

Nodilumizturīgo nanostrukturēto jonu-plazmas pārklājumu fizikāli-mehānisko īpašību eksperimentālā pētīšana

Margarita Urbaha, Riga Technical University

Kopsavilkums. Darbā ir apskatītas dažādas izmēģinājumu metodes un līdzekļi, kurus autors pielietoja materiālu un detaļu nodilumizturīgo pārklājumu fizikāli-mehānisko īpašību novērtēšanai. Ir izskatītas pārklājumu radīšanas ar jonu plazmas uzsmidzināšanas un jonu implantācijas metodēm tehnoloģiskās īpatnības. Izmantojot skenējošo elektronu mikroskopu ar mikroanalizatoru tika analizēti iegūto pārklājumu mikrostrukturās un ķīmiskā sastāva eksperimentālo pētījumu rezultāti. Ir pamatoti izmēģinājumu režīmi un piedāvāti kritēriji pārklājumu nodilumizturības, pretierāvumu īpašību un pārklājumu materiāla piestrādājamības novērtēšanai. Atjaunoto detaļu nodilumizturības novērtēšanu ir piedāvāts īstenot pēc salīdzinošo ekspress-izmēģinājumu rezultātiem, nosakot atjaunotās un etalona virsmu, kuras izmēģina vienādos apstākļos, dilšanas intensitāšu attiecību. Darbā apskatītie mikrociētības mērīšanas līdzekļi un metodika ļauj novērtēt pamatmateriāla un pārklājumu kvalitāti. Uz iegūto elastīgi-plastiskās deformācijas diagrammu pamata tiek piedāvāts vērtēt dažāda tipa pārklājumu stiprību.

Atslēgas vārdi: nodilumizturīgie pārklājumi, pārklājumu fizikāli-mehānisko īpašību novērtēšana, pārklājumu kvalitātes novērtēšana.

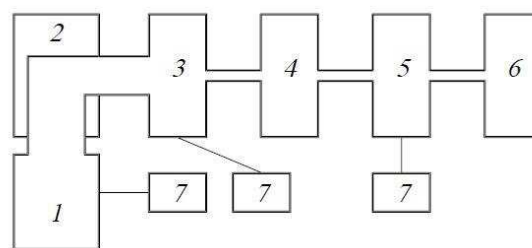
I. METĀLU JONU IMPLANTĀCIJAS EKSPERIMENTA TEHNIKA

Jonu implantācijas tehnoloģijā [1] tiek izmantoti separēti monoizotopu jonu kūļi. Salīdzinoši zemā materiālu apstrādes temperatūrā, pietiekami precīzā piemaisījumu sadalījuma dziļuma un profila kontrole, un procesa automatizācijas iespēja veicina jonu implantācijas tehnoloģijas pielietošanas izplatīšanu dažādās mūsdienu ražošanas jomās. Jonu implantācija ļauj kontrolēt apstarojuma dozas 1010...1019 joni/cm² robežās un nodrošina piemaisījumu sadalījuma nevienmērību 320 cm² laukumā ne vairāk par 1...2%.

Jonu implantāciju metālos [1] pielieto to virsmas īpašību mainīšanai: cietības, nodilumizturības, korozijas un radiācijas pretestības palielināšanai; pretestības pret noguruma sagrūšanu palielināšanai; berzes koeficienta samazināšanai; ķīmisko, optisko un citu īpašību ietekmēšanai. Lai palielinātu nodiluma pretestību, visbiežāk tiek izmantoti N⁺, B⁺, C⁺, Ti⁺ jonu implantācija, pēc kā detaļu ilgmūžība palielinās 2-10 reizēs.

Jonu implantācijas iekārta (1.att.) sastāv no: jonu avota, ekstrāģējošās un fokusējošās jonu optikas, paātrināšanas sistēmas, masas separatora, jonu kūļa skanēšanas iekārtas, barošanas avota, uztveršanas kameras, vakuuma sistēmas,

tehnoloģisko procesu kontroles un vadības iekārtas. Implantējamā piemaisījuma atomus ievada jonu avotā vai nu gāzveida stāvoklī, vai arī ar šķidrums vai cietas vielas iztvaikošanu. Jonu avotā tie jonizējas un ar elektroniskā potenciāla palīdzību tiek ievilkti paātrinātājā, kur tie iegūst nepieciešamo enerģiju.



1. att. Jonu implantācijas iekārtas shēma:

1 – jonu avots, 2 – masas separatora, 3 – fokusēšanas sistēma, 4 – jonu paātrināšanas sistēma, 5 – skanēšanas sistēma, 6 – pieņemšanas kamera, 7 – vakuumsūkņi

Eksistē vairāki jonu avotu veidi: avoti ar karstu, aukstu vai dobu katodu; duoplazmatroni; avoti ar AF vai SAF ierosmi; ar virsmas jonizāciju. Vairākvērtīgu (divvērtīgu vai trīsvērtīgu) jonu iegūšanai tiek izmantots loka avots ar netiešās kvēles katodu.

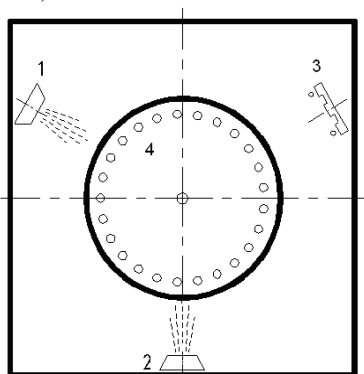
Jonu paātrinātājs ir paredzēts jonu nepieciešamā enerģijas blīvuma iegūšanai un kūļa fokusēšanai tā kustības laikā gar paātrinātāju. Tas var tikt izvietots gan pirms, gan pēc masas separatora. Pēdējais tiek lietots, lai atdalītu implantējamos jonus no citām vielām, kuru klātbūtne rodas, formējoties kūlim jonu avotā, t.i., lai radītu monoizotopu jonu kūli.

Jonu kūļa skanēšanas iekārta virza fokusēto jonu staru uz vajadzīgo detaļas vietu pēc noteiktās programmas. Jonu implantācijas iekārtās izmanto trīs skanēšanas veidus: mehānisko, elektrostatisko un kombinēto. Pie mehāniskās skanēšanas jonu stars nepārvietojas perpendikulārā pret tā kustību virzienā, bet pārvietojas detaļa attiecībā pret staru divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Pie elektrostatiskās skanēšanas paātrinātais jonu stars novirzās no sava kustības virziena ar novirzošo elektrodu potenciāla palīdzību.

Pieņemšanas kamera kalpo apstrādājamo izstrādājumu ievietošanai, fiksācijai, pārvietošanai leģēšanas laikā un izkraušanai. Jonu implantācijas iekārtu vakuumsistēmas tiek būvētas kā uz eļļas (izmantojot difūzijas sūkņus), tā arī uz bezēļas (turbomolekulāro vai kriogēno) sūkņu bāzes.

II. JONU -PLAZMAS UZPUTINĀŠANAS EKSPERIMENTA TEHNIKA

Pētījumi ir veikti uz modificētas vakuuma iekārtas «HHB-6.6-И1» bāzes [1], kuras konstrukcijā viena no triju esošo elektroloka iztvaicētāju vietā ir paredzēts planārais magnetrons (2.att.).



2. att. Iztvaicētāju atrašanās vietu shēma uz modificētas vakuuma iekārtas: 1, 2 – elektroloka iztvaicētāji; 3 – magnetrons; 4 – rotējošs darba galds

Jonu plazmas vakuuma iekārta «HHB-6.6-И1» ir paredzēta dažāda tipa vienslāņu un daudzslāņu pārklājumu uzklāšanai uz izstrādājumiem, kuru diametrs nepārsniedz 200 mm un gabarīta izmērs nepārsniedz 250 mm. Vakuuma iekārtas darbības princips ir pazīstams kā kondensācijas un bombardēšanas princips. Viens no metodes būtiskajiem trūkumiem ir pilienu fāzes esība; pārāk „lielas” daļiņas no pamatplūsmas tiek atdalītas ar fokusējošas spoles magnētiskā lauka palīdzību. Izsmidzināto daļiņu plūsma transformējas virpulī un aizgriežas, jonizētās daļiņas izvietojas tuvāk plūsmas asij, bet smagākās daļiņas centrālās spēka dēļ tiek aiznestas perifērijā, nemaz nerasniedzot pamatni.

Tātad katoda pakāpeniskās iztvaicēšanas un iztvaicējamā materiāla daļiņu noteiktās ievirzes kustības rezultātā notiek pārklājuma veidošana uz pamatnes. Mainot iztvaicētāja stāva lielumu, spriegumu uz pamatnes un ieplūstošās gāzes spiedienu ir iespējams kontrolēt procesa intensitāti un iegūt pārklājumus ar atbilstošām īpašībām.

Tā kā vakuuma iekārtai «HHB-6.6-И1» ir trīs iztvaicētāji, ir iespējams veidot dažāda tipa un kombināciju daudzslāņu pārklājumus. Piemēram, viens no iztvaicējamajiem katodiem var būt sakausējums, bet divi citi – dažādi metāli. Atkarība no mērķa, mainot katodu materiālus un iztvaicēšanas secību, intensitāti un ilgumu, ir iespējams sasniegt nepieciešamo rezultātu. Gadījumā, ja visi katodi ir izgatavoti no viena un tā paša materiāla, iztvaicējot no trim avotiem, ir iespējams vienkārši intensificēt procesu un samazināt uzsmidzināšanas

laiku. Ir jāpiemin, ka, veidojot pārklājumus ar minētās iekārtas palīdzību, iespēju spektrs ir diezgan plašs, un ir iespējams veidot dažāda tipa un struktūras aizsargpārklājumus.

Izmantotajai vakuuma iekārtai viena izsmidzinātāja vietā ir uzstādīts magnetrons. Magnetronu izsmidzināšanas sistēmu darbības princips atšķiras no iztvaicētāju darbības principa un metodei ir savas būtiskas priekšrocības; modernizācijas rezultāta metožu priekšrocības apvienojas, un, protams, iekārtas universālums palielinās.

Veidojot aizsargplēves ar magnetronu, to pamatpriekšrocības ir liels pārklājuma uzklāšanas ātrums un izsmidzināmā materiāla sastāva atkarojamības precizitāte. Izsmidzinot ar magnetronu, ir iespējams veidot praktiski jebkuru metālu un sakausējumu pārklājumus. Atkarība no darba atmosfēras sastāva, ir iespējams veidot dažādu materiālu oksīdu, nitrīdu, karbīdu un sulfīdu plēves, tai skaitā tādas plēves, kurus nav iespējams iegūt, pielietojot termiskās iztvaicēšanas metodi.

Izsmidzinot ar magnetronu, kondensācijas ātrums ir atkarīgs no izlādes strāvas spēka vai jaudas un darba gāzes spiediena; šis parametrs magnetronam ir zemāks nekā elektroloka izsmidzinātājam, tomēr dažādiem metāliem izsmidzināšanas ātrums ir diezgan liels, piemēram, Cu, Zn, Au, Ag. Atkarība no elektroloka iztvaicētāja, uzsmidzinot ar magnetronu, pilienu fāze netiek konstatēta, izsmidzināmās daļiņas ir metāla joni un neitrālie atomi, kas ir būtiska priekšrocība uzsmidzinot aizsargpārklājumus. Uzsmidzinot ar magnetronu, jonizācijas pakāpe ir zemāka nekā termiskās iztvaicēšanas gadījumā.

III. MATERIĀLU UN PĀRKLĀJUMU MIKROSTRUKTŪRAS UN ĶĪMISKĀ SASTĀVA PĒTĪŠANAS IEKĀRTAS UN METODIKA

Lai veiktu izveidoto pārklājumu mikrostruktūras un to ķīmiskā sastāva pētījumus, darbā tika izmantots skenējošais elektronu mikroskops SEM HITACHI – S3000N (izšķirtspēja – 3.5nm; palielinājums – līdz 300000) ar mikroanalizatoru Bruker Quantax (3.att.).



3.att. Mikroskopa SEM HITACHI S3000N ar mikroanalizatoru Bruker Quantax kopējais skats

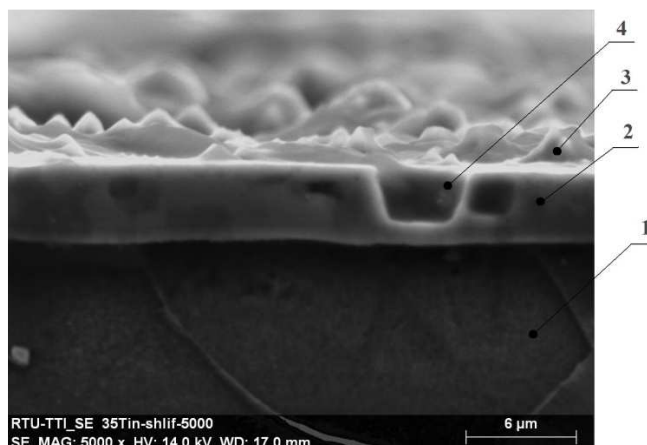
Skenējošais elektronu mikroskops SEM HITACHI S3000N ir paredzēts cietu ķermeņu virsmas pētīšanai ar elektronu zondes palīdzību.

Mikroskops sastāv no kolonnas ar paraugu kameru, informācijas vākšanas un datorvadības sistēmas, vakuuma, ūdens un gaisa sistēmām.

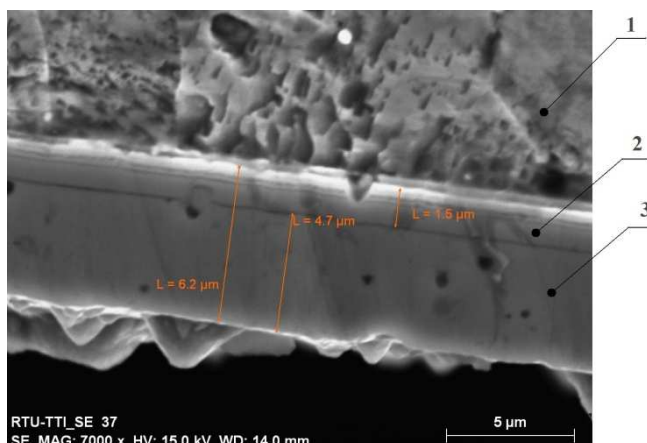
Mikroskopa darbības princips balstās uz augstas enerģijas elektronu kūļa izmantošanu kā attēla iegūšanas instrumentu. Elektronu avots ir vakuumā sakarsējams V-veida volframa katods, kam tiek padots līdz 30 kV augstspriegums. Zem katoda noteiktā attālumā ir izvietots anods, kurš ir savienots ar mikroskopa kolonnas paātrinātāja sprieguma formēšanai pētāmā objekta virzienā. Emitētie elektroni paātrinās ar iegūtā elektrostatiskā lauka palīdzību. Elektromagnētisko lēcu un kolonnas diafragmu sistēma formē plānu, pietiekami homogenu pēc savām enerģētiskām un viļņu īpašībām elektronu zondi ar noteiktajiem strāvas un ģeometriskajiem raksturojumiem. Ar speciālu novirzošo elektromagnētisko spoļu palīdzību iegūtais kūlis pārvietojas (skenēšana) pa pētāmā objekta virsmu. Nokļūstot uz analizējamās virsmas, viss elektronu kūlis sadalās atstarotajos un absorbētajos elektronus, bez tam uz virsmā inducējas sekundārie elektroni un rentgena starojums. Parasti elektronu-mikroskopiskā attēla formēšanai tiek izmantoti sekundārie un atstarotie elektroni, kurus uztver speciāls detektors. Signāls no detektora pēc pastiprināšanas un speciālas apstrādes modulē attēla elementa lokālo spilgtuma uz datora displeja. Katram displeja punktam atbilst punkts uz parauga virsmas. Mikroskopa elektronu optiskais palielinājums ir vienāds ar displeja ekrāna laukuma attiecību pret skenējoša stara laukumu uz pētāmās virsmas un tiek regulēts ar signāla amplitūdas izmaiņu mikroskopa novirzes sistēmā, un tas svārstās robežās 5-300000. Attēla kontrastu nodrošina virsmas apgabala ķīmiskā sastāva, elektrisko īpašību un topogrāfijas nevienmērīgums (4.att.). Mikroskops ļauj arī ar augstu precizitāti noteikt daudzslāņu nanostrukturēta pārklājuma biezumu (5.att.).

Vakuuma sistēma, kura sastāv no diviem pirmsvakuuma un viena difūzijas sūkņiem un pneimovārstu sistēmas, nodrošina mikroskopā augstu vakuuma pakāpi un atsūkņēšanas sadali, izmantojot zema vakuuma režīmu, izmantojot speciālas pētniecības metodes. Ūdens sistēma nodrošina difūzijas sūkņa dzesēšanu.

Bruker Quantax mikrorentgenspektrālās energodispersijas analīzes sistēma ir paredzēta virsmas daļas ķīmiskā sastāva noteikšanai, pētot to ar mikroskopa palīdzību (6.att.) uz rentgena starojuma, kuru indicē elektronu stars, detektēšanas, apstrādes un sekojošās datoranalīzes pamata. Rentgenspektrālās analīzes sistēma sastāv no rentgena starojuma detektora, signāla sakopošanas un apstrādes bloka, un interfeisa - saites ar mikroskopu nodrošināšanai un mikroskopa vadīšanai.

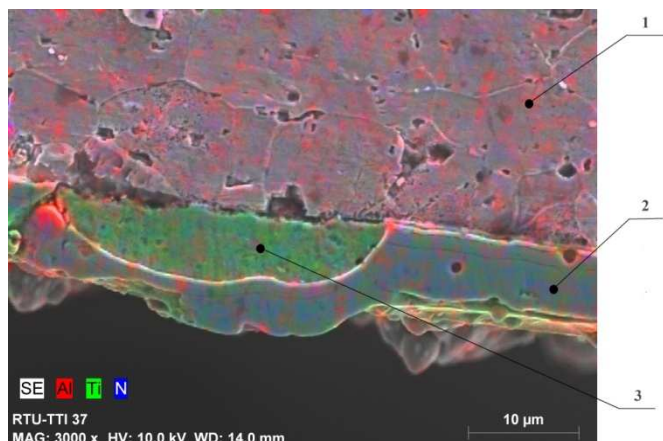


4. att. Parauga ar jonu plazmas pārklājumu virsmas daļas topogrāfija: 1 – pamatmateriāls; 2 – pārklājums; 3 – pārklājuma virsmas mikronelidzumi; 4 – pārklājuma defekts



5.att.Daudzslāņu nanostrukturēta pārklājuma biezuma noteikšanas rezultāti: 1-pamatmateriāls; 2 – pārklājuma pirmais slānis; 3 – pārklājuma otrais slānis

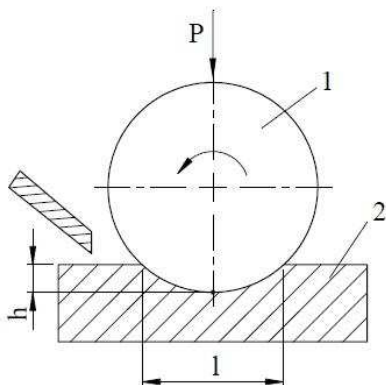
Rentgena starojuma detektors satver rentgena kvantus, pārveido to enerģiju elektriskās strāvas impulsos un pārsūta tos uz signāla sakopošanas un apstrādes bloku, izveido lineāro spektru, kurš tiek apstrādāts ar datorprogrammu un tiek atainots uz datora monitora. Rentgena starojuma kvantiem, kuri nāk no parauga, piemīt dažāda enerģija, kura ir atkarīga no atomskaitļa un vielas atomu uzbūves. Galvenās raksturīgās starojuma, kurš piemīt konkrētam ķīmiskām elementam, spektrālās līnijas tiek dēvētas par K, L, M sērijām. Viss rentgena starojuma spektrs satur pilnu rentgena līniju, kuras ir raksturīgas pētāmajam paraugam, kopumu. Quantax Software ļauj veikt kvalitatīvo un kvantitatīvo analīzi, atainot informāciju diagrammu, tabulu, attēlu rentgena staros utt. veidā, kā arī sastādīt pētījumu atskaites. Spektrālo analīzi veic vai nu izvēlētajai zonai kopumā, vai arī pēc punktiem vai līnijām. Bez tam var veikt kā atsevišķu elementu, tā arī to kopuma attēla kartēšanas veidošanu rentgena staros.



6.att. Materiāla parauga ar pārklājumu mikrorentgenspektrālās ķīmiskā sastāva analīzes rezultāti: 1 - pamatmateriāls; 2 - pārklājums; 3 - pārklājuma defekts («pilienu fāzes» veidošanās)

IV. PĀRKLĀJUMA VIRSMAS DILSTAMĪBAS SPĒJAS BERZES REZULTĀTĀ EKSPERIMENTĀLĀ NOVĒRTĒŠANA

Pārklājuma dilstamības spējas izmēģināšanas shēma ir atspoguļota 7.attēlā.



7.att Cilindrisko paraugu pārklājumu virsmas dilstamības spējas izmēģināšanas shēma

Cilindriskā rotējošā paraugs-rullītis 1 no izmēģināmā materiāla ar savu radiālo virsmu deldē nekustīga parauga-etalona 2 plakano virsmu (7. att.). Berzes zonā no pilinātāja tiek padota smērviela. Izmēģinājuma procesā mēra plakana parauga un rullīša ass relatīvo tuvināšanos h , bet virsmas dilstamības spējas kritērijs ir dilšanas intensitātes atkarība no spiediena. Izmēģinājumu nosacījumi ir apkopoti 1. tabulā.

1. TABULA

PARAUGU AR PĀRKLĀJUMU BERZES IZMĒĢINĀJUMU NOSACĪJUMI

| Parametrs | Parametra vērtība |
|---|-------------------|
| Cilindriskā parauga rotācijas frekvence, min^{-1} | 100 ± 5 |
| Rullīša piespiešanas spēks F pie etalonparauga, N | 98.1 ± 1.96 |
| Rullīša ass un etalonparauga darba virsmas novirze no paralelītātes, mm, ne vairāk kā | 0.1 |
| Smērvielas padeves ātrums berzes zonā, | |

| | |
|---|----------------------|
| pilienu/min | 40 ± 5 |
| Izmēģināmais paraugs-rullītis: | |
| materiāla cietība, HV, vairāk par | 30 |
| rullīša veidules sitienu rotējot, mm, ne vairāk par | 0.01 |
| Etalonparaugs: | |
| materiāls | Presēta fotoplate-4 |
| augstums, mm | 7 ... 10 |
| Smērviela | Industriālā eļļa I20 |

Rullīti pieslīpē pēc etalonparauga 30 minūtes ar slodzi 98.1 ± 1.96 N. Novieto jaunu etalonparaugu, piespiež pie tā rullīti ar spēku 100 N un iztur zem slodzes 3 minūtes. Rullītim uzdod rotējošu kustību ar noteiktu frekvenci un secīgi reģistrē rullīša ass pārvietojuma pieaugumu hi attiecībā pret plakano paraugu. Izmēģinājumu procesā netiek pieļauta rullīša rotēšanas pārtraukšana. Izmēģinājumos dilšanas un nepārtraukta kontakta laukuma palielinājuma rezultātā notiek monotons spiediena samazinājums, ko ir nepieciešams ņemt vērā [2].

Kontakta virsmas laukums A_c ir saistīts ar rullīša diametru r , platumu b un rievas dziļumu h sekojošā tuvinātā attiecībā:

$$A_c = b\sqrt{8rh}.$$

Spiediens p ar laukumu A_c ir saistīts sekojoši:

$$p = F / A_c.$$

Dilšanas intensitāte tiek aproksimēta ar sakarību:

$$I = C(p - p_k),$$

kur C – koeficients; p_k – spiediena vērtība, pie kuras dilšana praktiski izbeidzas.

V. PĀRKLĀJUMA VIRSMAS PRETIERĀVUMU ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANA

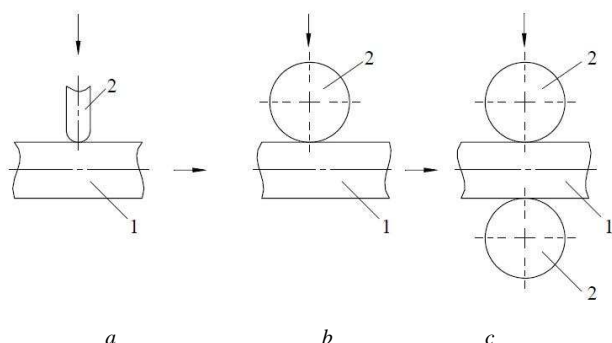
Esošie standarti nosaka sekojošas trīs izmēģinājumu metodes (8.att.):

a) Smērvielu robežslāņu nestspējas novērtēšana. Uz izmēģināmo paraugu 1 uzklāj pētāmo smērvielu, pa tā virsmu pārvieto sfērisku indentoru 2 ar slodzi, kas palielinās līdz ar tā pārvietošanos, reģistrē berzes spēku un indentora iespiešanās dziļumu, pēc kuru vērtības berzes spēka lēcienveidīga palielinājuma brīdī novērtē smērvielu robežslāņu nestspēju. Šī metode neizplatās uz materiāliem, kuru cietība pārsniedz 50 HRC;

b) metālisko materiālu izturību pret ierāvumiem novērtē pēc to nostiprināšanās pakāpes ierāvumu veidošanās procesā. Paraugu 1 un darba paraugu 2 no izmēģināmiem materiāliem piespiež vienu pie otra ar slodzi, kas palielinās līdz ar pārvietošanos, un bīda vienu attiecībā pret otru līdz rodas iesprūšana, reģistrējot attiecīgu berzes spēku. Mēra virsmu bojājuma ģeometriskus raksturlielumus un iesprūšanas laikā

deformēto berzes virsmu laukumu mikrocietību, pēc kuru vērtībām nosaka materiālu izturību pret ierāvumiem;

c) metālisko materiālu sasaistīšanas izturības novērtēšana. Diviem pretēji izvietotiem rullīšiem- darba paraugiem 2 ar paralēli izvietotām asīm un starp tiem esošam cilindriskam paraugam 1 ar asi, kas ir perpendikulāra rullīšu asu plaknei, uzdod relatīvu pārvietošanos rullīšu asu plaknes normāles virzienā. Vienlaicīgi līdz ar pārvietošanos palielina rullīšu piespiešanas spēku pie parauga un to pagriežiena leņķi, mēra pārvietošanās spēku un virsmu mikroģeometrijas raksturlielumus, pēc kuriem nosaka materiālu sasaistīšanas izturību.



8.att. Izmēģinājumu shēmas materiālu pretierāvumu īpašību novērtēšanai

Parauga un darba parauga relatīva pārvietošanās notiek ne vairāk kā 50 mm garumā ar ātrumu, kas nepārsniedz 100 mm/apgr.; paraugu piespiešana ar spēku līdz 2943 N pie parauga pārvietošanas monotona pieauguma ātruma ne vairāk par 59 N/mm; darba parauga -rullīša pagriešanās (virzes relatīvas pārvietošanās) ātrums 3.5°/mm.

Cilindriskus paraugus veido ar diametru 16 mm [1].

Izmēģinājumu aparātu uzstāda uz pārraušanas mašīnas kustīgās traversas.

Veicot izmēģinājumus pēc metodes a): uz parauga darba virsmu uzklāj pētāmo smērvielu un iztur 2...4 h. Uz deformēta parauga laukuma tiešā tuvumā no ieskrāpējumu pirmām zīmēm ar profilografēšanas palīdzību mēra iespiestas rievas dziļumu: no sānu izciļņu virsotnēm līdz rievas dibenam diapazonā 5...100 μm ar kļūdu ne vairāk par 5%. Nestspējas mērs ir deformācija (iespiešanas dziļuma attiecība pret indentora rādiusu), pie kuras notiek eļļošanas robežslāņa vienlaidības lavīnveida sabrukums.

Veicot izmēģinājumus pēc metodes b): darba paraugu balstos ievieto rullīšus no pētāmā savienojuma cietākā materiāla, cieti fiksējot to stāvokli balstos.

Darba laukuma robežās šķērsvirzienā noņem virsmas profilogrammas. Mēra sekojošus parametrus: vilkšanas spēku F_i un uz paraugiem darbojošos slodzes N_i darba laukuma robežās; ieskrāpējumu šķērsgriezuma laukumu A_i , kas ierobežots ar parauga virsmas profilu un mikronelīdzenumu vidējo līniju, kas ir novilkta profila virsmas laukumā bez ierāvuma; mikronelīdzenumu sākotnējo virsmu, kas ir novilkta

profila virsmas laukumā bez ierāvuma; sākotnējo mikrocietību H_{00} uz parauga virsmas laukumiem ārpus berzes virsmas un beigu H_{01} uz punu virsmas. Punu mikrocietības atkārtoto mērtījumu skaits nepārsniedz 50.

Pretierāvumu izturības kritēriji ir sekojoši:

- berzes nostiprināšanās rādītājs $\psi = H_{01} / H_{00}$;
- materiāla berzes stabilitātes rādītājs:

$$\chi_r = \frac{H_{01}}{f_{in}} \cdot \frac{A_{in}}{N_{in}}$$

kur f_{in} ir materiāla berzes koeficients.

Veicot izmēģinājumus pēc metodes c): darba paraugu balstos ievieto rullīšus no pētāmā savienojuma cietākā materiāla, bet paraugā – balstā – cilindiskus paraugus. Pēc vilkšanas spēku maksimālām vērtībām nosaka vilkšanas spēka lineāru atkarību no slodzes pēc mazāko kvadrātu metodes.

VI. ATJAUNOTU PLUNŽERU VIRSMAS DILSTAMĪBAS SPĒJAS NOVĒRTĒŠANA

Pie uzdotiem izmēģinājumu nosacījumiem ar atjaunota plunžera cilindrisku virsmu deldē paraugu virsmas, kas ir veidotas no etalona materiāla. Noteiktam berzes ceļam nosaka etalonparaugu vidējo lineāro nodilumu, pēc kura novērtē plunžera dilstamības spēju.

Pie izmēģināmā plunžera piespiež darba paraugus 2 no etalona materiāla un balsta paraugu 3, arī no etalona materiāla (9. att.). Visi paraugi ir nostiprināti turētajos 4, kas ir ievietoti skavā 5. Smērvielu padod berzes zonā no eļļnīcas 6. Skavu 5 no iegriešanas aptur atbalsts 7. Slodzi uz balsta rullīšiem veido atspere 8. Izmēģinājumu nosacījumi ir apkopoti 2. tabulā

2.TABULA

PLUNŽERU AR PĀRKLĀJUMU DILSTAMĪBAS SPĒJAS IZMĒĢINĀJUMU NOSACĪJUMI

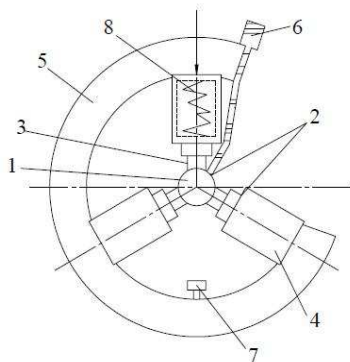
| Parametrs | Parametra vērtība |
|--|-----------------------|
| Slīdes ātrums, m/s | 0.2 ... 0.3 |
| Slodze uz katru paraugu, N | 98.2 ± 1.96 |
| Smērvielas padeves ātrums, pilieni/min | 40 ± 10 |
| Smērviela | Industriāla eļļa I20A |
| Paraugu darba virsma: | |
| izmēri, mm | 5x4 |
| raupjuma parametri Ra, μm, ne vairāk par | 0.6 |
| Etalona materiāls | Presēta fotoplate-4 |

Parauga dilšanas intensitāti nosaka pēc formulas:

$$I = \frac{h}{L} \cdot \frac{\Delta m}{2\pi R n A \gamma}, \quad (1)$$

kur h - parauga-sprūda nodilušais slānis pēc n apgriezieniem (tiek pieņemts vienmērīgs visai parauga-sprūda berzes virsmai); Δm - parauga masas zudums pēc n apgriezieniem;

$L=2\pi Rn$ - berzes ceļš n apgriezieniem; R - plunžera rādiuss; A - nomināla kontakta virsma; γ - parauga-sprūda materiāla blīvums.



9.att. Paraugu izmēģinājumu shēma atjaunoto plunžeru berzes virsmas dilstamības spējas novērtēšanai

VII. ATJAUNOTU DETAĻU NODILUMIZTURĪBAS NOVĒRTĒŠANA

Esošie standarti nosaka sekojošas četras nodilumizturības novērtēšanas metodes:

1. Salīdzinošie ekspress-izmēģinājumi, kuru laikā nosaka pētāmās (atjaunotās) un etalona virsmu, kuras izmēģina vienādos apstākļos, dilšanas intensitāšu attiecību.
2. Modelēšanas, kad laboratorijas vai stenda izmēģinājumu rezultātus ar mēroga vai paātrinājuma koeficientu palīdzību pārreķina ekspluatācijas rezultātos dilšanas intensitātes novērtēšanai.
3. Paātrinātie resursu.
4. Izmēģinājumi, kuros nosaka slodžu, slīdes ātrumu un temperatūras diapazonu, kas nodrošina materiālu darbību ekspluatācijas apstākļos.

Izmēģinājumus veic uz iekārtām, kas nodrošina salāgojuma nepieciešamā kinemātiskā tipa atveidošanu. Kinemātisko tipu nosaka pēc berzes detaļu savstarpējā stāvokļa, ģeometrijas un relatīvas kustības rakstura.

Triboloģiskie izmēģinājumi tika veikti uz automatizētās berzes mašīnas (Tribometer) pēc shēmas «lodīte – disks» (rotācijas kustības modulis) un «lodīte – plāksne» (alternējošās kustības modulis). Iekārtas izmēģinājumu tehniskie raksturojumi ir atainoti 3. tabulā.

3.TABULA

BERZES MAŠĪNAS TEHNISKIE RAKSTUROJUMI

| Parametrs | Parametra vērtība |
|---|-------------------|
| Slodžu diapazons, N | 1...10 |
| Rotācijas kustības modulis, shēma «lodīte – disks» | |
| Rotācijas frekvence, apgr./min | 0.60...600 |
| Diskveida parauga diametrs, mm | 10...60 |
| Izmēģinājumu vide | Gaiss, šķidrums |
| Alternējošās kustības modulis, shēma «lodīte – plāksne» | |
| Lineārās pārvietošanās gājiena garums, mm/s | līdz 100 |
| Pilnās gaitas ātrums, Hz | 1.6 |
| Ierobežotas gaitas ātrums, Hz | līdz 10 |

Izmēģinājumi tika veikti atbilstoši starptautiskajiem standartiem ASTM G99-959, DIN50324 un ISO 20808 kā gaisa vidē, tā arī šķidrums.

Izmēģinājumos tika noteikts pētāmā berzes pāra paraugs/pretkermeņis – lodīte ar diametru 3 mm, kura ir izgatavota no sertificēta materiāla (Al₂O₃, WC, dažādas tēraudu markas), berzes koeficients. Lai noteiktu parauga un pretķermeņa materiāla nodiluma ātrumu, attiecīgi tika mērīti nodiluma rievās vertikālā šķēluma profils un pretķermeņa nodiluma laukuma diametrs.

Lodītes nodilums tika aprēķināts pēc formulas:

$$V = \pi h^2 (r - 1/3h),$$

kur $h = r - (r^2 - [d/2]^2)^{1/2}$, d – nodiluma plankuma diametrs, r – lodītes rādiuss, h – segmenta augstums.

Parauga nodilumu aprēķina pēc formulas:

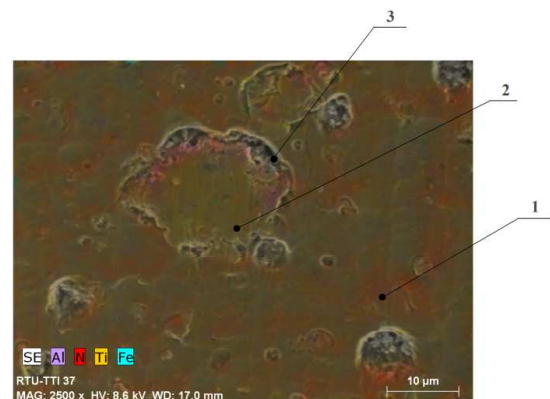
$$V = Al$$

kur l – aploces garums, A – nodiluma rievās šķēluma laukums.

Attēlos 10 un 11 ir parādīti paraugi ar nodilumizturīgu pārklājumu pēc nodiluma izmēģinājumiem.



10.att. Parauga ar nodilumizturīgu pārklājumu nodiluma izmēģinājumu rezultāti: 1 – pamatmateriāls; 2 - pārklājums



11.att. Parauga ar pārklājumu nodiluma izmēģinājumu rezultāti: 1 - pārklājums; 2 - pārklājuma defekts («piliena fāze»); 3 - materiāla izdrupšana uz šķirtnes robežas

Modelējot ekspluatācijas apstākļus otrās grupas izmēģinājumiem dilšanas intensitātes ekspluatācijas vērtību I_e eksperimentālās vērtības $I_{eksp.}$ pamatā nosaka pēc formulas:

$$I_e = I_{eksp.} / K_{eksp.} \quad (2)$$

kur $K_{eksp.} = \sqrt[6]{A_{mp}A_{md}S_{np}S_{nd} / A_{np}A_{nd}S_{mp}S_{md}}$ - mēroga koeficients, A – modeļa (m) parauga (p) un darba parauga (d) un konstrukcijas mezgla (n) berzes laukums; S – brīvo virsmu, kas nepiedalās berzē, konstrukcijas mezgla (n) un modeļa (m) tilpumam, laukumu attiecība.

VIII. PĀRKLĀJUMA ADHĒZIJAS AR PAMATMATERIĀLU IZTURĪBAS EKSPERIMENTĀLĀ NOVĒRTĒŠANA

Viens no visdrošākajiem pārklājuma adhēzijas ar pamatni noteikšanas paņēmieniem ir pārklājuma virsmas skrāpēšana ar Rokvella veida dimanta indentoru pie nepārtraukti pieaugošas slodzes. Izmēģinājumu laikā veic dažādu fizisko parametru reģistrāciju atkarībā no pieliktās slodzes un skrāpējuma garuma. Pārklājuma adhēzijas vai kohēzijas sagraušanas momentu fiksē pēc izmēģinājumiem vizuāli ar optiskā mikroskopa, kurš ir apgādāts ar ciparu kameru, palīdzību, kā arī pēc viena no pieciem parametriem izmaiņas:

- akustiskās emisijas,
- berzes spēka,
- berzes koeficienta,
- indentora iekļūšanas dziļuma,
- skrāpējumu paliekošā dziļuma.

Izmēģinājumu rezultātā nosaka minimālo (kritisko) slodzi (P_c), kura noved pie pārklājuma sagrūšanas. Jāatzīmē, ka ne visi reģistrējamie notikumi, kuri ir saistīti ar pārklājuma sagrūšanu, apraksta tieši pārklājuma adhēziju ar pamatni. Piemēram, ar P_{c1} apzīmē pirmās plaisas parādīšanās momentu, ar P_{c2} – pārklājuma daļu atslāņošanas un ar P_{c3} – pārklājuma plastisko nodilumu līdz pamatnei. Dažādu parametru kopums, kurš tiek reģistrēts izmēģinājumu gaitā, paaugstina metodikas ticamību un kritiskās slodzes noteikšanas precizitāti.

Dotā metodika atbilst starptautiskajam standartam ISO DIS 20502.

Iekārtas adhēzijas izturības izmēģinājumiem (Scrach Tester) tehniskie raksturojumi ir atainoti 4. tabulā.

4. TABULA

PĀRKLĀJUMA ADHĒZIJAS AR PAMATMATERIĀLU IZTURĪBAS IZMĒĢINĀJUMU IEKĀRTAS TEHNISKIE RAKSTUROJUMI

| Parametrs | Parametra vērtība |
|------------------------------------|-------------------|
| Normālā spēka diapazons, N | 0.5...200 |
| Maksimālais berzes spēks, N | 200 |
| Maksimālais skrāpējuma garums, mm | 70 |
| Skrāpēšanas ātrums, mm/min | 0.4... 600 |
| Maksimālais skrāpējuma dziļums, mm | 1 |
| Izšķiršana pēc dziļuma, nm | 1.5 |

IX. MATERIĀLU PIESTRĀDĀJAMĪBAS EKSPERIMENTĀLĀ NOVĒRTĒŠANA

Izmēģinājumi sastāv no trīs pamatetapiem :

1. Nepiestrādātam paraugam berzes procesā pa tērauda vai čuguna darba paraugu ar uzdotu slīdes ātrumu un ieziešanu ar izvēlēto smērvielu pie ātri pieaugošas slodzes nosaka spiedienu p_{bkp} , kuram palielinoties tiek novērota berzes koeficienta palielināšanās, kā arī spiediena vērtību p_{ie} , pie kuras sākas iesprūšana.
2. Veic piestrādi pie pakāpeniskās sloģošanas, paaugstinot slodzi diezgan ātri, lai berzes režīms būtu maksimāli tuvs iesprūšanas režīmam. Šeit novērtē maksimālo pastāvīgi izmēģināmām materiālam spiedienu p_{pie} , kas atbilst pārejai uz iesprūšanu, kā arī piestrādes ilgumu t_p no spiediena p_{ie} sasniegšanas brīža līdz spiediena p_{pie} sasniegšanas brīdim.
3. Veic ātru un nepārtrauktu darbojošās slodzes samazināšanu, kuras procesā novērtē spiedienu p_{bks} , pie kura beidzas berzes koeficienta samazināšanās.

Pieņem, ka labāka piestrādājāmība piemīt materiāliem ar lielāku p_{ie} un p_{pie} starpību, kuriem šī starpība piestrādes procesā režīmā uz iesprūšanas robežas tiek sasniegta īsākā laikā. Materiāla nestspēju (kravnesību) piestrādātā un nepiestrādātā stāvoklī nosaka pēc spiediena p_{bkp} , p_{ie} , p_{bks} , p_{pie} vērtībām.

Iekārtas kustīgam un nekustīgam paraugam izmēģinājumu standā jābūt elektriski izolētiem vienam no otra ar pretestību ne mazāk par 10 mΩ. Paraugu vai darba paraugu ar speciālā instrumenta palīdzību apstrādā tādā veidā, lai to savstarpējās piekļaušanās virsmas laukums sastādītu ne mazāk par 90% no kontaktēšanas virsmas nominālā aprēķina laukuma. Piekļaušanos kontrolē vizuāli pēc kontakta plankuma.

Parauga un darba parauga atvienotām berzes virsmām padod $20 \pm 0,5$ mV spriegumu. Paraugu piespiež pie darba parauga ar slodzi, kas nodrošina aprēķinu spiedienu (1 ± 0.1) MPa un atzīmē attiecīgu sprieguma vērtību U_{min} , kuru pieņem par regulēšanas apakšējo robežu. Pēc iesprūšanas rašanās momenta nosaka izmēģināmā materiāla parauga nestspējas spiedienu p_{ie} nepiestrādātā stāvoklī.

Uzstāda jaunu paraugu pāri (paraugu un darba paraugu) no tās pašas partijas un veic izmēģinājumus, palielinot slodzi līdz tam brīdim, kamēr spriegums saskares vietā nesasnies regulēšanas apakšējo robežu U_{min} . Palielinot slodzi, izmēģinājumus turpina secīgi un nepārtraukti līdz iesprūšanai, nosakot izmēģināmā materiāla nestspējas spiedienu p_{ie} piestrādātā stāvoklī.

Pēc izmēģinājumu rezultātiem nosaka:

– kravnesības pieauguma pakāpes rādītāju veicot piestrādi:

$$q_p = \frac{p_{pie} - p_{ie}}{p_{pie}},$$

kur p_{ie} , p_{pie} – spiediens, kuru noteica veicot pirmā un otrā etapa izmēģinājumus;

– izturīgas nepilnīgas eļļošanas piestrādes laikā maksimāla spiediena palielināšanas pakāpes rādītāju:

$$q_{ms} = \frac{P_{bks} - P_{bkp}}{P_{bks}},$$

kur P_{bkp} , P_{bks} – spiedieni, kurus noteica veicot pirmā un trešā etapa izmēģinājumus;

– piestrādājamības ātruma rādītāju atkarībā no pieauguma ātruma veicot maksimālās kravnesības piestrādi:

$$q_{pa} = \frac{P_{pie} - P_{ie}}{P_{pie} t_{pie}},$$

kur t_{pie} – izmēģinājumu veikšanas (piestrādes) ilgums no sprieguma U_{min} sasniegšanas pirmā momenta līdz pēdējam momentam;

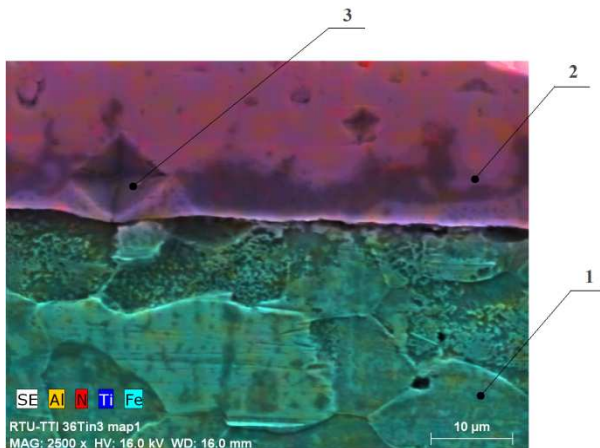
– piestrādājamības komplekso rādītāju

$$q_k = \frac{P_{pie} - P_{ie}}{t_{pie} N P_{pie}},$$

kur N – izmēģināmā materiāla parauga nodilums.

X. PAMATMATERIĀLA UN PĀRKLĀJUMU MIKROCIEĒTĪBAS MĒRĪŠANAS METODIKA UN LĪDZEKĻI

Mikrocietību (atsevišķu sakausējuma vai materiāla struktūras sastāvdaļu cietība, kā arī virsmas slāņu cietība) nosaka pēc pretestības, kas rodas dimanta piramīdu iespiežot materiālā nelielu slodžu iedarbībā (12.att).



12.att. Indentora nospiedums uz mikroslīpņa pārklājuma mikrocietības mērīšanas laikā: 1 - pamatmateriāls; 2- pārklājums 3 – dimanta piramīdas nospiedums

Mikrocietības noteikšanai pielieto speciālus mikrocietības mērītājus [3]. Mikrocietības mērīšanai tika pielietotas PMT-3 un MTI-3M tipa ierīces.

Paraugu virsmu mikrocietības noteikšanai sagatavoja ar slīpēšanu un pulēšanu.

Interferences mikrocietības mērītājs PMT-3 ļauj veikt dažādu materiālu mikrocietības mērījumus pēc dimanta piramīdas (Berkoviča piramīdas) iespiešanas dziļuma. Pēc mērījumu rezultātiem aprēķināja:

- cietību pēc neatjaunota nospieduma, kas tika veikts ar četrstūru piramīdu ar kvadrāta pamatu:

$$H_h = \frac{F}{A} \approx \frac{0.3784F}{h^3}, \quad (3)$$

kur F – slodze, N ; A – saņemta nospieduma sāna virsmas nosacītais platums, mm^2 ; h – nospieduma dziļums, mm ;

- materiāla elastības īpašību raksturlielumu (%) kā attiecību $100 = \frac{h_{el}}{h_{kop}}$;

- materiāla plastisko īpašību raksturlielumu $100 = \frac{h_{pi}}{h_{kop}}$;

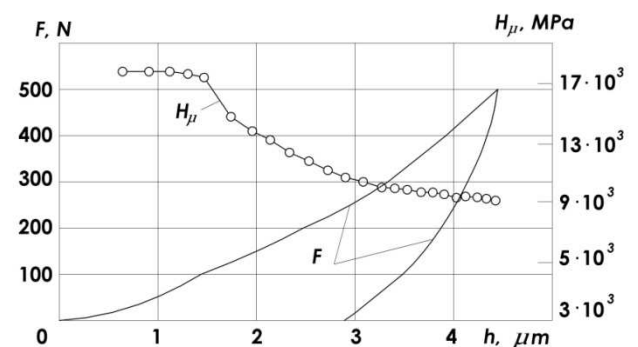
- materiāla plūstamības raksturlielumu $100 = \frac{h_{pl}}{h_{kop}}$.

Ar mērķi palielināt mērījumu precizitāti cietību, kas tika noteikta pēc neatjaunota nospieduma dziļuma, salīdzināja ar cietību, kas tika noteikta pēc parastās metodikas – pēc atjaunota nospieduma diagonāles.

Mikrocietības mērītājs MTI-3M ir automatizēts komplekss, kuru pieskaita pie ierīču klases, ar kuru palīdzību nosaka metālisko, nemetālisko, kompozītmateriālu, kā arī dažādu cieto un mīksto pārklājumu mikromehāniskas īpašības (mikrocietību, virsmas cietības un elastības raksturlielumus u.c.) ar indentora iespiešanas metodi izmēģināmā virsmā. Ar tās palīdzību veic mikrocietības, elastības, plastiskuma, plaisu veidošanās, trausluma, mikroplūstamības, pārklājumu integrālā biezuma pētījumus un novērtējumus.

Izmēģinājumu rezultātu parametri tiek atspoguļoti koordinātēs kinētisko iespiešanas diagrammu veidā: berzes spēks F un nospieduma dziļums h mikroiespiešanas procesa darbības laikā t .

13.attēlā ir parādīti eksperimentālo datu mērījumu un apstrādes rezultāti diagrammas F no h veidā pārklājumam AlTiNi, ar kuru ir pārklāts ciets sakausējums VK-6, kā arī mikrocietības $H\mu$ atkarība no nospieduma dziļuma h . Pēc turpmāko metalogrāfisko pētījumu datiem pārklājuma biezums ir $2 \mu\text{m}$ [2].



13.att. Uz sakausējuma VK-6 uzklāta pārklājuma elastīgi-plastiskās deformācijas diagramma

„Slogojuma” diagrammas posma lūzuma punkts atbilst $h \approx 1.5 \mu\text{m}$. Spēks uz indentora šajā gadījumā sastāda 102 N. Pēc mikrocietības atkarības rakstura nospieduma dziļuma izmēra diapazonā $h = 0 \dots 1.5 \mu\text{m}$ var novērtēt tiešu pārklājuma mikrocietību: $H\mu \approx 17\,869 \text{ MPa}$. Ja nospieduma dziļums ir lielāks par $1.5 \mu\text{m}$, mikrocietība samazinās, tuvojoties pamatmateriāla (sakausējuma VK-6) mikrocietības vērtībai $H\mu \approx 9\,150 \text{ MPa}$.

Jāatzīmē, ka šī mikrociētības vērtība nav sakausējuma VK-6 mikrociētība, piemēram, 4 μm dziļumā. Šajā dziļumā vēl diezgan stiprā mērā turpina darboties ciets pārklājums. Tikai pie $h = 10 \dots 20 \mu\text{m}$ parādās patiesa pamatmateriāla ciētība.

Praktisko interesi izraisa nospieduma dziļuma $h = 1.5 \dots 4 \mu\text{m}$ zonas analīze. Pēc krasa vai pakāpeniska līknes lūzuma, pēc šīs līknes slīpuma attiecībā pret h asi var, piemēram, noteikt pārklājuma sasaistīšanās izturības pakāpi ar pamatmateriālu, plaisu un poru esamību pārklājumā.

Pārklājuma kvalitāte, pārsvarā tā trauslums, lokāls sabrukums lielā mērā ir atkarīgi no tā uzklāšanas režīmiem. Turklāt mikrociētības noteikšanas metode pēc mikroindentēšanas nospieduma dziļuma ir viena no svarīgākām un gandrīz vai vienīgā metode dažāda tipa pārklājumu mehāniskās stiprības noteikšanai.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Urbaha M. Nanokristāliskie nodilumizturīgi pārklājumi kuģu dzinēju detaļu aizsargāšanai un atjaunošanai. In: *Proceedings of 12th International Conference "Maritime Transport and Infrastructure-2010"*, Latvija, Rīga, 2010, 99.-105. lpp.
- [2] Urbaha M. Possibilities of ionic-plasma methods of formation nanostructural wearproof composite coating. In: *Proceedings of the International Convention "Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications"*, Italy, Brixen, 2010, p 71-75.
- [3] Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Nanostructured composite coatings for the protection and restoration of precision friction pair parts. *International Journal Machines, Technologies, Materials*, 2008, p 58-59.

Margarita Urbach, born in Latvia, has graduated with a Master degree in 2006. Since 2006 she is studying for the doctoral degree at Riga Technical University Faculty of Transport and Mechanical Engineering. She is a researcher at the Institute of Transport Vehicles Technologies of the Riga Technical University. Her field of scientific interest includes: surface protection technologies, nanocomposite coatings, structural materials, transport systems and logistics.

Margarita Urbach. Experimental investigation of physico-mechanical properties of wear resistant nanostructured ion-plasma coatings

The work considers different testing methods and facilities used by the author for the evaluation of physico-mechanical properties of materials and parts with wear-resistant coatings. The work considers the technological characteristics of creating coatings using the methods of ion-plasma sputtering and ion implantation. It analyses the results received during experimental investigation of microstructure and chemical composition of the obtained coatings by using a scanning electron microscope with microanalyzer.

It substantiates the modes of testing and proposes criteria for the evaluation of coating wear resistance. It is suggested to carry out abrasiveness tests by using cylindrical rotating specimens made of the material being tested and sample plated specimens. The abrasiveness of a coated plunger is defined from average linear wear of specimens during a certain friction path. It is suggested to carry out the evaluation of wear resistance of restored parts from the results of comparative fast test which defines relations between the wear rates of the restored surface and the sample surface tested in the same conditions. Tribological tests have been conducted with the help of an automated tribometer according to "ball and disc" scheme (rotational motion module) and "ball and plate" scheme (reciprocal movement module). The method and microhardness measurement instrumentation considered in this work make it possible to evaluate the quality of basic material and coatings. On the basis of the obtained diagrams of coating plasto-elastic deformation, it is suggested to evaluate the strength of different types of coatings.

Маргарита Урбах. Экспериментальное исследование физико-механических свойств износостойких наноструктурированных ионно-плазменных покрытий

В работе рассмотрены различные методы и средства испытаний, примененные автором для оценки физико-механических свойств материалов и деталей с износостойкими покрытиями. Рассмотрены технологические особенности создания покрытий методами ионно-плазменного напыления и ионной имплантации. Проанализированы результаты экспериментальных исследований микроструктуры и химического состава полученных покрытий с использованием сканирующего электронного микроскопа с микроанализатором.

Обоснованы режимы испытаний и предложены критерии оценки адгезионной прочности и износостойкости покрытий. Испытания на истирающую способность предлагается производить с использованием цилиндрических вращающихся образцов из испытуемого материала и эталонных плоских образцов. Истирающую способность плунжера с покрытием определяют по среднему линейному износу образцов за определенный путь трения. Оценку износостойкости восстановленных деталей предложено производить по результатам сравнительных экспресс - испытаний, заключающихся в определении отношения интенсивностей изнашивания восстановленной и эталонной поверхностей, испытанных в одних и тех же условиях. Трибологические испытания проводили на автоматизированной машине трения по схеме «шарик-диск» (модуль вращательного движения) и «шарик-пластина» (модуль возвратно-поступательного движения). Рассмотренные в работе методика и средства измерения микротвердости позволяют оценить качество основного материала и покрытий. На основе полученных диаграмм упруго-пластической деформации покрытия предложено оценивать прочность покрытий различного типа.