასალების მოხახუნე ზედაპირების ანალიზის მეთოდებს შორის განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს ოჟე-ელექტრონული სპექტრომეტრიას (ოეს). ეფექტი, რაზედაც არის დაფუძნებული ოეს აღმოჩენილი იყო ფრანგი ფიზიკოსის პიერ ოჟეს მიერ 1925 წელს და მას შემდეგ მასალათა ზედაპირების კვლევის ერთ-ერთ ძირითად იარაღს წარმოადგენს. მისი უნიკალურობა მდგომარეობს იმაში, რომ პერიოდული სისტემის ყოველი ელემენტისათვის (გარდა წყალბადისა) არსებობს მახასიათებელი ოჟე-ენერგიების მთელი რიგი. თანაც არ არსებობს ელემენტი, რომელსაც ექნება ატომური ბმის ერთნაირი ენერგია სხვა ელემენტის მიმართ. ეს ხელს უწყობს ოჟე-ენერგიების დახმარებით მოვახდინოთ ელემენტების იდენტიფიკაცია ამა

თუ იმ მასალაში. ოეს უპირატესობას განაპირობებს ასევე ანალიზის ძალიან მცირე სიღრმეებში ჩატარებას, რაც ტესტირების ამ საშუალებას ანიჭებს ძალიან დიდ მნიშვნელობას ზედაპირების კვლევისას და შეუცვლელს ხდის მას მასალის ზედაპირის 0.5-1.0 ნმ-ის სიღრმიდან ინფორმაციის მისაღებად. არანაკლებ მნიშვნელოვანია რაოდენობრივი ოჟე-ანალიზის ჩატარება, რომლის მიზანს წარმოადგენს მრავალკომპონენტიანი ობიექტის, როგორცაა ჩვენს შემთხვევაში ფრიქციული მასალის ზესადები, შემადგენლობაში შემავალი სხვადასხვა ელემენტის ატომთა კონცენტრაციების დადგენა. ცნობილია, რომ ელემენტთა ოჟე-სიგნალების ინტენსივობები და კონცენტრაცია ურთიერთდამოკიდებული სიდიდეებია.

ფრიქციული გადატანის პროცესების კვლევისას ოჟე-სპექტროსკოპიის მეთოდი იძლევა იდეალურ შედეგს, რადგანაც მისი დახმარებით შეგვიძლია მოვახდინოთ ზედაპირზე ნებისმიერი ელემენტის იდენტიფიცირება 0,1 წამზე ნაკლებ დროში /46/. ზედაპირის ოჟე-ანალიზი მეტად ეფექტურია ორი განსხვავებული ცვეთამდეგი მასალების ხახუნისას, როდესაც გადატანის აფსკები ძალიან თხელია.

რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის მუშაობის სქემა



ნახ.7 რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის მუშაობის სქემა.

2.2 ნანოფოროვანი კომპოზიციების დამზადების ტექნოლოგია

2.2.1 საწყისი კომპონენტების კვლევა და შემკვერელი ფისის

მოდულირება თერმომედეგობის გაზრდის მიზნით

პოლიმერული ფრიქციული კომპოზიციების დამზადების ტექნოლოგია ითვალისწინებს საწყისი კომპონენტების დაფქვას, შრობას, შერევას, დაწნეხვა-კომპაქტირებას და სხვა სახის გადამუშავების იმ ოპერაციების გამოყენებას, რომლებიც ანიჭებენ ფრიქციულ ნაკეთობას მოთხოვნად ფიზიკურ-მექანიკურ და საექსპლუატაციო თვისებებს. საწყის კომპონენტებად აიღება ისეთი ნივთიერებები, რომლებიც ავლენენ რა საჭირო ფრიქციულ თვისებებს, ასევე წარმოადგენენ იაფ შემდგომებს. ასეთებია ბარიტი, რკინის სურინჯი, სხვადასხვა ლითონების ჟანგეულები, ლითონური ფხვნილები და მათი ნაქლიბები, გრაფიტი, ტექნიკური ნახშირბადი და სხვა.

ფრიქციულ მასალებში ერთ-ერთ ძირითად ინგრედიენტს წარმოადგენს ბარიტი- მძიმე შპატი, ბუნებრივი მინერალი, რომელიც შეიცავს 80-98%-ს უწყლო ბარიუმის სულფატს – $BaSO_4$. იგი წარმოდგენილია თითქმის ყველა სამუხრუხე ხუნდების მწარმოებელი ფირმის კომპოზიციის რეცეპტურაში სხვადასხვა პროცენტული რაოდენობით, როგორც ცვეთამედეგი შემდგომები და ხახუნის მოდიფიკატორი. ბარიტი მინარევის სახით შეიძლება შეიცავდეს კვარცს - SiO_2 , კალციტს - $CaCO_3$, დოლომიტს - $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ და ჰემატიტს - Fe_2O_3 . ბარიტის კონცენტრატი წარმოადგენს თეთრი ფერის ფხვნილს (დაფქვის შემდეგ) 5-6 მკმ ზომის ნაწილაკებით და ნაყარი სიმკვრივით 2500-2650 კგ/მ³. თერმიული თვისებებიდან აღინიშნება ის, რომ 750°C-ზე საერთო მასის დანაკარგები არ აღემატება 3-3,5%-ს, ხოლო 1000°C-მდე გაცხელებისას მასის ცვლილება პრაქტიკულად არ ხდება. რაც უფრო დისპერსიულია ბარიტი, მით მეტია მისი ადჰეზია პოლიმერთან. ბარიტის შეყვანა ფრიქციულ მასალებში იწვევს მათი ანაგლეჯისადმი მდგრადობის გაზრდას, ამადლებს და ასტაბილიზირებს ხახუნის კოეფიციენტს და ამადლებს მათ ცვეთამედეგობას. ბარიუმის სულფატის შემცველობის ცვლილება კონცენტრატში 83-92%-ის ფარგლებში ვერ ახდენს გავლენას მასალის ფრიქციულ თვისებებზე, ხოლო 80%-ზე ნაკლები შემცველობა არასასურველია, რომლის დროს

SO₂-ის % რაოდენობა შესაძლოა 4,5%-ს აღწევდეს. არ არის ასევე სასურველი, რომ კონცენტრატის ტენიანობა 1%-ზე მეტი იყოს, რადგან ეს იწვევს ფრიქციული მასალის ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებების გაუარესებას, ამიტომ ბარიტის შრობა უნდა მოვახდინოთ 100-120°C-ზე 4-6 საათის განმავლობაში, რათა ტენი მოვაშოროთ.

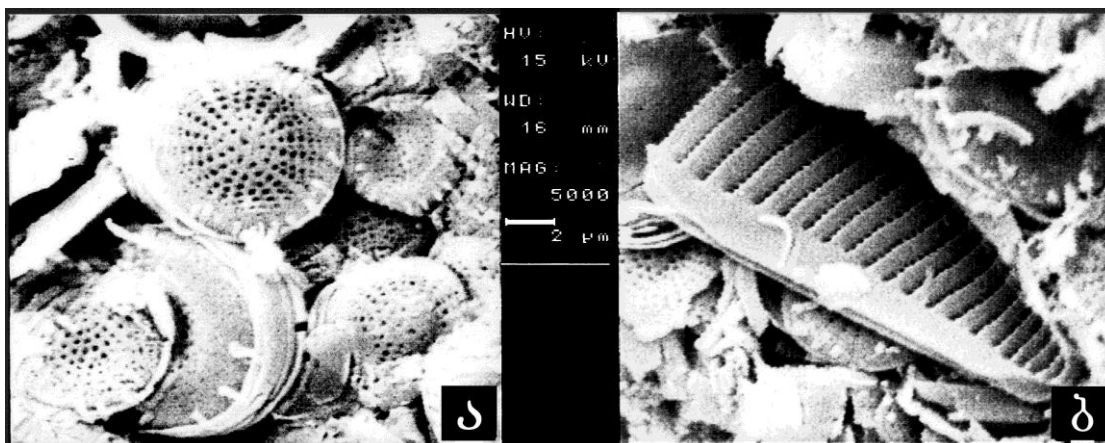
სამუშაოში საწყის კომპონენტად გამოყენებულ იქნა ადგილობრივი წარმოების ბარიტი ჩორდის საბადოდან (რაჭა, ონის რაიონი), რომელიც ცნობილია ბარიუმის სულფატის დიდი რაოდენობის შემცველობით- 85-95%. საქართველოში დიდია ბარიტის მარაგები, იგი 20 მილიონ ტონას აღემატება.

ნანოფოროვანი ფრიქციული მასალის მიღების მიზნით სამუშაოში გამოყენებულ იქნა საქართველოს ნედლეულის წარმომადგენელი – ქისათიბის (ახალციხე) დიატომიტი ამორფული კაჟმიწის – SiO₂-ის 96%-ის შემცველობით.

დიატომიტი თეთრი ან ღია მოყვითალო ფერის მიკროსკოპიული სიდიდის დიატომებისა და წყალმცენარეების ნარჩენებისაგან წარმოქმნილი დანალექი ქანების მინერალია /47/. დიატომიტის გარსები, რომლებიც ორი განაპობისმაგვარი ნახევრისგან შედგება (ბერძნულად – diatome გაპობას ნიშავს), შეიცავს ამორფულ კაჟმიწას და ქმნის რბილ, მსუბუქ და ფორებიან თეთრი ფერის ქანს – დიატომიტს. მისი მოცულობითი მასა მშრალ მდგომარეობაში იცვლება 800-900 კგ/მ³-ის ფარგლებში, ფორიანობა 85%-ია და წყალშთანთქმა 150%-ს აღწევს. 1 სმ³ დიატომიტი შეიცავს 10 მლ ცალამდე დიატომიტის ჩონჩხს. ბუნებრივ მდგომარეობაში დიატომიტის ტენიანობა 75%-ს აღწევს. მისი გამოშრობა კომპოზიციაში შეყვანამდე ტარდება 100-120°C-ზე.

დიატომიტის ძირითადი ქანმაშენი მინერალია, როგორც ავღნიშნეთ, კაჟმიწა SiO₂·nH₂O ჰიდრატული წყლით, რომლის პროცენტული რაოდენობა 3-8% ფარგლებშია და რომლის მოცილება შესაძლებელია მხოლოდ 500°C-ზე გაცხელებით, 600-700°C-ზე იწვის მასში შემაჯავლი ორგანული მინარეგები, მაგრამ ისე, რომ მისი მოცულობითი მასა უცვლელი რჩება. უცხოეთის დიატომიტის

საბადოების შემადგენლობაში ამორფული კაჟმიწის შემცველობა 70-94% ფარგლებშია და ქართული ქისათიბის დიატომიტი ამ მაჩვენებლით ბევრად სჯობნის მათ და იგი ერთ-ერთი საუკეთესოა მსოფლიოში და საყოველთაოდ ცნობილია.



ნახ.8. ქისათიბის საბადოდან (ახალციხე) აღებული დიატომიტის ნიმუშის შემადგენელი ნაწილაკების რემ გამოსახულება: ა) *Ethmodicus gazellae* - ტიპის ნაწილაკები, ბ) *Gyrosigma attenuatum* – ტიპის ნაწილაკი;

ნახ.8-ის ა და ბ გამოსახულებებზე მოყვანილია ჩვენს მიერ საწყის მასალად აღებული თეთრი დიატომიტის ფხვნილის შემადგენელი ნაწილაკების მემ გამოსახულებები. სტატისტიკურმა დაკვირვებამ აჩვენა, რომ დიატომიტის საწყისი ნედლეული შედგება 85÷90% ნახ.8 ა-ზე ნაჩვენები რადიალური აგებულების უნაჭდეო საგდულებიანი ტიპის (*Ethmodicus gazellae*) კაჟოვანი ჯავშნებისაგან, რომელთა დიამეტრის ზომები მერყეობს 4 მკმ-დან 10 მკმ-მდე; ჯავშნები წარმოადგენენ თხელ (სისქით 100÷200 ნმ) დისკოებს, რომლებიც თავის მხრივ თითოეული შეიცავს რამოდენიმე ასეულამდე გამჭოლ, წრიული კვეთის ცილინდრულ ფორებს დიამეტრებით 100÷500 ნმ, რადიალურად ზუსტი გეომეტრიული განლაგებით. გარდა აღნიშნული ტიპის ჯავშნებისა, ნედლეული შეიცავდა განსხვავებული ტიპის დიატომიტის ნაწილაკებს ჯამური რაოდენობით არაუმეტეს 10÷12%-ისა, რომლებიც აგრეთვე ნანოფოროვანი აღნაგობისა იყო (ნახ.8 ბ).

ფრიქციული მასალების სითბოგამტარებლობის გაზრდის მიზნით, რაც უზრუნველყოფს ხახუნის ზედაპირზე განვითარებული ტემპერატურის შემცირებას ფრიქციული მასალების კომპოზიციაში შეჰყავთ სხვადასხვა ლითონის ფხვნილები, როგორებიცაა სპილენძის ტყვიის, რკინის და სხვა. ზოგჯერ შეჰყავთ თითბერის ან ბრინჯაოს ნაქლიბი, ზოგჯერ თითბერის ან სპილენძის დაქუცმაცებული მათეული, რომელთა დიამეტრი 0,15-0,2 მმ-ია. ამ ჯგუფის ფრიქციულ შემესებებს მოეთხოვებათ, რომ არ შეიცავდნენ უცხო მინარევებს და ზეთოვან ნივთიერებებს.

სამუშაოში ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა სპილენძის ფხვნილი, რომლის მარცვლების ზომა 4-6 მკმ-ია, სპილენძის ფხვნილის შრობა ხდებოდა 95-100°C-ზე, ეს აუცილებელია, რათა აორთქლებულ იქნას ადსორბირებული სინესტე მარცვლების ზედაპირიდან.

სამუშაოში ერთ-ერთ კომპონენტს და ხახუნის მოდიფიკატორს წარმოადგენდა ტექნიკური ნახშირბადი, ცნობილია ტექნიკური ნახშირბადის გამოყენება ფრიქციულ მასალებში, როგორც ხმაურჩამსშობი, მაღალტემპერატურული და ხახუნის კოეფიციენტის დამწვევი შემესები /48/. მიღების მეთოდით განასხვავებენ ტექნიკური ნახშირბადის სხვადასხვა ტიპს, როგორიცაა თერმიული, აცეტილენური, ღუმლის, ლამპის და არხის /49/. ისინი ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან ნაწილაკების ზომით და კუთრი ზედაპირებით. მათი ნაწილაკების დიამეტრი 10-180 ნმ-ის ფარგლებშია. მაგ. TM-30 მარკის ღუმლის ტექნიკური ნახშირბადის ნაწილაკების დიამეტრის ზომა 23 ნმ, მაგრამ იგივე ღუმლის Corax L მარკის ნაწილაკების – 100 ნმ. აღმოჩნდა, რომ ღუმლის ტექნიკურ ნახშირბადს ახასიათებს წვრილფორიანობა, სადაც ფორების ზომა 2 ნმ-ის ფარგლებშია, როცა აცეტილენური ტექნიკური ნახშირბადი პრაქტიკულად ფორებს არ შეიცავს, თუმცა იგი ისეთივე მაღალსტრუქტურული ნივთიერებაა, როგორც ღუმლის ტექნიკური ნახშირბადი. ეს მაღალსტრუქტურულობა განაპირობებს იმას, რომ ტექნიკურ ნახშირბადს გააჩნია უნარი წარმოქმნას მეორადი სტრუქტურები, აგრეგატები - თანამედროვე ტერმინოლოგიით - კლასტერები, რომლებსაც შეუძლიათ პოლიმერის მთელ მოცულობაში არათანაბრად გადანაწილდნენ და უზრუნველყონ

იგივე რაოდენობის გრაფიტის ნაწილაკებზე უკეთესი ელექტროგამტარებლობა რომელთაც ეს თვისება არ გააჩნიათ ე.ი. არ გააჩნიათ ერთმანეთზე მიბმული კლასტერების წარმოქმნის უნარი.

ჩვენს მიერ კვლევის ობიექტად აღებულ იქნა ღუმელური PM-15 მარკის (რუსეთი) ტექნიკური ნახშირბადი, რომლის საერთო კუთრი ზედაპირი შეადგენდა 150 მ²/გ-ს, მიკროფორების ფარდობითი ზედაპირის 36%-ით, კუთრი ელექტროწინალობით 5·10⁻³ ომი.მ და ნაწილაკების 30 ნმ-ის ზომით.

სამუშაოში ხახუნის კოეფიციენტის ეფექტურ მოდიფიკატორად გამოყენებულ იქნა ასევე კორუნდის – Al₂O₃-ის ფხვნილი, რომელთა მარცვლების ზომა 0,5-1 მკმ-ის ტოლი იყო.

ხახუნის ერთ-ერთ მოდიფიკატორად გამოყენებულ იქნა ბაზალტის უწყვეტი ბოჭკო, რომლის წარმოება არსებობს ქ.რუსთავეში. ბაზალტის ბოჭკო ცნობილია, როგორც პოლიმერული კომპოზიტების ერთ-ერთი საუკეთესო შემესები და მაარმირებელი ინგრედიენტი /50/. მაგრამ იგი ასევე არის აზბესტის შემცველი პოლიმერულ ფრიქციულ კომპოზიტებში /23,37,51/.

სამუშაოში გამოყენებულ იქნა ქმარნეულის ადგილმდებარეობის ბაზალტისაგან წარმოებული ბაზალტის უწყვეტი ბოჭკო, რომლის დიამეტრი 15-17 მკმ-ის ფარგლებშია და ფრიქციული მასალის კომპოზიციაში გამოიყენება დისკრეტულად დაჭრილი ბოჭკოს სახით, რომელთა სიგრძე 5-7 მმ-ია. უნდა აღინიშნოს, რომ მარნეულის ბაზალტი საქართველოს სხვა ადგილმდებარეობის ბაზალტებიდან გამოირჩევა არა მხოლოდ რკინის ოქსიდების ნაკლები რაოდენობით, არამედ შემადგენელი კომპონენტების ოპტიმალური თანაფარდობითა და მინერალოგიური და ქიმიური შემადგენლობის სტაბილურობით /52/. მარნეულის ბაზალტის ბოჭკოს ახასიათებს მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები, მისი მექანიკური სიმტკიცე წყვეტაზე 210 მპა-ია, იგი გამოირჩევა მაღალი ტუტემდებლობით და თერმომდებლობით - 700°C-ზე, როდესაც სხვა, მაგ. ბოლნისის ან ასპინძის რაიონების ბაზალტებისგან მიღებული უწყვეტი ბოჭკოს თერმომდებლობა 570°C-ს არ აღემატება /53/.

სამუშაოში კომპოზიციების თერმომედეგობის გაზრდის მიზნით გამოყენებულ იქნა რკინის ფოსფატის ფხვნილი, რომელიც ემატებოდა შიხტას მცირე რაოდენობით (1-3 მას.%). საერთოდ, ცნობილია ფოსფატების და ფოსფორის შემცველი დანამატების გავლენა ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ და ტრიბოლოგიურ თვისებებზე. მაგალითად, გერმანულ პატენტში /63/ აღწერილია ფრიქციული კომპოზიციური მასალის მისართი, რომელიც შეიცავს ტიტანისა და თუთიის სულფიდებს და ამავე დროს Mg, Ca, B, Al, Cu ან Fe-ის ფოსფატებს (რა თქმა უნდა ყველას ერთად არა). ეს მისართი აუმჯობესებს ფრიქციული მასალის ტრიბოლოგიურ თვისებებს და ცვეთამედეგობას. პატენტში ხაზგასმულია, რომ ლითონების სულფიდები წარმოადგენენ ცვეთის საწინააღმდეგო კომპონენტებს, ხოლო გამოყენებული ფოსფატები აუმჯობესებენ მასალის თერმომედეგობას.

საქართველოში რკინის ფოსფატის ფხვნილს აწარმოებს შპს “გარეჯი”. ის არის მოყვითალო – მოთეთრო ფერის ფხვნილი, რომლის კუთრი წონა 1560 კგ/მ³-ია, თერმომედეგობა გამყარების შემდეგ 1200°C-ს აღემატება.

სამუშაოში შემუშავებული ფრიქციული მასალების შემკვრელ ფისად შერჩეულ იქნა რეზოლური ფენოლფორმალდეჰიდური ფისი, როგორც ერთ-ერთი ყველაზე წარმოებადი, იაფი და ამავე დროს სხვა ფისებთან შედარებით მაღალტემპერატურული ნივთიერება.

ფენოლფორმალდეჰიდური ფისები გამოირჩევიან კარგი ელექტროსაიზოლაციო თვისებებით, ქიმიური მდგრადობით და მექანიკური სიმტკიცით /54/.

გამყარებული ფენოლფორმალდეჰიდური ფისები (ფფფ) ფლობენ თვისებას გაუწიონ წინააღმდეგობა მაღალი ტემპერატურების ზემოქმედებას: 200-250°C-სას რამდენიმე დღეს, 250-500°C-ზე რამდენიმე საათს, 1000-1500°C-ზე რამდენიმე წამს. მათი რღვევა (დაშლა) 300°C-ის შემდეგ იწყება. სწორედ ამ თვისებებმა განაპირობეს ფფფ-ს ფართო გამოყენება ფრიქციული მასალების წარმოებაში. ძალიან ხშირად ფფფ-სთან ერთად შემკვრელად იხმარება კაუჩუკები, რომლებიც მართალია

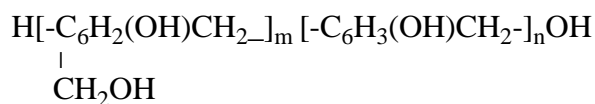
ამაღლებენ მასალის ხახუნის კოეფიციენტს, მაგრამ მცირდება მათი ტემპერატურამდეგობა.

ფენოლური ფისების თვითაალების ტემპერატურა 450-550°C, აფეთქების ტემპერატურა 150-250°C. ფისები უნდა ინახებოდეს არა უმეტეს 25°C-ისა. მათი შენახვის ვადა 3-5 თვეა, ამის შემდეგ უნდა ხდებოდეს მისი შემოწმება სათანადო სტანდარტის შესაბამისად.

ფენოლური ფისების პოლიკონდენსაციის შედეგად მიღებული დიდი სიმსხოს მოყვითალო ფერის ნამსხვრევების დაფქვა ხდება სხვადასხვა სახის წისქვილებში, ზოგჯერ კი დაფქვა და შერევა მიმდინარეობს ერთდროულად მაგ. როტორული ტიპის შემრევში. ფენოლური ფხვნილები გამოყოფენ მტვერს, რომლის ზღვრული დასაშვები კონცენტრაცია 6 მგ/მ³-ია. მტვერის აალების ტემპერატურა 410°C, ხოლო თვითაალების ტემპერატურა 520°C.

ფფფ ახასიათებს კარგი შეთავსებადობა სხვადასხვა სახის როგორც არაორგანული, ასევე ორგანული სახის შემცხებთან, გამოირჩევიან ტექნოლოგიურობით და სიიაფით.

სამუშაოში გამოყენებული რეზოლური ფფფ-ისგან მიიღება მასალები მაღალი სითბომდეგობით, სიმაგრით და სიმტკიცით. რეზოლური ფისი თერმორეაქტიულია. იგი წარმოადგენს ხაზობრივი და განტოტვილი ოლიგომერების ნარევეს მოლეკულური წონით 400-დან 1000-მდე. მისი საერთო ფორმულაა:



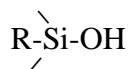
გაცხელებისას რეზოლი გადადის ჯერ რეზიტოლში და შემდეგ რეზიტში, რომელიც წარმოადგენს გამყარებულ არაღლობად და არახსნად პროდუქტს.

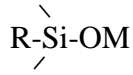
ფენოლური ფისების მსოფლიო წარმოების წლიური ზრდა 4-5%-ია მათი მრავალმხრივი გამოყენების გამო. ამავე დროს ხდება ამ ფისების თვისებების გაუმჯობესება მათი მოდიფიცირების სხვადასხვა მეთოდებისა და ხერხების გამოყენებით /54-60/, რაც იწვევს მათ ბაზაზე შემუშავებული მასალების საექსპლუატაციო თვისებების ამაღლებას.

თერმიულ თვისებებს ბევრად აუმჯობესებს ფენოლურ ფისებში გარდამავალი ლითონების ჟანგეულების, ამორფული ბორის და სილიციუმის შეყვანა /55/. აღმოჩნდა, რომ პიროლიზის დროს წარმოიქმნება ამ ლითონების საკმაო რაოდენობის კარბიდები, რომლებიც მადლა სწევენ ფენოპლასტების თერმომედეგობას. ამ თვისებას ბევრად აუმჯობესებენ ასევე ბორშემცველი ანტიპირენები და სხვადასხვა ლითონის ბაზაზე მიღებული ფოსფატები. სამუშაოს ავტორმა /57/ რეზოლურ ფენოლფორაღდგვიდურ ფისთან შეათავსა სილიციუმორგანული ოლიგომერი K-9 და შეიმუშავა პრეს-ნივთიერებები, რომელთაც ბევრად გაუმჯობესდათ თერმიული და დიელექტრიკული თვისებები. მაგრამ ყველაზე ეფექტური აღმოჩნდა სილანური აპრეტების დამატება ფენოლურ ფისების ბაზაზე შემუშავებულ კომპოზიტებში /55/, რომელთა პროცენტული რაოდენობა არ აღემატება 5%-ს.

სილანური აპრეტები წარმოადგენენ სილიციუმის მონომერულ შენაერთს, რომელთაც გააჩნიათ უნიკალური უნარი ქიმიურად დააკავშიროს პოლიმერული შემაკავშირებელი არაორგანულ ნივთიერებებს, როგორებიცაა მინა, მინერალური შემესებები, ლითონები და მათი ჟანგეულები /56/. მათი შეყვანა იწვევს ყველა სახის პოლიმერული კომპოზიტების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას. სილანი, რომელიც მეტწილად სითხის სახით არსებობს, გამოიყენება ან შემესების უშუალოდ დამუშავებით, ან პირდაპირ შეჰყავთ პოლიმერში (ინტეგრალური ნარევის მეთოდი). ამ შემთხვევაში ის მიგრაციას განიცდის შემესების ზედაპირთან ჩვეულებრივი შერევის და ექსპლოატაციის დროს. სილანურ აპრეტებს გააჩნიათ რეაქციის უნარის მქონე ჯგუფები, რომლებიც უერთდებიან მინის ან სხვა შემესების ზედაპირს, ამასთანავე ორგანული ფუნქციონალური ჯგუფები, რომლებიც წარმოქმნიან ქიმიურ კავშირებს პოლიმერთან.

თავისუფალი სილანური ჯგუფები არსებობენ ან ასეთი სახით





სახით, სადაც $M=Na,K$ ე.ი. წყალბადი ჩანაცვლებულია ტუტემეტალით /59/. შემსვების ზედაპირზე ძალიან ბევრი სილანოლური ჯგუფების არსებობისას წარმოიქმნება ერთგვაროვანი ჰიდროფობური აფსკი, რომელიც არ სველდება წყლით. საწყის მდგომარეობაში შესაძლოა მასპრიტერებელი აგენტი არ შეიცავდეს სილანოლურ ჯგუფებს. მათ მაგივრად ხშირად აპრეტის შემადგენლობაში შეჰყავთ ჯგუფები, რომლებიც ადვილად ჰიდროლიზდება წყლით, რომელიც ადსორბირებულია მინის ზედაპირზე. მათ მიეკუთვნება ქლორსილანური ჯგუფები, მაგალითად, ვინილტრიქლორსილანში



ან უბრალოდ სილანური, მაგალითად, პოლიმერულ აპრეტში



პოლიეთილჰიდროსილოქსანურ სითხეს. ამ ნივთიერებების ჰიდროლიზის დროს წარმოიქმნება სილანოლური წარმოებულები, რომლებიც შემდგომ ხელს უწყობენ შემსვების მოლეკულებთან მიერთებას.

აპრეტები ეფექტურები არიან მაშინ, თუ მათ პოლიმერთან მტკიცე კავშირთან ერთად გააჩნიათ ერთგვარი მოძრაობის უნარი შემსვების ზედაპირზე /59/. სწორედ ეს ძვრადობა ანიჭებს პოლიმერულ კომპოზიციურ მასალებს თვისებას გაუძღონ საკმარის დაძაბულობებს, რომლებიც აღიძვრება მასალის ტემპერატურული ცვლილებისა და მექანიკური ზემოქმედების დროს, მათ შორის ხახუნის დროსაც. ბოლოს შეიძლება ითქვას, რომ სილიციუმორგანული აპრეტები, იგივე სილანები წარმოადგენენ საუკეთესო აპრეტებს პოლიეთერების, ეპოქსიდური და ფენოლფორმალდეჰიდური ფისებისათვის.

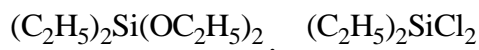
ნაშრომის ავტორის და სხვათა მიერ /60/ ნაჩვენები იქნა მათ მიერ სინთეზირებული თიენილშემცველი სილიციუმორგანული ნაერთების, როგორცაა α, ω - დიჰიდროქსილმეთილთიენილსილოქსანი

და ოლიგოტეტროლი, გავლენა გრაფიტით შევსებული ფენოლფორმალდეჰიდური კომპოზიციური მასალის თვისებებზე. გამოირკვა, რომ ამ მოდიფიკატორების (აპრეტების) 2 მას.%-ით შეყვანამ გააუმჯობესა მიღებული კომპოზიტების ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებები. მათი სიმტკიცე კუმშვაზე გაიზარდა 27%-ით, ხახუნის კოეფიციენტი 0,2-დან შემცირდა 0,1-მდე, ცვეთამდეგობა გაიზარდა 5-ჯერ, ხოლო თუჯის კონტრსხეულზე 1,88 მ/წმ სიჩქარის განვითარებისას მოხახუნე ზედაპირების ტემპერატურა არ აღემატებოდა 110°C , როდესაც არამოდიფიცირებული კომპოზიტის შემთხვევაში იგი 200°C -ს შეადგენდა 0,2 ხახუნის კოეფიციენტის დროს.

ნაშრომის ავტორმა პროფ. ო.მუკბანიანთან ერთად /61/ შევისწავლე ტეტრაეთოქსისილანის წარმოების ნარჩენის, როგორც მააპრეტირებელი დანამატის გავლენა ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის და საქართველოს ბუნებრივი ნედლეულის – კლინოპტილოლიტის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალის ფიზიკურ-მექანიკურ და ტრიბოლოგიურ თვისებებზე. აქაც აღმოჩნდა, რომ ამ ტიპის სილანური აპრეტის 3-5 მას.%-ით შეყვანა მკვეთრად აუმჯობესებს კომპოზიტის ტრიბოლოგიურ თვისებებს კლინოპტილოლიტ-გრაფიტის ბინარული შემესების გამოყენებისას. ამ დროს ხახუნის კოეფიციენტი 1,88 მ/წმ-ში სიჩქარისას შემცირდა 3-ჯერ, ცვეთამდეგობა გაიზარდა 6-ჯერ და ამ სიჩქარეზე განვითარებული ტემპერატურა შემცირდა 40°C -ით.

საინტერესო სამუშაოები ჩავატარე ნოვოლაქური ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის მოდიფიცირების მიზნით /62/ ეპოქსი ჯგუფების შემცველი პოლიფენილსილსესქვიოქსანებით (როული შემადგენლობის სილანებით), რომლის დროს წარმოიქმნება ფისის ბლოკ-თანაპოლიმერი. დადგინდა, რომ ამ სილანის ოლიგომერის მოლეკულის სიგრძის გაზრდა იწვევს მიღებული მასალის თერმოსტაბილურობის მკვეთრ გაზრდას. ეს მეტად მნიშვნელოვანი შედეგია, რადგან ფრიქციული მასალების სამრეწველო წარმოებისას, ხშირად რეზოლური ფისის მაგივრად შემკვრელად იყენებენ ნოვოლაქურ ფისს, იმ განსხვავებით, რომ მის გასამყარებლად დამატებით იხმარება უროტროპინი.

სამუშაოში ფრიქციული კომპოზიციური მასალის შემკვრელი რეზოლური ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის მამოდიფიცირებელ აპრეტად გამოყენებულ იქნა რუსული წარმოების ოლიგოდიეთილსილოქსანების წარმომადგენელი ПЭС-5 მარკის (პოლიეთილსილოქსანი-5), რომელიც წარმოადგენს სხვადასხვა სილოქსანური ოლიგომერების ნარევიდან სინთეზირებულ სითხეს, როგორებიცაა:



და სხვა. ამ სითხის საშუალო მოლეკულური მასა \bar{M}_n შეიძლება 1300-2000-ის ტოლი იყოს /63/. მისი აბსოლუტური სიმკვრივე 990-1020 კგ/მ³-ს ფარგლებშია, კინემატიკური სიბლანტე V-200-500 მმ²/წმ, ხოლო გამყარების ტემპერატურა – მინუს 96°C. ეს სითხე კარგად იხსნება ორგანულ გამხსნელებში და კარგად შეთავსებადია მინერალურ ზეთებთან, ამიტომ იგი ფართოდ გამოიყენება ზეთების და საზეთების ფუძედ. მისი რთული შემადგენლობა, რომელიც წარმოადგენს სხვადასხვა პოლიმერიზაციის და განსხვავებული აგებულების მოლეკულების ნარევს – სუფთა ხაზობრივიდან განტოტვებულებამდე და ციკლოხაზობრივამდე, განაპირობებს მის სპეციფიკურ კომპლექსურ ფიზიკურ თვისებებს. მას ახასიათებს კარგი დიელექტრიკული თვისებები, რომელიც არ არის დამოკიდებული ელექტრული დენის სიხშირეზე. გამოირკვა, რომ საერთოდ ოლიგოორგანოსილოქსანების დამატება ნავთობურ ზეთებზე ხახუნისას იწვევს მათ დაშლას ორ ზედაპირულ ფენად: პირველი არის ძალიან მაგარი, რომელიც შეიცავს Si-ს, ხოლო მეორე – ოქსიდების რბილი ფენა, რომელიც ასრულებს საზეთის ფუნქციას. შესაძლებელია ასევე სხვა შემადგენლობის ქიმიური შენაერთის წარმოქმნა, რომელიც ამცირებს ხახუნს. ПЭС-5, როგორც ოლიგოორგანოსილოქსანების ერთ-ერთი საუკეთესო წარმომადგენელი გამოიყენება, როგორც აპრეტი – ადჰეზიის პრომოტორი და როგორც თერმომდეგობის ამწვევი მოდიფიკატორი ფენოლური ფისების ბაზაზე შემუშავებული პოლიმერული კომპოზიციური მასალების შემთხვევაში /64/.

ახალი ფრიქციული მასალების შემუშავებისას ტოლუოლში გახსნილი სილოქსანური სითხე 1-3 მას.%-ის რაოდენობით მშრალ მასაზე გათვლით ემატებოდა უშუალოდ ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის ფხენილს ან კომპოზიციის რომელიმე მინერალურ ფხენილს, მაგ. ბარიტს და ხდებოდა მისი შემდგომი გაშრობა გამხსნელის აორთქლების მიზნით, ფისის შემთხვევაში 70°C ტემპერატურაზე, ხოლო მინერალური შემესების შემთხვევაში $90-100^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე.

2.2.2 ფრიქციული კომპოზიტების კომპაქტირების (დამზადების)

ტექნოლოგია

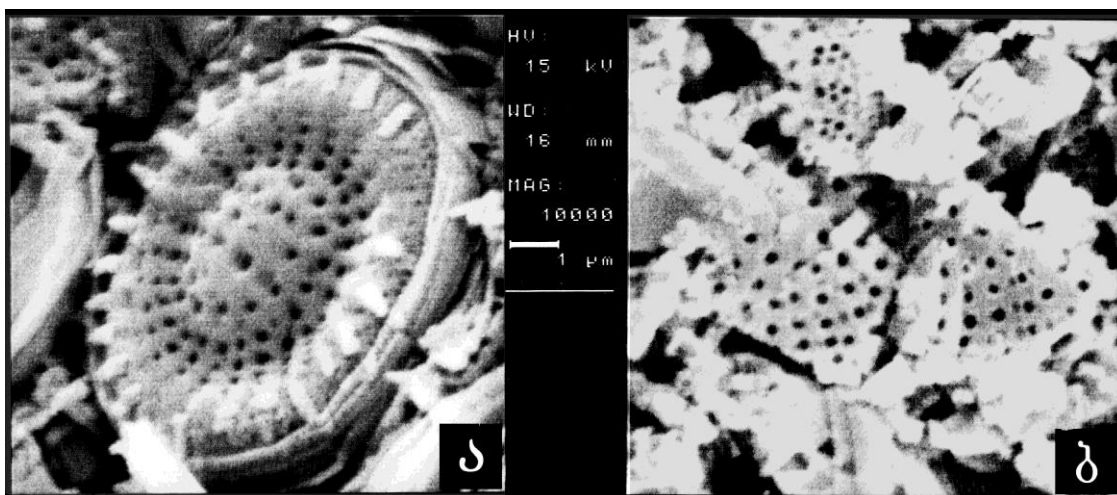
პოლიმერული კომპოზიციური პროდუქციის დამზადება, რომელ სფეროშიც არ უნდა გამოიყენებოდეს ის, მოიცავს დამზადების ერთიდაიგივე ძირითად პროცედურას: კაზმის მომზადებას, ფორმირებას და წნევით (ცივად ან ცხელ) კომპაქტირებას. ამასთან საბოლოო პროდუქტის მასალის თვისებები მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ფხენილოვანი ტექნოლოგიური პროცესის პირველივე ეტაპისაგან – კაზმის მომზადებისაგან, რომელიც თავის მხრივ მოიცავს კომპოზიციაში შემავალი კომპონენტების დაქუცმაცებას, დაფქვას, ჰომოგენიზაციას და შერევას /66/. ცხადია აგრეთვე, რომ საბოლოო პროდუქტის – ფრიქციული კომპოზიციური მასალისაგან მიღებული ნამზადის ღირებულება, მისი სასურველი საექსპლოატაციო პარამეტრების უზრუნველყოფის პირობებში, განისაზღვრება ნამზადის მასალის შემადგენელი კომპონენტების ნედლეულის ხელმისაწვდომობით, სიიაფით, მისი მასალად გარდაქმნის ტექნოლოგიის სიმარტივით და აგრეთვე კაზმიდან მასალის მისაღებად საჭირო ტექნოლოგიური პროცესების ენერგოტევადობით, ხანგრძლივობითა და თვით ტექნოლოგიისა და მისი განხორციელებების სირთულის დონით. ამიტომ, ახალი კომპონენტებისა და მათი პროპორციების შედგენა, რომელიც ტექნოლოგიური პროცესის შემდგომ ეტაპზე უზრუნველყოფს კომპოზიციური კაზმის კომპაქტირების შედეგად მიღებული ფრიქციული მასალის ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებების გაუმჯობესებას, ტექნოლოგიის გამარტივებას, გაიაფებას

და ეკოლოგიურ უსაფრთხოებას, ამიტომ ეს არის და ყოველთვის იქნება მნიშვნელოვანი ტექნიკური ამოცანა.

სამუშაოში შემუშავებული ფრიქციული მასალების კომპონენტების განხილვისას აღინიშნა, რომ ამ მასალებისათვის ძირითად ნედლეულს წარმოადგენენ საქართველოს მინერალური ნედლეულის წარმომადგენლები – ბარიტი და ფოროვანი დიატომიტი, მათი ერთობლივი პროცენტული რაოდენობა კაზმში შესაძლებელია 65-70 მას.% აღწევდეს, ხოლო დანარჩენ კომპონენტებს წარმოადგენს სპილენძის, ტექნიკური ნახშირბადის ფხვნილები და შემკვრელი ფიფი, რომელიც შემოსატანი იქნება საქართველოში მეზობელი ქვეყნებიდან (აზერბაიჯანი, უკრაინა, თურქეთი, ირანი). ყველა ეს ქვეყანა აწარმოებს ფენოლურ ფისებს, რუსეთის ჩათვლით, საიდანაც შესაძლოა გაძნელებულ იქნეს მათი შემოტანა. როგორც ცნობილია ფენოლური ფისები მაღალმწარმოებლური პოლიმერების რანგს მიეკუთვნებიან, მათი მსოფლიო წარმოება ყოველწლიურად 4-5%-ით იზრდება. წარმოადგენენ იაფ პროდუქტს, მაგრამ მსოფლიო ეკონომიკური კრიზისის პირობებში, შესაძლოა გაძვირებულ იქნეს, რადგან იგი ძირითადად ნავთობისაგან მიიღება. გარკვეული პერიოდი ფენოლფორაღდგენი ფისის წარმოება ათვისებული იყო ქრუსთავის საწარმოო გაერთიანება “აზოტში” კაპროლაქტამის წარმოების ნარჩენების ბაზაზე. უწყვეტი ბაზალტის ბოჭკოს საწარმო მუშაობს ქრუსთავში, სადაც ხდება მისი დისკრეტიზაცია სპეციალურ დამჭრელ აპარატზე, მიღებული ძაფის სიგრძე 15-20 მმ-ია. ამ სიგრძის რეგულირება (სიგრძეში შემცირება) შესაძლებელია ვიბრაციული ან პლანეტარული ტიპის წისქვილების გამოყენებით, რომლებიც ერთდროულად წარმოადგენენ კომპოზიციების ინგრედიენტების როგორც დამფქვავ, ასევე შემრევ მოწყობილობებს და მათი უპირატესობა სხვა ტიპის შემრევებთან (მაგ. ბურთულოვან წისქვილებთან) არის: შერევის მცირე დრო, ჰომოგენურობის მიღწევის მაღალი დონე, დაბალი ხმაურიანობა და ენერგეტიკული მცირე დანახარჯები.

საქართველოში მაღალი ხარისხის ბარიტს აწარმოებს ფირმა “მორიონი კკმ”, ხოლო დიატომიტის წარმოება შეწყდა გასული

საუკუნის ბოლოს (დიატომიტის დაფქვილი პროდუქტი მიიღებოდა ქთბილისთან ახლოს მდებარე საწარმოში). აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ დიატომიტის წარმოება არ შემწყდარა სომხეთში, რომელიც დღემდე აწარმოებს და თავისი პროდუქცია გააქვს მსოფლიოს 21 ქვეყანაში. სამუშაოში ფრიქციული მასალების შემუშავებისას, როგორც აღინიშნა გამოვიყენეთ ქართული წარმოების ქისათიბის დიატომიტი, თუმცა შესაძლებელია ფრიქციული სადებების ქარხნული წესით გამოშვების შემთხვევაში, ქართული ნედლეულის დროებით შემცვლელად გამოყენებულ იქნას სომხური დიატომიტი, მაგრამ მასში SiO_2 -ის ნაკლები შემცველობაა.



ნახ.9. დიატომიტის ფხვნილის დაფქვილი ნაწილაკების რემ გამოსახულება: ა) საბადოს ბუნებრივ ნიმუშში დაფქვამდე ბ) პლანეტარულ წისკვილში დაფქვილი და გაცრილი ფხვნილის ნიმუშში.

ნახ.9-ზე მოცემულია დაუფქველი და პლანეტარულ წისკვილში დაფქვილი დიატომიტის ფხვნილის ნაწილაკების რემ გამოსახულებები. პლანეტარულ წისკვილში დიატომიტის ნედლეულის დაქუცმაცებული ნატეხების (~5მმ) დაფქვისას რამდენიმე წუთის განმავლობაში ხდებოდა დიატომიტის ჯავშნის დისკოსებრი ნაწილაკების (ნახ.9.ა.) დაფშვნა და დაფქვილი მასალის გაცრით ვღებულობდით ულტრადისპერსიულ ფხვნილს, შემდგარს ფირფიტისებრი, პერიმეტრზე დაკბილული

ნაწილაკებისაგან, ზომების დისპერსიით 0,2-5 მკმ. ამასთან, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, ფხვნილში ყოველი ნაწილაკი შეიცავდა საშუალოდ ერთიდან ათეულამდე გამჭოლ ნანოფორას დიამეტრებით 100-500 ნმ (ნახ.9ბ). ცხადია ასეთი მორფოლოგიისა და ზომების მქონე ნაწილაკებისაგან შემდგარი ულტრადისპერსიული ფხვნილის ძირითად ინგრედიენტად შეყვანამ ჩვენს მიერ შემუშავებული კაზმის კომპოზიციაში, ამ უკანასკნელს შესძინა მოცულობის მჭიდროდ შევსებისა და ადვილად გამკვრივების თვისება, ამიტომ ასეთი კაზმისაგან მაღალი წნევის ზემოქმედებით ცხლად კომპაქტირების არსებული მეთოდით დამზადებული სამუხრუჭე ხუნდის ზესადები მასალა ხასიათდება მთელს მოცულობაში ნანოფორების სტატისტიკურად თანაბარი განაწილებით ტექნოლოგიური მაკროფორების პრაქტიკულად არ არსებობისას.

ფრიქციული მასალების კომპაქტირების შემდგომ ეტაპს ნედლეულის მომზადების (შრობა-დაფქვის) და დოზირება-შერევის შემდეგ წარმოადგენს დაწნეხვა, შემდეგ შესაძლებელია ეს პროცესი დამთავრდეს თერმიული და ბოლოს მექანიკური დამუშავებით.

სამუშაოში, როგორც ავლნიშნეთ ლაბორატორიულ პირობებში მასალების კომპაქტირება მიმდინარეობდა ცხლად დაწნეხვის მეთოდით 50-80 მპა წნევით და 170-190°C ტემპერატურაზე დაყოვნებით და შემდგომი გაცივებით ოთახის ტემპერატურამდე, რომელსაც განაპირობებდა ლაბორატორიული პირობებისათვის გამოყენებული პრეს-ფორმების კონსტრუქციები. საქარხნო პირობებში კომპაქტირება მიმდინარეობს ნახევრადავტომატურ ან მთლიანად ავტომატურ ჰიდრავლიკურ წნეხებზე, სადაც ტექნოლოგიური პარამეტრების იგივე პირობებში მიღებული ნამზადის გაცივება არ ხდება მრავალბუდიან პრესფორმაში და ცხლად წნეხვისას გარკვეული დროის შემდეგ (უმეტეს წილად ნამზადის 1მმ-ის სიმაღლის მიმართ 1 წუთის დაყოვნებით) ხდება ფრიქციული სადების (ხუნდის) ცხლად ამოღება პრეს-ფორმიდან სპეციალური ამომგდების საშუალებით.

მიღებული ხუნდების დამატებითი თერმოდამუშავება ხდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ საჭიროა მექანიკური დაძაბულობების მოხსნა ან სითბომედეგობის გაზრდა. თუმცა ფრიქციული ხუნდების

ბევრი მწარმოებელი ფირმებისათვის ხუნდების თერმოდამუშავება მიღებულია, როგორც წამყვანი ტექნოლოგიური პროცესი. ამ შემთხვევაში სადებები ჯერ იწნეება ცივად, შემდეგ მცირე დროის პერიოდში იწნეება ცხლად (15-20 წუთის მაგივრად აიღება 2-3 წთ.), ამის შემდეგ ტარდება უკვე აუცილებელი ტექნოლოგიური ოპერაცია – ხუნდების თერმიული დამუშავება 170-200°C-ის ფარგლებში სპეციალურ სავენტილაციო სისტემებით აღჭურვილ ღუმელებში ავტომატიზირებული ჩატვირთვა-გადმოტვირთვით. თუ განვიხილავთ ამ პროცესს, შეგვიძლია ავხსნათ, რომ მასალის 2-3 წუთით დაწნევა საკმარისია მხოლოდ იმისთვის, რომ შემკვრელმა ფისმა განიცადოს სტრუქტურული სივრცითი გაკერვა იმ დონემდე, რომ მან მასალა “დაიჭიროს” გაფორმებულ მდგომარეობაში, ხოლო შემდგომ თერმოდამუშავებისას დაასრულოს გამყარების ის მთლიანი პროცესი, რომელსაც იგი ასრულებდა ცხლად დაწნევის პირობებში, მაგრამ გამყარებისათვის საჭირო ოპტიმალურ დროში. ამ მეთოდის უპირატესობა მდგომარეობს ხუნდების მწარმოებლურობის გაზრდაში და მათ გაიაფებაში, თუმცა ცნობილია, რომ მიღებული ხუნდების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები ოდნავ გაუარესებულია პირველ მეთოდთან შედარებით. სამუშაოში ფრიქციული მასალების შემუშავებისას გამოყენებული იქნა პირველი მეთოდი.

ლაბორატორიულ პირობებში მიღებული ნიმუშებისათვის მექანიკურ დამუშავებას – ზედაპირების ხეხვას ნულლოვან ზუმფარაზე განიცდიდა ყველა ნიმუში მათი შემდგომი ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებების ტესტირებისათვის. ამით ვაღწევდით გამოსაცდელი ნიმუშების ზედაპირების პარალელურობას, რაც აუცილებელი პირობა იყო, როგორც ძელაკების კუმშვაზე გამოცდებისათვის, ასევე მილისებისათვის მოხახუნე კონტრსხეულის ზედაპირისათვის კონტაქტირებისა და მიხეხვის პირობების გაუმჯობესების მიზნით. საქარხნო პირობებში სამუხრუჭე ხუნდების მექანიკური დამუშავებისათვის გამოიყენება ყველა ის ჩვეულებრივი დანადგარი, რომლებიც იხმარება ფენოპლასტების გადამუშავების დროს. ეს ითვალისწინებს ნაწიბურების და ნაზოლების მოხსნას, სადების გადახეხვას და სხვა /67/.

**2.3 ხახუნის კოეფიციენტის მოდიფიკატორების გაგენა
შემუშავებული მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ და
ტრიბოლოგიურ თვისებებზე**

შემუშავებული ფრიქციული მასალების კაზმის ოპტიმიზებული კომპოზიციების ექსპერიმენტულად დადგენის შემდეგ, სამუხრუჭე ხუნდების წარმოების მიღებული ტექნოლოგიური ციკლის გამოყენებით დამზადდა ნანოფოროვანი კომპოზიციების საცდელი ნიმუშები ლაბორატორიული სასტენდო ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური ტესტირებისათვის ხახუნის მანქანა IM-58-ზე 0,7 მპა დატვირთვისას.

ჩვენს მიერ შემუშავებული ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებები მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი №2.

შემუშავებული ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური და
ტრიბოლოგიური თვისებები.

| ფრიქციული მასალის რაობა | კუთრი სიმკვრივე d, კგ/კმ ³ | სიმტკიცის ზღვარი კუმშვისას, σ მპა | წყალშთანაქმა, % | ხახუნის კოეფიციენტი, f | | | ცვეთის ინტენსივობა, J*10 ⁻⁹ | | |
|---|--|---|-----------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|
| | | | | 200 ⁰ C | 380 ⁰ C | 600 ⁰ C | 200 ⁰ C | 380 ⁰ C | 600 ⁰ C |
| 1. არამოდიფ. მასალა | 1670 | 85 | 0.36 | 0.40 | 0.19 | – | 5,7 | 7,7 | – |
| 2. მოდიფიც. რკინის ფოსფატით | 1970 | 143 | 0.25 | 0.43 | 0.25 | – | 10.9 | 3.8 | – |
| 3. მოდიფიც. სილანით | 2065 | 118 | 0.30 | 0.40 | 0.29 | 0.47 | 4.8 | 4.5 | 6.7 |
| 4. მოდიფიც. სილანი + ტექნიკური ნახშირბადით | 2268 | 145 | 0.34 | 0.33 | 0.31 | 0.37 | 1.1 | 2.3 | 2.5 |
| 5. მოდიფიც. მე-4+ბაზალ- ტის ბოჭკო | 2460 | 137 | 0.45 | 0.54 | 0.33 | 0.42 | 2.15 | 5.42 | 8.3 |

ცხრილი №2-დან ჩანს, რომ ყველა მოდიფიცირებული ფრიქციული მასალის სიმტკიცე კუმშვისას მაღალია არამოდიფიცირებულ მასალაზე. სიმტკიცისა და ტრიბოლოგიური თვისებებით გამორჩეულია სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალა. მისი სიმტკიცე კუმშვაზე 185 მპა-ს ტოლია, მშრალი ხახუნისას მისი ტემპერატურული მუშა დიაპაზონი გაზრდილია 600°C-მდე და ამ ექსტრემალურ პირობებში და მისი ცვეთის ინტენსივობა არ აღემატება 2,5-10⁻⁹, რომელიც ჩვენს მიერ ახსნილ იქნა ნახშირბადის ნანონაწილაკების მიერ პერკოლაციური სითბოგამტარი არსების წარმოქმნით, რომელთა არსებობა დადებითად მოქმედებს მშრალი ხახუნისას. ტექნიკური ნახშირბადის შეყვანამ ოდნავ დასწია ქვევით მისი ხახუნის კოეფიციენტი, მაგრამ სტაბილურია კვლევის მთელ დიაპაზონში (0.33-0.37). ასეთივე ეფექტურობით გამოირჩევა მხოლოდ სილანით მოდიფიცირებული კომპოზიტიც: 600°C ტემპერატურაზე მისი ხახუნის კოეფიციენტი ასევე იზრდება 0,47 მნიშვნელობამდე, მაგრამ მისი ცვეთამდეგობა ამ ექსტრემალურ პირობებში 2,5-ჯერ ნაკლებია. რაც შეეხება არამოდიფიცირებულ და რკინის ფოსფატით მოდიფიცირებულ მასალებს, ისინი დამაკმაყოფილებლად მუშაობენ 350°C-მდე, 380°C-ზე მათი ხახუნის კოეფიციენტი მკვეთრად ეცემა (იხ. ნახ.11), განსაკუთრებით არამოდიფიცირებულის და ამ ტემპერატურაზე ცვეთის ინტენსივობა ყველაზე მაღალია. მათ არ გააჩნიათ უნარი რეალიზება გაუკეთონ ტრიბოლოგიურ თვისებებს 400°C-ს ზემოთ. აქ შეიძლება ითქვას, ის რომ 380°C ტემპერატურაზე ყველა მასალის, არამოდიფიცირებული და მოდიფიცირებულის ცვეთამდეგობა შესაბამისობაშია სტანდარტით მოთხოვნილებებთან, რასაც ჩვენის აზრით განაპირობებს დიატომიტის შემცველობა და მისი ნანოფორების არსებობით განპირობებული ცვეთის მექანიზმი, რომელიც აღწერილია ექვთელიას ხელმძღვანელობით ჩატარებულ სამუშაოებში /44,45,68,69/.

ნანოფოროვანი ფრიქციული კომპოზიციების ხახუნისა და ცვეთის მექანიზმის არსი შემდეგია:

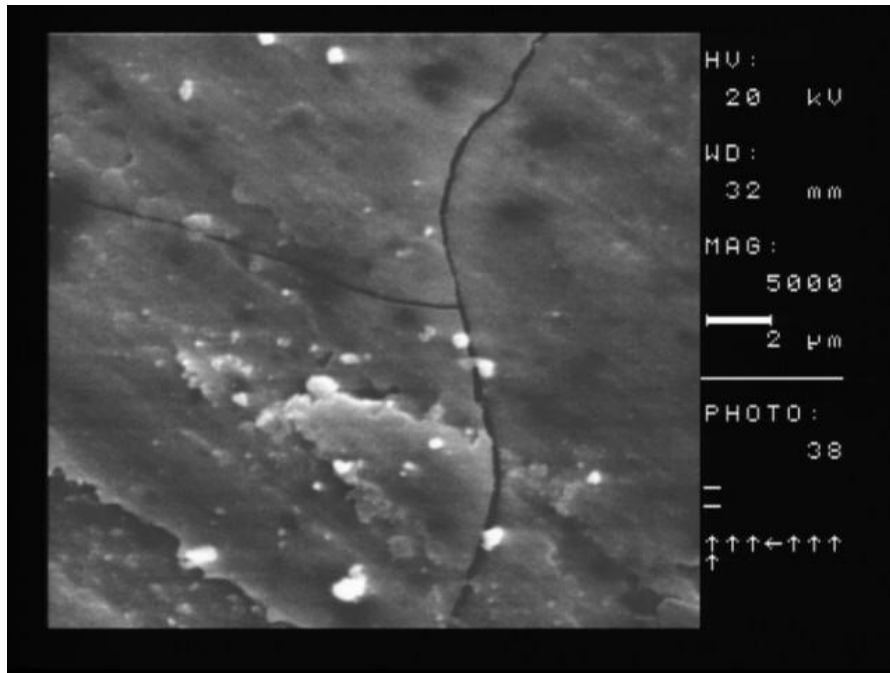
1. ხახუნის პირველ სტადიაზე ხდება თუჯის კონტრსხეულის ზედაპირის პოლირება თავისუფალი სუბმიკრონული ნაწილაკების საშუალებით.
2. პარალელურად ფრიქციული მასალის ზედაპირზე ფორმირდება ცვეთის პროდუქტის – ნანონაწილაკებისაგან შემდგარი რამდენიმე მიკრონიანი ფხვნილის შუა შრის ფენა აფსკის სახით, რომელსაც თავის მხრივ ზედაპირზე სუბმიკრონული ფორების თვითმოწესრიგების ნიშნები გააჩნია.
3. ნანოფხვნილის შუა შრის “აფსკის” ფორმირების გავლენა ცვეთის მექანიზმის ხასიათზე შემდეგია:
 - ა) ხდება ძირითადი მასალისაგან განუწყვეტლივი შევსება ხახუნისას, როგორც ნიმუშის ზედაპირზე, ასევე ლითონური კონტრსხეულის ზედაპირზე “დაგრუნტის” სახით ამ ზედაპირის სიმქისებზე.
 - ბ) ხდება ზედაპირების საკონტაქტო ფართების მკვეთრი ზრდა და ამის შედეგად კუთრი წნევის შემცირება, რომლის დროს მაღალ დონეზე შენარჩუნებულია ძვრის წინააღმდეგობის ძალები “დენად” ფხვნილში ნანონაწილაკებს შორის შინაგანი ხახუნის გამო, რის გამოც მკვეთრად მცირდება ლითონური კონტრსხეულის ცვეთა.

რაც შეეხება მოდიფიკატორებს, ამ შემთხვევაში სილანი (პოლიეთილენსილანი-5) ზრდის შემკვერელი ფისის თერმომედეგობას, რაც შემდგომში ხახუნისას დადებითად აისახება უკეთესი ფრიქციული აფსკის წარმოქმნით და ბევრად აუმჯობესებს აღნიშნულ სამუშაოებში აღწერილი ცვეთის მექანიზმის რეალიზაციას. რაც შეეხება ტექნიკურ ნახშირბადს, ამ მაღალდისპერსული ამორფული ნივთიერების ნაწილაკების 120 ნმ ზომის სახით შეყვანა ჩვენის აზრით წარმოქმნის სითბოგამტარ “სითბოგამწოვ” პერკოლაციურ არხებს კომპოზიტის მთელ მოცულობაში და ეს არხები დიატომიტის ნანოფორებთან და ნანოფხვნილის შუა შრესთან ერთად უზრუნველყოფენ სამუხრუჭე სისტემის ეფექტურ მუშაობას 600°C ტემპერატურამდე და ხახუნის კოეფიციენტის სტაბილურობას.

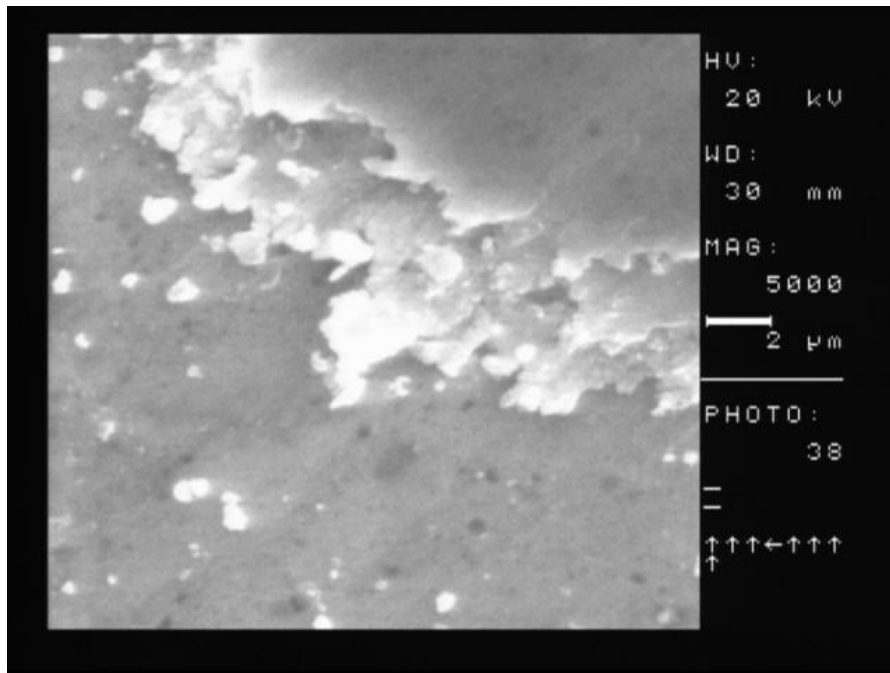
პერკოლაციური არხების არსებობას ბევრად განაპირობებს, ის რომ საყოველთაოდ ცნობილია ტექნიკური ნახშირბადის გამორჩეული ადსორბციის უნარი და მის ნანონაწილაკებს ახასიათებს წარმოქმნას ჯაჭვური სტრუქტურა, რომელსაც მიდრეკილება აქვს ბადისებრი სტრუქტურის წარმოქმნისაკენ და იგი ცნობილია ტექნიკური ნახშირბადის “სტრუქტურულობის” სახელით. თანამედროვე მიდგომით ნახშირბადს ანიჭებენ უნარს შექმნას კლასტერები, რომლებიც შემდეგ მონაწილეობენ პერკოლაციური არხების ჩამოყალიბებაში. უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთი უნარი არ გააჩნია ტექნიკური ნახშირბადის მსგავს ნივთიერებას - გრაფიტს.

ბაზალტის ბოჭკოს შეყვანა მოდიფიცირებულ კომპოზიტებში ზრდის ხახუნის კოეფიციენტს, მათი ცვეთამდეგობა 2-3-ჯერ მცირდება მაღალ ტემპერატურებზე, მაგრამ იგი მაინც მაღალია და აკმაყოფილებს სტანდარტულ მოთხოვნებს. დისკრეტული ბოჭკოს შეყვანით ჩვენ შეგვიძლია ვარაუდობთ ხახუნის კოეფიციენტი მოთხოვნილებისდა მიხედვით და მოსალოდნელია, რომ იგი გააუმჯობესებს ტექნოლოგიურ პარამეტრებს კომპოზიტის გადამუშავებისას ფრიქციული ზესადების მასიურად წარმოების დროს. რაც შეეხება პირველ სამ კომპოზიტს, ისინი გამოირჩევიან ესტეტიურობით (მოთეთრო-მოყვითალო ფერის არიან), არამოდიფიცირებული კომპოზიტი ყველაზე მსუბუქია. შემუშავებული მასალები არ წრიპინებენ. ტრიბოლოგიური ტესტირების დროს ვახდენდით საცდელი ნიმუშების წყლით დასველებას, რომლის დროს შეინიშნებოდა მათი ხახუნის კოეფიციენტის უმნიშვნელო ვარდნა და ხდებოდა მისი სწრაფად აღდგენა.

ჩვენს მიერ მიღებულ შედეგებს კარგად ხსნის ხახუნის ზედაპირების რასტრული ელექტრომიკროსკოპიული სურათების ანალიზი. გადაღებული გვაქვს მაღალ ტემპერატურებზე (450-600°C) ნამუშევარი ფრიქციული მასალების და თუჯის კონტრსხეულის ზედაპირების რასტრული მიკროსკოპიული სურათები (რემ გამოსახულებები).



(ა)



(ბ)

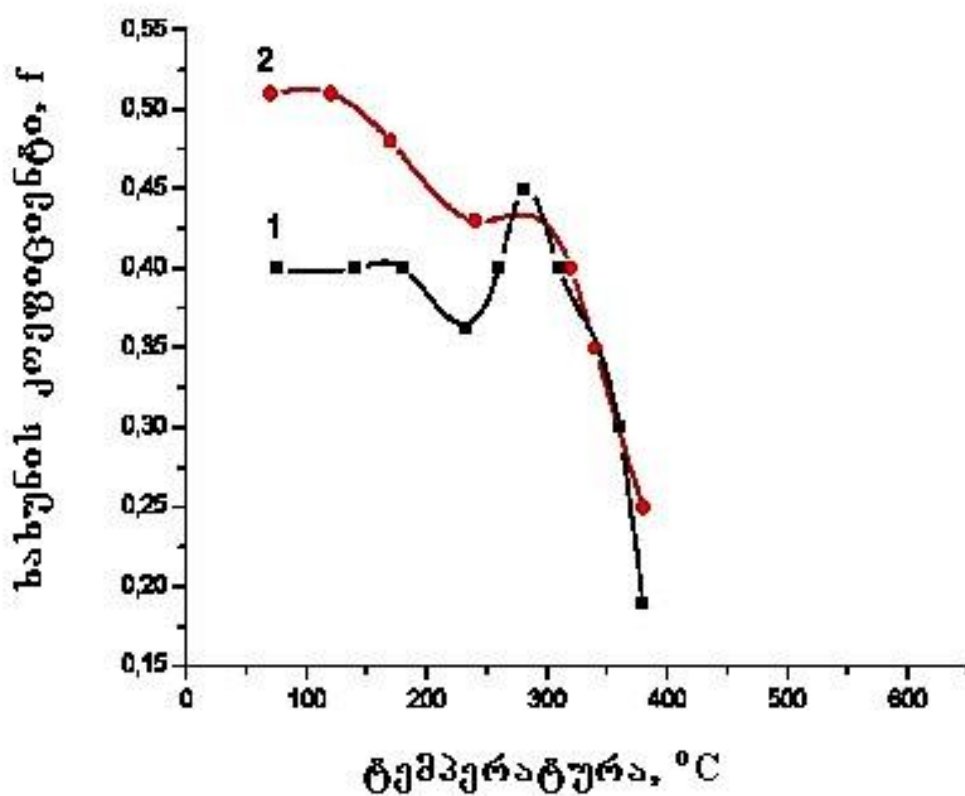
ნახ. 10. ნანოფლოროვანი ზესადების 600°C-მდე ნამუშევარი ზედაპირების რემ გამოსახულებები:

ა - სილანით მოდიფიცირებული;

ბ - სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული

ნახაზზე 10-ზე წარმოდგენილია ა) სილანით მოდიფიცირებული და ბ) სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული

ფრიქციული მასალის (ზესადების) 600°C-მდე ნამუშევარი ზედაპირების რემ გამოსახულებები. ამ სურათებიდან ჩანს, რომ მიუხედავად ორივე მასალის ზედაპირების დამაკმაყოფილებელი რელიეფისა, სილანით მოდიფიცირებული მასალის ზედაპირზე ფიქსირდება ამ მასალის ზედაპირზე წარმოქმნილი თბური მიკრონაპრალები, რაც ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალის ზედაპირზე არ დაიმზირება, რასაც ალბათ ბევრად განაპირობებს პერკოლაციური არხების არსებობა /70/.



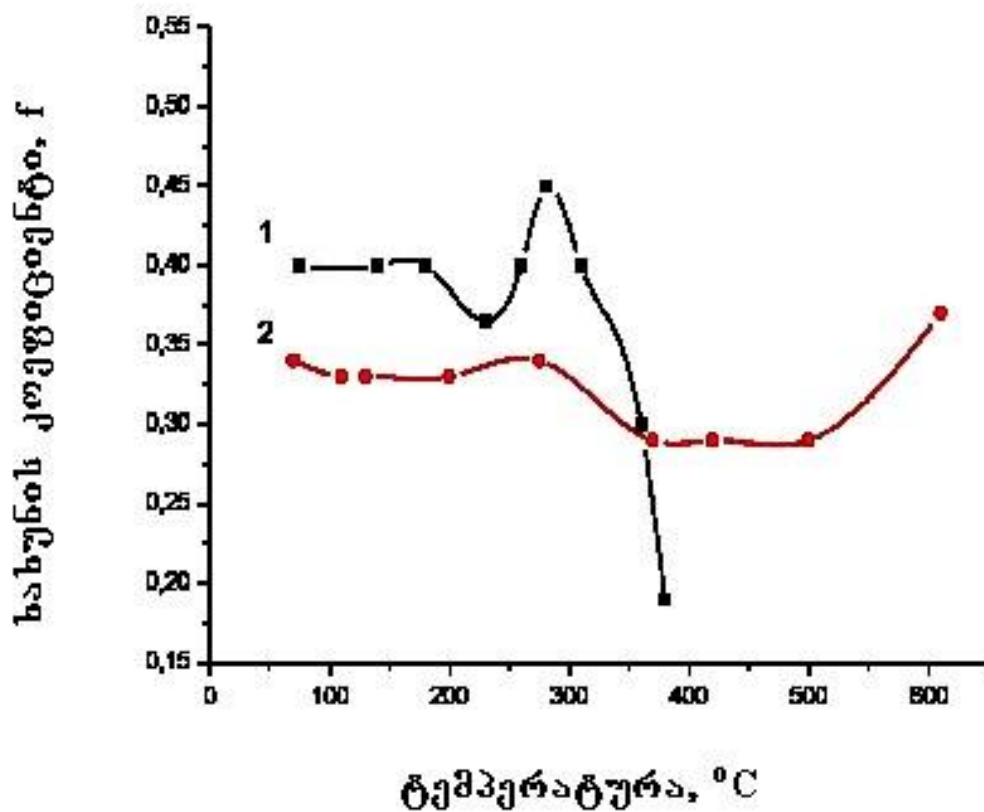
ნახ. 11. სახუნის კოეფიციენტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება;

1 – არამოდიფიცირებული მასალა.

2 – რკინის ფოსფატით მოდიფიცირებული მასალა.

ნახ.11-ზე წარმოდგენილია არამოდიფიცირებული და რკინის ფოსფატით მოდიფიცირებული ნანოფოროვანი ფრიქციული მასალების სახუნის კოეფიციენტების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

ნახაზიდან ნათლად ჩანს, რომ ზემოთაღნიშნული ფრიქციული მასალების მუშა ტემპერატურული დიაპაზონი 400°C -მდეა. რკინის ფოსფატით მოდიფიცირებამ გამოიწვია მასალის ხახუნის კოეფიციენტის გაზრდა საწყის ტემპერატურებზე, მაგრამ შემდგომ ხახუნის კოეფიციენტი ისევ დაეცა, თითქმის გაუთანაბრდა არამოდიფიცირებულ კომპოზიტს. შეიძლება გამოვთქვათ ვარაუდი, რომ რკინის ფოსფატმა ვერ გამოამუქავნა სილანის მსგავსი ეფექტი პოლიმერული შემკვრელის მიმართ. თუმცა შესაძლოა, რომ მის მიერ გაზრდილიყო პოლიმერის ცეცხლმედეგობა, რაც ფოსფატების მთავარი თვისებაა.



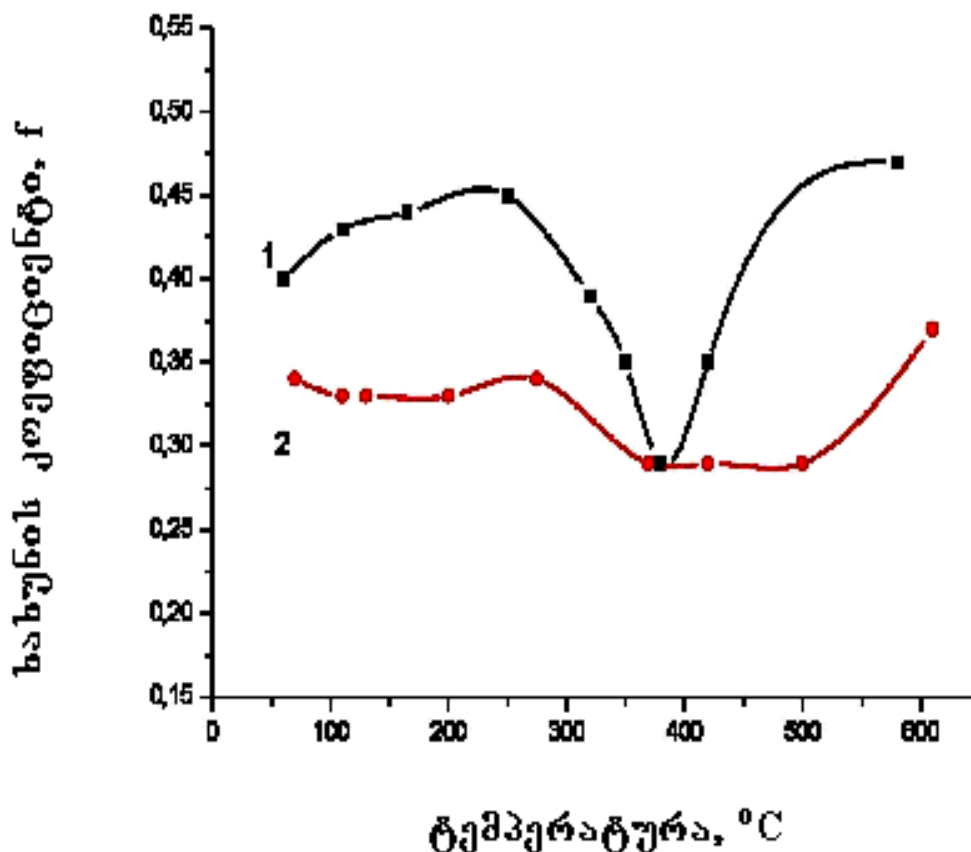
ნახ. 12. ხახუნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე:

1 - არამოდიფიცირებული მასალა.

2 - სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალა.

ნახ.12-ზე წარმოდგენილია არამოდიფიცირებული და სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული ფრიქციული მასალების ხახუნის კოეფიციენტების დამოკიდებულება

ტემპერატურაზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ არამოდფიცირებულ მასალასთან შედარებით მოდიფიცირებული მასალის მუშა დიაპაზონი გაზრდილია 600°C-მდე. რაც დადასტურებაა ჩვენს მიერ მოყვანილი ცვეთის მექანიზმის სილიკონის მამოდიფიცირებელი როლის და პერკოლაციური არხების კომპლექსური მოქმედების გამოვლენის.



ნახ.13. ხახუნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

1 - სილანით მოდიფიცირებული მასალა.

2 - სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალა.

ნახ.13-ზე ნაჩვენებია სილანითა (1) და სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით (2) მოდიფიცირებული ფრიქციული მასალების ხახუნის კოეფიციენტების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ სილანით მოდიფიცირებულ კომპოზიტს ახასიათებს მაღალი ხახუნის კოეფიციენტი, რომლის ვარდნა აღინიშნება ისევე იმ ტემპერატურულ დიაპაზონში (380°C), როგორც ეს ახასიათებდა

არამოდფიცირებულ მასალას, თუმცა ამ შემთხვევაში ხახუნის კოეფიციენტი 0,3-ის ქვევით არ ჩამოდის. ამ ტემპერატურიდან 580°C-მდე ხდება ამ მასალის ხახუნის კოეფიციენტის მკვეთრი გაზრდა, რაც ჩვენი აზრით აიხსნება სილიკონის დადებითი როლის და Al₂O₃-ის არსებობით კომპოზიციაში ტექნიკური ნახშირბადის ნაცვლად. ცნობილია, რომ კორუნდის მარცვლები ფრიქციული მასალების ხახუნისას ავლენენ აბრაზიულ თვისებებს და გამოდიან ამ შემთხვევაში მოდიფიკატორის როლში ხახუნის კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით /71/.

ცხრილ №3-ში წარმოდგენილია ჩვენს მიერ განხილული ფრიქციულ მასალებთან კონტრსხეულის (თუჯი ZHMX მარკის) ცვეთის ინტენსივობა.

ცხრილი №3

კონტრსხეულის ცვეთის ინტენსივობა.

| ფრიქციული მასალის რაობა | კონტრსხეულის ცვეთის ინტენსივობა, J*10 ⁻¹⁰ | | |
|---|--|-------|-------|
| | 200°C | 380°C | 600°C |
| 1.არამოდფი. მასალა | 1.60 | 0 | – |
| 2. მოდიფიც. რკინის ფოსფატით | 1.00 | 1.0 | – |
| 3. მოდიფიც. სილანით | 0.80 | 1.0 | 0.6 |
| 4. მოდიფიც. სილანით + ტექნ. ნახშირბადით | 0.30 | 0.25 | 0 |
| 5. მოდიფიც. (4) + ბაზალტის ბოჭკოთი | 0.39 | 0.21 | 0.39 |

რაც შეეხება კონტრსხეულის ცვეთამდეგობას, სადაც ჩვენს მიერ აღებული იყო ZHMX მარკის თუჯი, იგი ერთი-ორი რიგით მაღალია ფრიქციული მასალების ცვეთამდეგობაზე. კონტრსხეული ყველაზე

მეტად ცვდება 200°C ტემპერატურაზე არამოდიფიცირებულ მასალასთან მუშაობისას და მათი მინიმალური ცვეთა აღინიშნება სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალის მოხახუნე ზედაპირთან. რაც აიხსნება ამ მასალის დაბალი ხახუნის კოეფიციენტით და ჩვენს მიერ განხილული ცვეთის მექანიზმის ყველაზე უკეთესი რეალიზაციით. ცხრილიდან ასევე ჩანს 600°C-მდე მომუშავე ბაზალტის ბოჭკოთი მოდიფიცირებული მასალის ზედაპირთან მოხახუნე თუჯის ცვეთის ინტენსივობა $0,3-0,39 \cdot 10^{-10}$ ფარგლებშია. ე.ი. იგი ოდნავ მეტად ცვდება, ვიდრე ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული მასალის კონტრსხეული, რაც აიხსნება ბაზალტის ბოჭკოს არსებობით კომპოზიტში. 380°C-ზე არამოდიფიცირებულ მასალასთან თუჯი არ ცვდება ხახუნის კოეფიციენტის ვარდნის გამო. თუმცა იგი ყველაზე მეტად ცვდება 200°C-ზე რადგანაც ამ დიაპაზონში მასთან მომუშავე მასალას ახასიათებს მაღალი ხახუნის კოეფიციენტი.

2.4 ნანოფორიანი ფრიქციული მასალების ღერო-დისკურ ხელსაწყოზე ტესტირება და ორ ხახუნის მეთოდზე დაყრდნობით ტრიბო-წყვილების ცვეთის თავისებურებანი

სამუშაოში ჩატარებულ იქნა სათანადო კვლევები მოდიფიცირებულ ღერო-დისკურ ხელსაწყოზე, სადაც ჩვენს მიერ შემუშავებულ ფრიქციულ მასალებთან ერთად გამოიცადა ერთი LM მასალა, რომელიც ევროპის ბაზარზეა გავრცელებული და მეორე NAO მასალა აშშ ბაზრიდან. სკანირებადი ელექტრომიკროსკოპიის (რემ) და ენერგო-დისპერსიული რენტგენო-სხივური სპექტროსკოპიის (ედს) საშუალებით შესწავლილ იქნა ჰაერში გაფრქვეული, სხვადასხვა ზესადები მასალისაგან წარმოქმნილი და ფილტრებზე დაგროვილი ნაწილაკების ზომა, ფორმა და ელემენტური შედგენილობა.

ჩვენს მიერ შერჩეული ნიმუშები, როგორებიცაა სილანით მოდიფიცირებული – I, სილანითა და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებული – II, სილანით, ტექნიკური ნახშირბადით და ბაზალტის ბოჭკოთი მოდიფიცირებული – III მასალები უცხოურ მასალებთან ერთად (LM, NAO) კონტაქტში იყო რუხი თუჯის

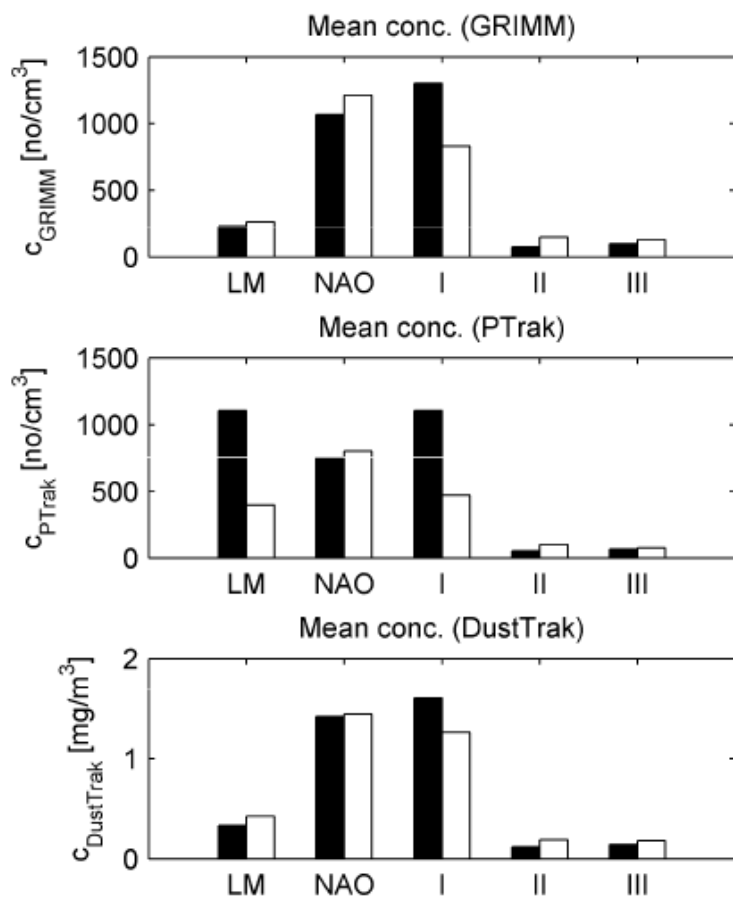
დისკოსთან 30 წუთის განმავლობაში, სადაც ყოველი მასალის კომბინაცია მოწმდებოდა 2-ჯერ.

გამოიკვლიდა 63 მმ დიამეტრის და 66 მმ სისქის დისკოს ფორმის როტორული ნიმუშები 10 მმ დიამეტრის და 13-17 მმ სიმაღლის ღეროების ფორმის ხუნდების ნიმუშების გამოყენებით. გამოსაცდელი ნიმუშები დამზადებული იყო სამუხრუჭე ხუნდებისაგან და სამგზავრო ავტომობილების როტორებისაგან. გამოცდილი იყო ერთი მცირე-მეტალური (LM) სამუხრუჭე მასალა ევროპული საბჭოსგან და ერთი არააზბესტური ორგანული სამუხრუჭე მასალა (NAO) აშშ-დან. გარდა ამისა, გამოცდილი იყო სამი ახალი კომპოზიციური მასალის საფუძველზე შექმნილი სამუხრუჭე ხუნდები, რომლებიც შეიცავენ სამ განსხვავებულ ხახუნის მოდიფიკატორს (ზევით ავლნიშნეთ როგორც I, II და III). სამუხრუჭე ხუნდების ყველა მასალა გამოცდილი იყო რუხი თუჯის დისკოებთან ერთად. გამოცდა ჩატარდა ღერო-დისკურ მანქანაზე ჰორიზონტალურ მბრუნავ დისკოთი რუხი თუჯისგან და ბალასტით დატვირთული ღეროთი ჩვენს შრომაში დეტალურად აღწერილი მეთოდის მიხედვით /72/. ხახუნის კოეფიციენტი გამოთვლილი იყო გაზომილი ტანგენციალური ძალის გაყოფით მოდებულ ნორმალურ ძალაზე. მასალების თითოეული კომბინაცია ორჯერ გამოიკვლიდა.

მოხახუნე წყვილების ნიმუშების ზედაპირების მორფოლოგია გამოიკვლიდა სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით DSM-960 (Karl Zeiss, Germany). ზედაპირული ფენების შემადგენლობა განისაზღვრებოდა ოქე LAS -2000 სპექტრომეტრით (Riber, France). ატომური სიღრმეული განაწილების ფენა-ფენა ანალიზი ხორციელდებოდა 2 კილოელექტრონვოლტამდე ენერჯის მქონე არგონის აჩქარებული იონების სხივით, გაფრქვევით გამოსაკვლევი ნიმუშების ღერო-დისკო ზედაპირებისგან. იონური დენის შერჩეული სიმკვრივე უზრუნველყოფდა ფენების მოცილების 5 Å/წთ სიჩქარეს.

ნახ.14-ზე მოცემულია ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაციის სიდიდეები ბოლო 10 წუთის განმავლობაში (მიმუშავების შემდეგ), რომლებიც გაზომილია GRIMM, DustTrak და PTrak ხელსაწყოებით. ნახაზიდან ჩანს, რომ სამივე ხელსაწყოთი გაზომილი ცვეთის

ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაციის სიდიდეები ძირითადად შესაბამისობაშია ერთმანეთთან და ყველაზე დაბალი კონცენტრაციები ახასიათებს ისევ ჩვენს II და III ნიმუშებს, ისინი ყველაზე ნაკლებად იცვითებიან. ეს შედეგები შეესაბამება ჩვენს მიერ მიღებულ შედეგებს პირველი ტესტირებისას ხახუნის მანქანა IM-58 და შეიძლება დავასკვნათ, რომ მოდიფიცირებულ დერო-დისკურ ხელსაწყოზე ჩატარებული ტესტური გამოცდები ადასტურებს პირველი ტესტირებისას მიღებულ შედეგებს.



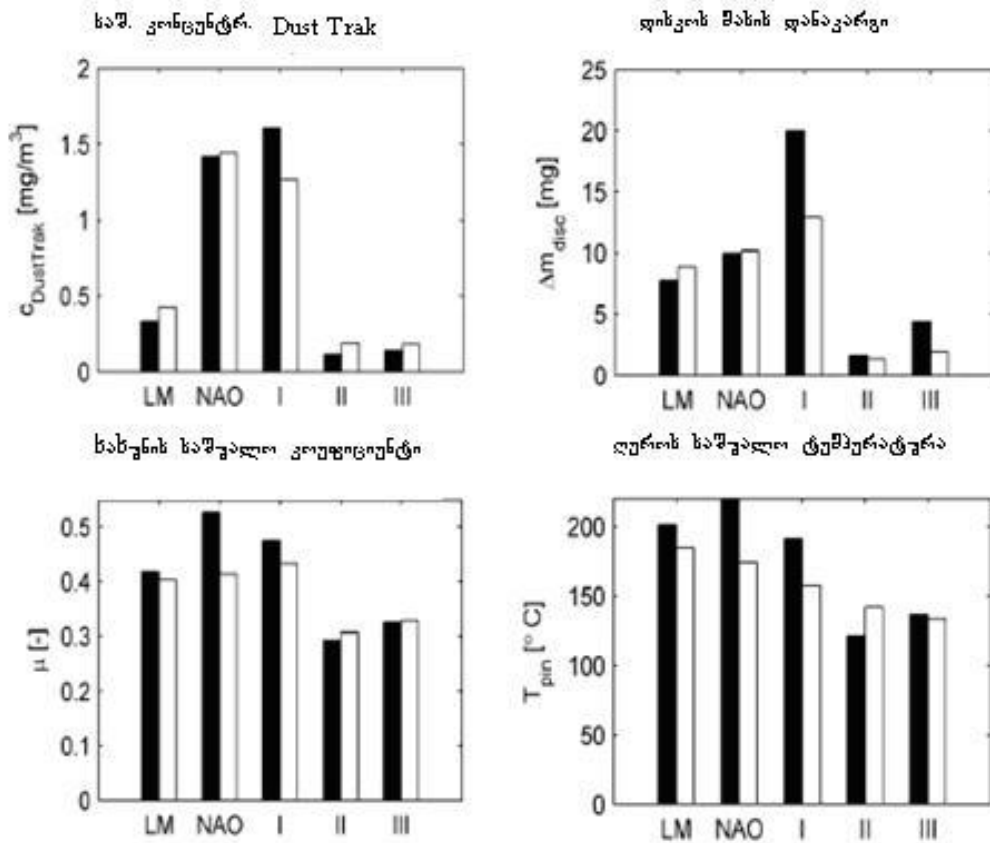
ნახ. 14. GRIMM (C_{GRIMM}), P-Trak (C_{P-Trak}), DustTrak ($C_{Dust-Trak}$) ხელსაწყოებით გაზომილი ცვეთის ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაციები მიმუშავების შემდეგ. მუქი ფერის სვეტი: პირველი ტესტი; ღია ფერის სვეტი: მეორე ტესტი.

თითოეული გამოკვლეული სახუნდე მასალა, გამოცდილი რუხი თუჯის დისკოებთან ერთად კომბინაციაში, ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით: ჰაერში მოხახუნე ზედაპირების ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაცია ($C_{dustTrak}$), მიღებული DustTrak ხელსაწყოს საშუალებით,

დისკოს მასური დანაკარგი (Δm_{disc}), ხახუნის საშუალო კოეფიციენტი (μ) და ღეროს საშუალო ტემპერატურა (T_{pin}), როგორც ნაჩვენებია ნახ.5.2-ზე. ერთნაირ ექსპერიმენტულ პირობებში მიღებული ეს მონაცემები საშუალებას გვაძლევდა შეგვედარებინა და შეგვეფასებინა ახალი ნანოფოროვანი კომპოზიციებისგან დამზადებული სამუხრუჭე ხუნდების ტრიბოლოგიური ეფექტურობა (ანუ I, II და III) ჩვეულებრივ სამუხრუჭე ზესადებთან შედარებით (LM და NAO).

შედარებისას აღმოჩნდა პირველი შესანიშნავი განსხვავება, რომ ნანოფოროვანი კომპოზიციებისგან (II და III) დამზადებული ღეროები გენერირებენ გაცილებით მცირე რაოდენობის ჰაერის ნაწილაკებს ხახუნისას, ვიდრე ჩვეულებრივი მასალები, სახელდობრ, ~ 3- ჯერ და ~ 7-ჯერ ნაკლები სიდიდე LM და NAO-თან შედარებით, შესაბამისად. საჭიროა აღვნიშნოთ, რომ ჩვენს შრომაში [72] აღნიშნული მასალებისათვის ჰაერის მტერის ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაცია იზომებოდა ერთდროულად სამი სხვადასხვა მოწყობილობით: ნაწილაკების ოპტიკური მთვლელის GIMM 1.109-ის გამოყენებით, კონდენსაციის ცენტრების მთვლელით P-Trak და აეროზოლის მონიტორით DustTrak. უკანასკნელი ხელსაწყო საშუალებით მიღებული გაზომვის შედეგები მოცემულია ნახ.15-ზე, რომელზედაც წარმოდგენილი შედეგები ზოგადად შესაბამისობაშია ორი სხვა ხელსაწყო საშუალებით გაზომილ შედეგებთან ჰაერის ნაწილაკების გენერირებული კონცენტრაციებისთვის მათი ზომების ფართო დიაპაზონში (0.02-32 მკმ).

ხახუნის შედეგად ჰაერის ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების ზემოდაღნიშნული შედეგები კარგ კორელაციაშია დისკოს ცვეთის პარამეტრების მნიშვნელობებთან, რომლებიც წარმოდგენილია ნახ. 15-ზე, როგორც დისკოს მასის დანაკარგების მონაცემები Δm_{disc} -ის სახით და გაზომილი თითოეული საკვლევი კომპოზიციის ღეროებთან ხახუნის შემდეგ.



ნახ. 15. ჰაერში ცვეთის შედეგად გაჩენილი ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაცია გაზომილი DustTrak (C_{dustTrak}) მოწყობილობით, დისკოს მასის დანაკარგი (Δm_{disc}), ხახუნის საშუალო კოეფიციენტი და ღეროს საშუალო ტემპერატურა (T_{pin}) მუშაობის შემდეგ. შავი სვეტი: პირველი გამოცდა, თეთრი სვეტი: მეორე გამოცდა.

ამ მონაცემების შედარებასაც ცალსახად მიუყვართ დასკვნამდე, რომ იგივე ორი ნანოფოროვანი კომპოზიციისგან (II და III) დამზადებული ღეროები იწვევენ დისკოს მნიშვნელოვნად ნაკლებ ცვეთას ხახუნისას, ვიდრე კონვენციური მასალებისაგან (LM და NAO) დამზადებული ღეროები. კერძოდ II და III კომპოზიციის ღეროებთან ხახუნისას დისკოს ცვეთა შესაბამისად დაახლოებით 4-ჯერ და დაახლოებით 6-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე LM და NAO კომპოზიციებთან ხახუნისას. რაც შეეხება ნანოფოროვან I კომპოზიციას, მასში განსხვავებით II და III კომპოზიციებისაგან, ხახუნის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობის მისაღწევად დამატებით შეყვანილ იქნა ჩვენს მიერ კორუნდის ფხვნილის გარკვეული რაოდენობა, რამაც მისი

დისკოსთან ხახუნისას ცვეთის პროცესში კაწვრითი მექანიზმის წილის გაზრდა გამოიწვია სრესვის მექანიზმით ცვეთის ფონზე და შესაბამისად მისი ტრიბოლოგიური პარამეტრები მიუახლოვდა უპირატესად კაწვრის მექანიზმით მომუშავე ფრიქციულ მასალებს LM და NAO-ს, თუმცა გარკვეული დოზით შეინარჩუნა ის დადებითი თვისებები, რაც გააჩნიათ II და III ნანოფოროვან კომპოზიტებს.

გამოკვლევული მასალებისათვის ნახ.15-ზე მოყვანილი ოთხივე პარამეტრის პირველი და მეორე გაზომვებით მიღებულ მონაცემებს შორის ცვლილებების ტენდენციები და სიდიდეები მიუთითებენ ცვეთის პროცესების განსხვავებულ მექანიზმებზე ხახუნისას უპირატესად კაწვრა-ხეხვის მექანიზმით მომუშავე მასალებსა და უპირატესად სრესვის მექანიზმით მომუშავე მასალებს (II და III კომპოზიცია) შორის, როგორც ჩანს განპირობებულია მეორადი ეფექტებით, რომელიც კავშირშია მესამე შუალედური ფაზის ფორმირებასთან, ცვეთის პროდუქტების სახით, რომელიც გამოყოფია ღეროებისა და დისკოს მოხახუნე ზედაპირების. ეგრეთწოდებული “მესამე ფაზის” შესაძლო მნიშვნელოვან როლზე ნანოფოროვანი კომპოზიციური ფრიქციული მასალების ტრიბოლოგიურ თვისებებზე ჩვენს მიერ პირველად იქნა მითითებული ნაშრომში /68,69/.

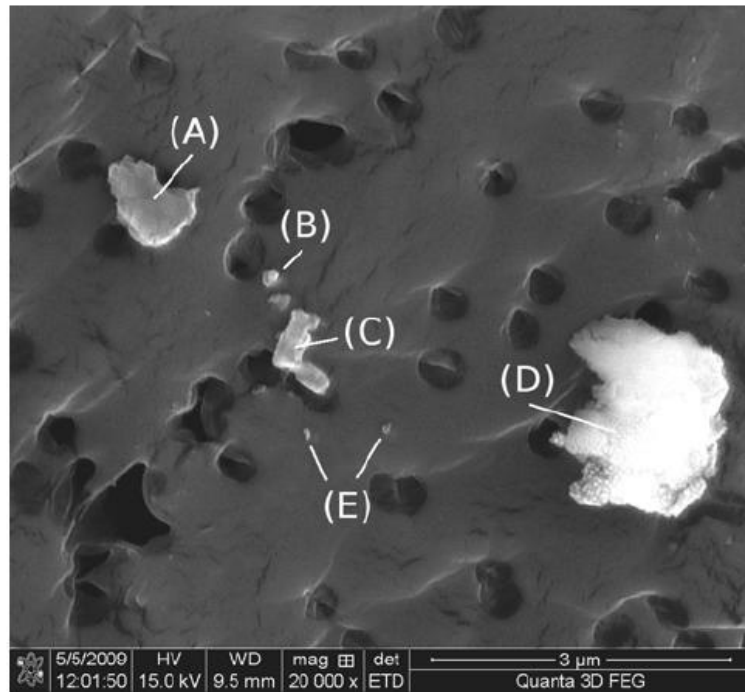
2.4.1. ცვეთის პროდუქტების კვლევა

სამუშაოში გამოკვლევულ იქნა ტრიბოწყვილში ნამუშევარი ზედაპირების მორფოლოგია და ელემენტარული შედგენილობა რემ და ოეს მეთოდებით.

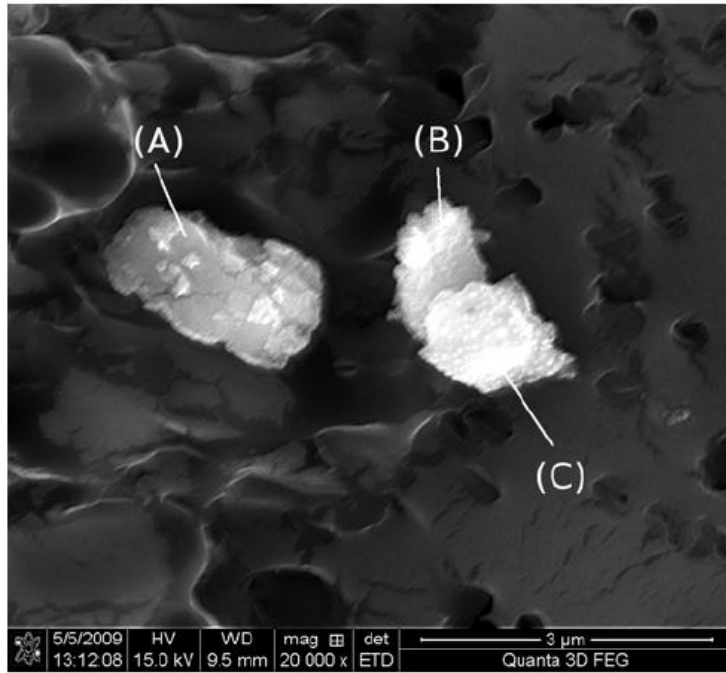
რადგან ცვეთის პროდუქტების შესწავლას ვაწარმოებდით ორი განსხვავებული ტრიბოლოგიური ტესტირების მეთოდით ხახუნის მანქანა MM-58-ზე მილისების ტორსული ხახუნისას და ღერო-დისკურ ხელსაწყოზე ფრიქციული ღეროების ხახუნის საშუალებით, შევეცადეთ მიღებული კვლევითი შედეგების ურთიერთშედარებით უფრო ნათლად წარმოგვეჩინა და აგვეხსნა ნიმუშების ცვეთის მექანიზმი და მათი ნამუშევარი ზედაპირების მორფოლოგია.

ნახაზები 16 – 20 გვიჩვენებს LM, NAO, I, II და III ნიმუშების გამოცდების დროს ფილტრებზე დაგროვილი ნაწილაკების ულტრა-

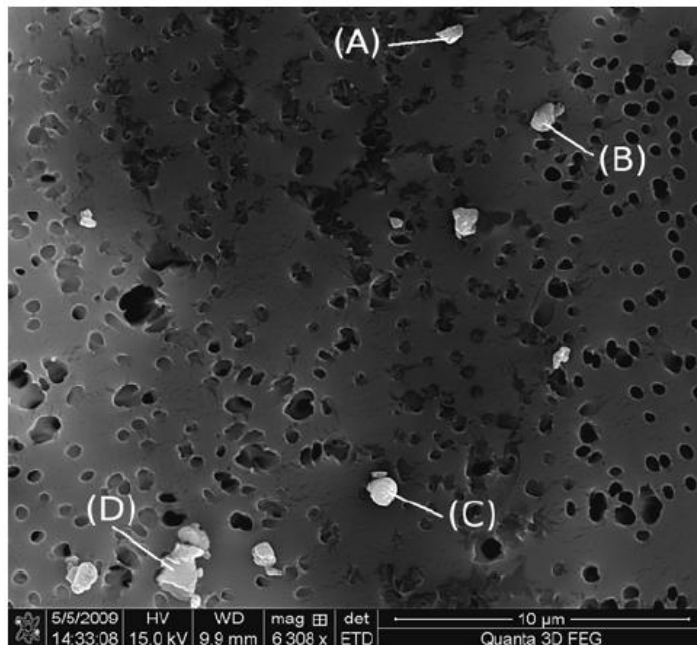
მცირე, მცირე და დიდი ფრაქციების შერჩევით სურათებს. ყველა შესწავლილი ფილტრზე დაგროვილი ნაწილაკი შეიცავს რკინას, ქრომს, კალას, ცინკს და სპილენძს. ნანოფოროვანი ნაწილაკების უმრავლესობა (მაგ. I, II, III) შეიცავს რკინას, სპილენძს, სილიციუმს, ალუმინს და ბარიუმს. NAO ნაწილაკები შეიცავს ისეთ ელემენტებს, როგორცაა რკინა, ქრომი, ტიტანი, ბარიუმი, ცირკონიუმი, ცინკი და სპილენძი. ზოგი წმინდა ნაწილაკი განიცდის კოაგულაციას და ქმნის უხეშ ნაწილაკებს (ნახ. 17A და 20A), ზოგი წარმოადგენს კომპლექსებს (ნახ. 16 A და D) და ზოგი თითქმის სფერული ფორმისაა (ნახ. 16 B და 19B).



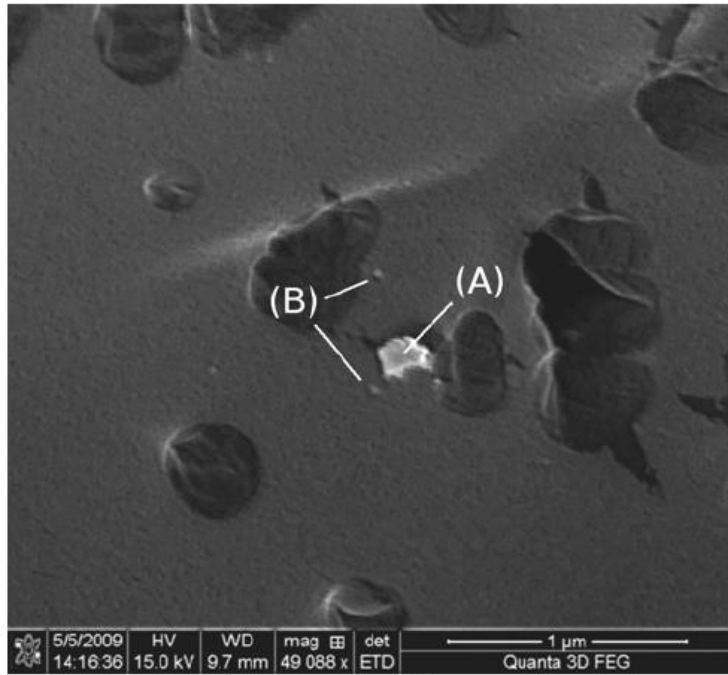
ნახ. 16 LM ტექსტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (20.000x გადიდება). A-C: წმინდა ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Cr და Cu. D: უხეში ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Fe, Mn, Cu, Sn, Al. E: ცვეთის ზეწმინდა ნაწილაკები.



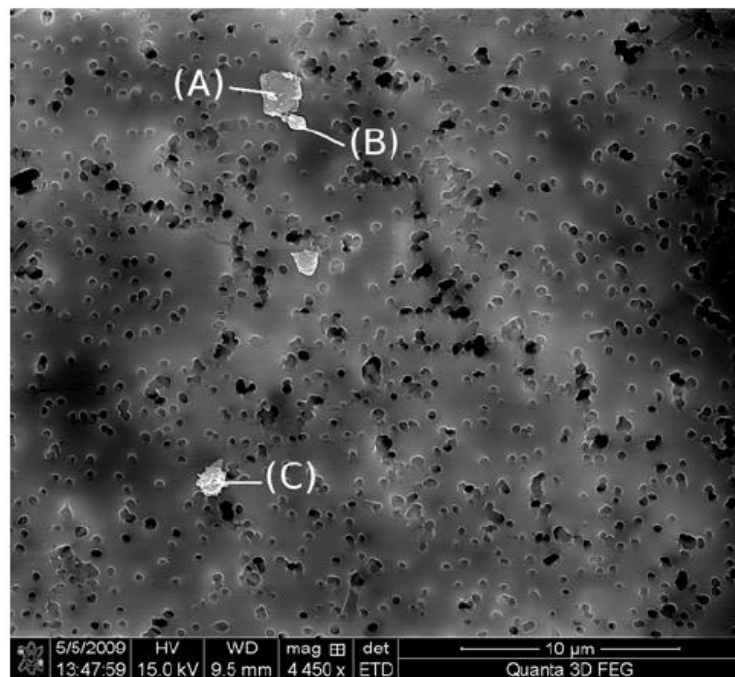
ნახ. 17. NAO ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (20.000x გადიდება). A-C: უხეში ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Fe, Ti, Cu, Ba, Zn.



ნახ. 18. I ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (6300x გადიდება). A-D: წმინდა და უხეში ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Fe, Cu, Ba, Si, Al.



ნახ. 19. II ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (49.000x გადიდება). A: წმინდა ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Ba და Cu. B: ზეწმინდა ნაწილაკები.



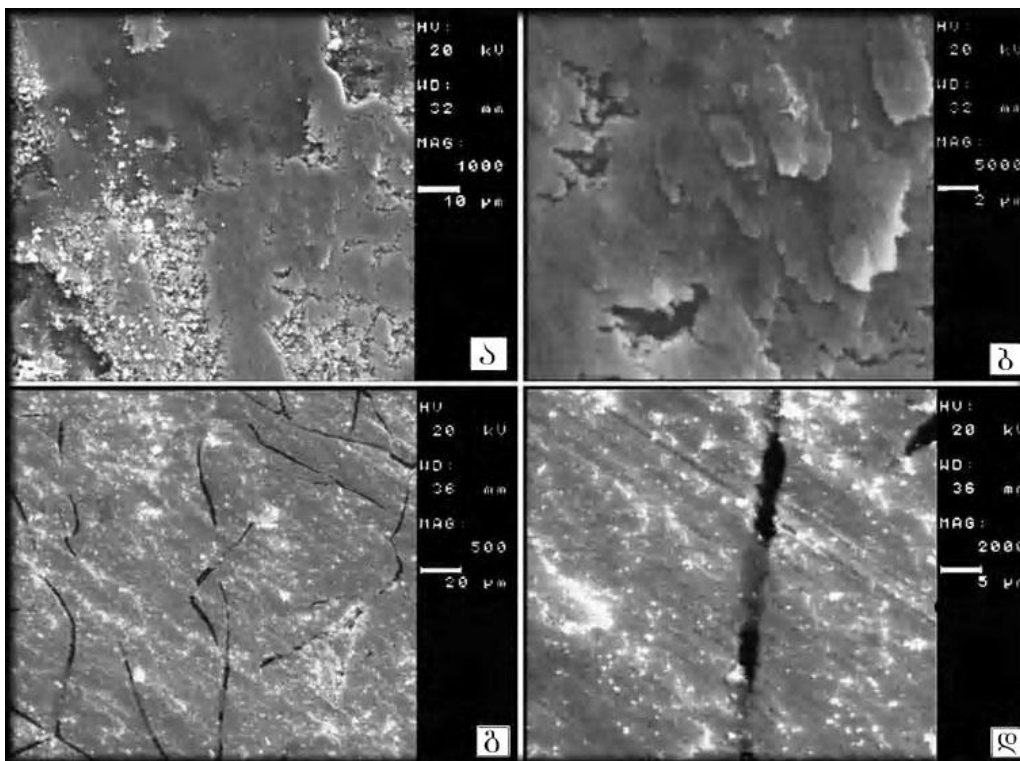
ნახ. 20. III ტესტის დროს შეგროვებული ჰაერში გაფანტული ცვეთის ნაწილაკების რემ სურათი (4450x გადიდება). A-C: წმინდა და უხეში ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავს ელემენტებს Fe, Cu, Ba, Si, Al.

კომპოზიტზე დამყარებული ორი ნანოფოროვანი მასალა ჰაერში წარმოქმნის გაცილებით ნაკლებ ცვეთის ნაწილაკებს, ვიდრე ჩვეულებრივი მასალები. ჰაერში აღმოჩნდა ცვეთის ულტრაწვრილი, წვრილი და მსხვილი ნაწილაკები, რომლებიც შეიცავენ ისეთ მეტალებს როგორცაა, რკინა, ტიტანი, მანგანუმი და სპილენძი. ყველა შესწავლილ მასალას ახასიათებს ბიმოდალური რაოდენობა განაწილების პიკებით მიახლოებით 350 და 550 ნმ დიამეტრის ნაწილაკებისათვის.

2.4.2. ფოროვანი მასალის ცვეთის მიკროსკოპიული მექანიზმის თავისებურებანი

ნახ. 21. ა, ბ გვიჩვენებს III კომპოზიციისგან დამზადებული სამუხრუჭე ხუნდის ნიმუშის ზედაპირის დამახასიათებელ მორფოლოგიას სამუხრუჭე დისკოზე ხახუნის შემდეგ 370°C ტემპერატურამდე. ცხადია, რომ ადგილი აქვს სამუხრუჭე ზესადების ზედაპირზე ხახუნის პროცესის განმავლობაში ხახუნის პროდუქტების ფორმირების პროცესს ფხვნილის სუპერდისკრეტული მარცვლების სახით და მათი ფორმირება ხორციელდება “ბლანტი” ხახუნის შედეგად. დამზერილი შერეული მიკრო-გეომეტრიული ზედაპირული პროფილი სამუხრუჭე დისკოს ზესადებზე (ნახ. 21. ბ, დ) წარმოადგენს მისი ნანოფხვნილებით “დაგრუნტვის” შედეგს, რომელიც ხახუნის პროდუქტს წარმოადგენს. ნანოფხვნილის ნახსენები ფენა – მესამე შუალედური ფაზის სახით, რომელიც ორ მოხახუნე ზედაპირს ჰყოფს – ხასიათდება დენადობის უნარით, რომელიც მსგავსია ძალიან დიდი სიბლანტის (ჰიპოთეთური) სითხისა (პასტისა) ზესადების ზედაპირზე. მართლაც ნახ. 21. დ-ზე მოყვანილი გადიდებული SEM გამოსახულება ჭიის მსგავსი გრაფიტული ჩანართების ზედაპირული გამოსავალთა პოლირების დემონსტრირებას ახდენს, რომელიც ხორციელდება ზემოდაღნიშნული ნანოფხვნილის წყალობით. გარდა ამისა, როგორც ეს აშკარად ჩანს ნახ. 21. დ-დან ნანოფხვნილების “ფირი” სხივდება რემ ელექტრონული სხივებით, რომელიც აჩქარდება 20 KeV ენერგიამდე და ამის საშუალებით შეიძლება დავინახოთ გრაფიტული ჩანართების

კონტურები, ამიტომ, დენადი “ფირის” სისქე ნაკლებია 1000 Å-ზე, მაშასადამე მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ძალებით დაკავშირებული ნანონაწილაკების ზომებს ამ ფირებში აქვთ უფრო ნაკლები მნიშვნელობა, ვიდრე ნამდვილი ნანო ზომების შემთხვევაში.



ნახ. 21. ზედაპირების რემ გამოსახულებები ტრიბო-წყვილის 370°C ტემპერატურამდე მუშაობის შემდეგ; ა, ბ – სამუხრუჭე ზესადები (III კომპოზიცია) და გ, დ – რუხი თუჯის სამუხრუჭე დისკო.

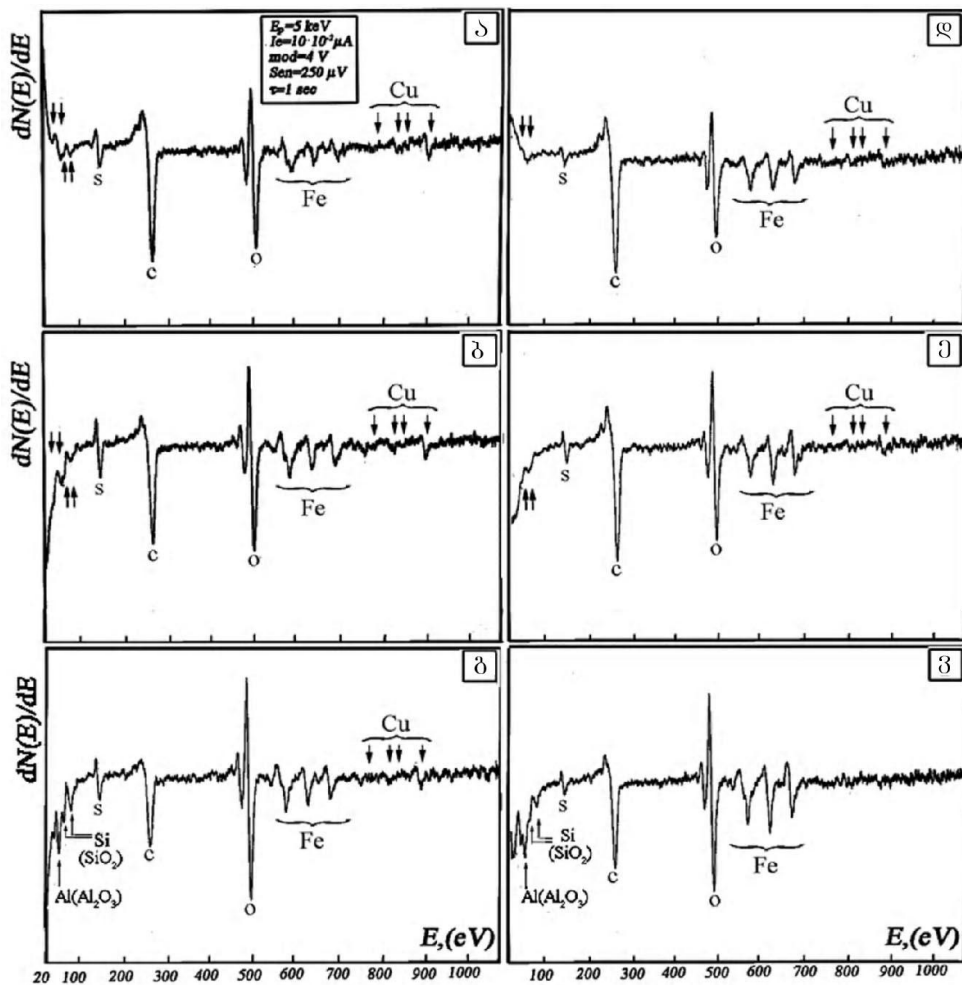
ცხადია, რომ დამზერილი ფენის ხახუნის პროდუქტის შემადგენლობა (მესამე შუალედური ფაზა) უნდა შედგებოდეს ნანონაწილაკების ნარევისგან, რომელთა კომპონენტები შედგება სამუხრუჭე დისკოსა და სამუხრუჭე ზესადებისგან. მოცემული ნარევი ფორმირდება დაქუცმაცებული და გასრესილი ნაწილაკების მექანიკური შერევის შედეგად და დიფუზიის საშუალებით წნევით გამოწვეული ხახუნის პროცესის დროს.

ნახ. 22. ა-ვ მოცემულია დიფერენციალური ელექტრონული ოქე სპექტრების სერია, რომლებიც დეტექტირებულია 20-1020 eV ენერგეტიკულ ინტერვალში ფრიქციული წყვილის ზედაპირისათვის,

რომლებიც განცალკევებულნი არიან ერთმანეთისაგან 370°C ტემპერატურამდე მუშაობის შემდეგ. ნახ. 22. ა და დ წარმოადგენენ ოქე სპექტრებს, რომლებიც მიღებულია ზესადების და სამუხრუჭე დისკოს ზედაპირიდან, შესაბამისად, არგონის იონებით ბომბარდირების დაწყებამდე და ისინი შეიცავენ გარედან აბსორბირებულ ზედაპირულ ფენას. აბსორბირებული ფენა შედგება ელემენტებისაგან, რომლებიც შეიცავენ ატმოსფერულ ჰაერს (ძირითადად, ნახშირბადს და ჟანგბადს), როგორც წესი, ის ყოველთვის არსებობს ნებისმიერი მყარი სხეულის ზედაპირზე, აღწევს რა ატმოსფეროდან ოქე სპექტრომეტრის კამერაში, სადაც ვაკუუმის დონე შეადგენს $1,33 \cdot 10^{-9}$ პასკალის რიგის სიდიდეს. ასეთი ფენის სისქე, როგორც წესი, არ აღემატება $\sim 30 \text{ \AA}$ -ს და ამიტომ არგონის იონებით ბომბარდირების წინ არსებობს შთანთქმული წყალბადის და ჟანგბადის ინტენსიური პიკები ორივე ზედაპირის სპექტრებზე $\text{KL}_{2,3}\text{L}_{2,3}$ ოქე გადასვლებისათვის და შედარებით სუსტი ოქე პიკები L_{3}VV ტრიპლეტის რკინის ატომების გადასვლებისათვის. გოგირდის და სპილენძის ძალიან სუსტი პიკები და აგრეთვე სილიციუმის და ალუმინის ოქე პიკები აგრეთვე გაჩნდნენ ასევე SiO_2 და Al_2O_3 შემცველი კომპოზიტებიდან (შესაბამისი სუსტი პიკები აღნიშნულია ისრებით ნახ.22 ა და დ-ზე).

ზესადების და სამუხრუჭე დისკოს ზედაპირებისათვის იდენტიფიცირებული ოქე სპექტრები გამოსაკვლევი ნიმუშებისგან აღსორბირებული ფენის მოშორების შემდეგ ($\sim 50 \text{ \AA}$ სისქით) ნაჩვენებია ნახ. 22 ბ და ე-ზე, შესაბამისად. ოქე პიკის ინტენსივობის შემცირებასთან ერთად, რაც დამახასიათებელია აღსორბირებული ნახშირისთვის, წარმოიქმნებიან გაძლიერებული პიკები ყველა ელემენტებისათვის, რომლებიც შედიან ტრიბო-ფენაში. ოქე-სპექტრების მონაცემების მიხედვით ისინი შეიცავენ SiO_2 და Al_2O_3 , BaSO_4 , Cu , Fe და გრაფიტიზირებული ნახშირბადის ნანონაწილაკებს, რომლებიც წარმოადგენენ ფრიქციული წყვილის ძირითადი კომპონენტების ზესადებისა და თუჯის სამუხრუჭე დისკოს ცვეთის და ხეხვის პროდუქტებს. მოცემულ სიღრმეში ტრიბოლოგიური პროდუქტის შემადგენლობა ორივე ზედაპირისთვის პრაქტიკულად ერთნაირია, და

ცხადია, რომ აბსორბირებული ფენის მოშორების შემდეგ მიღებული ოქუ სპექტრები (ნახ 22. ბ და ე) ფაქტიურად წარმოადგენენ ცალკეული ფენების ცვეთადი ნაწილების ზედაპირის შემადგენლობას. ზედაპირიდან მოშორებული ფენის სისქის გაზრდასთან ერთად ხდება კომპოზიციური ფრიქციული ფენის თითოეული ზედაპირის ცვლილებები, რომლებიც მოცემულია ნახ. 22 ე და ვ –ზე გამოსახულ ოქუ სპექტრებში. ~ 200 Å სიღრმეში გარე ზედაპირიდან ზესადების მიმართულებით მცირდება გრაფიტის ნანონაწილაკების რაოდენობა, ამავე დროს ზედაპირიდან დისკოს სიღრმის მიმართულებით მოძრაობისას ტრიბო-ფენის იმავე სიღრმეში სპილენძის ნანონაწილაკების რაოდენობა მცირდება (სპილენძისათვის ოქუ გადასვლების პიკები პრაქტიკულად ერწყმება ფონს, იხ. ნახ.22 ე).



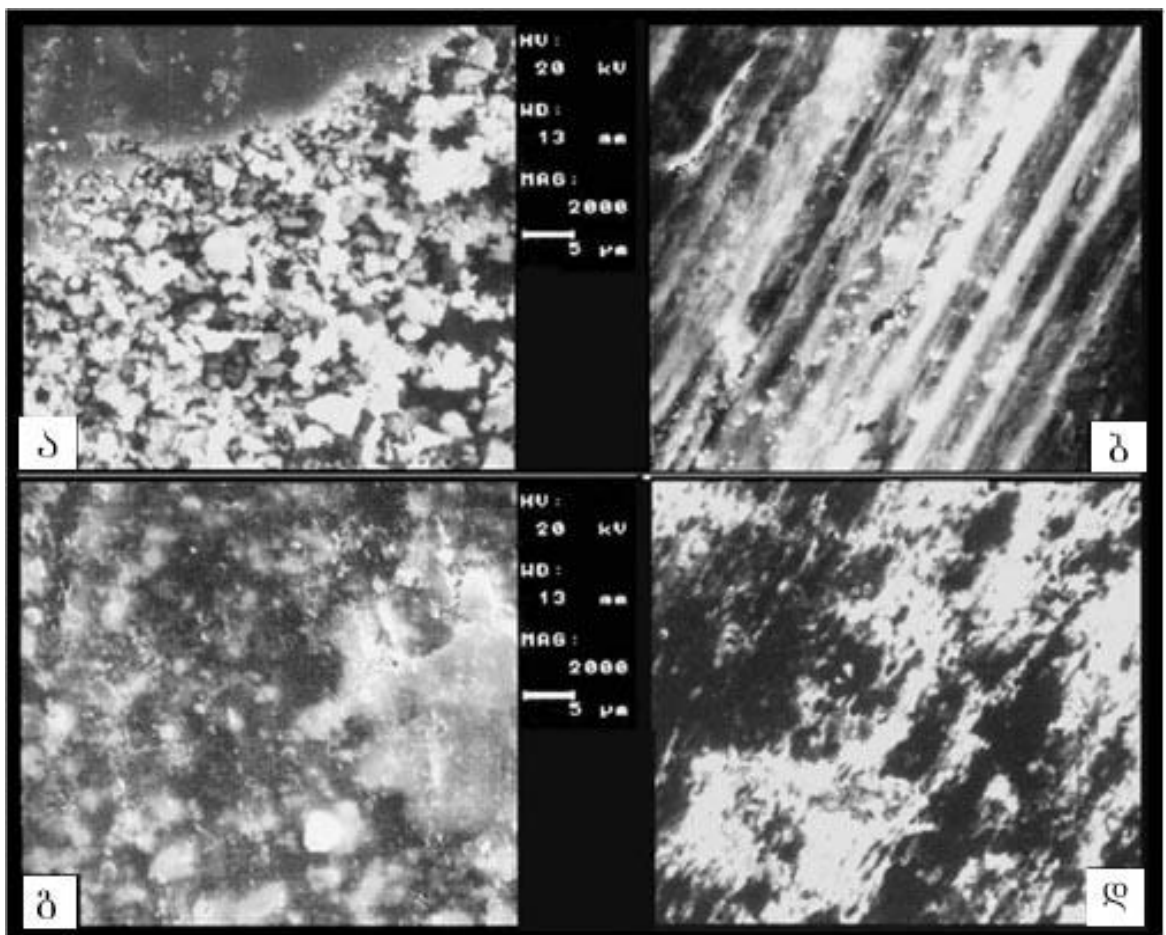
ნახ. 22. დიფერენციალური ელექტრონული ოქუ სპექტრები, მიღებული ფრიქციული წყვილის ზედაპირებისაგან, რომლებიც ნაჩვენებია იყო ნახ. 21-ზე:

ა, ბ, გ- ზესადების ზედაპირებიდან მიღებული სპექტრები და დ, ე, ვ - სამუხრუჭე დისკოს ზედაპირიდან მიღებული სპექტრები; ორივე შემთხვევაში სპექტრები დეტექტირებულია არგონის იონებით დაქუცმაცების შემდეგ შემდეგნაირი სისქის ფენებისთვის: ა, დ - 0 Å; ვ, ე - 50 Å; გ და ვ - 200 Å.

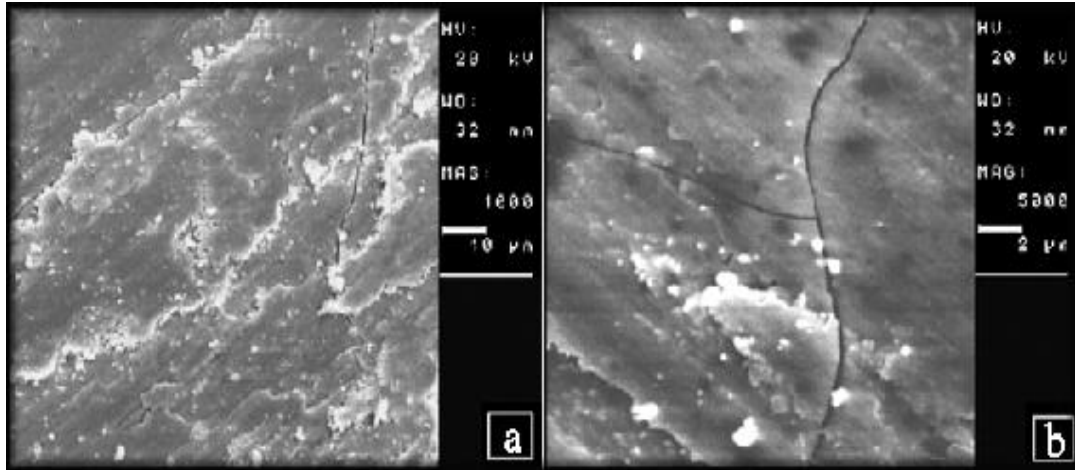
ცხადია, რომ ტრიბოლოგიური ნანოფხვნილის დისპერსიის გაზრდასთან ერთად მყარი SiO_2 , Al_2O_3 და BaSO_4 ნანონაწილაკების შემცველ შუალედურ ფენაში, რბილი მასალის ნაწილაკები (Cu, Fe) შუალედურ ფენას უფრო დენადად ხდიან და ზრდიან ცვეთას (ხახუნს) ნანონაწილაკებს შორის და საბოლოოდ იზრდება ფენის “სიბლანტე” და ფარდობითი სრიალისადმი წინაღობა (ხახუნის კოეფიციენტი შენარჩუნებულია საკმარისად მაღალ დონეზე), და ამავდროულად მცირდება ტრიბო-პროდუქტის გაშხეფვის უნარი.

უთუოდ სხვა არაფოროვანი კომპოზიციური მასალების (LM და NAO) ხახუნისას დისკოზე წარმოიქმნებიან ცვეთის პროდუქტები, მაგრამ ისინი არ წარმოადგენენ სუპერწვრილი ხეხვისა და გაცვეთის პროდუქტებს შეკრულდისპერსიული ნანოფხვნილის სახით (როგორც ამას ადგილი აქვს II და III ნანოფოროვანი კომპოზიტების შემთხვევაში), არამედ მეტ შემთხვევაში წარმოადგენს მიკრონული ზომის თავისუფალ დისპერსიულ სისტემას, როგორც კაწვრის და შედარებით უხეში ხეხვის პროდუქტი თავიანთი თავისუფალი აბრაზიული ნაწილაკებით ცვეთის პროდუქტებში. ზემოდთქმული თვალსაჩინოდ დემონსტრირებულია ნახ.23-ზე მოყვანილი NAO-დისკო და კომპოზიცია II-დისკო ტრიბოწყვილების ხახუნის ზედაპირების მორფოლოგიის რემ გამოსახულებით. ჩანს, რომ NAO-დისკო ტრიბოწყვილის შემთხვევაში ხახუნისას ცვეთის მთავარ მექანიზმს წარმოადგენს კაწვრა (ნახ.23ა) და ტრიბოპროდუქტი წარმოდგენილია მიკროფხვნილის სახით (ნახ.23ბ), რომელსაც არ შეუძლია “დაგრუნტოს” (“შეფითხნოს”) ნაკაწრები დისკოს ზედაპირზე. ნანოფოროვანი კომპოზიცია II-დისკო ტრიბოწყვილის ხახუნის შემთხვევაში კი, ცვეთა მიმდინარეობს სუბმიკრონული ხეხვისა და გაცვეთის მექანიზმით, როდესაც ორივე ტრიბოწყვილის ზედაპირზე ფორმირდება “დამგრუნტავი” ნანოფხვნილი და მის ფენებში ელექტრონების ძლიერი შთანთქმის გამო შესაბამის რემ

გამოსახულებებზე შავი კონტრასტი წარმოიქმნება (ნახ.23.გ.დ). ამასთანავე უნდა აღინიშნოს, რომ ეს “მესამე” ფაზა, რომელიც ფორმირდება შეწეპებული აფსკის სახით ნანოფლოვანი კომპოზიციის ღეროსა და დისკოს ტრიბოწყვილის ორივე ზედაპირზე, როგორც ნაკადური კომპონენტა, ხელს უწყობს სითბოს უფრო ეფექტურ არინებას ხახუნისას. თან, ხახუნის ერთნაირ პირობებში, როდესაც NAO-ს ღეროს ტემპერატურა აღწევს 215°C-ს, II კომპოზიციის ღერო ცხელდება მხოლოდ 125°C-მდე. (ნახეთ ნახ.15).



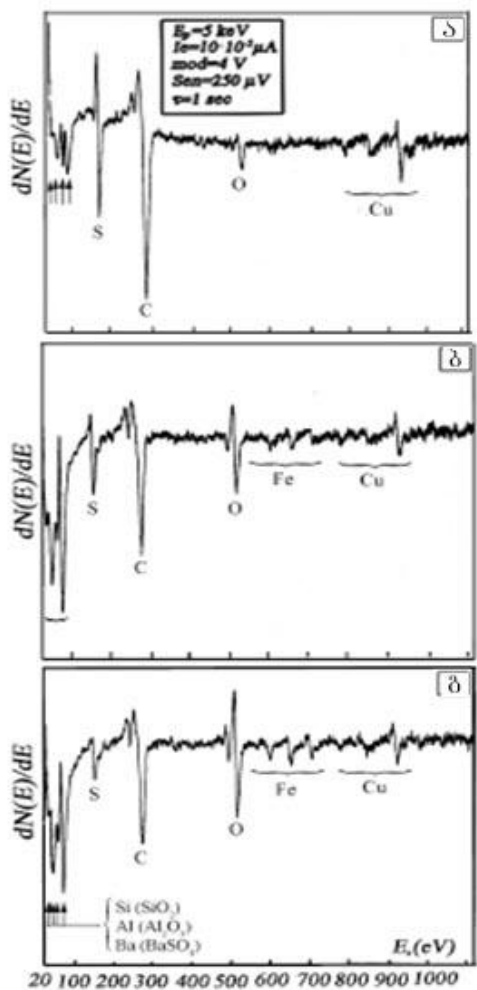
ნახ. 23. ზედაპირების რემ გამოსახულებები ტრიბო-წყვილის მუშაობის შემდეგ; ა) – NAO კომპოზიციისგან დამზადებული ღერო და ბ) – NAO ღეროსთან ერთად ნამუშევარი დისკო გ) ნანოფლოვანი II კომპოზიციური ღერო და დ) II კომპოზიციის ღეროსთან ერთად ნამუშევარი დისკო.



ნახ. 24. ფრიქციული ზედაპირის რემ გამოსახულებები სამუხრუჭე ნანოფოროვანი ზესადების (III კომპოზიცია) 600°C ტემპერატურამდე მუშაობის შემდეგ ტრიბო-წყვილში რუს თუჯთან ერთად.

ნახ.24-ზე წარმოდგენილია სამუხრუჭე ხუნდის ნანოფოროვანი ზესადების მასალის (კომპოზიცია III) 600°C-მდე ნამუშევარი ზედაპირების რემ გამოსახულებები სხვადასხვა გადიდებით, ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ ტრიბოწყვილის განცალკავების ზედაპირზე მესამე ფაზის შუაშრეში მაღალ ტემპერატურებზე წარმოიქმნება თხელი ქერქი მყარფაზური რეაქციის შედეგად შეცხოვრებულ ნანონაწილაკებისაგან, დიდი სიგრძის მიკრონაპრალებით. ამის გამო, ცხადია, რომ წარმოქმნილ ქერქს გააჩნია უფრო დიდი სიმკვრივე, ვიდრე მესამე ფაზას (შესაბამისად სიმტკიცეც), რითაც წარმოიქმნება მექანიკური სიმტკიცის უარყოფითი სხვაობა, რომელიც არღვევს გარე ხახუნის პირობებს და როგორც შედეგი მას მოყვება მოცემული ტრიბოწყვილის ტრიბოლოგიური პარამეტრების მკვეთრი გაუარესება ნაჩვენები ტემპერატურების გადამეტებისას. ზემოდ აღნიშნული მტკიცდება მონაცემებით, რომელიც მიღებულია ოჟე სპექტრების საშუალებით, რომლებიც ჩაწერილია სხვადასხვა სიღრმისათვის საკონტაქტო ზედაპირიდან ზესადები მასალის მოცულობის მიმართულების სიღრმეში. ასე, ნახ.25ა ოჟე-ელექტრონების დიფერენციალური სპექტრების სერია, რომელიც მიღებულია ნახ.24-ზე გამოსახული ზესადების ზედაპირიდან, თვალსაჩინოდ აჩვენებს ზესადებიდან გოგირდის ატომების (ან BaSO_4 -ის კლასტერების) და

სპილენძის ატომების სელექციურ დიფუზიას მესამე ფაზის შუაშრეში საკონტაქტო ზედაპირის მხარეს და დისკოდან რკინის ატომების (ან კლასტერების) და ნახშირბადის ზესადების მხარეს. ამასთანავე, ოქს-სპექტრებზე, რომლებიც ჩაწერილია ადსორბირებული ფენის მოცილების შემდეგ (ნახ.25. ბ და გ), გამოძლავნდა სილიციუმის (Si), ალუმინის (Al) და ბარიუმის (Ba) ოქს-პიკების დაბალენერგეტიკული (ენერგიის $20 \div 80$ eV დიაპაზონში) ინტენსივობის მკვეთრი გადიდება, რაც წარმოადგენს სიმკვრივის ამადლების (მომატების) და გაანალიზებულ მესამე ფაზის ზედაპირულ ფენაში მეტად სრულყოფილი კრისტალური მდგომარეობის ფორმირების შედეგს ტემპერატურის 600°C -მდე მომატებისას (შეადარე ასევე ოქს-სპექტრები ნახ.22.ა-ს).



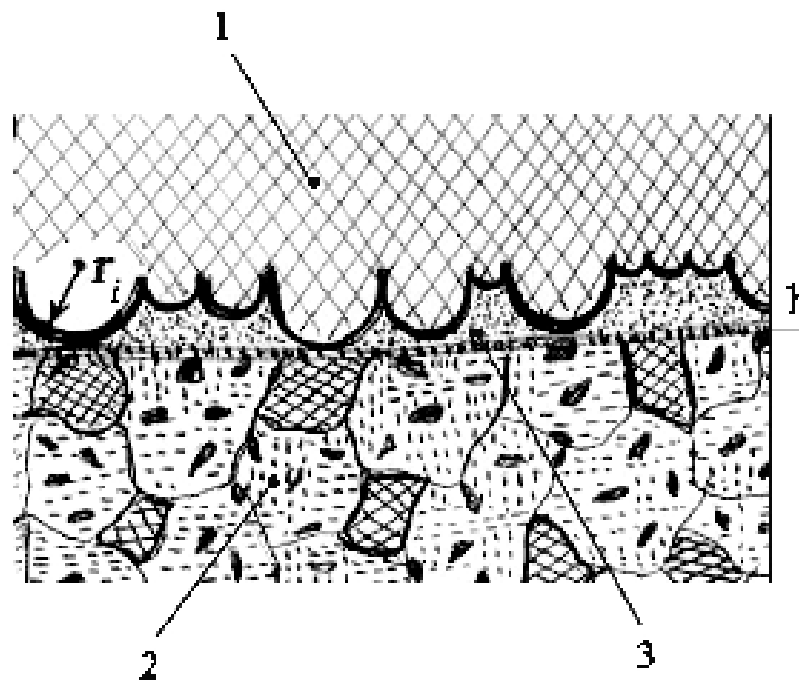
ნახ. 25. დიფერენციალური ელექტრონული ოქს-სპექტრები, მიღებული ზესადების ზედაპირებისაგან, რომლებიც გამოსახული იყო ნახ.24-ზე. ორივე

შემთხვევაში სპექტრები დეტექტირებულია არგონის იონებით დაქუცმაცების შემდეგ და შემდგენიანი სისტემის ფენებისათვის: ა – 0 Å; ბ – 50 Å; გ – 200 Å.

ურთიერთქმედების ყველაზე უფრო რეალურ სურათს, რომლებიც აღიქვებიან დატვირთვის შედეგად კონტაქტში მყოფი სამუხრუჭე დისკოსა და სამუხრუჭე ნანოფოროვანი ზესადების ფარდობითი ტანგენციალური მოძრაობისას, შესაძლებელია წარმოდგენილ იყოს ტრიბოწყვილის სამზაზიანი მოდელის დახმარებით. ნახ.26-ზე ნაჩვენებია ტრიბოწყვილის ხახუნის ზედაპირის განივკვეთის სქემატური ჩანახატი სამზაზიანი მოდელის მიხედვით, სადაც 1- სამუხრუჭე დისკოა, როგორც ხისტი მქისე (ხორკლიანი) სხეული, რომელიც მოდელირებულია r_1 რადიუსის მქონე ცალკეული სფერული სეგმენტების ნაკრების სახით, 2- ნანოფოროვანი კომპოზიციის სამუხრუჭე ზესადები და 3- შეკრულდისერსიული ნანონაწილაკებისაგან შემდგარი შუალედური შეწყობული “ფირის” ფენა (მესამე ფაზა, როგორც ტრიბოწყვილში არსებული ნაკადური კომპონენტა). ცვეთის პროდუქტებისაგან შემდგარი ნანოფხენილის შუაშრე ძალიან სწრაფად წარმოიქმნება აღნიშნული ტიპის მოხახუნე წყვილის კვანძის მუშაობის დაწყების შემდეგ და შემდგომში დამუხრუჭების პროცესის განმეორებადი ციკლებისას პერმანენტულად თან ახლავს (თანაარსებობს) პროცესს, რომლის განმავლობაში განუწყვეტლივ ხდება ძირითადად ზესადების კომპონენტების დაქუცმაცებისა და გაცვეთის შედეგად წარმოქმნილი კოლოიდური ნანონაწილაკებით თვით ზესადების ზედაპირისა და კონტრსხეულის სიმქისეების “დაგრუნტვა”. საკონტაქტო სხეულების ზედაპირზე (დისკო- I ფაზა და ზესადები- II ფაზა) იზრდება ნანოფხენილის (III ფაზა) ხახუნი ნანოფხენილის დისპერსიულობის ზრდასთან ერთად, რის შედეგად გარკვეულ ეტაპზე ნაწილაკებს შორის ხახუნის ძალების გადალახვისას ხდება “გაძრომა”.

უკვე III ფაზის შუაშრეების შორის თვითშეცხოვრილი გაცვეთილი ზედაპირების პროგრესირებადი მოდიფიკაციის თანხლებით. ამ შემთხვევაში ტრიბოურთიერთქმედების ელემენტარული მექანიზმი განისაზღვრება III ფაზის ნივთიერების მდგომარეობის დონით, რომელიც აღიწერება, როგორც ერთიანი გარემო ჰიდროდინამიკის,

თბოგამტარობის და დრეკადობის მახასიათებლებით, და ამასთანავე რომელიც ავლენს თხელაფსკურ მდგომარეობაში ძალიან ბლანტი სითხის ქიმიურ (მოლეკულურ) თვისებებს, რომელიც უზრუნველყოფს მოდიფიცირებული ზედაპირების ფიზიკურ “ნანოსიმქისეს” და III ფაზით “გაყოფილ” მყარი სხეულების ფლუქტუირებადი კონტაქტების ენერგოტევადობას. ამასთანავე, არ შეიძლება გამოირიცხოს III ფაზის “სიბლანტის” დამოკიდებულება წნევისაგან (საკონტაქტო ზედაპირების დატვირთვისაგან). ამ ფენის მაღალ სიბლანტეს მიუყვართ მოხახუნე სხეულების ფარდობითი ძვრის მნიშვნელოვან ძალებთან და ხახუნის კოეფიციენტის მაღალი მაჩვენებლების შენარჩუნებასთან. ამასთანავე ამავე ფენის დახმარებით ენერგია განიბნევა შიდა ხახუნის მექანიზმის ხარჯზე, როგორც შეკავშირებულ დისპერსიული ნანოფხენილოვანი სისტემის, რომელიც მთლიანად უზრუნველყოფს ტრიბოწყვილის მაქსიმალურ მადემფირებელ უნარს.



ნახ. 26. სამუხრუჭე დისკოს და სამუხრუჭე ზესადების წყვილის სამფაზიანი მოდელის განივი ჭრილის სქემატური ნახაზი:
 1 – სამუხრუჭე დისკო; 2 – სამუხრუჭე ზესადები;
 3 – ბმული დისპერსიული ნანონაწილაკების შუალედური ფენა (მესამე ფაზა).

შემოთავაზებული სამფაზიანი მოდელიდან გამომდინარე, რომელიც ითვალისწინებს ნაკადურ კომპონენტს მესამე ფაზის სახით, გარე ხახუნის ორფაზიანი მოდელის შიდა ხახუნში გადასვლის ცნობილი პირობა ხისტი მქისე სხეულის სრიალისას პლასტიკურად დეფორმირებად მასალაზე /1,4/, განსახილველ ჩვენს შემთხვევაში შესაძლოა ჩავიწეროთ ასე:

$$\frac{h^*}{r_i} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau^*}{\sigma_s}\right), \text{ სადაც}$$

h^* - მესამე ფაზის ეფექტური სისქეა, რომელიც პრაქტიკულად ემთხვევა ჩანერგვის სიღრმეს,

r_i - სფერული სეგმენტების საშუალო რადიუსი, რომელიც მოდელირებას უკეთებს ხისტი სხეულის (დისკოს) სიმქისეს, რომელიც ისაზღვრება როგორც $r_i = \frac{r_i^{\max} - r_i^{\min}}{2}$,

τ^* - მოლეკულური ძალების შეჭიდულობის კავშირების გაწყვეტისადმი წინააღმდეგობა მესამე ფაზაში ნანონაწილაკებს შორის σ_s - მესამე ფაზის დეფორმირებადი მასალის “გადინების” ზღვარი აგრეგაციული ფლუიზიდაციის მდგომარეობაში.

იმის გამო, რომ h^* სიდიდე, ჩვენს განხილულ შემთხვევაში, არ არის დამოკიდებული დატვირთვაზე და ის არამნიშვნელოვნად მცირდება r_i -ის შემცირებისას იმის გამო, რომ ცვეთის პროდუქტების ნანოფხვნილოვანი ფენა ნიველირებას უკეთებს ხახუნის ზედაპირის მიკროგეომეტრიულ პროფილს, გარე ხახუნის შიდა ხახუნში გადასვლის ჩაწერილი პირობა ყოველთვის იქნება დაცული აღნიშნული მესამე ფაზის არსებობისას. ამასთანავე, თვითონ მესამე ფაზის არსებობა ფლუიდიზირებული ნანოფხვნილიდან შეწეპებული “ფირის” შუაშრის სახით ბუნებრივია უზრუნველყოფს მექანიკური სიმტკიცის დადებითი გრადიენტის წესის დაცვის პირობას, როგორც თვით გარე ხახუნის განხორციელების პირობა. მდგომარეობა შენარჩუნდება მანამდე, სანამ ტრიბოწყვილში გაზრდილი ტემპერატურების მიღწევისას არ მოხდება ნანონაწილაკების შეცხობა მესამე ფაზის ხახუნის ზედაპირულ ფენაზე, რომელსაც მივყავართ მექანიკური სიმტკიცის

უარყოფით სხვაობასთან და შესაბამისად გარე ხახუნის პირობების დარღვევასთან.

ნანოფხენილიდან შუაშრის სახით მესამე ფაზის სწრაფი ფორმირება, უმეტეს შემთხვევაში, როგორც ტრიბოწყვილის ორივე ზედაპირის ცვეთის და “დაგრუნტვის” პროდუქტი, მნიშვნელოვნად ზრდის მოხახუნე სხეულების საკონტაქტო ფაქტიურ ზედაპირს და ამით ხელს უწყობს ლოკალური ძაბვების რელაქსაციას და მესამე ფაზის თვით შუაშრეს კი, გამომდინარე მისი აღნაგობისა და თვისებების თავისებურებებიდან, შეუძლია მიკრობზარების წარმოქმნის გარეშე აღიქვას მხები ძაბვები და ამასთანავე არ განიცადოს დაღლა, რასაც საბოლოოდ ტრიბოსისტემის მუშაობა მიჰყავს მინიმალური ცვეთის რეჟიმამდე თერმიული თვითგანტვირთვის რეოდინამიკასთან.

კონვენციური მასალების მონაწილეობით ტრიბოწყვილის მუშაობის შემთხვევაში, როცა ხახუნის მთავარ მექანიზმს წარმოადგენს კაწვრა და ხვნა, ადგილი აქვს მიხეხვის სხვა ტრაექტორიას, რომლის დროსაც რეალიზდება ტრიბოწყვილის ცვეთის უფრო მაღალი ინტენსივობა და სითბოწარმოქმნა.

სამუშაოს ამ თავში განხილული მასალები წარმოადგენს შედარებითი ანალიზის შედეგს ჰაერში ხახუნის (ცვეთადობის) ნაწილაკების საშუალო კონცენტრაციებისათვის ექსპერიმენტულად განსაზღვრული მნიშვნელობებისათვის, დისკოს მასის დანაკარგებისათვის, ხახუნის საშუალო კოეფიციენტისათვის და ღეროს ტემპერატურისათვის, რომლებიც გაზომილი იყო ღერო-დისკოს მოდელირების მეთოდით სამი ახალი თაობის ნანოფოროვანი კომპოზიციური მასალების საფუძველზე და ორი ჩვეულებრივი კონვენციური სამუხრუჭე ზესადები მასალებისათვის. ნაჩვენებია, რომ ახალი ნანოფოროვანი კომპოზიციისგან დამზადებული ზესადებ მასალებს გააჩნიათ შედარებით უფრო მაღალი ტრიბოლოგიური ეფექტურობა ვიდრე კონვენციური მასალებისაგან (ევროპიდან და აშშ-დან) დამზადებულ სამუხრუჭე ზესადებ მასალებს.

აღნიშნული კვლევის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი შედეგებია:

ორი ნანოფოროვანი კომპოზიციის (II და III) მასალები ქმნიან 3-დან 7-ჯერ ნაკლები რაოდენობის ცვეთის ნაწილაკებს ჰაერში, ვიდრე შესაბამისად LM და NAO მასალები.

II და III ნანოფოროვანი კომპოზიციების მასალებისგან დამზადებული ღეროები იწვევენ ხახუნისას დისკოს ცვეთას დაახლოებით 4-ჯერ და 6-ჯერ ნაკლებად, ვიდრე შესაბამისად LM და NAO კომპოზიციებისგან დამზადებული ღეროები.

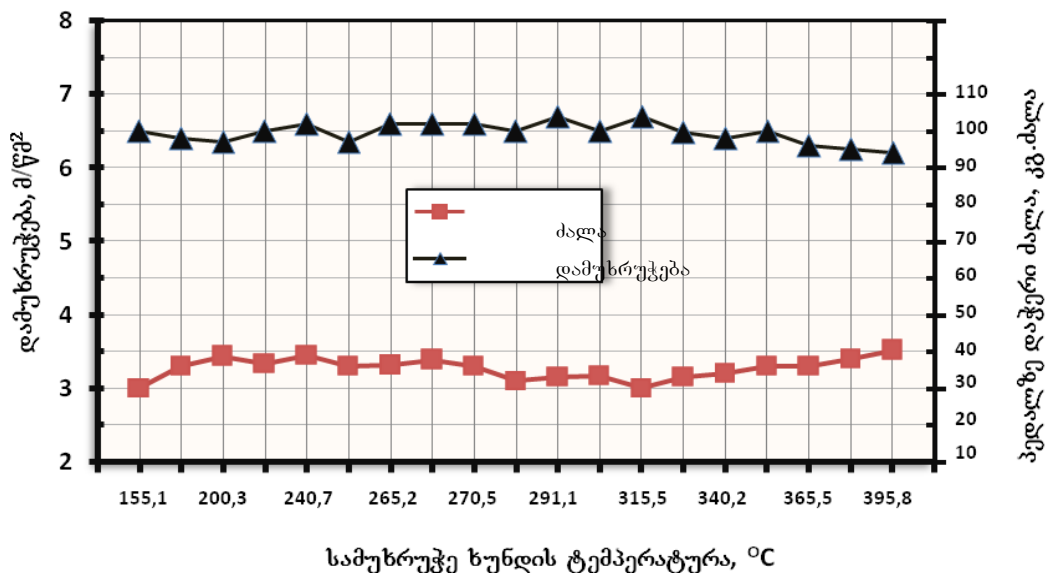
ხახუნის იგივე პირობებში ნანოფოროვანი კომპოზიციებისგან დამზადებული ღეროები ხურდებიან 25-40%-ით ნაკლებ ტემპერატურამდე, ვიდრე ჩვეულებრივი კომპოზიციებისგან დამზადებული ღეროები.

რემ და ოეს მეთოდებით გამოკვლეული იყო ტრიბო-წყვილის სასაზღვრო მოვლენები ფოროვანი კომპოზიციებისგან დამზადებულ სამუხრუჭე ზესადებსა და სამუხრუჭე დისკოს შორის, განსაზღვრული იყო ე.წ. “მესამე ფაზის” უპირატესი როლი, რომელიც ფორმირდება ნანოფხვნილური შეწებებული “ფირის” სახით, როგორც თხევადი (დენადი) კომპონენტა დისკოს და ზესადების მოხახუნე ზედაპირებს შორის.

ტრიბო-წყვილის სამფაზა მოდელის საფუძველზე მოცემულია ნანოფოროვანი კომპოზიციისგან დამზადებული სამუხრუჭე ზესადებების მოქმედების მექანიზმისა და მათი ტრიბოლოგიური ეფექტურობის ახსნა /73/. ასევე მიღებული შედეგები მოხსენებულ იქნება საერთაშორისო კონგრესზე გამოყენებით ფიზიკაში ქანტალიაში (თურქეთი) APMAS2011 /74/.

ავტომობილების რეალური ექსპლუატაციის პირობებში სამუხრუჭე ხუნდების ესთეტიურმა (თეთრი) საცდელი ნიმუშების გამოცდებმა აჩვენეს, რომ 25 ათასი კილომეტრის ქალაქის პირობებში გავლის შემდეგ მათი ზესადების ცვეთის ხარისხი შეესაბამებოდა ანალოგიურ პირობებში ნამუშევარი ITT ინდუსტრიული კომპანიის (იტალია) სერიული ხუნდის ფრიქციული ზესადები მასალის GALFER 3261 FF ცვეთის ხარისხს, მაშინ როდესაც სამუხრუჭე დისკოს ცვეთის სიდიდე იყო ორჯერ ნაკლები ITT-ის ხუნდთან ნამუშევარ დისკოს ცვეთის სიდიდესთან შედარებით.

მძიმე პირობებში, გადახურებისას, მასალის მუშაუნარიანობის შემოწმების მიზნით სამუხრუჭე ხუნდებს, დამზადებულს ზემოთაღნიშნული ფოროვანი კომპოზიტის შესადებისაგან, ჩაუტარდა ტესტირება 20-ჯერადი სერიებით დამუხრუჭებისას 130 კმ/სთ სიჩქარიდან საბოლოო გაჩერებამდე ~ 6,5 მ/წმ² შენელებით. გაქანება-დამუხრუჭების ყოველი ციკლის ხანგრძლივობა შეადგენდა დაახლოებით 50 წამს. ამ პირობებში იზომებოდა რეალური შენელება, მუხრუჭის სატერფულზე ძალვა და ხუნდების ტემპერატურა. ლაბორატორიულ პირობებში დამზადებული ხუნდების საცდელი ნიმუშების ასეთი გამოცდების შედეგები მოცემულია ნახ.27-ზე. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ 400°C-მდე დამუხრუჭების ეფექტურობის შემცირება არ აღინიშნება. ტესტირების შემდეგ სამუხრუჭე დისკოს და სამუხრუჭე შესადებების წყვილის ზედაპირების კვლევამ აჩვენა, რომ ფრიქციულ შესადებებს არ გააჩნდათ დაშლის (რღვევის) კვალი, ხოლო სამუხრუჭე დისკოს ცვეთა ატარებდა თანაბარ ხასიათს ხახუნის სარკისებურად გლუვი ზედაპირის შენარჩუნებით ანაგლეჯის გაჩენის გარეშე.



ნახ.27. ნანოფოროვანი შესადებებიანი სამუხრუჭე ხუნდების საცდელი ნიმუშის დამუხრუჭების ეფექტურობა გადახურებისას

სილანით მოდიფიცირებული ესთეტიურად თეთრი ფერის სამუხრუჭე ხუნდის შესადების ფრიქციული მასალის კომპოზიცია დაპატენტებულ იქნა საქართველოში /75/.

დასკვნები

1. შემუშავებულია პოლიმერული ფრიქციული მასალები ფოროვანი შემესების – დიატომიტის გამოყენებით რეზოლური ფენოლფორმალდეჰიდური ფისის ბაზაზე, რომელიც თერმომედეგობის გაზრდის მიზნით მოდიფიცირებული იყო სილანით, ხოლო მასალების კომპოზიციები რკინის ფოსფატით, ტექნიკური ნახშირბადით, ბაზალტის ბოჭკოთი. შემუშავებულ მასალებში საწყისი კომპონენტების რაოდენობა არ აღემატებოდა ექვსს.

2. გამოკვლევულ იქნა შემუშავებული ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური და ტრიბოლოგიური თვისებები ორი სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით: ა) ხახუნის მანქანა ИМ-58-ზე მასალათა ფრიქციული სითბომედეგობის განსაზღვრის მეთოდით, სადაც მოხახუნე წყვილების ხახუნის ზედაპირების გადაფარვის კოეფიციენტი K 1-ის ტოლია და ბ) მოდიფიცირებულ დერო-დისკურ ხელსაწყოზე შემუშავებული მასალების ტრიბო-წყვილის ხახუნისას ცვეთის ნაწილაკების ზომის, ფორმის და ელემენტური შედგენილობის ფიქსირებით, სადაც გადაფარვის კოეფიციენტი K მიისწრაფვის 0-ისაკენ.

3. შესწავლილ იქნა სილიკონური სითხით, რკინის ფოსფატით, ტექნიკური ნახშირბადით და ქართული წარმოების უწყვეტი ბაზალტის ბოჭკოს გავლენა შემუშავებული ფოროვანი ფრიქციული მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. გამოვლინდა, რომ ყველა მოდიფიკატორი აუმჯობესებს მასალათა სიმტკიცეს კუმშვაზე, განსაკუთრებით ეს მიიღწევა ერთდროულად სილანით და ტექნიკური ნახშირბადით მოდიფიცირებულ მასალაზე, რომლის სიმტკიცე გაიზარდა 40%-ით. აღინიშნება ყველა მოდიფიცირებული ფრიქციული მასალების კუთრი წონების ზრდა, ხოლო მათი წყალშთანთქმა აკმაყოფილებს სტანდარტულ მოთხოვნებს და არ აღემატება 0,35%-ს.

4. შემუშავებული ფრიქციული მასალების ტრიბოლოგიური თვისებების შესწავლამ 2 სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით აჩვენა:

1) ხახუნის მანქანა ИМ-58-ზე:

ა) ხახუნის კოეფიციენტის სტაბილური მნიშვნელობები (0,3-0,45) როგორც მშრალი, ისე სველი ხახუნის პირობებში.

ბ) ფრიქციული სამუშაო პარამეტრების (ხახუნის კოეფიციენტის და ცვეთამდეგობის) სტაბილურობა მაღალ ტემპერატურებზე 500-600 °C ჩათვლით.

გ) თუჯის კონტრსხეულის ცვეთამდეგობის გაზრდა 3-4-ჯერ.

დ) წრიპინის გარეშე უხმაურო მუშაობა.

ე) ფრიქციული მასალის კომპოზიციაში მცირე რაოდენობის (5-6) ინგრედიენტის შემცველობის საკმარისობა და პროდუქტის სიიაფე.

2) მოდიფიცირებულ დერო-დისკურ ხელსაწყოზე:

ა) შემუშავებული ფრიქციული მასალების, განსაკუთრებით ტექნიკური ნახშირბადით (II) და ტექნიკური ნახშირბადითა და ბაზალტის ბოჭკოთი (III) მოდიფიცირებული ორი ნანოფოროვანი კომპოზიტის უპირატესობა, რომლებიც ქმნიან გარემოში 3-დან 7-ჯერ ნაკლები რაოდენობის ცვეთის ნაწილაკებს, ვიდრე შესაბამისად ევროპული მცირე-მეტალური (LM) სამუხრუჭე მასალა და უაზბესტო ორგანული სამუხრუჭე (NAO) მასალა აშშ-დან.

ბ) II და III ნანოფოროვანი კომპოზიციური მასალებისგან დამზადებული დეროების ხახუნისას კონტრსხეულის –თუჯის დისკოს ცვეთის შემცირება დაახლოებით 4-6-ჯერ, ვიდრე შესაბამისად LM და NAO მასალებისგან დამზადებული დეროები.

5. კომპლექსურად შესწავლილ იქნა რასტრული ელექტრონული და ოქე-ელექტრონული სპექტროსკოპიის მეთოდების საშუალებით შემუშავებული ფრიქციული მასალების თუჯის (კონტრსხეულის) დისკოსთან ხახუნის წყვილში წარმოქმნილი ზედაპირების სტრუქტურული გარდაქმნებისა და ელემენტთა განაწილება, ცვეთის პროდუქტები და ცვეთის მექანიზმი, როგორც შემუშავებული, ასევე LM და NAO მასალებისათვის.

6. რემ და ოქს მეთოდებით ნანოფოროვანი კომპოზიციებისგან დამზადებული სამუხრუჭე ზესადებსა და სამუხრუჭე დისკოს შორის ტრიბოწყვილის სასაზღვრო მოვლენების გამოკვლევამ გამოავლინა ე.წ. “მესამე ფაზის” განმსაზღვრელი როლი, რომელიც ფორმირდება ნანოფხვნილური შეწებებული “ფირის” სახით, როგორც “თხევადი”

(დენადი) კომპონენტა ფრიქციული მასალისა და დისკოს მოხახუნე ზედაპირებს შორის.

7. ნაშრომში მოცემულია ტრიბო-წყვილის სამზაფიანი მოდელის საფუძველზე ნანოფოროვანი კომპოზიციისაგან დამზადებული სამუხრუჭე ზასადებების მოქმედების, ცვეთის მექანიზმისა და მათი ტრიბოლოგიური ეფექტურობის ახსნა.

ბიბლიოგრაფია

1. Мур Д., Основы и применение трибоники, Москва, «Мир», 1978, 488с.
2. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения, Москва, «Металлургия», 1976, 170с.
3. Гаркунов Д.Н., Триботехника, Москва, «Машиностроение», 1989, 328с.
4. Крагельский И.В., Трение и износ, Москва, «Машиностроение», 1980, 495с.
5. Lancaster J.K., ASLE Trans, 1965, V.8 №2, p.214-223.
6. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В., Трение и износ полимеров, Л, «Химия», 1972, 240с.
7. Suh N.P. An overveiw of the delamination theory of wear – Wear, 1977, v.44, №1, p.1-16.
8. Сысоев П.В., Богданович П.Н., Лизарев А.Д., Деформация и износ полимеров при трении, Мн., «Наука и техника», 1985, 239с.
9. Pooley C. M., Tabor D., Proc.Roy Soc.,1972.A329, №1578, P.251-274.
10. Погосян А.К., Оганесян К.В. Явление фрикционного переноса: Основные закономерности и методы исследования. Трение и износ, 1986, т.VII, № 6, с.998-1007.
11. Kar M.K., Bahadur S., Micromechanism of wear at polymer-metall sliding interface, Wear, 1980, v.63, №1, p.105-112.
12. Rhee S.H., Ludema K.C., Wear, 1978, v.46, №2, p.231-246.
13. Погосян А.К., Меликсетян Н.Г., Ламбарян Н.А. Исследование работоспособности фрикционных материалов тормозных устройств, Трение и износ, 1983, т.4, №6, с.1090-1098.
14. მეტალურგიის ტექნოლოგიური ლექსიკონი, 1999, თბილისი, მეცნიერება, 750გვ.
15. Cha S., Carter Ph., Bradow R.L., Simulation of automobile breke wear dynamics and estimation of emissions, SAE Techn. Pap. Ser., 1983, №831038, p.1-21.
16. Olofsson, U., Olander, L., Jansson, A.: Towards a model for the number of airborne particles generated from a sliding contact. 2009, J. Wear **267**, pp.2252–2256
17. Wahlström, J., Söderberg, A., Olander, L., Jansson, A., Olofsson, U.: A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. 2009, J. Wear. **267**, pp.2260-2265.
18. Чичинадзе А.В., Левин А.Л., Бородулин М.М., Зиновьев Е.В., Полимеры в узлах трения машин и приборов, Справочник, Москва, «Машиностроение», 1988, 328с.
19. Заменители асбеста в автомобильных узлах (обзор), Автомобильная промышленность США, №7, 1985, с 25-29.
20. Aramidfasern als Asbestersatz in Reibelägen, Kunststoffberater, 1985, 30, №11, p.31-34.
21. Янецки Я., Шумняк Е., Провоторов А., Разработка тормозных фрикционных материалов, не содержащих асбеста, Труды Международной научной конференции «Трение, износ и смазочные материалы», Ташкент, 22-26 мая 1985, с.161-167.
22. Погосян А.К. Основы трибологии. Ереван-Афины: Луйс, 1995, с. 420.
23. Погосян А.К., Сысоев П.В., Меликсетян Н.Г., Полимерная фрикционная пресс – композиция. Автор. Свидет. №1142488, 28.02 1985, заявл. №357805.23-05, 15.04.1983.

24. Roberts Gordon J., Heasley James H., Unstable devitrifiable glasses and friction materials containing them. USA, Pat. № 4182437, 08.01.1980, Appl. №903746, 08.05.1978.
25. Мошков А.Д. Пористые антифрикционные материалы, Москва, «Машиностроение», 1968, 207с.
26. Федорченко И.М., Пугина Л.И., Композиционные спеченные антифрикционные материалы, Киев, «Наукова думка» 1980, 404с.
27. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении, Москва, «Машиностроение», 1981, 247с.
28. Удовицкий В.И., Пористые композиционные покрытия, М, «Машиностроение», 1991, 144с.
29. Удовицкий В.И., Крагельский И.В., Бройде З.С., Об особенностях изнашивания пористых материалов. Трение, износ и смазочные материалы, Труды международной научной конференции, том 1, Москва, 1985, с. 276-281, (Ташкент, 22-26 мая, 1985).
30. Ретинакс – теплостойкий фрикционный материал, Москва, Госхимиздат, 1961.
31. Pilache Michel. Matériau de friction poreux notamment pour freins ou embrayages et procédé délaboration d'un tel matériau. France Pat. №2581149, 31.10.1986, Appl. № : 8506230, 24.04.1985.
32. Тоёта дзидося к.к. Фрикционный материал. Япония, Заявка №60-151435, Оpubл. 09.08.1985. заявл. : №59-8336, 19.01.1984.
33. Parker Euan. Friction materials and their manufacture. Great Britain. Pat. №2165851, 23.04.1986, Appl. № : 8525506, 16.10.1985.
34. Левит М.З., Касаткин Г.П., Пивень Е.Г. Фрикционное изделие. Российская Федерация. Пат. №2229634, 27.05.2004. Заявл. №: 20022122178/11, 15.08.2002.
35. Лапшин В.П., Изюмова В.И., Левит М.З., Касаткин Г.П., Пивень Е.Г. Фрикционное изделие. Российская Федерация. Пат. № 2136983, 10.09.1999, Заявл. № : 98105118/28, 16.03.1998.
36. Малышева Т.Б., Левит М.З., Касаткин Г.П., Воронина Н.Н., Крайнова Н.А., Изюмова В.И., Калачев И.Д., Пивень Е.Г. Фрикционное изделие. Российская Федерация. Пат. № 2150618, 10.06.2000. Заявл. № : 99118788/28, 26.08.1999.
37. Левит М.З., Касаткин Г.П., Пивень Е.Г. Фрикционное изделие. Российская Федерация. Пат. № 2207458, 27.06.2003, Заявл. № : 2001123604-28, 23.08.2001.
38. Миловский А.В., Минералогия и петрография, Москва, «Недра», 1985, с.432.
39. Левит М.З., Крайнова Н.А., Изюмова В.И., Голкин В.Б., Хведченя О.А., Соколов В.А. Новые безасбестовые фрикционные материалы и изделия. Трение и износ, 2005, Т.26. №2, с.201-207.
40. Friction materials: the second generation asbestos substitutes, Design Engineering, February, 1988, pp 44-50.
41. Старченко В.Н., Гурин В.А. Триботехнические характеристики новых фрикционных материалов, Вісник СНУ ім В. Даля, 2005, №8 (90). ч.1, с.121-126.

42. Марди Нейл, Паркер Чарльз А., Пигфорд Джеймс А., Нарасимхан Фрэнк (US), Российская Федерация. Пат. № 21193542, 11.27.2002. Заявл. №99116312/03, 12.10.1997
43. Baker Ralph, Smith Eric T., Dickinson Vaughan Thomas, Mekenzie Noel Christofer, Hargreaves Brian. Ferodo Ltd. Wet laid friction facing material. Great Britain. Pat. №2163784, 05.03.1986, Appl. №: 8421915, 30.08.1984.
44. ქუთელია ე., გრიშაშვილი ი., მუხრუჭის ხუნდის ზესადების კომპოზიციური მასალა და მისი მიღების ხერხი. საქართველო, პატენტი 3034 B, 25.07.2003, განაცხადი №AP 1999 003735, 12.30.1999.
45. ქუთელია ე., გვენცაძე დ., წურწუშია ო., დათიაშვილი რ., გვენცაძე ლ. ნანოფოროვანი კომპოზიციის ბაზაზე დამზადებული სამუხრუჭე ხუნდის ზესადების ხახუნისა და ცვეთის თავისებურებათა გამოკვლევა. „ნოვაცია“, N2, 2008, გვ. 46-55.
46. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии, Москва, Машиностроение, 1986, 360 с.
47. ბოლქვაძე ლ.ი. თბოსაიზოლაციო მასალების ტექნოლოგია. თბილისი, განათლება, 1985, გვ.295.
48. Le Lannou Michel. Garniture de friction, notamment pour fraeins, embraayages et autres applications. France. Valeo. Pat. № 2489455, 05.03.1982, Appl. № : 8019087, 04.09.1980 .
49. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции, Москва, Химия, 1984, 240 с.
50. Наполнители для полимерных композиционных материалов, справоч., под ред. Каца Г.С. и Милевски Г.С., Москва, Химия. 198, 736 с.
51. Болотовский Д.Я., Полтавский В.Ф., Быстров Ю.В., Цепляева О.И., Смагина Т.В. Полимерная композиция фрикционного назначения. Российская Федерация. Пат. № 2213105,15/ 09/2003, Заявл. № : 2001126641-04, 01.10.2001.
52. გაგუნაშვილი დ., ხართიშვილი ლ., გაბუნია ლ. საქართველოს ბაზალტები მინაბოჭკოვანი მასალების ძირითადი ნედლეულია, საშენი მასალები და ნაკეთობანი, №1, 1993, გვ.2-5.
53. ვერულაშვილი რ., გაგუნაშვილი დ., გაბუნია ლ., ქამუშაძე ი., გაბუნია ნ. საქართველოს ბაზალტების კვლევა ბოჭკოვანი მასალების მსაღებად. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, №4 (458), თბილისი, 2005, გვ.52-54
54. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе. Москва, Химия, 1983, 280 с.
55. Гвоздев Д.В., Блюменфельд А.Б., Коварская Б.М. и др., Пути повышения термостойкости фенолоформальдегидных полимеров и материалов на их основе. Пласт.массы, №1, 1980, ст.28-29.
56. Плюдеман Э., Поверхности раздела в полимерных композитах, Москва, Мир, 1978, 295 с.
57. Певзнер Л.В., Модифицированные фенопласты, Пласт.массы, №5, 1968, ст.21-24.
58. Toughening moldable phenolic composites, Adv. Mater and Process, 138, N4, 1990, p.60-64.
59. Барашков Н.Н., Полимерные композиты: получение, свойства, применение, Москва, Наука, 1980, 128 с.

60. გვენცაძე ლ., მუკბანიანი ო., ვარდოსანიძე ც., მარქარაშვილი ე., გვენცაძე დ. ფენოლური კომპოზიციური მასალის მოდიფიცირება თიენილშემცველი სილიციუმორგანული ოლიგომერებით, კერამიკა, №1 (15), 2006, გვ.24-27.
61. Гвенцадзе Д.И., Маркарашвили Э.Г., Гвенцадзе Л.Д., Миндиашвили Г.С., Мукбаниани О.В., Исследование физико-механических и трибологических свойств композитов, полученных на базе фенолформальдегидной смолы и апретированного клиноптилолита, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის მაცნე, ქიმიის სერია, ტ.35, №2, 2009, გვ.257-260.
62. Mukbaniani O.V., Markarashvili E.G., Iskakova M.I., Aneli J.N., Gventsadze L.D., “Modification Reactions of Novolac Resins by Epoxy-containing Polyphenylsilsesquioxanes”. Oxidation Communications, 2008, 31, №3, pp. 300-310.
63. Соболевский М.В. Скороходов И.И., Гриневич К.П. и др., Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение. Москва, Химия, 1985, 264 с.
64. Новикова О.А., Соколинская М.А., Шорохов В.М., Полимерная пресс – композиция. Автор. Свидет. № 1659431, 15.05.1991, заявл. № 4439114/05, 10.06.1988.
65. Sprügel Friedrich, Panster Peter. Zusatz für Reibbelagmischungen. Deutschland, Pat. № 3428347, 06.02.1986, Appl. № P342834, 01.08.1984.
66. Материалы будущего, Пер. с немецкого., под ред. А. Неймана, “Химия”, 1985 г., с.240.
67. Крыжановский В.К., Износостойкие реактопласты, Ленинград, Химия, 1984, 120 с.
68. Kutelia E., Gventsadze D., Tsurtsunia O., Datiashvili R., Gventsadze L., Friction and wear peculiarities of the nanoporous composition base brake linings, International conference *NORDTRIB 2008*, Tampere, Finland.
69. Kutelia E., Gventsadze D., Tsurtsunia O., Datiashvili R., Gventsadze L. Friction and wear peculiarities of the brake lining based on nanoporous composition, Published paper: GEN, #2, 2008 p.69-76.
70. გვენცაძე ლ., ქუთელია ე., გვენცაძე დ., წურწუმია ო.. ნანოფოროვანი მაღალტემპერატურული ფრიქციული კომპოზიციური მასალების ტრიბოლოგიური პარამეტრების ფორმირებაში პერკოლაციური სითბოგამტარი არხების როლის შესახებ. ივ.ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის 90-ე წლისადმი მიძღვნილი სამეცნიერო კონფერენცია ფიზიკაში, 2008, 25-26 სექტემბერი. გვ.30.
71. Strohm F. VDI Ber. 1987, N69, p.307-334.
72. Wahlström J., Gventsadze D., Olander L., Kutelia E., Gventsadze L., Tsurtsunia O., Olofsson U. A pin-on-disc study of nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles. 14th Nordic Symposium on Tribology, International conference *NORDTRIB 2010*. Lulea, Sweden, 7-10 June, 2010.
73. Kutelia E., Gventsadze D., Eristavi B., Maisuradze N., Tsurtsunia O., Gventsadze L., Olofflosn U., Wahlstoem J., Olander L., “The tribological efficiency and the mechanism of action of nano-porous composition base brake lining materials”, Georgian Engineering News №1, 2011
74. Kutelia E., Gventsadze D., Eristavi B., Maisuradze N., Tsurtsunia O., Gventsadze L., Olofsson U., Wahlström J., Olander L., “The tribological

efficiency and the mechanism of action of nano-porous composition base brake lining materials”, Advances in applied physics & materials science congress APMAS2011, Antalya, Turkey, May 13-15, 2011

75. ქუთელია ე., გვენცაძე დ., წურწუშია ო., დათიაშვილი რ., გვენცაძე ლ., ძნელაძე დ. ფრიქციული ზესადების კომპოზიციური მასალა. საქართველო, პატენტი P 4986. 05.10.2010. განაცხადი № AP 2008 010846, 07.28 2008.