

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

PRETSİZİON HİSSƏLƏRİN LAZER TEXNOLOJİ METODU İLƏ ETİBARLILIĞININ YÜKSƏLDİLMƏSİ

İxtisas: 3310.01 - Sənaye texnologiyası

Elmi sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Fərid Sabir oğlu Hüseynli**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI – 2025

Dissertasiya işi Azərbaycan Texniki Universitetinin “Xüsusi texnologiyalar və avadanlıqlar” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: texnika üzrə elmlər doktoru, professor
Ələkbər Güləhməd oğlu Hüseynov

Rəsmi opponetlər: texnika üzrə elmlər doktoru, dosent
Əhməd Qulu oğlu Məlikov

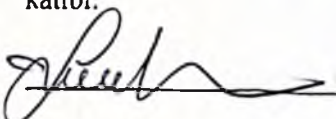
texnika üzrə elmlər doktoru, professor
Vaqif Həjan oğlu Həsənov

texnika üzrə fəlsəfə doktoru,
Ceyhun Gülbala oğlu Aslanov

Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.09 Dissertasiya Şurası.

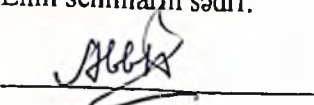
Dissertasiya şurasının sədri: texnika elmləri doktoru, professor
**Ələkbər Güləhməd oğlu Hüseynov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi: texnika elmləri namizədi, dosent



Füzuli Rəsul oğlu Rəsulov

Elmi seminarın sədri: texnika elmləri doktoru, professor



Məhəmmədəli Nurəddin oğlu Nuriyev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi: Müasir dövrdə maşın və avadanlıqların pretsizion hissələrinin səthi möhkəmləndirilməsi zamanı daha çox üstünlük kimyəvi-termiki emala verilir. Bu da bir sıra səbəblərlə izah olunur, bunlardan başlıcaları: kimyəvi-termiki emal üsullarından - lazer texnologiyasının daha yüksək səmərəliliyi, istənilən sahəni emal etməsi, sürətləndirilmiş emal hesabına emal vaxtın azaldılması imkanları var. Eyni zamanda, yüksək xüsusi gücə malik yeni və modernləşdirilmiş lazer texnologiyası hesabına enerjiden istifadə azaldılmışdır. Belə lazer texnologiyasının istifadəsi əmək məhsuldarlığını artırmağa imkan verir ki, bu da xüsusilə vacibdir.

Yuxarıda qeyd olunan məsələlərin həlli, ilkin tədqiqatların göstərdiyi kimi, maşın və aparatların pretsizion hissələrinin səthi möhkəmliyini lazer texnologiyası və kompleks diffuziya metallaşdırması ilə vakuumda yüksəldilməsidir. Bu halda, üsullar yalnız pretsizion hissələrin işçi səthlərinin möhkəmliyinin artırılması kimi deyil, həm də hissələrin bərpası vasitəsi kimi istifadə edilə bilər.

Abraziv yeyilmə və yüksək temperatur şəraitində işləyən maşın və aparatların sürtünmə cütlərinin hissələrinin səthi möhkəmliyini artırmaq üçün vakuumda lazer texnologiyasından istifadə məsələsi praktiki olaraq öyrənilməmişdir. “Plunjer-bolt itələyici” cütünün (kontakt səthinin) istismar şəraitində səth qatında ən intensiv şəkildə mexaniki, zərbə abraziv, hidro abraziv, istilik və digər təsirlərə məruz qalır. Yanacaq nasoslarının plunjer və “plunjer–itələyici bolt” tribotexniki qovşağının işçi səthinin istismar etibarlılığının və uzunömürlülüüyünün artırılması probleminin təhlili göstərir ki, hazırda onların xidmət müddətinin uzadılması məsələsini yalnız bahalı yüksək legirli poladlardan istifadə etməklə və ya ənənəvi səthi möhkəmliyin artırılması üsulları ilə həll etmək həmişə mümkün olmur.

Lazerlə səthi emalın texnoloji üstünlükləri sırasına yerli və təmassız qızdırılma, deformasiyaların (əyilmələrin) olmaması, prosesin yüksək sürəti və məhsuldarlığı, çətin ölçətən sahələrin emal imkanı, avtomatlaşdırmaya uyğunluq, habelə tez-tez tətbiq olunan yüksək tezlikli cərəyanla emal, azotlama, sementləşdirmə, vakuumda

diffuziya metallaşdırma və nitrosegmentləşdirmə prosesləri ilə müqayisədə elektrik enerjisinə qənaət daxildir.

Çoxsaylı tədqiqatlara baxmayaraq, bu günədək lazerlə səthi möhkəmliyin artırılması prosesinin texnoloji parametrlərinin müxtəlif sürtünmə və yeyilmə rejimlərində səthi qatların tribotexniki xüsusiyyətlərinə təsiri yetərinə öyrənilməmişdir. Ümumiyyətlə, vakuumba lazerlə səthi möhkəmliyin artırılması tribotexniki qovşaqların xüsusiyyətlərinə təsiri tədqiq edilməmişdir. Yalnız tribotexniki cütlərinin yeyilməyə davamlılığının artırılması məqsədilə lazerlə səthi möhkəmliyin artırılmasına həsr olunmuş az sayda işlər mövcuddur. Zərbə-abraziv və hidro-abraziv rejimlərdə işləyən prezeziyon hissələrin səthlərinin modifikasiyası üçün lazer emalının tətbiqi ilə bağlı demək olar ki, heç bir məlumat yoxdur.

Yanacaq nasoslarının istismar xüsusiyyətlərinin artırılması məqsədilə yeni texnoloji proseslərin və işçi səthlərin möhkəmləndirilməsi üsullarının işlənilib hazırlanması istiqamətində tədqiqatlar xüsusi aktualıq kəsb edir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri yanacaq nasoslarının müxtəlif sürtünmə və yeyilmə şəraitində işləyən, yüksək yüklənmiş “plunjer-oymaq” cütündə plunjerin və “plunjer-bolt itələyici” cütlərinin səthi qatların lazerlə emalı zamanı formalaşma qanunauyğunluqlarının kompleks şəkildə araşdırılması, onların irsiliyinin öyrənilməsi, real təmas qarşılıqlı təsir şəraitində əsas xüsusiyyətlərinin tədqiqi və bu əsasda yüksək tribotexniki xüsusiyyətlərə malik səthi qatların alınmasını təmin edən elmi cəhətdən əsaslandırılmış tövsiyələrin işlənilib hazırlanmasıdır.

Bu məqsədə nail olmaq üçün tədqiqatın aşağıdakı vəzifələr həll edilmişdir:

1. Yanacaq nasoslarının tribotexniki hissələrinin lazerlə vakuumba səthi qatların möhkəmləndirilməsində həndəsi parametrlərinin və əsas xüsusiyyətlərinin formalaşma qanunauyğunluqlarını araşdırmaq;

2. Lazerlə emal rejimlərinin, materialın ilkin strukturunun və səth kələ-kötürlüyünün müxtəlif tribotexniki cütlərdə antifriksion və yeyilməyə davamlı xüsusiyyətlərinə təsirini araşdırmaq;

3. Konkret istismar şəraiti üçün yüksək tribotexniki xüsusiyyətlərə malik səthi qatların məqsədyönlü formalaşmasını təmin edən, vakuumda lazerlə emalı üzrə optimal rejimlərin seçilməsinə dair elmi cəhətdən əsaslandırılmış tövsiyələr hazırlamaq;

4. Struktur və yeyilməyə davamlılıq baxımından preseziyon qovşaqların həndəsi ölçülərindəyişməsi hesabına etibarlıq göstəricilərinin təmini üçün səth materiallarının tribotexniki xüsusiyyətlərinin qiymətləndirilmə üsullarını işləyib hazırlamaq.

5. Yanacaq nasoslarının “plunjer-oymaq” cütündə plunjerin və “plunjer-bolt itələyici” qovşağının istismar etibarlılığının və uzunömürlülüüyünün artırılması məqsədilə vakuumda lazerlə səthi möhkəmləndirmənin tətbiqinə dair tövsiyələr işləyib hazırlamaq;

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar. Aparılmış tədqiqatlar nəticəsində müdafiyyə aşağıdakı əsas müddəalar çıxarılır.

1. Pretsizion hissələrin abraziv və zərbə abraziv yeyilməsinin əsaslandırılması, pretsizion cütlərinin yeyilməyə davamlılığının artırılması üçün lazer texnologiyasından istifadənin elmi əsaslarının işlənilib hazırlanması, yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin lazerlə səthi möhkəmliyin artırılması üçün yeni texnoloji proses, pretsizion hissələrin səthi möhkəmliyinin artırılması texnoloji prosesin qiymətləndirilməsi üçün eksperimental tədqiqatların nəticələri;

2. Preseziyon hissələrin səthi qatının yüksək sürətlə qızdırılması və soyudulması, təsir müddətinin qısa olması emal olunmuş səthdə optimal quruluş və xassələrin əldə edilməsinə şərait yaratmağı;

3. Lazer emalının parametrlərinin tənzimlənməsi imkanı səthi qatın strukturunu, fiziki-mexaniki xassələrini, kələ-kötürlüyünü və emal olunmuş səthlərin həndəsi ölçülərini məqsədyönlü şəkildə formalaşdırmağa şərait yaratmağı.

Tədqiqatın obyektı: yanacaq nasoslarının pretsizion hissələri - plunjer və “plunjer-bolt itələyici” qovşağıdır (XBГ; ИИХ15; 25Х5МА - poladlarıdır).

Tədqiqatın metodları və nəticələrinin etibarlılığı. Dissertasiya işində qarşıya qoyulan məsələlər laboratoriya və istehsalat şəraitində aparılan nəzəri və eksperimental tədqiqatlar əsasında həll edilmişdir. Alınan nəticələrin etibarlılığı eksperimental tədqiqatlar üçün müasir avadanlıq və alətlərdən istifadə, kompüterdən istifadə etməklə riyazi

statistika metodlarından istifadə etməklə eksperimental nəticələrin işlənməsi və digər müəlliflərin fərdi nəticələri ilə müqayisəsi ilə təsdiqlənir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. İlk dəfə olaraq vakuumda lazer üsulu nəzəri cəhətdən əsaslandırılmış və yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin səthinin möhkəmləndirilməsi üsulu üçün qurğu layihələndirilmiş və texnoloji proses işlənmişdir – iki patent alınmışdır [1, 16];

2. Abraziv və zərbə abraziv yeyilmə mexanizmi öyrənilmiş və vakuumda lazer texnologiyası ilə pretsizion hissələrin səthinin möhkəmliyinin artırılmasında istilik proseslərinin yeni modeli təklif edilmişdir, şüalanmanın istiliyi nəticəsində presezion hissələrdə baş verən gərginlik və deformasiya dəyişmələri öyrənilmişdir [2, 3, 12];

3. Xətti ölçülərdə ən böyük artımı təmin edən diffuziya doyma rejimləri optimallaşdırılmışdır [5, 9, 13];

4. Presezion qovşaqların fiziki-mexaniki xassələri və metalloqrafiyası tədqiq edilmişdir [14, 15];

5. Səthi möhkəmliyi artırılmış pretsizion hissələrin triboloji və istismar xarakteristikası öyrənilmişdir [4].

Tədqiqatın praktiki əhəmiyyəti və sənayedə tətbiqi. Yanacaq nasoslarının tribotexniki hissələrinin səthi möhkəmləndirilməsi üçün yeni texnologiya işlənilib hazırlanmış və istehsalatda tövsiyə edilmişdir. Bu texnologiyanın tətbiqi yanacaq nasoslarının plunjerinin və “plunjer-bolt itələyici” qovşağının işçi səthində yüksək keyfiyyətli qatların məqsədyönlü şəkildə formalaşdırılmasına imkan verir.

Maşın və aparatların dəqiq hissələrinin səthi möhkəmliyinin artırılması texnologiya tətbiq olunmaq üçün “NeftQazMaş” zavoduna təqdim edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin lazerlə səthin möhkəmliyinin artırılması onların işləmə qabiliyyətini 2-3 dəfə artırır.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin əsas müddəaları aşağıdakı konfrans və seminarlarda müzakirə olunmuş və bəyənilmişdir və həmçinin Azərbaycan Texniki Universitetində XTM 060002-“Optotexnika” və XTB 050106-“Silah sistemləri mühəndisliyi” ixtisasında keçirilən fənlərlərin tədrisində

aprobasiyadan keçmişdir və tədris prosesinə tətbiq edilmişdir və “Tribologiyanın əsasları” adlı dərs vəsaiti işlənib hazırlanmışdır.

1. Heydər Əliyevin anadan olmasının 101 illiyinə həsr olunmuş tələbə və gənc tədqiqatçıların "Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar" mövzusunda IX Respublika elmi-texniki konfransı. Bakı, 1-2 may, 2024.

2. Heydər Əliyevin anadan olmasının 102-ci il dönümünə həsr olunmuş tələbə və gənc tədqiqatçıların "Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar" mövzusunda X Respublika elmi-texniki konfransı. Bakı, 1-2 may, 2025.

3. VI. International Turkic World Congress On Science And Engineering. 19-21 December 2024, Azerbaijan Technical University, Azerbaijan-Baku.

4. XX International Scientific And Practical Conference «Innovative Scientific Research: Latest Theories, Modern Methods And Practices». May 20 – 23, 2025, Seville, Spain

5. Ə. G. Hüseynov, Ş. N. Əsədov və F. S. Hüseynli, Tribologiyanın əsasları. Bakı: KINGPRINT, 2024. – 262 s.

Ümumiyyətlə, dissertasiya işinin əsas məzmununu 16 elmi işdə öz əksini tapmışdır Onlardan 3-ü Scopus bazalarında indekslənən yüksək impakt faktorlu dövrü nəşrlərdir. Həmçinin iş üzrə 1 patent (AzPatent No. İ 2025 0055) alınmış və digər patent üçün dərc qərarı verilmişdir (AzPatent No. a 2023 0076) və 1 dərs vəsaiti işlənib hazırlanmışdır. Digərləri beynəlxalq və respublika əhəmiyyətli konfranslarda dərc edilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işin bütövlükdə 196 səhifəni əhatə edir. İşin ümumi həcmi 57 şəkil, 5 cədvəl, giriş, 5 fəsil, ümumi nəticələr və istifadə edilmiş 148 adda ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın həcmi (mətindəki boşluqlar və şəkillər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – 228,336 işarədir. Titul vərəqi – 337 (1 s.), mündəricat – 4337 (3 s.), Giriş – 9361 (4 s.), I fəsil - 57.772 (32 s.), II fəsil – 48173 (39 s.), III fəsil – 8055 (9 s.), IV fəsil – 61476 (48 s.), V fəsil – 44668 (35 s.), Nəticələr – 3917 (2 s.) və istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısı – 30276 (17 s.).

İŞİN ƏSƏS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı, müdafiyyəyə çıxarılan əsas müddəalar, elmi yenilik, praktiki əhəmiyyəti və metodlar və nəticələrin etibarlığı verilmişdir.

Birinci fəsildə ədəbiyyat icmalı aparılmış və yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarının etibarlığının təmin olunması istiqamətində aparılan araşdırmalar ümumiləşdirilmişdir. Burada əsas diqqət pretsizion cütlərin sıradan çıxma səbəblərinə, işçi səthlərin etibarlığının təmin edilməsinə və onlara qoyulan texnoloji tələblərə yönəldilmişdir. Eyni zamanda səthi möhkəmləndirmənin tribotexniki qovşaqların davamlılığına təsiri, səthi qatın keyfiyyətinin, fiziki-kimyəvi vəziyyətinin və xassələrinin daşıyıcılıq qabiliyyətinə və yeyilməyə qarşı müqavimətinə təsiri təhlil olunmuşdur. Bundan başqa, tribotexniki hissələrin səth möhkəmliyinin artırılması üsulları, o cümlədən lazer texnologiyası ilə emalın imkanları da araşdırılmışdır.

Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin yeyilmə mexanizmlərini öyrənmək üçün И.В. Крагельский, М.М. Тененбаум, М.М. Хрушов, М.Л. Бабичев, Б.И. Костецкий, Н.И. Бахтияров, eləcə də Ə.G. Hüseynov və akademik Əhəd Cənəhmədovun tədqiqatlarına istinad olunmuşdur. Əlavə olaraq, zərbə-abraziv yeyilmə prosesləri tribologiyada özünəməxsus rol oynayan Георгий М. Сорокинin fundamental işlərindən olan məlumatlarla təhlil edilmişdir. В.В. Антипов isə iş qabiliyyətinin yüksəldilməsi məsələlərinə xüsusi diqqət yetirmişdir.

Etibarlılığın təmin edilməsi və bərpa texnologiyaları mövzusunda В.Н. Бугаев, К.А. Ачкасов, Ю.В. Мазаев, В.З. Сергеев, Е.А. Давиденко, Б.А. Богачев, həmçinin S.H. Babayev və Ə.G. Hüseynovun elmi işləri nəzərdən keçirilmişdir.

Lazerlə səthin möhkəmləndirilməsi istiqamətində yerli alim Ə.M. Hacıyevin araşdırmalarına paralel olaraq, beynəlxalq səviyyədə Lin Li, Andrés Fabián Lasagni və Y. Lawrence Yao tərəfindən lazerlə səth strukturlarının modelləşdirilməsi, mikromexaniki təsirləri və lazerlə emal texnologiyaları istiqamətində aparılan tədqiqatlar da nəzərə alınmışdır.

Aparılan təhlillərin nəticələri göstərir ki, yanacaq nasoslarında nasazlıqların əhəmiyyətli hissəsi pretsizion tribotexniki cütlərin (

plunjer və “plunjer–itələyici bolt” cütü) yeyilməsi ilə bağlıdır və nasazlıqların təxminən 41,7%-i bu qovşaqların payına düşür, ümumi nasazlığın 30%-i triboloji qovşaqlarla əlaqədardır. Tipik qüsurlar plunjer–oymaq cütünün hidravlik kipləşməsinin itməsi, plunjerin hərəkət qabiliyyətinin zəifləməsi və plunjer və “plunjer–itələyici bolt” cütündə zərbəli yeyilmə/dağılmadır. Nəticədə istismar müddəti orta hesabla ~20% azalır, yanacaq sərfiyyatı 10–15% arta bilər; plunjer–itələyici bolt cütünün real resursu 200...1500 motor-saat (təxminən istehsalçı zamanətinin 20–25%-i) diapazonunda dəyişir.

Səthi möhkəmləndirmə üsullarının müqayisəli təhlili göstərir ki, kimyəvi-termiki emal növləri – azotlama, sementləmə, nitrosementləşdirmə, karbonitrasiyalaşma və titanlaşma – pretsizion hissələrin bərklik və yorulma sərhədini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Lakin diffuziya qatlarında kövrəkliyin artması və zərbə dayanıqlığının azalması səbəbindən optimal emal rejimlərinin seçilməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Səthi plastik deformasiya üsulları (almazla hamarlaşdırma, diyircəklə yayma və s.) qalıq sıxıcı gərginliklər formalaşdıraraq yorulma sərhədini 15...30% və bəzən daha çox yüksəldə bilər. Termomexaniki emallar, elektron-şüa və elektro-qövs legirləşdirmə, ion implantasiyası kimi yüksək enerjili və diffuzion metodlar da strukturun incəldilməsi və sıxlaşdırılması hesabına yeyilməyə qarşı dayanıqlığı yüksəldir. Bununla belə, pretsizion səthlərdə ölçü dəqiqliyi, forma sabitliyi və kövrəklik balansı baxımından bu texnologiyaların tətbiqi müəyyən məhdudiyətlərə malikdir. Optimal nəticələr üçün texnologiya seçimi materialın xüsusiyyətləri, işçi şərait və istismar tələbləri ilə uzlaşdırılmalıdır.

Birinci fəsildə ədəbiyyat icmalını aparılmış və göstərilmişdir ki, yanacaq nasoslarının istismar qabiliyyəti ilk növbədə işçi səthin keyfiyyəti və istismar müddətində sabitliyini qoruyan səthi qatın xüsusiyyətləri ilə şərtlənir. İnnovativ və yüksək idarəolunan lokal istilik mənbəyi kimi lazer texnologiyası perspektiv hesab olunsa da, dəyişən yüklər və termiki rejimlər altında işləyən pretsizion tribotexniki qovşaqlar üçün tam işlənmiş texnoloji rejimlər hələ formalaşmamışdır. Xüsusilə, plunjer və “plunjer–itələyici bolt” cütündə lazerlə səthi möhkəmləndirmənin tətbiqinə dair tədqiqatlar

demək olar ki yoxdur və belə qeyri-bircins materiallar üçün etibarlı sınaq metodikaları kifayət qədər inkişaf etdirilməmişdir.

Beləliklə, mövcud elmi baza və praktikaya baxmayaraq, yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarında lazerlə səthi möhkəmləndirmə prosesindən sonra səth qatında gedən proseslərin və yüksək tribotexniki göstəricilərə malik qatın məqsədyönlü formalaşma şərtlərinin kompleks nəzəri-eksperimental tədqiqinə ehtiyac qalır; məhz bu boşluqlar araşdırmanın məqsədini və qarşıya qoyulan vəzifələri müəyyənləşdirir. Bu səbəbdən, lazerlə səthi möhkəmləndirmə texnologiyasının işlənməsi və tətbiqi, pretsizion hissələrin yeyilməyə davamlılığını artırmaq üçün ən perspektivli yanaşmalardan biri kimi qiymətləndirilir.

İkinci fəsildə yanacaq nasoslarının pretsizion qovşaqlarında etibarlılığın səthi möhkəmliyin artırılması hesabına təmin edilməsinə dair lazer texnologiyasının nəzəri əsasları ümumiləşdirilmişdir. Burada əsas pretsizion qovşaqların lazer emalı prosesində istilik hadisələri, möhkəmləndirilmiş qatların həndəsi parametrləri və onların dəyişməsi, üst-üstə düşmə əmsalı (K_n) əsasında qat ölçülərinin hesablanması məsələləri izah edilmişdir. Pretsizion hissələrin tablanmış poladlardan hazırlanması şəraitində qat parametrlərinin hesablanması qaydaları göstərilmişdir və pretsizion hissələrin etibarlılığının proqnozlaşdırılması imkanları nəzərdən keçirilmişdir.

Nəzəri tədqiqatlar dissertasiyada geniş şəkildə verilmişdir. Lazer texnologiyası ilə yanacaq nasoslarının pretsizion qovşaqlarının səthi möhkəmliyinin artırılmasında istilik prosesləri analiz edilmişdir. İstilik proseslərinin təhlili zamanı qəbul edilə bilər ki, lazerlə emal zamanı metalda istilik yayılmasını istilik keçiriciliyi nəzəriyyəsinin klassik prinsipləri əsasında izah etmək mümkündür. Pretsizion hissələrin materialının istilik-fiziki xarakteristikalarına istilik keçirmə əmsalı (λ) lazer şüalanmasının yaratdığı səthi qızdırıcı mənbədən istiliyin keçirilmə qabiliyyətini müəyyən edir. Eyni zamanda, istilik axınının intensivliyini təyin edən materialın həcmi istilik tutumu da vacib rol oynayır ($c\gamma$ – həcmi istilik tutumu). İstilik-fiziki xassələrin kompleks göstəricisi isə istilik yayılma əmsalıdır - $a = \frac{\lambda_T}{c\gamma}$.

Aparılan tədqiqatların ümumiləşdirilməsi lazerlə emal olunan materialın struktur və faza çevrilmələrinin xarakterinə, onun

xüsusiyyətlərinə, eləcə də termiki təsir zonasının həndəsi göstəricilərinə müxtəlif amillərin təsirini müəyyən etməyə imkan verir. Hesablamalarda pretsizion hissələr üçün bu əmsalların orta qiymətləri qəbul olunur: $\lambda_T = 0,38...0,42 \text{ C}/(\text{sm}\cdot\text{s})\cdot\text{dərəcə}$; $c\gamma = 4,9...5,2 \text{ C}/(\text{sm}^3)$; $\alpha t = 0,075...0,09 \text{ sm}^2/\text{s}$. Şüa gücünün sıxlığı $10^2 - 10^5 \text{ Vt}/\text{sm}^2$ olduqda, lazer istilik mənbəyi kimi ekvivalent qəbul edilə bilər. İstiliyin ani lokal mənbədən Q başlanğıc anı $t = 0$ -da yayılması prosesi aşağıdakı tənliklə ifadə oluna bilər.

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\gamma(4\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{\alpha t}} + T_0, \quad (1)$$

burada, T – araşdırılan nöqtədəki temperatur; t – istilik mənbəyinin təbiiqindən sonrakı zaman; $R = x^2 + y^2 + z^2$ – istilik mənbəyindən (Q) araşdırılan nöqtəyədək məsafənin kvadratı; $\alpha = \lambda_T/c\gamma$ – istilik yayılma (temperatur ötürmə) əmsalı; T_0 – lazerlə emaldan əvvəl materialın ilkin temperaturudur.

Davamlı şüalanma ilə lazer termiki möhkəmləndirmə prosesi, fokuslanmış şüanın emal olunan səth üzrə V sürətilə bərabər şəkildə hərəkət edərkən lazer şüasının düşmə mərkəzindəki maksimal temperatur aşağıdakı düsturla müəyyən edilə bilər:

$$T_{\max} = \frac{q\phi r}{\lambda_T} \left(1 - \frac{Vr}{2a}\right). \quad (2)$$

Ekspərimental məlumatlar göstərir ki, udulma $(5 \div 80) \cdot 10^{-3}$ mkm qalınlığında olan bir qat daxilində baş verir və istiliyin materialın dərinliklərinə yayılması isə istilikkeçirmə hesabına həyata keçirilir.

Dərinliyinə doğru istilik ötürülməsinin baş verdiyi nəzərə alınmaqla, bərkidilən qatın dərinliyi Z ilə bərkitmə temperaturu T arasında əlaqə yaradan tənlik əldə edilmişdir və lazerlə möhkəmləndirilməsi zamanı aşağıdakı şərt ödənməlidir:

$$Z = \left[\frac{2\sqrt{\alpha\tau}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\lambda\tau}{\varepsilon(1-R)} \right], \quad (3)$$

burada a , λ və R müvafiq olaraq istilik yayılması, istilik keçiriciliyi və işığın əks olunması əmsallarıdır, ε — lazer şüalanmasının enerji gücünün sıxlığıdır; bu, materialın səthində temperaturun T -yə çatdığı güc sıxlığına uyğundur. Lazerlə emal zamanı pretsizion hissələrin möhkəmləndirilməsi güc sıxlığı $10^2 - 10^5 \text{ Vt}/\text{sm}^2$ və şüalanma müddəti təxminən $\tau = 10^{-3}...10^{-7}$ saniyə olduqda baş verir.

Materialın səth qatında udulan istilik enerjisi və səthdən məsafə üzrə Δx qədər dəyişmə ilə udulan enerjinin miqdar müvafiq olaraq aşağıdakı tənliklərlə ifadə olunur :

$$E(x) = E_0(1 - R)e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

$$E(x) = E_0(1 - R)2e^{-\alpha x} \cdot \Delta x. \quad (5)$$

burada $E(x)$ — materialın səth qatında udulan istilik enerjisi; E_0 - səthin şüalanma enerjisi; R - xüsusi əks etdirmə qabiliyyəti (reflektivlik); α — enerjinin udulma əmsalıdır. (4) və (5)-ci tənliklərə əsaslanan analiz göstərir ki, enerjinin udulması birbaşa səthə yaxın sahədə maksimum olur və dərinlik artdıqca tədricən azalır. Bu isə möhkəmləndirilmiş qatın mikrobərqliyinin səthdən məsafə artdıqca azalması ilə izah olunur.

Nəzəriyyədə alınmış nəticələr eksperimentlərlə və dissertasiyada qrafiklər şəklində öz əksini tapmışdır.

Əvvəlcədən möhkəmləndirilmiş yanacaq nasoslarının presesiozn hissələri üçün emal zamanı, tablandırma zonasının sahəsi aşağıdakı düsturla ifadə olunur:

$$A_0 = \frac{h_0}{15} \left[6\beta_0 + 8\sqrt{h_0^2 + (0.5\beta_0)^2} \right] - \frac{h}{15} \left[6\beta + 8\sqrt{h^2 + (0.5\beta)^2} \right], \quad (6)$$

burada lazer möhkəmləndirilməsi zonasının (LMZ) dərinliyi — h ; LMZ-nin eni — β ; çevrə seqmentinin radiusu — R ; lazer təsiri zonasının (LTZ) eni— β_0 ; LTZ-nin dərinliyi — h_0 ; LTZ çevrə seqmentinin radiusu — R_0 ilə müəyyən olunur.

Lazərlə səthi möhkəmləndirilmiş yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin etibarlığının proqnozlaşdırılması tədqiq edilmişdir. imtinasız işləmə vaxtının şərti paylanma sıxlığı ($\lambda(t)$) və eyni zamanda yeyilmə intensivliyi ($\lambda(n)$) təyin edilmişdir. Aşağıdakı düsturla ifadə olunur:

$$\lambda(n) = P(\hat{u} > \hat{x}/\hat{A}(n)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_{\hat{u}}^n(x)R_{\hat{u}} dF_{\hat{x}}(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} F_{\hat{u}}^n(x)dF_{\hat{x}}(x)} \quad (7)$$

burada n - sınaqların sayı, $\hat{x}/\hat{A}(n)$ obyektin n sınaqda imtinası olmadığı $A(n)$ şərti ilə n sınaqdan sonra \hat{x} parametrinin şərti təsadüfi dəyişənidir, $F_{\hat{u}}(x)$ və $R_{\hat{u}}(x)$ təsadüfi kəmiyyətin paylanma və $F_{\hat{x}}(x)$ istismar göstəricilərinin paylanma funksiyası, t - imtina intensivliyi anına qədər imtinasız işləyən obyektin növbəti zaman vahidi və $P(\hat{u} > \hat{x}/\hat{A}(n))$ proqnozun ilk qarşılıqlı təsirində müvafiq olaraq imtina və imtinasız nəticə ehtimallarıdır.

Eksperimental $H(z)$ asılılıqlarının aproksimasiyası nəticəsində optimal rejimlərdə aparılan emal zamanı mikrobərqliyin təbəqə qalınlığı üzrə dəyişmə qanunauyğunluqlarını təsvir edən analitik ifadə əldə edilmişdir:

$$H = \frac{Hn_l}{\left[\left(\frac{Hn_l}{Hc_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{Z}{hc_l} \right)^4 + 1 \right]}, \quad (8)$$

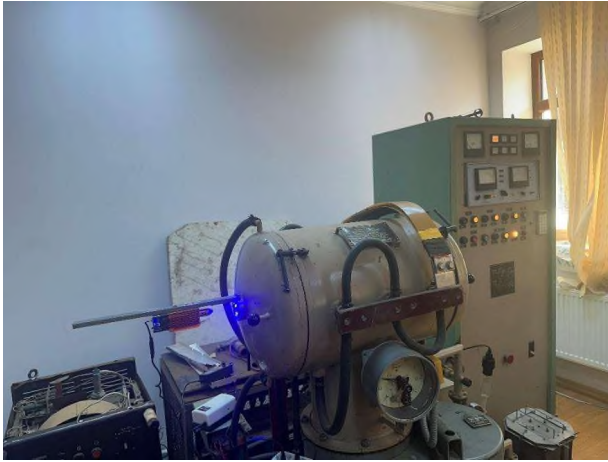
burada Hn_l və Hc_0 — müvafiq olaraq, əsas metalın səthində və nüvəsindəki mikrobərqliyin qiymətləridir; hc_l — hissənin nüvəsinin bərklik səviyyəsinə uyğun sabit bərkliklə xarakterizə olunan sahəyə qədər olan, səthdən ölçülən möhkəmləndirilmiş qatın qalınlığıdır; Z — qat daxilində nöqtənin cari koordinatıdır.

Beləliklə, bərqliyin dəyişmə qanunauyğunluqlarının təhlilindən belə nəticə çıxır ki, lazerlə möhkəmləndirmə rejiminin seçilməsi zamanı mikrobərklik xüsusiyyətlərinin elə səviyyədə təmin olunması əsas götürülməlidir ki, bu da yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin real istismar şəraitində dağılma və yeyilməyə qarşı davamlılığını təmin etsin.

Bu fəsil üzrə aparılan tədqiqatlar göstərir ki, yanacaq nasoslarının pretsizion tribotexniki qovşaqlarında lazer təsiri zamanı sürətli qızdırılma və intensiv istilikötürmə şəraitində yüksək enerji axınları səciyyəvi struktur dəyişikliklər yaradır və səth qatının formalaşma şəraiti materialın kimyəvi tərkibi və istilik-fiziki xassələri, həmçinin lazerin güc sıxlığı və emal rejimləri ilə müəyyən olunur. Möhkəmləndirilmiş qatın həndəsi ölçüləri emal olunan metalın istilik-fiziki xüsusiyyətlərindən, şüalanmanın güc sıxlığından və şüanın səth üzrə hərəkət sürətindən asılıdır.

Üçüncü fəsildə müəllif tərəfindən istifadə edilən eksperimental metodika təqdim olunmuşdur.

Tədqiqat işləri Azərbaycan Texniki Universitetinin “Diffuziya metallaşdırma və Xüsusi təyinatlı məhsulların texnologiyası” laboratoriyasında müəllif tərəfindən patentləşdirilmiş vakumda lazer diffuziya qurğusunda aparılmışdır (şəkil 1). Obyekt kimi yanacaq nasoslarının pretsizion hissələri olan plunjer “plunjer–bolt itələyici” qovşaqlarının işçi səthləri seçilmişdir. Qurğu CHB-131/16И4 tipli vakuum kameralı müqavimətli qurğu prototipinin bazasında modifikasiya olunmuşdur.



Şəkil 1. Vakumda lazerlə diffuziya metallaşdırma qurğusu.

Təmizlənmiş səthin kələ-kötürlülüyü qiymətləndirmək üçün profiloqraf-profilometr modeli 253 istifadə edilmişdir.

Plunjer və “plunjer-bolt itələyicinin” ölçülməsi 0,0002 mm qiymətli bölməyə malik “ОГП” optikatorunda, konusluq, ovalıq “E-92IA” ratometrində və “Talyron 200” cihazında aparılmışdır. Konusluq, ovalıq, silindrik forma və seçilmiş qruplar üzrə “ОП286” tipli optikordan istifadə etməklə müəyyən edilmişdir. Yeyilmə dərəcəsi göstərilən cihazlarda mikro ölçmələr vasitəsilə təyin olunmuşdur. Plunjer və “plunjer-bolt itələyici”nin ölçülməsi istehsalçı zavodun mikrometraj еучтщщщщ чкшшәәдәкшштә uyğun olaraq beş kəsikdə və iki qarşılıqlı perpendikulyar müstəvidə aparılmışdır.

Metalloqrafik analiz mikroşlif nümunələri və ya nümunə hissələrindən hazırlanmış kəsiklər üzərində aparılmışdır. Bütün mikroşliflər standart metodologiyaya uyğun hazırlanmışdır və mövcud metodlarla aparılmışdır. Həm düz, həm də maili kəsiklərə üzrə aparılmışdır.

Nümunə detallarının bərkliyi isə TKC – 1M ölçü cihazında Rokvel və Brinelliyə görə təyin edilmişdir.

ГОСТ 9450-76 (standart SEB I95-78) uyğun olaraq mikrobərklik ölçmələri Vikers parametrinə uyğun olaraq ПИМТ -3M cihazında Vikerslə H_μ aparılmışdır.

Mikrostruktur və faza tərkibini metalloqrafik kəsiklər üzərində və SEM mikroskopunda emaldan əvvəl və sonra tədqiq edilmişdir.

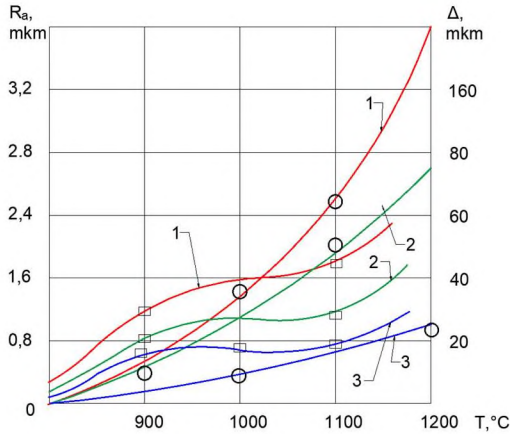
Triboloji xüsusiyyətlər III-5018 sürtünmə maşınında “kalodka–diyircək” sxemi üzrə qiymətləndirilmiş və “Xüsusi texnologiyalar və avadanlıqlar” kafedrasında mövcud metod ilə işlənmişdir.

Dördüncü fəsildə vakuum şəraitində yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarında səthi möhkəmliyin lazerlə artırılmasına həsr olunmuşdur. Burada pretsizion hissələrin həndəsi ölçülərindəki dəyişikliklər, möhkəmləndirmədən sonrakı mikrobərklik və bərklik göstəriciləri, istismar amillərinin səthi qatlara qoyulan tələblərlə əlaqəsi, lazer treklərinin üst-üstə düşməsinin qovşağın etibarlılığına təsiri, optimal üst-üstə düşmə əmsalının seçilməsi, həmçinin lazer rejimlərinin tribotexniki qatın parametrlərinə, xüsusilə XBF poladında formalaşan möhkəmləndirilmiş qatın göstəricilərinə təsiri araşdırılmışdır.

Lazerlə səthi möhkəmliyi artırılmış pretsizion hissələrin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri tədqiq edilmişdir. Plunjerlərin səthinin hissələrinin yeyilmə ölçülərinin təhlili göstərir ki, bu ölçülərin paylanması Veybull qanununa tabe olur. Yeyilmə ölçüsünün orta qiyməti $t^- = 13,119$ mkm, $t^B = 27,30$ mkm, $t^H = 1,856$ mkm-dir. Orta kvadratik sapma $G = 12,123$ mkm, və variasiya əmsalı $V = 0,906$ -dur. Triboloji qovşaqların istismardan sonrakı pretsizion səthlərinin kələ-kötürlüyünün analizi göstərir ki, az yeyilmiş səthlərdə kələ-kötürlük $R_a = 0,04 \dots 0,05$ mkm intervalında dəyişir, lokal yeyilmə sahələrində isə $R_a = 1,22 \dots 1,42$ mkm səviyyəsində olmuşdur və burada abraziv təsirin buraxdığı izlər açıq şəkildə müşahidə olunur.

Lazerlə möhkəmləndirmədə qat qalınlığının parametrlərə təsiri analiz edilmişdir. Həndəsi ölçülərin dəyişməsinə müəyyən etmək məqsədilə ilkin eksperimentlər aparılmışdır. Bu eksperimentlərin nəticəsində vakuumda diffuziya bor-titanlama, vakuumda diffuziya titanlama və vakuumda lazerlə möhkəmləndirilmədə, zamanın və temperaturun səthinin kələ-kötürlüyünə, xarici və daxili səthin qalınlığına təsiri üzrə asılılıqlar müəyyən edilmişdir. Apardığımız tədqiqatlar göstərir ki, 1000 °C-dən aşağıda kələ-kötürlük az olsa da, xətti ölçü artımı yeyilmiş plunjer və “plunjer–itələyici bolt” cütünün

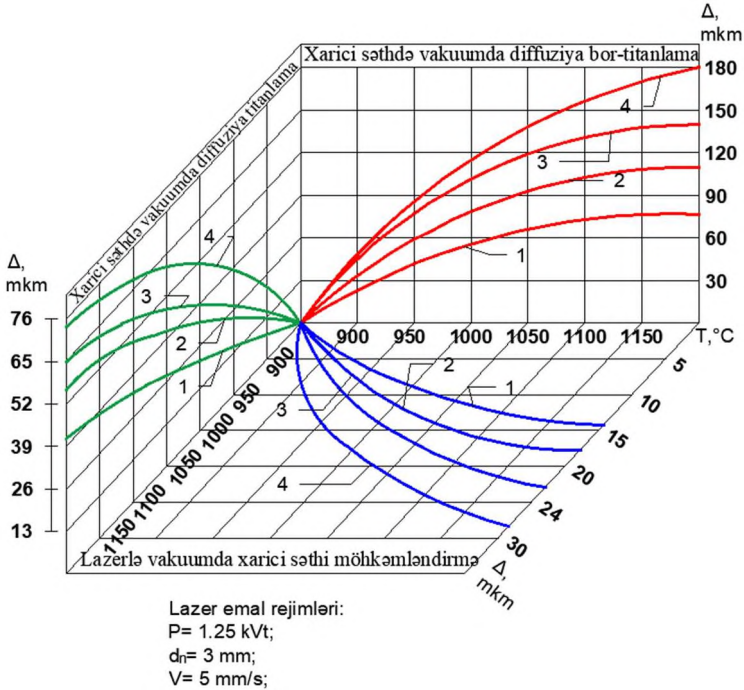
tam möhkəmləndirilməsi üçün kifayət etmir (Şəkil 2). Qeyd etmək olar ki, səthin kələ-kötürlüyü vakuumda diffuziya bor-titanlamada ən yüksək, sonra diffuziya titanlama və ən yaxşı göstərici isə lazerlə səthi möhkəmləndirmədə alınmışdır. Temperatur 1200 °C-dən yuxarı olduqda səthin kələ-kötürlüyü kəskin şəkildə artır.



Şəkil 2. Səth kələ-kötürlüyünün R_a (□- □) və detalların xətti ölçülərinin Δ (0 - 0) vakumda diffuzion bor-titanlama (1), vakumda diffuzion titanlama (2) və vakumda lazerlə səthi möhkəmləndirmə (3) temperaturundan asılılığı.

Şəkil 3 xarici səthlərdə möhkəmləndirmə qatının qalınlığının (Δ , mkm) temperaturdan və emal müddətindən asılılığını göstərir. Apardığımız tədqiqatlar göstərir ki, xarici səthdə bortitanlama, titanlama və lazerlə möhkəmləndirmə formalaşan qat qalınlığı müvafiq olaraq 180 mkm, 74 mkm və 26 mkm-dir. Lazer möhkəmləndirməsində isə ümumi qatın təxminən üçdə ikisi daxilə, üçdə biri xaricdə formalaşır və lazerlə möhkəmləndirilmiş qatlarda mikrobərklik 21,2–22 GPa diapazonunda olur. Nəticədə, lazer möhkəmləndirməsi lokal və sürətli texnologiya olmaqla yanaşı, yüksək temperatur şəraitində effektivliyini qoruyur. Disertasiyada daxili səthdə vakuumda diffuzion bortitanlama, diffuzion titanlama və lazerlə möhkəmləndirmədə həndəsi parametrlərin temperaturdan və zamandan asılı olaraq dəyişməsi və səth kələ-kötürlüyünün

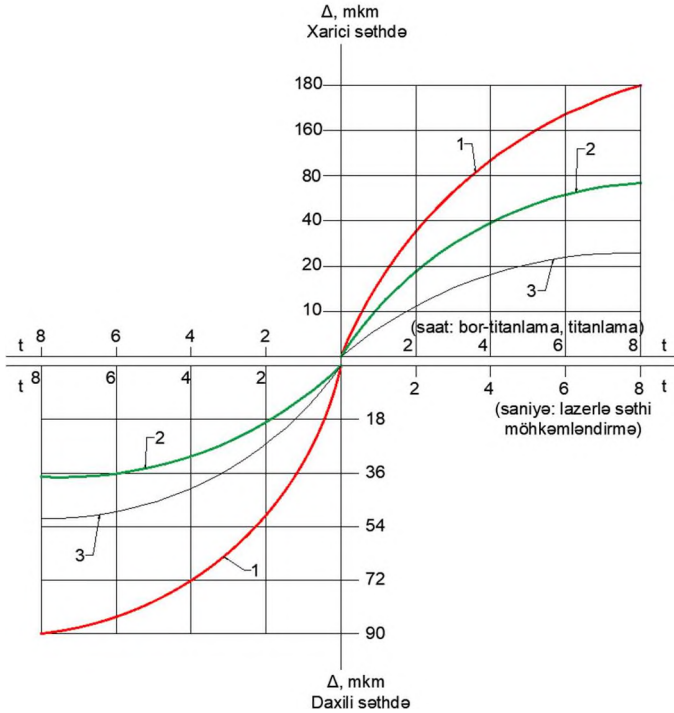
göstəricilərinə təsiri geniş şəkildə tədqiq olunmuşdur. Lazer möhkəmləndirməsində texnoloji prosesin müddəti 2–8 saniyədir, müddət artdıqca R_a bir qədər yüksəlir və optimal interval 4–8 saniyədir və daha uzun müddət məqsədə uyğun hesab edilməmişdir.



Şəkil 3. Xarici səthdə vakuunda diffuzion bor-titanlama, diffuzion titanlama və lazerlə möhkəmləndirmədə həndəsi parametrlərin temperaturdan və zamandan (müvafiq olaraq: 1 – 4 saat; 2 – 5 saat; 3 – 5.5 saat; 4 – 6 saat; lazerlə möhkəmləndirmədə: 1 – 4 saniyə; 2 – 5 saniyə; 3 – 5.5 saniyə; 4 – 6 saniyə) asılı olaraq dəyişməsi.

Texnoloji prosesin müddəti və möhkəmləndirilmiş qatın qalınlığı (Δ) asılılığı tədqiqatından məlum olur ki, lazerlə səthi möhkəmləndirmə saniyə miqyasında getdiyi üçün qat nazik formalaşır və 2–4 saniyədə $\sim 18 \text{ mkm}$, 6–8 saniyədə $\sim 26 \text{ mkm}$. Daxili səthdə eyni tendensiya qorunur, lakin diffuzion üsullarda qalınlıq xaricə nisbətən daha azdır (şəkil 4). Nəticə etibarilə, böyük qat qalınlığı üçün bor-

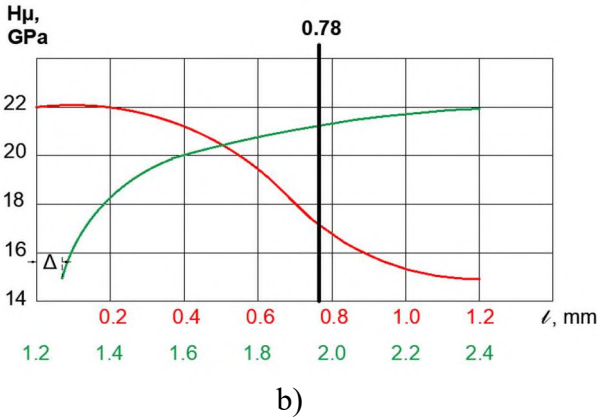
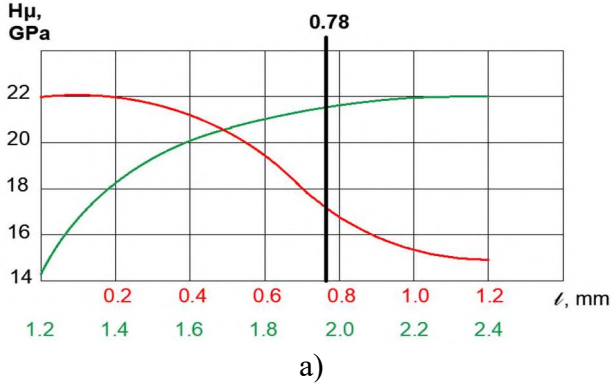
titanlama, idarəolunan qalınlıq və korroziyaya davamlılıq üçün titanlama, ölçü dəqiqliyi və sürətli proses üçün lazer emalı daha məqsədəuyğundur.



Şəkil 4. Bor-titanlama, titanlama və lazerlə səthi möhkəmləndirmə proseslərində xarici və daxili səth möhkəmləndirilmiş qat qalınlığının (Δ , mkm) texnoloji prosesin müddətindən (t) asılı olaraq dəyişməsi. 1 – Bortitanlama (t – saatla); 2 – Titanlama (t – saatla); 3 – Lazerlə səthi möhkəmləndirmə (t – saniyə ilə)

Şəkil 5 (a)-dan görünür ki, üst-üstə düşmə əmsalı K_n az olduqda, lazerlə emal zamanı treklərin qismən üst-üstə düşdüyü sahələrdə mikrobərklik dəyərləri ilkin metalın mikrobərklik səviyyəsindən praktiki olaraq fərqlənməyən, möhkəmləndirilməmiş hissələr qalır. Üst-üstə düşmə əmsalı $k = 0,5 \cdot dn$ səviyyəsinə qədər artırıldıqda (Şəkil 5, b), presezion hissənin möhkəmləndirilmiş səthində martensit və

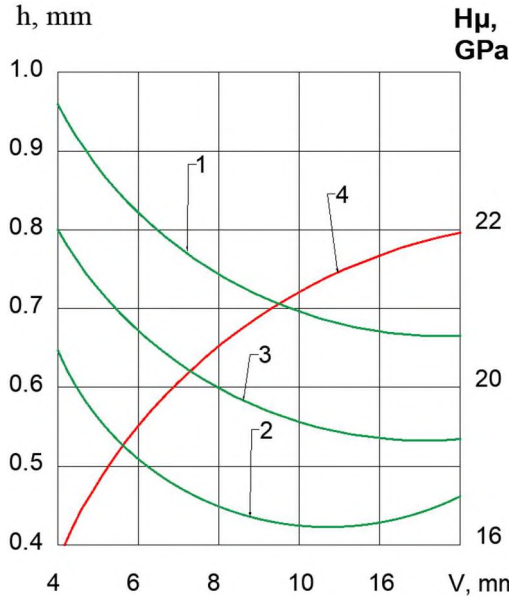
troosit quruluşuna malik bərkidilmiş və tablandırılmış sahələr müşahidə olunur. Mikrobərkliyi 19 GPa-a qədər azalmış tablandırma zonasının eni təqribən 0,4 mm təşkil edir. Tədqiqatlar göstərmişdir ki, səthi qatın mikrobərkliyi azalmış sahələrinin formalaşması həmin zonaların təkrar qızdırılaraq tablandırma temperaturuna çatması ilə bağlıdır.



Şəkil 5. Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin lazerlə möhkəmləndirilmiş səth üzrə mikrobərklik paylanması: a – emal $S=df$ olduqda; b – üst-üstə düşmə ilə aparılan emal; 1 və 2 – birinci və ikinci lazer trekləri.

Şəkil 6-da yanacaq nasoslarının tribotexniki cütlərində lazerlə emal sürətindən asılı olaraq möhkəmləndirmə və istilik təsiri zonalarının həndəsi ölçülərinin, həmçinin möhkəmləndirmə zonasının

orta mikrobərəkliyinin dəyişməsinə əks etdirən ümumiləşdirilmiş qrafiklər təqdim edilmişdir.

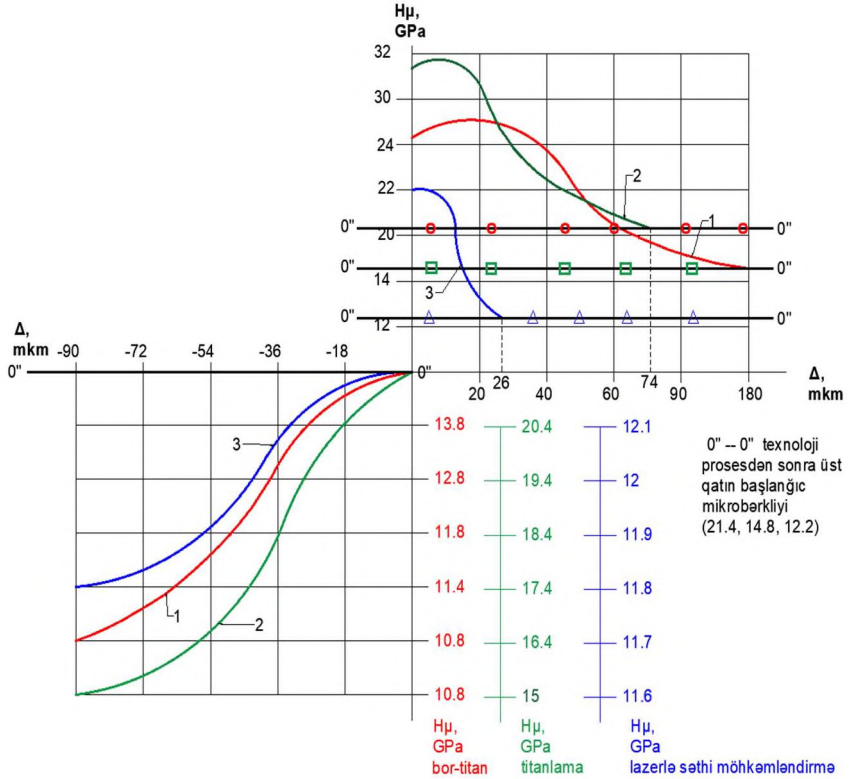


Şəkil 6. Pretsizion hissələrdə lazer təsiri zonalarının ölçülərinin və mikrobərəkliyin emal sürətindən asılılığı:

1 – möhkəmləndirmə zonasının eni; 2 – möhkəmləndirmə zonasının dərinliyi; 3 – istilik təsiri zonasının dərinliyi; 4 – möhkəmləndirmə zonasının mikrobərəkliyi.

Səthi möhkəmləndirilmiş presezion hissələrin metalloqrafik analizi aparılmışdır. Eksperimental tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, XBF poladından hazırlanmış nümunə və hissələrin lazerlə möhkəmləndirilmiş qatlarında mikrobərəklik 1200...2200 HV diapazonunda (təxminən 12.2...22 GPa) dəyişir. Şəkil 7-dən məlum olur ki, lazer üsulunda səth mikrobərəkliyi təqribən 22 GPa-dan 26 mkm dərinlikdə 12,2 GPa-a kəskin düşür və ~52 mkm-dən sonra baza metalı səviyyəsində ($\approx 11,8$ GPa) sabitləşir; yəni qat nazik və sərhədi kəskindir, baza metalına təsir azdır. Ümumiləşdirilmiş nəticələr göstərir ki, lazer möhkəmləndirmə işə qat qalınlığı baxımından daha aşağı olsa da, səth bərəkliyi yüksək, emal müddəti qısa, istilik təsir

zonası dar və deformasiyalar minimaldır. Buna görə də, dərin yeyilmə riski olan hissələrdə bor-titanlama, yüksək dəqiqlik və minimal deformasiyaya ehtiyac olan hissələrdə isə lazerlə səthi möhkəmləndirmə texnologiyası daha məqsədəuyğun hesab edilir.



Şəkil 7. Müxtəlif səthi möhkəmləndirmə üsullarından sonra yanacaq nasoslarının tribotexniki hissələrinin mikrobərklik profilinin dərinlik üzrə dəyişməsi. 0'' – 0'' texnoloji prosesdən sonra üst qatın başlanğıc mikrobərkliyi (müvafiq olaraq 21.4, 14.8, 12.2 GPa), 1 – diffuzion bor-titanlama, 2- diffuzion titanlama, 3- lazerlə möhkəmləndirmə.

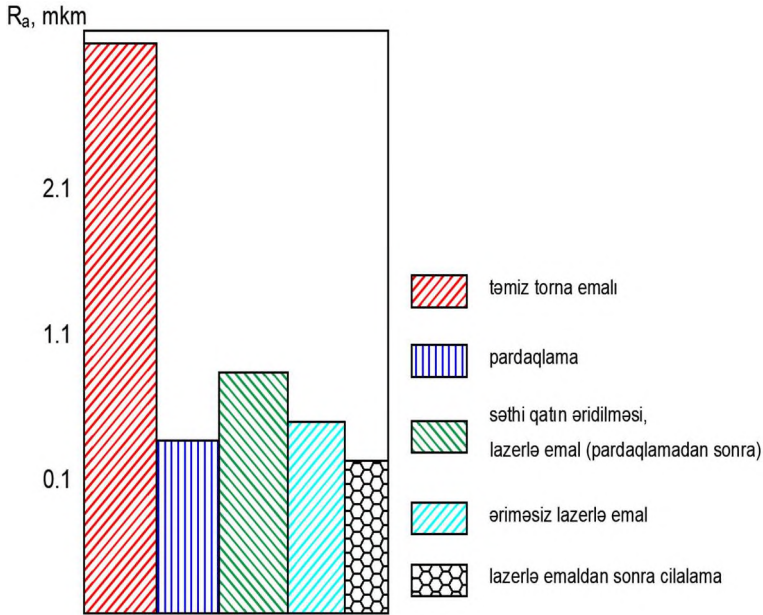
Aparılan rentgen struktur faza analizinin nəticələri göstərir ki, bor-titanlama zamanı təklif olunan toz qarışığında dəmir və titanın mürəkkəb boridlərindən ibarət difüzion örtüklər formalaşır. Əsas faza

aşağı borid (Fe,Ti)₂B olub, daha az kövrəklik göstərir. Yüksək borid (Fe,Ti)B isə yalnız XBΓ və IIIX15 polad nümunələrinin səthində az miqdarda mövcuddur. XBΓ və IIIX15 poladlarında bor tərəfindən sıxışdırılan karbon Fe₃C karbidləri şəklində çıxır. Nəticədə interkristal sahədə karbon difuziyası baş verir və bu da Fe₃C karbidlərinin yaranması ilə müşayiət olunur.

Ölçmələr göstərir ki, mikrobərklik qeyri-bərabər paylanır. XBΓ, IIIX15 və P18 polad nümunələri üzərində aparılan sınaqlarda maksimum bərklik dəyərləri müvafiq olaraq 21 GPa, 18.6 GPa və 17.6 GPa olmuşdur. Bu qiymətlərə XBΓ poladında 180 mkm, IIIX15 və P18 poladlarında isə 240 mkm diffuziya qatının qalınlığında nail olunmuşdur. Ən aşağı bərklik XBΓ üçün 11 GPa (480 mkm), IIIX15 üçün 10 GPa (380 mkm), P18 üçün isə 8.8 GPa (380 mkm) dərinlikdə qeydə alınmışdır (şəkil 10). XBΓ və IIIX15 poladlarının difuzion qatında titan miqdarı 4%-ə, digər poladlarda isə 2%-ə qədər yüksəlir. Bor-titanlama zamanı borid örtüyün strukturunun dəyişməsi çox güman ki, Fe₂B və FeB əsaslı yeni fazaların — (Fe,Ti)₂B; (Fe,Ti)B; (Ti,Fe)₂B; (Ti,Fe)B — əmələ gəlməsi ilə bağlıdır.

Səth kələ-kötürlüyü isə lazer emalı sürətindən asılı olaraq dəyişir. İlk $R_a=2,7 \mu\text{m}$ olduqda, 10–18 mm/s sürət intervalında səth keyfiyyəti pisləşir və $R_z 50 \mu\text{m}$ -ə qədər artır. Sürət artdıqca isə göstəricilər yaxşılaşır: $v=30 \text{ mm/s}$ olduqda $R_a=1,25 \mu\text{m}$, $R_z=5,1 \mu\text{m}$ olur ki, bu da ilkin parametrlərlə müqayisədə nəzərəçarpaq yaxşılaşma deməkdir.

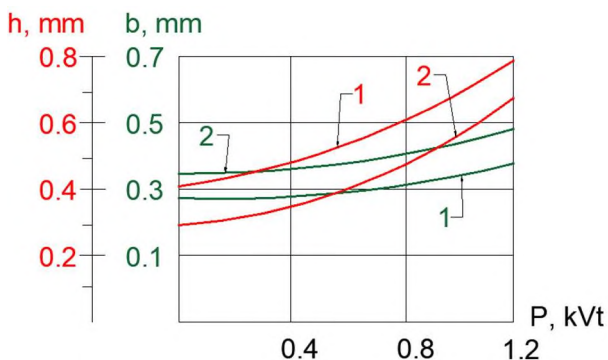
Ümumilikdə, minimal ərimə ilə aparılan lazer emalı nəticəsində səthlərin yeyilməyə davamlılığı və antifriksion xassələri əhəmiyyətli dərəcədə artır. Belə emal üsulu $R_a = 1,25 \pm 0,63 \mu\text{m}$ səviyyəsində səth keyfiyyəti təmin edir və bu da bəzi detallar üçün finiş emal üsulu kimi istifadəni mümkün edir. Aparılmış analizlərin nəticəsi göstərir ki, əvvəlcədən paradaqlanmış səthin lazerlə əridilərək emalı onun ilkin kələ-kötürlüyünün əhəmiyyətli dərəcədə pisləşməsinə səbəb olur. Əriməsiz aparılan emal isə səthin mikrohəndəsəsinə bu qədər təsir etmir. Lazerlə emaldan sonra aparılan cilalama səthin mikrohəndəsəsinə əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırır (şəkil 8).



Şəkil 8. Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin emal növündən asılı olaraq kələ-kötürlüyün dəyişməsi.

Emal olunmuş sahələr faza çevrilmələrinin dərəcəsinə görə fərqli zonalardan ibarətdir. Birinci zonada martensit iynələri üstünlük təşkil edir, yüksək yeyilmə davamlılığına malikdir və mikrobərkliyi 22.5 GPa-dır. İkinci zonada “ağ qat”dan sonra orta və incə iynəvari martensit formalaşır, karbidlərlə zənginləşir və mikrobərkliyi 12–14 GPa arasında dəyişir. Üçüncü zona əsas metalın ilkin vəziyyətinə uyğun olub, xırda dənəcikli perlitdən ibarətdir və mikrobərkliyi 11.8 GPa təşkil edir. Lazerlə bərkidilmiş zona ilə ilkin struktur zonası arasında yerləşən keçid zonası təxminən 50–80 mikrometr enindədir və burada mikrostruktur martensit, troostit və dənəvər perlit sahələrindən ibarətdir.

Teorik təhlil və eksperimental məlumatlar əsasında XBF markalı yeyilməyə davamlı polad üçün lazer təsiri zonasının həndəsi ölçülərinə lazer şüalanmasının əsas parametrlərinin təsirini göstərən asılılıqlar qurulmuşdur (şəkil 9). Bu asılılıqlar lazerlə emalın optimal rejimlərinin operativ şəkildə təyin olunmasına imkan verir.



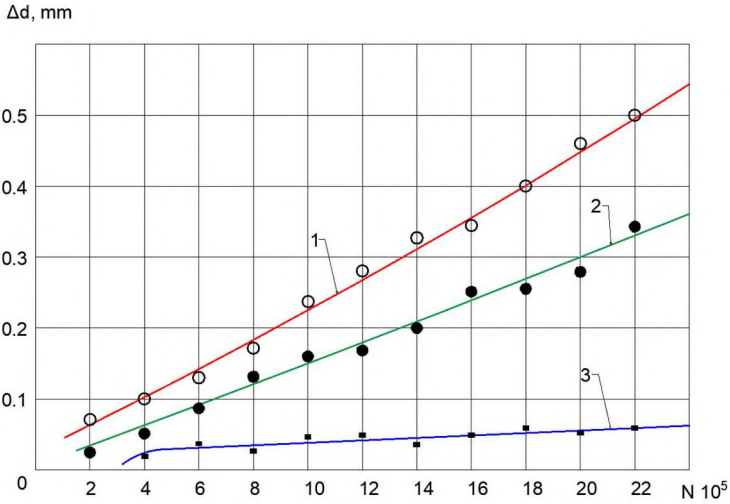
Şəkil 9. Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin lazer təsiri zonasının eninin (b , mm) və dərinliyinin (h , mm) şüalanma gücündən ($V = 7$ mm/s, $d_n = 3$ mm) asılılıqları: 1 – XBF; 2 – IIX15.

Dördüncü fəsildə aparılan tədqiqatlar göstərmişdir ki, yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarının lazerlə emalı nəticəsində qatın həndəsi parametrləri, struktur və fiziki-mexaniki xassələri emal rejimlərindən, üst-üstə düşmə əmsalından və şüa parametrlərindən asılı olaraq dəyişir, bu işə yeyilmə davamlılığını əhəmiyyətli dərəcədə artırır və bəzi hallarda səthlərin özünü-bərpa etmə effektini təmin edir. Həm nəzəri, həm də eksperimental analizlər təsdiq etmişdir ki, lazer texnologiyası ənənəvi üsullarla müqayisədə qatın keyfiyyətinə, mikrogeometriyasına və davamlılıq göstəricilərinə daha dəqiq nəzarət imkanı verir və optimal rejimlər seçildikdə pretsizion hissələrin etibarlılığı əhəmiyyətli dərəcədə yüksəlir.

Bəşinci fəsildə aşağıdakı məsələlərə baxılmışdır: lazer təsiri zamanı faza–struktur dəyişikliklərinin gedişi; möhkəmləndirilmiş qatın mikrobərqliyi, qalıq gərginlikləri və tribotexniki göstəriciləri; üst-üstə düşmə əmsalının qatın strukturunun formalaşmasına təsiri və optimal intervalın seçilməsi; ilkin struktur və termiki emalın səthi qatın xüsusiyyətlərinə təsiri; lazer emalının kələ-kötürlüyə, həndəsi parametrlərə və mikrobərqlik paylanmasına təsiri. Beləliklə, fəsildə pretsizion qovşaqların etibarlılığının artırılması üçün lazer rejimlərinin seçilməsinə dair metodik əsas işlənmişdir.

Lazerlə səthi möhkəmliyi artırılmış qatın tribotexniki xüsusiyyətləri araşdırılmışdır. Sınaqlar göstərmişdir ki, ən yüksək

yeyilməyə qarşı davamlılıq lazer treklərinin optimal yerləşməsi ilə əldə olunur (Şəkil 10), bu zaman üst-üstə düşmə əmsalı $k = (0,5 \div 0,7) \cdot df$ intervalında olur. Sınaqların ilkin mərhələsində, dalğavarilik artır və sonrakı mərhələlərdə isə dalğavarilik sınaqların sonunadək qorunub saxlanılır. Üstəlik, lazer treklərinin yerləşmə addımı nə qədər böyükdürsə, əmələ gələn dalğavarilik da bir o qədər çox olur.

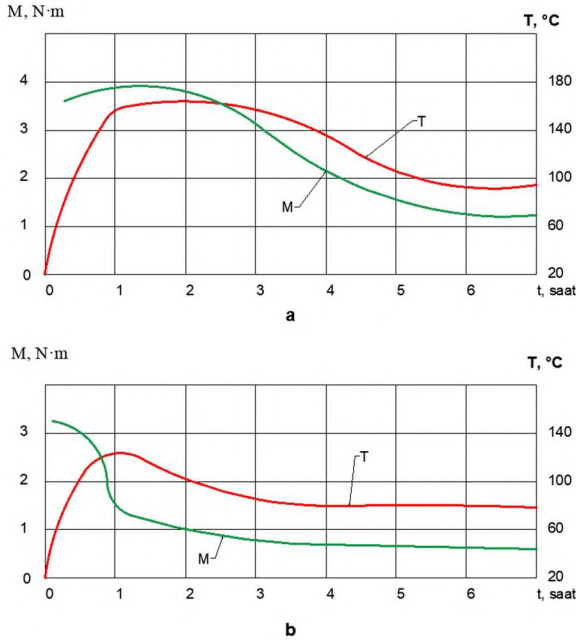


Şəkil 10. Sürtünmə maşınında “diyircək – kalodka” sxemi üzrə aparılmış sınaqlarda yükləmə dövrlərinin sayından asılı olaraq xətti (yeyilmənin dəyişməsi: 1 – yüksək tezlikli cərəyanla möhkəmləndirmə; 2 – treklərin üst-üstə düşmə əmsalı $k=0,3 \cdot df$ olduqda lazerlə emal; 3 – üst-üstə düşmə əmsalı $k=0,5 \div 0,7 \cdot df$ olduqda lazerlə emal.

Lazerlə səthi möhkəmliyin artırılması zamanı, digər termiki möhkəmləndirmə üsullarında olduğu kimi, qızdırılma mərhələsində austenit strukturu formalaşır və soyuma zamanı bu struktur martensitə çevrilir. Perlitin austenitə çevrilməsi, yavaş qızdırılmada olduğu kimi izotermik rejimdə deyil, A_{c1} -dən A_{c3} -ə qədər olan temperatur intervalında davamlı artan temperatur şəraitində baş verir.

Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin sürtünmə xüsusiyyətlərini öyrənmək üçün $P=700$, $d_n=1,6$ mm, $v=25$ mm/s və

üst-üstə düşmə əmsalı $K_n=0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3$ rejimlərində sınaqlar həyata keçirilmişdir. Məlum olmuşdur ki, həcmi möhkəmləndirilmiş diyircəklə olan sürtünmə cütündə (şəkil 11, a) sınaq prosesi yüksək sürtünmə momenti və sürtünən səthlərin yüksək temperaturu ilə xarakterizə olunur lakin lazerlə möhkəmləndirilmiş diyircəyin istifadəsi zamanı sınaq prosesi bir qədər fərqli şəkildə gedir (şəkil 11, b). Nəticədə ilkin dövrdə (sınaqların başlanmasından 40–50 dəqiqə sonra) sürtünmə momenti kəskin şəkildə azalır. Sınaq prosesinin ikinci dövrü sürtünmə momentinin daha da azalması ilə xarakterizə olunur və bu, aşağı bərkliyə malik səth sahələrinin yeyilməsi ilə bağlıdır.



Şəkil 11. Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin sürtünmə qüvvələrinin momenti (M) və səthin orta temperaturunun (T) sınaq müddətindən (t) asılılığı: a — həcmi möhkəmləndirilmiş diyircək ; b — lazerlə möhkəmləndirilmiş diyircək.

Lazerlə möhkəmləndirilmə zamanı üst-üstə düşmə əmsalı $K_n=2$ olduqda orta mikrobərklik 21,8 GPa təşkil etsə də, sərhədlərdə 12,4

GPa-a qədər azalır. $K_n=1$ şəraitində ikinci lazer zolağı əvvəlki sahədə ikincili zonaların yaranmasına səbəb olur və burada mikrobərklik əvvəlcə 11,8 GPa-a enir, sonra isə 12,1 GPa-a yüksəlir. Optimal rejim kimi $K_n=1,20\div 1,25$ diapazonu qəbul edilə bilər.

Aparılan təhlillər göstərir ki, müxtəlif sürtünmə və yeyilmə rejimlərində işləyən tribotexniki qovşaqlarda lazer termiki emalının rejimləri səthi qatın tribotexniki xüsusiyyətlərini həlledici dərəcədə formalaşdırır və pretsizion hissələrdə, xüsusilə plunjer və “plunjer–bolt itələyici” cütlərində antifriksion davranışı və yeyilməyə qarşı davamlılığı əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Lazer emalı nəticəsində formalaşan struktur və möhkəmləndirilmiş səthi qat plunjer və “plunjer–itələyici bolt” qovşaqlarında dağılma və yeyilməyə qarşı müqaviməti nəzərəcarpacaq dərəcədə yüksəldir; beləliklə, optimal lazer rejimlərinin seçimi pretsizion qovşaqların etibarlılığını məqsədyönlü şəkildə artırmaq üçün effektiv vasitə kimi əsaslandırılır.

NƏTİCƏLƏR

1. Yanacaq nasoslarının triboloji qovşaqlarında baş verən sıradan çıxma hallarının səbəbləri, xarakteri və yeyilmə növlərinin tədqiqi əsasında müəyyən edilmişdir ki, yanacaqda mövcud olan mexaniki qarışıqların təsiri ilə plunjer və ‘plunjer – bolt itələyici’ kontakt sahəsində baş verən abraziv, zərbə abraziv və mexaniki yeyilmənin və dağılmanın intensivliyini azaltmaq üçün presezion hissələrin səthlərində etibarlılığı təmin edən qat yaratmaq lazımdır. Bu, abraziv, zərbə abraziv və mexaniki yeyilmənin normal gediş sərhədlərini genişləndirir və yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrinin etibarlılığını əhəmiyyətli dərəcədə artırılması üçün şərait yaradır [2, 3, 5].

2. Yanacaq nasoslarının presezion hissələrinin səthinin möhkəmləndirilmə metodları, tribotexniki səthlərin tələb olunan fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərini və etibarlılığını təmin etmədiyi sübut edilmişdir. Yanacaq nasoslarının presezion hissələrinin işləmə qabiliyyətinin artırılması probleminin həlli üzrə aparılmış nəzəri və eksperimental tədqiqatlar nəticəsində lazerlə səthi möhkəmliyin

artırılması tətbiqinin yanacaq nasoslarının tribotexniki cütlərinin səthinin möhkəmləndirilməsi üçün yeganə effektiv metod olduğu elmi əsaslarla işlənib hazırlanmışdır. Yanacaq nasoslarının pretsizion hissələrin (XBG, IIIX15, 25X5MA və P18) möhkəmləndirilməsi üçün işə lazerlə səthin möhkəmləndirmə üsulunun tətbiqi əsaslandırılmışdır [4, 7, 14, 15].

3. Yanacaq nasoslarının pretsizion qovşaqlarının hissələrinin səthində yüksək tribotexniki xüsusiyyətlərə malik səth qatlarının formalaşdırılmasını təmin edən lazer texnologiyası işlənib hazırlanması üçün zəruri analizlər və tədqiqat aparılmışdır [6, 11, 12].

4. Lazer emalı texnologiyasının rejimlərinin tribotexniki qovşaqlarının səthlərin mikrohəndəsəsinə təsiri öyrənilmişdir. Lazer emal texnologiyasının yüksək tribotexniki xüsusiyyətlərə malik və $R_a = 0,63 - 1,25$ mkm səthlər yaratmaqla finiş əməliyyatı kimi tətbiq olunma imkanları əsaslandırılmışdır [8, 10, 14].

5. Müxtəlif növ yeyilməyə davamlı lazer emalının texnoloji parametrləri, materialın ilkin vəziyyətindən asılı olaraq və istismar göstəricilərini nəzərə alaraq, əvvəlcədən müəyyən edilmiş fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərə malik qat strukturlarının məqsədyönlü şəkildə formalaşdırılmasını eksperimental yolla almaq olar [13 - 15].

6. Səth qatının kəsiyinin bərk faza ilə dolma dərəcəsini nəzərə alan və onun həcm xarakteristikalarını əks etdirən qatın doldurulma əmsalı K_c və üst-üstə düşmə əmsalı parametri təklif olunmuşdur. Lazer izlərinin həndəsi parametrlərindən asılı olaraq optimal üst-üstə düşmə əmsallarının seçilməsi təqdim edilmişdir [5, 9, 10].

7. Yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarının hissələri üçün ən səmərəli lazer texnologiyası emal rejimi, $K_n = 1,20-1,25$ olan üst-üstə düşmə əmsalı ilə həyata keçirilən üst-üstə düşmə əmsalının qiyməti, səth möhkəmləndirilməsində səthin yüksək yeyilməyə davamlılığını və antifriksion xüsusiyyətlərini araşdırmaqla etibarlığını təmin edir [5, 9, 10].

8. Məlumdur ki, yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarında, plunjer abraziv, mexaniki yeyilməyə, 'plunjer-bolt itələyici' ilə zərbə abraziv yeyilməyə məruz qalır. Bu səthlərdə lazer texnologiyası ilə emal zamanı maksimum yeyilməyə davamlılıq, səthin bərk faza ilə doldurma əmsalının (K_c) maksimal qiymətlərinə

uyğun gələn üst-üstə düşmə əmsalları zamanı müşahidə olunur [14, 15].

9. Müəyyən edilmişdir ki, lazerlə səthi möhkəmləndirmədən sonra yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarının səthi bərkliyi, seriya istehsalı hissələrin bərklik göstəricisinə nisbətən 1,5–3,5 dəfə artır. Bununla yanaşı, preseziyon hissələrin lazerlə səthi möhkəmləndirilməsi, onları nadir tapılan, bahalı və yüksəl legirli alət poladları əvəzinə mövcud materialın səth möhkəmləyini artırmaqla istifadə etməyə imkan verir. Lazerlə səthi möhkəmləndirilmiş tribotexniki cütləri, abraziv və zərbə abraziv yeyilməyə qarşı yüksək davamlılıq göstərir və preseziyon hissələrin sürtünmə əmsalı 0,10...0,11 diapazonunda olur. Sürətləndirilmiş stend sınaqları göstərmişdir ki, lazerlə səthi möhkəmləndirmə ilə səthi möhkəmliyi artırılmış plunjer və “plunjer–itələyici bolt” cütləri ilə təchiz olunmuş yanacaq nasosları, standart hissələrlə müqayisədə təxminən iki dəfə artıq istismar resursuna malikdir [1, 16].

10. Yanacaq nasoslarının tribotexniki qovşaqlarının presizion hissələrinin vakuumda lazerlə səthi möhkəmləndirilməsi üçün işlənib hazırlanmış texnoloji proses, “NeftQazMaş” zavodu tərəfindən istehsalatda tətbiq tövsiyə edilmişdir. Hesablamalar göstərir ki, vakuum mühitində lazerlə səthi möhkəmləndirilmə ilə yanacaq nasoslarının preseziyon hissələrinin səthi möhkəmləndirmə texnologiyasının tətbiqi əhəmiyyətli iqtisadi səmərə verir [1, 11, 16].

Dissertasiyanın əsas məzmunu aşağıdakı işlərdə çap olunub:

1. Vakuum elektrik sobası. İxtira. No: a 2023 0076. Hüseynov Ə.G ., Abbasov V.A., Əsədov Ş.N., Kərimov A.F., Hüseynli F.S. AzPatent, -2023

2. Hüseynov Ə., Hüseynli F., Mustafayev N. Presizion hissələrin lazerlə bərkliyinin artırılması və bərpası məqsədi ilə etibarlılığı // “Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar” mövzusunda IX Respublika elmi-texniki konfransı (Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr olunmuş tələbə və gənc tədqiqatçılar), Bakı, 2024. — s. 1104–1107.

3. Hüseynov Ə., Hüseynli F., Mustafayev N. Yanacaq nasoslarının presizion cütlərinin istismar müddətində daxilindəki proseslər // “Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar” mövzusunda IX Respublika elmi-texniki konfransı (Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr olunmuş tələbə və gənc tədqiqatçılar), Bakı, 2024. — s. 1048–1051.

4. Huseynov A.G., Huseynli F.S., Safarov M.R. Justification of Increasing the Durability and Productivity of Precision Parts Using Laser Method // Journal of Baku Engineering University – Mechanical and Industrial Engineering. — 2024. — 8(2), s. 87–93. — DOI: 10.30546/09090.2024.02.309. — UOT: 621.793:621.785.

5. Huseynli F.S. Critical Thickness of Precision Parts Hardened by Laser Method // VI International Turkic World Congress on Science and Engineering (Book of Proceedings-I), 19–21 December 2024, Azerbaijan Technical University, Baku. — s. 1285–1291. — ISBN 978-975-8062-55-3.

6. Hüseynov Ə. G., Əsədov Ş. N., Hüseynli F. S. Tribologiyanın əsasları / Bakı: KİNGPRINT, 2024. – 262 s.

7. Huseynov A., Huseynli F. Justification of Increasing the Performance of Machine Parts and Equipment Using Laser Method // Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Elmi xəbərlər məcmuəsi (Texniki elmlər). — № 2/2025. — s. 74–79. — DOI: 10.30546/JIECM.2025.025.3174. — UOT: 621.904; 621.43.038

8. Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M. Selection of Grinding Wheels for the Machining of Precision Parts with Increased Surface Hardness by Laser // Universum: Технические науки. — 2025. — № 3(132), s. 48–53. — DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.3.19439.

9. Huseynov A., Huseynli F. Optimal Design of the Friction Surface Profile of a Plunger and Barrel Pair with Laser-Hardened Surface // Universum: Технические науки. — 2025. — № 5(134), s. 41–44. — DOI: 10.32743/UniTech.2025.134.5.20163.

10. Huseynli F. Displacements Caused by the Wear of the Surface of a Laser-Treated Barrel // XX International Scientific and Practical Conference “Innovative Scientific Research: Latest Theories, Modern

Methods and Practices”, Seville, Spain, 20–23 May 2025. — s. 261–263. — ISBN 979-8-89692-711-2. — DOI: 10.46299/ISG.2025.1.20.

11. Nazarov I., Bagiyev E., Safarov M., Huseynli F. Yanacaq nasoslarının presizion detallarının lazerlə vakuumda parofaz metodu ilə səthin möhkəmliyinin artırılmasında və bərpasında qalıq gərginlikləri // “Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar” mövzusunda X Respublika elmi-texniki konfransı, Bakı, 2025. — s. 1829–1833.

12. Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M. Pretseziyon hissələrin lazerlə vakuumda nanodiffuziya örtükçəkmə zamanı istilik gərginlikləri // “Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar” mövzusunda X Respublika elmi-texniki konfransı, Bakı, 2025. — s. 2020–2025.

13. Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M. Determination of Deformation and Machining Allowance of Precision Parts Hardened by Laser Method // RT&A – Reliability: Theory & Applications. — 2025. — Vol. 20, Special Issue No. 7(83), s. 379–385.

14. Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M. Challenges of Property Inheritance During the Technological Processing of Fuel Pump Precision Parts // Tribologia – Finnish Journal of Tribology. — 2025. — 42(1–2), s. 72–79. — DOI: 10.30678/fjt.160975.

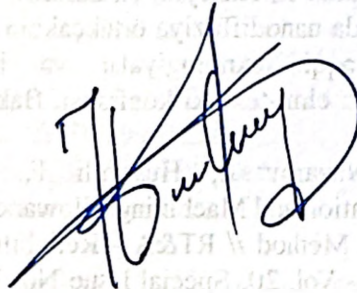
15. Huseynov A., Huseynli F., Safarov M. Reliability Prediction of Precision Parts of Fuel Pumps with Enhanced Surface Hardness Achieved Through Laser Technology // Tribologia – Finnish Journal of Tribology. — 2025. — 42(1–2), s. 64–71. — DOI: 10.30678/fjt.152491.

16. Vakuumda lazerlə diffuziya metallaşdırması üsulu. İxtira. No: İ 2025 0055. Hüseynov Ə.G., Abbasov V.A., Əsədov Ş.N., Kərimov A.F., Hüseynli F.S.: AzPatent, – 05.06.2025.

Çap olunmuş əsərlərdə müəllifin şəxsi iştirakı:
[1-4, 6, 7, 9, 12, 16] işlərində müəllif məsələnin qoyuluşunu formalaşdırmış, həll üsulu təklif etmiş, nəticələrin doğruluğunun yoxlanılmasında iştirak etmişdir.

[7, 8, 11, 13-15] sayılı işlər müəlliflər eksperimentlərin aparılması və nəticələrin emalını yerinə yetirmişdir.

[5, 10] sayılı işlər müəllif tərəfindən müstəqil yerinə yetirilmişdir.



Dissertasiyanın müdafiəsi “31” oktyabr 2025-ci il tarixində saat 12⁰⁰ da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.09 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1073, Bakı, H.Cavid prospekti, 23, Azərbaycan Texniki Universiteti.

Dissertasiya ilə “Azərbaycan Texniki Universiteti” PHŞ-nin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları “Azərbaycan Texniki Universiteti” PHŞ-nin rəsmi internet saytında (www.aztu.edu.az) yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat “29” sentyabr 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 29.09.2025

Kağızın formatı: A5

Həcm:45699

Tiraj: 100