

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Aeronautikas Institūts

Vladislav TURKO
Doktora studiju programmas „Transports” doktorants

**AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU NOGURUMA PLAISU AGRĪNĀS NOTEIKŠANAS UN
KONTROLES METODES IZSTRĀDE STENDU IZMĒĢINĀJUMOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. Habil. Sc. Ing., profesors
M.BANOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2013

UDK 620.178.35:539.4

Turko V. Aviācijas konstrukciju noguruma agrīnās noteikšanas un kontroles metodes izstrāde standu izmēģinājumos. Promocijas darba kopsavilkums. - R.: RTU Izdevniecība, 2013.- 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes „RTU P-22” 2013.gada 16.septembra lēmumu, protokols Nr.6/2013



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN 9984-690-24-5

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.gada 16. decembrī, plkst.14.30 Rīgas Tehniskās Universitātes Aeronautikas Institutā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. Habil. Sc. Ing. Juris Paramonovs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija.

Profesors, Dr. Habil. Sc. Ing. Vasilij Šapkin,
Federāla Unitāra Valsts Uzņēmuma " Valsts zinātniski un pētniecisks Civilas Aviācijas
Institutūts", Krievija

As. Profesors, Dr. Sc. Ing. Vjačeslavs Žilinskis,
Baltijas Starptautiska Akadēmija, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Vladislav Turko(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, slēdzienu, literatūras sarakstu, 9 pielikumus, 55 zīmējumus un ilustrācijas, 45 tabulas, kopā 138 lappuses. Literatūras sarakstā ir 82 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Pētījumu mērķis.....	5
Pētījumu uzdevumi.....	5
Pētījumu metodes.....	6
Pētījumu rezultātu novitāte.....	6
Darba rezultātu praktiskā vērtība.....	7
Aizstāvamās tēzes.....	8
Darba rezultātu aprobācija:	
- uzstāšanās konferencēs.....	8
- publikācijas periodiskajos izdevumos, ieskaitot elektroniskos	10
Darba struktūra.....	12
DARBA SATURS.....	13
1.nodala. Pētījumu jautājumi. Problēmas statusa definīcija. Skats nākotnē.....	13
2. nodaļa. Bojājumu uzkrāšanas modelis lielizmēra konstrukcijās. Lokālo Zonu Hipotēze.....	13
3. nodaļa. Uzkrāto noguruma bojājumu sakarības izpēte uz koncentratoru sistēmām.....	16
4.nodaļa. Lokālās zonas noguruma ilgmūžības modelis.....	28
5. nodaļa. Tehniskā stāvokļa monitoringa organizēšana lielizmēra konstrukciju lokālām zonām.....	35
SLĒDZIENS.....	40

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pašreizējo situāciju civilā aviācijā raksturo palielināta izmēra, sarežģītības un pieaugošas lidaparātu izmaksas. Ņemot vērā gaisa kuģu konstrukcijas, īpaši civilā aviācijā, skaidri iezīmējas tendence palielināt lidaparātu izmērus to nestspēju un pasažierietilpību. Šāda tendence rosina nepieciešamību palielināt gaisa kuģu komerciālo izmantošanu – atsakoties no konstruēšanas principa pēc resursa pārejot uz principu-ekspluatācija pēc tehniskā stāvokļa, sākas konstruēšana pēc principa-droša (noteikta) sagraušana un jāmeklē iespēju pielietot kādu no nesagraujošās kontroles metodēm "on-line" režīmā ekspluatācijas un/vai stendizmēģinājumu laikā.

Nepārtrauktās kontroles uzraudzības metodoloģija pilna izmēra konstrukciju tehniskajam stāvoklim galvenokārt vērsta uz AGRĪNO bojājumu atklāšanu ar sekojošu, nepieciešamības gadījumā, tās ATTĪSTĪBAS KONTROLI. Tas ļauj dārgu testu veikšanā lielizmēra konstrukcijām secīgi risināt daudzus atšķirīgus pēc satura uzdevumus, mainīt pētījumu scenāriju.

Zināms, ka pirmais un pats svarīgākais pētniecības testēšanā ir vājo konstrukcijas vietu noteikšana, kādas lielizmēra konstrukcijās var būt vairākas.

Periodiskās vizuālās apskates, dažādu nesagraujošās kontroles sensoru tipu uzstādīšana, bez zināšanām par galvenajiem fenomenoloģiskiem principiem konstrukcijas elementu degradācijā, noved pie ievērojamām laika, materiālu un cilvēkresursu izmaksām.

Pētījumu mērķis

Pētījumu mērķis ir noteikt noguruma bojājumu uzkrāšanas raksturu un izstrādāt metodoloģiju to diagnosticēšanai lielizmēra konstrukcijās, pamatojoties uz „lokālo zonu hipotēzi” par atkarīgu noguruma bojājumu uzkrāšanos šajās zonās.

Pētījumu uzdevumi

Uzstādītā mērķa sasniegšanai nepieciešams risināt sekojošus uzdevumus.

1. Izveidot matemātisko un fenomenoloģisko modeli (modeļus) viendabīga lielizmēra konstrukcijām bojājumu uzkrāšanai, proti:

- fenomenoloģisko modeļu zonas vietējai noguruma bojājumu uzkrāšanai;
- matemātisko modeli Lokālo Zonu veidošanā un tā lielumu;

- matemātisko modeli Lokālo Zonu drošumam un ilgizturībai, tajā skaitā kritērijiem par tās sagrūšanu (atteikumu), noguruma izturības īpašības (varbūtības sadalījuma funkciju noguruma ilgizturībai, ierobežoto noguruma veidu robežas, noguruma līknes veidu, ciklu jūtīguma sliksni);

2. Pārbaudīt izvirzītās hipotēzes un modeli uz eksperimenta rezultātiem:

- veikt eksperimentus ar paraugu ar vairākiem koncentratoriem, kā analogu bojājumu uzkrāšanas modeli konstruētajās lielizmēra konstrukcijās;

- apstrādāt eksperimenta datus, kas iegūti ar citiem autoriem;

- izmantot datus, kas iegūti pēc stendizmēģinājumi reālajās aviācijas konstrukcijās.

3. Izvēlēties nesagraujošās kontroles metodes, kuras būtu vispiemērotākās lietošanai lielizmēra konstrukciju izmēģinājumos:

- izstrādāt darbību secību (algoritmu) izvēlētajām nesagraujošās kontroles metodēm eksperimentos agrīno bojājumu noteikšanai;

- izstrādāt metodoloģiju iegūto rezultātu pielietojumam pilnizmēra aviācijas konstrukciju izmēģinājumos.

Pētījumu metodes

Augšminēto uzdevumu risināšanai tiek lietotas sekojošas metodes:

- matemātiskās, ieskaitot varbūtības teoriju, bojājumu veidošanās procesu modelēšanu;

- dažādu konfigurāciju paraugu tipi ar koncentratoriem izmēģinājumi uz nogurumu;

- iegūto rezultātu statistiskā analīze, ieskaitot korelācijas analīzi, analīzes pielietojot kārtas statistikas teoriju;

- atšķirīgu nesagraujošās kontroles metožu eksperimentāla pārbaude uz dažādām aviācijas pielietojuma un tehnisko sistēmu konstrukcijām.

Pētījumu rezultātu novitāte

Šo pētījuma novitāte slēpjas attieksmē no pētījumiem par bojājumu uzkrāšanos viendabīgā ķermeņi uz modeli - analogu noguruma bojājumu uzkrāšanai uz paraugiem ar koncentratoru sistēmām.

1 Hipotēze par Lokālo Zonu, kurās uzkrājas nogurumu bojājumi notiek stohastiski atkarīgi un ir formulēta un apstiprināta, tādējādi:

- noguruma plaisu veidošanās procesu pozitīvas korelācijas gadījumā var uzskatīt kā vienas maģistrālās plaisas attīstību, kad veidojās pirmā noguruma plaisa un tā provocē citu plaisu veidošanos tās virzienā, tā sauktais "lidmašīnu bojājumu attīstības modelis";

- negatīvas korelācijas gadījumā pirmā izveidojusies plaisa lokalizē savas izcelsmes vietu, pie kam jaunu plaisu veidošanās process ir tālāk attālināts un noved pie daudzkārtīgu plaisu veidošanos, kuras nesavienojas viena ar otru - "helikoptera bojājumu attīstības modelis".

2. Lielizmēra konstrukcijas var uzskatīt, kā apvienotas Lokālas Zonas.

3. Kopējā noguruma raksturojumi (noguruma ilgizturība, noguruma robežas, noguruma līknes, ciklu jūtīguma sliekšnis) pamatā ir DESF - divpakāpju eksponentiāla sadalījuma funkcija (SF) ar logaritmisku cikla ilgizturīguma un apraksta tikai četri parametri.

Divparametriskās DESF, pielietojuma priekšrocība pārbaudes objektu noguruma ilgizturības aprakstam objektiem ar paaugstinātu drošību sakarā ar SF kreiso zaru, kas zināms, ka, jūtības sliekšnis pēc cikliem" mazu varbūtību apgabalā.

4. Parādīts, kā nesagraujošās kontroles visefektīvākā metode agrīno plaisu noteikšanai ir akustiskās emisijas metode, kura ļauj veidot "on-line" monitoringu lokālajām zonām ar noguruma bojājumu uzkrāšanu kontroles zonā. Akustiskās emisijas metodi var pielietot lai monitorētu dažādu aviācijas detaļu un mezglu pārbaudes, ieskaitot kompozītu materiālus un arī dažādos slogojumos(dinamiskā, statiskā, termiskā, u.c.).

Darba rezultātu praktiskā vērtība

Galvenās pētījuma pamatnostādnes tika izmantotas SIA „Aviatest” helikoptera Mi-8 stabilizatora ilgizturības analīzē, lidmašīnas Tu-154 šasijas galvenā balsta sānu cēlejštokā, helikoptera Mi-26T astes un ķīļa siju resursa un plaisāšanas novērtējums, noguruma izmēģinājumu programmu izstrādes helikopteru agregātiem un nesagraujošās kontroles metodes izvēle noguruma izmēģinājumu monitorēšanai helikoptera Ka-62 agregātiem.

Piedāvāto matemātisko modelis par lokālo zonas drošticamību, kas definē ilgizturīguma lielizmēra konstrukcijas, precīza izlieto aprēķināšanas metodiku par konstrukcijas drošu ekspluatācijas laiku.

Parādīts, ka pie vairāku zonu klātbūtnes paātrinātai noguruma bojājumu uzkrāšanai, (piemēram, pie helikoptera Mi-26T astes un ķīļa siju pārbaudēm) vēlams kontrolēt secīgu sagraušanu šajās zonās arī ar citām metodēm (tenzometrēšanu, akustisko emisiju, siltumvīziju). Sasniedzot plaisāšanas kritisko stāvokli nepieciešams remontēt visu bojājumu zonu.

Izstrādāti lielizmēra objektu tehniskā stāvokļa monitoringa organizēšanas metodoloģija.

Aizstāvējamās tēzes

Uz aizstāvēšanos tiek piedāvātas šādas tēzes:

- Lokālu Zonu Hipotēze ar atkarīgo noguruma bojājumu uzkrāšanu, kā ar pozitīvu, tā ar negatīvu stohastisko saiti;

- noguruma bojājumu uzkrāšanās matemātiskie modeļi lielizmēra konstrukcijās, izmēru noteikšana lokālajām zonām, un to varbūtiskie drošuma (ilgizturības) raksturotāji: dubultā eksponenciālā sadalījuma funkcija ar logaritmu ciklu skaitam (DESF) līdz plaisas rašanās brīdim un noguruma līknes attēlojums fragmentāri-lineārā formā dubultlogaritmu koordinātēs, lokālās zonas resursa (izturības) aprēķina metodika;

- monitoringa organizēšana lielizmēra konstrukcijām (helikoptera Mi-26T astes un ķīļa sijās) agrīno noguruma plaisu noteikšanai pielietojot NT metodi;

Darba rezultātu aprobācija

Pētījumu rezultāti atspoguļoti šādās **konferencēs**:

- 1) The International Conference “Non-Destructive Testing and Diagnostics-2006”, 28-29 May 2006, Vilnius, ULTRASOUND Kaunas University of Technology - *“Undercarriage fatigue test control by acoustic emission method”*.
- 2) The 15th International Conference, „Mechanika 2010, 8-9 April, 2010, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas, - „*Acoustic emission diagnostic of fatigue crack development during undercarriage bench testing*”.
- 3) The 6th International Conference MECHATRONIC SYSTEM and MATERIALS MSM 2010, 5-8 July, 2010, Opole, Poland. Opole University of Technology, 2010. - „*Acoustic emission checking of welded rail joints*”.
- 4) The Space & Global Security of Humanity (SGS 2010), 5-9 July, 2010, Transport and Telecommunication Institute, Riga, Latvia - „*Estimation of mechanical properties of the anisotropic reinforced plastics with application of the method of acoustic emission*”.
- 5) The 18. zinātniski praktiskās un mācību metodiskās konferences „The Step into the Future”. 10.– 11. decembrī, 2010., Transporta un Sakaru Institūts, Rīga, - „*Features of behavior of acoustic emission signāls at dynamic tests of pre-stressed concrete elements of railways*”.
- 6) The 14th International Conference Transport Means, 21-22 October, 2010, Kaunas University of Technology, Lithuania. - *Some features of behavior of Acoustic Emission signals at dynamic bench tests of prestressed concrete sleepers*”

- 7) 13th International Conference. Maritime Transport and Infrastructure. 28-29 aprīlis 2011.g., Rīga, Latvija. - *Noguruma plaisu rašanās likumsakarību pētīšana daudzkoncentratoru paraugos*".
- 8) The 16th International Conference, „Mechanika 2011”, Kaunas University of Technology, Lithuania 7-8 April, 2011 - *“Investigation of mechanical properties of composite materials using the method of acoustic emission”*.
- 9) The 7th International Conference Mechatronic System and Materials MSM 2010, Kaunas, Lithuania. 7-9 July, 2011, - *„The Mathematical Model of the Dependent Fatigue Damage Zone”*.
- 10) The Eight International Conference Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications. AES-ATEMA 11-15 July 2011, Riga, Latvia - *„Investigation of micromechanics of plasto-elastic behavior of anisotropic composite materiāls under static loading by the acoustic method”*.
- 11) The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. ICAMME 2011, 28-30 November, 2011, Venice, Italy.- *„The fatigue damage accumulation on systems of concentrators”*.
- 12) The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. ICAMME 2011, 28-30 November, 2011, Venice, Italy. - *„Diagnostic of fatigue damage of gas turbine engine blades by acoustic emission method”*.
- 13) The XYII International Conference. Mechanics of Composite Materials. May 28-June 1, 2012. Institute of Polimer Mechanics University of Latvia. Jurmala , Latvija.- *Research into the Micromechanics of the Plastic-Elastic Behaviour of Anisotropic Composite Materials under Static Loading by the Acoustic Emission Method”*
- 14) The 14th International Conference "Maritime Transport And Infrastructure- 2012", Latvian Maritime Academy 23-24 April, Riga, Latvija *New approach to use the acoustic emission monitoring for the defects detection of composit material's design elements"*.
- 15) The 3 rd International Conferences of Mechanical And Aerospace Engineering,(ICMAE 2012), July 7-8, 2012, Paris, France - *The Characteristic Features of Composite Materials Specimen’s Static Fracture Investigated by the Acoustic Emission Method*.
- 16) The 3 rd International Conferences of Mechanical And Aerospace Engineering, (ICMAE 2012), July 7-8, 2012, Paris, France - *Hypothesis of Local Zones with Dependent Fatigue Damages Accumulation*.

Publikācijas periodiskajos izdevumos, tai skaitā elektronisko:

1. TURKO VI., „The simplest model of the scale effect based on the hypothesis of the local volumes.” *Strenght of Materials* , 1986, vol 18, N4, p.455-460, ISSN 0039-2326, 0039-2326/1804-1455, Public Publishing Corporation. USA.

2. URBAH A., BANOVS M., DOROSKO S., TURKO V., Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strenght testing. . In *Ultragarsas (Ultrasound)-40 metu*, vol.64, No1, 2009., p43-45. Kaunas, Lietuva, ISSN 1392-2114

3. TURKO VI., „Estimation of fatigue durability dispersion in operation by results of tests and loading measurements”, In *RTU Zinātniskie raksti. „Mašīnzinātne un transports”*. VI sērija, 34.sējums, P.17-23, RTU Izdevniecība, Rīga, 2010.g., ISSN 1407-8015.

4. URBAHS A., BANOVS M., DOROŠKO S., TURKO VI., FESCHUK Y., 2010, „Acoustic emission checking of welded rail joints”. In *6th International Conference MECHATRONIC SYSTEM and MATERIALS MSM 2010, 5-8 July, 2010*, (HTML-file #105), Opole, Poland. Opole University of Technology, 2010. [Electronic CD] The Archive of Mechanical Engineering ISSN 0004-0738

5. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., BRATARCHUCK S., HODOS N., FESHCHUK Y., 2010, „Features of behavior of acoustic emission signāls at dinamic tests of pre-stressed concrete elements of railways”. In „*Research and Techology-Step into the Future*”. Vol.5, No2, 2010, 18. zinātniski praktiskās un mācību metodiskās konferences “Zinātne un tehnoloģija – Solis nākotnē” 2010., 10.– 11. decembrī, Rīga, P.106. Transporta un Sakaru Institūts, Rīga, 2010. ISSN 1691-2853, ISSN 1691-2861.

6. URBAHS, A., BANOVS, M., TURKO, V., BRATARCHUSK, S., KHODOS, N. Some features of behavior of Acoustic Emission signals at dynamic bench tests of prestressed concrete sleepers (2010) *Transport Means* - Proceedings of the International Conference, pp. 45-48.

[http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-](http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79952648219&partnerID=40&md5=726267b6a03bb4de474bebd15fd8fb77)

[79952648219&partnerID=40&md5=726267b6a03bb4de474bebd15fd8fb77](http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79952648219&partnerID=40&md5=726267b6a03bb4de474bebd15fd8fb77)

7. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., SOLOGUBOVYS Y., ”Noguruma plaisu rašanās likumsakarību pētīšana daudzkoncentratoru paraugos”. In *Maritime Transport and Infrastructure. 13th International Conference. 28-29 aprīlis 2011.g., Rīga, Latvija*. P.170-173. Latvijas Jūra Akadēmija, Rīga, 2011.g. ISSN 1691-3817.

8. TURKO VI., „The Mathematical Model of the Dependent Fatigue Damage Zone”. In *7th International Conference Mechatronic System and Materials MSM 2010, 7-9 July, 2011, Kaunas, Lithuania*. Kaunas University of Technology, 2011. ISSN 1822-8283
9. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., FESHCHUCK Y., HODOS N., 2011, „Investigation of micromechanics of plasto-elastic behavior of anisotropic composite materials under static loading by the acoustic method” . *AES-ATEMA 2011 Eight International Conference Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications. 11-15 July 2011, Riga, Latvia*. ISSN 1915-5409
17. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., „The fatigue damage accumulation on systems of concentrators”. *International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. ICAMME 2011, 28-30 November, 2011, Venice, Italy*.
<http://www.hub.sciverce.com/action/search/results?st=turko+v.+banov+m>.
11. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., FESHCHUCK Y., „Diagnostic of fatigue damage of gas turbine engine blades by acoustic emission method”. *International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. ICAMME 2011, 28-30 November, 2011, Venice, Italy*.
<http://www.hub.sciverce.com/action/search/results?st=turko+v.+banov+m>.
12. URBAHS A., BANOVS M., TURKO VI., „The fatigue damage accumulation on systems of concentrators”. In *World Academy of Science, Engineering and Technology. Issue 59, November 2011, Venice, Italy*. p.p.934-939, pISSN 2010-376X, eISSN 2010-3778.
13. URBACH, A., BANOV, M., TURKO, V. Hypothesis of local zones with dependent fatigue damages accumulation (2012) *Applied Mechanics and Materials*, 232, pp. 19-23.
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84871572669&partnerID=40&md5=657a147df5523fe413e020cb1aae3c6b>
14. A.URBAHS, M.BANOVS, V.TURKO,, Y.FESHCHUCK, *New approach to use the acoustic emission monitoring for the defects detection of composite material's design elements"* Latvian Maritime Academy 14th International Conference "MARITIME TRANSPORT AND INFRASTRUCTURE- 2012", 23-24 April, Riga, Latvia .ISSN 1691-3817
15. URBACH A., BANOV M., TURKO V., 2012, Hypothesis of Local Zones with Dependent Fatigue Damages Accumulation. In *3rd International Conferences of Mechanical And Aerospace Engineering,(ICMAE 2012)*, July 7-8, 2012, Paris, France.
16. URBACH A., BANOV M., TURKO V., Y.FESHCHUK, 2012, The Characteristic Features of Composite Materials Specimen's Static Fracture Investigated by the Acoustic Emission

Method. In *3rd International Conferences of Mechanical And Aerospace Engineering, (ICMAE 2012)*, July 7-8, 2012, Paris, France.

17. TURKO VI. 2013, The Uniform Statistical Model of Fatigue Strength. In *RTU Zinātniskie raksti. „Mašīnzinātne un transports”*. RTU Izdevniecība, Rīga, ISSN 1407-8015. (pieņemts pie publicēšana 2014.g.)

Darba struktūra

Darbs satur anotāciju, ievadu, piecas nodaļas, slēdzienu, 9 pielikumus, 55 ilustrācijas, 45 tabulas, 138 lapas, 82 literatūras atsauces.

- Ievadā formulēta pētījumu tēmas aktualitāte, pētījumu mērķis, pētījumu uzdevumi, pētījumu metodes, pētījumu novitāte, darba rezultātu praktiskā vērtība, aizstāvamās tēzes.

- 1. nodaļā sniegts pārskats un īsa analīze par problēmu agrīnai plaisu atklāšanai lielizmēra struktūrām;

- 2. nodaļā tiek apskatīti trīs noguruma bojājumu uzkrāšanās sākotnējie modeļi lielizmēra konstrukcijām ar īsiem drošuma raksturotājiem, formulēta Lokālo Zonu Hipotēze (LZH) ar atkarīgu noguruma bojājumu uzkrāšanos;

- 3. nodaļā tiek doti nogurumu izmēģinājumu rezultāti no paraugiem ar dažādu koncentratoru skaitu. Izmantojot statistiskās analīzes metodes - kārtas statistikas teoriju un iekšklases korelācijas koeficientu. Pielietojumos ir parādīta stohastiskās saites (gan pozitīvā, gan negatīvā) eksistence, ir sastādīti Lokālo Zonu izmēru noteikšanas matemātiskais modelis un veikta modeļa pārbaude pēc paraugu izmēģinājumu rezultātiem. Apstiprinātas norādes LZH ar atkarīgiem noguruma bojājumu uzkrājumiem un parādītas sekas stohastisko saišu eksistencei lai noteiktu Lokālo Zonu drošumu (ilgmūžību) lielizmēru konstrukcijām;

- 4. nodaļā tiek dots četru parametru Lokālās Zonas drošuma (ilgmūžībai) matemātiskais modelis, kas apvieno parametrus sadalījuma funkcijām (SF) no ilgmūžības, noguruma izturības robežas, noguruma līknes dubultlogaritmiskām koordinātēm. Tiek paredzēts, ka SF noguruma ilgmūžībai lielām ilgmūžības vērtībām (ekspluatācijas nosacījumi) ir divpakāpju eksponenciālais sadalījums ar ciklu skaita logaritmu (DESF), bet nogriežņu-lineārās noguruma līknes parametru šajā apgabalā tiek noteikti no dispersijas palielinājuma parametriem un variācijas koeficienta logaritma ciklu skaita atkarībā no slodzes samazinājuma. Dots resursa aprēķina piemērs helikoptera Mi-26 ķīļa sijai pēc stenda pārbaudes rezultātiem;

- 5. nodaļā tiek doti nesagraujošās kontroles metožu īss raksturojums. Parādīts, ka vislabākā kontroles metode “on-line” režīmā lokālo bojājumiem ir akustiskās emisijas un termovīzijas metodes, doti piemēri LZH eksistenci un tās pielietojuma sekām stenda pārbaudēs un

ekspluatācijā. Parādīta Lokālo Zonu kontroles monitoringa organizēšana helikoptera Mil-26T stendizmēģinājumos agrīnai plaisu atklāšanai un izstrādāts drošuma izpētes scenārijs helikoptera astes un ķīļa sijām;

- secinājumos uzrādīti rezultāti, kas apstiprina pētījuma tēzes, kuras izvirzītas aizstāvībai;
- pielikumā tiek doti veikto eksperimentu, starprezultāti, izstrādātie matemātiskie modeļi un aprēķini.

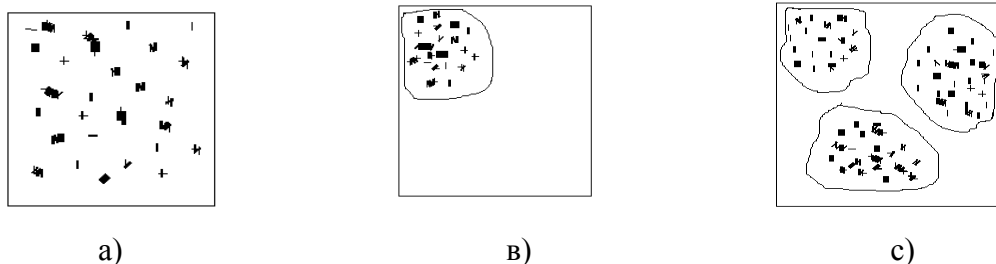
DARBA SATURS

1.nodaļa. Pētījumu jautājums. Problēmas statusa definīcija. Skats nākotnē

Problēmas stāvoklis liecina, par metodoloģijas trūkumu pie lielizmēra konstrukcijas stendizmēģinājumiem un ekspluatācijas laikā. Konstrukcijas tehnisko nosacījumu novērtējums laikā ir tās kontrole ar NT metodēm, vāju vietu definēšanas principi ir atšķirīgi no parastajiem. Tas būtiski palielina laiku, materiālus un cilvēciskos resursus. Lielizmēra konstrukciju pētījumos vajag izvēlēties atbilstošus procesus un konstrukcijas degradācijas nosacījumus.

2.nodaļa. Bojājumu uzkrāšanās modelis lielizmēra konstrukcijās. Lokālo zonu hipotēze

Pirmā nodaļa piedāvā trīs modeļus noguruma bojājumu uzkrāšanai uz viendabīgas virsmas, kas noved pie dažāda rakstura bojājumiem.



2.1. att. Noguruma bojājumu izplatība uz virsmas: a) - vienmērīgi pa virsmu, b) - ir koncentrētas vienā zonā, c) - koncentrēta atsevišķās zonās.

Zināmi sistēmas modeļi statistiskiem un noguruma bojājumiem (vājā posms Veibula hipotēze, klasiskā kūļa modelis Danielsa u.c.), kā arī parametriskie modeļi, kuru apraksta noguruma bojājumu kā dažāda tipa procesus, uzskaitot uzkrāto bojājumus SKAITU, bet neapskata to SADALĪJUMU uz konstrukciju sastāvošiem elementiem. Tas neienes lielas kļūdas apskatot mazas detaļas vai elementus, bet aprakstot lielizmēra konstrukcijas, tas jau var novest pie lielām kļūdām (piemēram, mēroga faktora iespaids, peldošs stāvoklis "vājamam posmam", spriegumu pārbīdīšanās pie daļēja bojājuma).

Vienmērīgs bojājumu sadalījums pa visu virsmu (2.1.a att.) kā visvienkāršākā Puasonu plūsma (vienmērīgi telpā), tiek apskatīta kā visbīstamākais gadījums, kad nav izteikta vājā vieta un ir neiespējami organizēt efektīvu monitoringu, jo tas prasa kontrolēt visu konstrukcijas virsmu. Parasti šādas konstrukcijas ekspluatē pēc piešķirta (nozīmēta) resursa. Šādu principu pielieto īpaši svarīgām detaļām un mezgliem, kuriem ir apgrūtināti veikt kādu monitoringu no nesagraujošās kontroles metodēm. Šīm konstrukcijām ilgmūžības aprēķinam parasti izmanto lognormālo SF (NDF), ko iegūst no modeļa summējot lielu skaitu mikrobojājumus:

$$F(\lg N) = \Phi\left(\frac{\lg(N - N_0) - a}{b}\right) \quad (2.1)$$

kur N - slogošanas ciklu skaits;

N_0 - ciklu jūtības sliekšnis;

a, b – SF attiecīgi stāvokļa un mēroga parametri.

Pretējs gadījums ir noguruma bojājumu uzkrāšana ar arī vienkāršu Puasonu plūsmu, bet tikai ierobežotā apgabalā (2.1.b att.). Šajā gadījumā tehniskā stāvokļa monitoringu ir viegli organizēt tā kā „vājā vieta” ir noteikta jau vēl pirms bojājumu kritiskā blīvuma, kas noved pie sākotnējās maģistrālās noguruma plaisas izveidošanās. Bojājumu uzkrāšanās kontroli, ja šī vieta ir viegli pieejama, var veikt praktiski nepārtraukti, un zonas ierobežojums, tās novietojums ļauj laicīgi veikt remonta darbus. Ja nekontrolējama zonas sabrukšana, piemēram, noguruma plaisas izveidošanās, kas noved pie visas konstrukcijas sabrukšanas tad šādas sistēmas ilgmūžību ērti aprakstīt ar "vājā posma" modeli Veibula sadalījumu (Smallest Extreme Values – SEV):

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N - a}{b}\right)^m\right] \quad (2.2).$$

kur N - slogošanas ciklu skaits;

a, b, m – SF attiecīgi stāvokļa, mēroga un mode parametru.

Ja zonas monitoringi ļauj veikt tās remontu, tad šāds sagraušanas raksturs vislabāk piemērojams ekspluatācijai pēc tehniska stāvokļa. Aviācijā šādu modeli pielieto raksturīgās konstrukcijās, tā kā kontrole pēc vienīgās „vājās vietas”, kā izcelsmes vieta vienai maģistrālai plisai, ļauj ne tikai pielietot zināmās nesagraujošās kontroles metodes tās attīstībai, bet arī laicīgi veikt remontdarbus. Lielizmēra konstrukcijās visbiežāk vērojams bojājumu uzkrājumu starpraksturs (2.1.c att.).

Šāds bojājumu uzkrāšanās starpraksturs konstrukcijās ļauj piemērot ne tikai principu ekspluatācija pēc stāvokļa, bet arī drošu sagraušanu (Fail Safe Concept), jo bojājumu lokalizācija dod iespēju noteikt „vājās vietas” ar sekojošu to monitoringu. Ja lokālajā zonā veidojas maģistrālā plaisa, tad īpaša bīstamība rodas šādu maģistrālo plaisu no citām zonām saplūšana vienā. Var uzskatīt, ka maģistrālās plaisas izveidošanās blakus esošajās zonās ir indikators iespējamai sekojošai visas konstrukcijas sabrukšanai. Tad, lai pārietu uz principu ekspluatācija drošai sagraušanai, nepieciešams ļoti precīzu identificēt šo „vājo vietu” izvietojumu pēc ekspluatācijas rezultātiem un/vai stenda izmēģinājumos.

Lokālās Zonas sagraušanas (maģistrālās noguruma plaisas izveidošanās formā) parasti nenoved pie tūlītējas visas konstrukcijas sabrukšanas. Var pieņemt, ka lokālās zonas ilgizturība labi aprakstās ar „maksimumu” ilgizturības SF no logaritma izskaitļo sekojoši, (Largest Extreme Value – LEV) :

$$F(\tau) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{\tau - a}{b}\right)\right] \quad (2.3)$$

kur $\tau = \lg N$ - slodzes ciklu skaita logaritms;

a, b – SF parametri attiecīgi stāvokļu un mēroga.

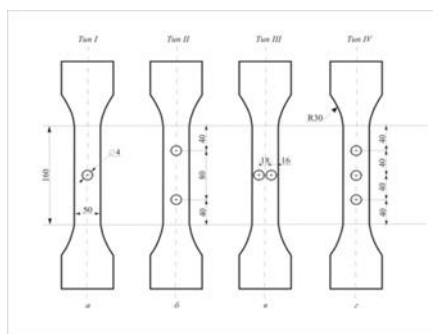
Tiek pieņemts, ka šādu zonu vietošanās viendabīgā struktūrā iespējama tikai pie atkarīgas bojājumu uzkrāšanās zonas iekšienē. Tad bojājuma rašanās var provocēt jaunus bojājumus sākotnējā bojājuma tuvumā, lokalizējot izcelsmes vietu un relaksējot ar to pārējās vietas sakarā ar slogojuma pārdislokāciju. Šī saite izplatās līdz noteiktam attālumam un vājinās attālinoties. Šie apsvērumi noved pie formulējuma „Hipotēzes par Lokālo Zonu ar atkarīgiem noguruma bojājumu uzkrājumiem.” (LZH).

Galvenie principi Lokālo Zonu Hipotēzei:

- lielizmēra konstrukcija var tikt uzskatīta, ka dažu Lokālo Zonu apvienojums;
- Lokālajās Zonās noguruma bojājumu uzkrāšanās notiek stohastiski atkarīgi, bet ārpus Lokālās Zonas – neatkarīgi;
- Lokālas Zonas drošums (ilgizturības) atkarībā no stohastiskās saites rakstura: pozitīva korelācijas saite provocē jaunu plaisu, kas rodas viena pēc otras, kā pirmā turpinājums, lokalizē nākamā bojājuma vietu. Turpretim negatīva saite paātrina tās pilno plaisāšanu šai zonā, ja plaisa rodas vēlāk;
- Lokālā Zona nosaka visas konstrukcijas drošumu (noguruma ilgizturību);
- Lokālā Zona var aptvert pilnīgi visu konstrukciju.

3.nodaļa. Uzkrāto noguruma bojājumu sakarības izpēte uz koncentratoru sistēmām

Sāja nodaļā eksperimentāli tiek pārbaudīts piedāvātais modelis LZH. Piedāvātā hipotēze tika pārbaudīta uz dažādas konfigurācijas paraugiem no alumīnija sakausējuma D16T ar vairākiem koncentratoriem, kuri izvietoti paralēli un perpendikulāri pieliktajam slodzes virzienam.



a). b). c). d).

3.1.att. Paraugi «V» konfigurācijas.

Paraugu izgatavošanā, tipa izvēlē, koncentratoru kārtības izveidē un iestādīšanu pārbaudes iekārtā visur tika izmantots randomizācijas princips. Koncentratori tika izvietoti tādā attālumā viens no otra un no noapaļojuma rādiusa pārejai no darba zonas uz iestiprinājumu, kas ļāva pielietot pieņēmumu, ka sprieguma lauku ap koncentratoru neiespaidos cits koncentrators vai pārbaudes iekārtas satvērēji.

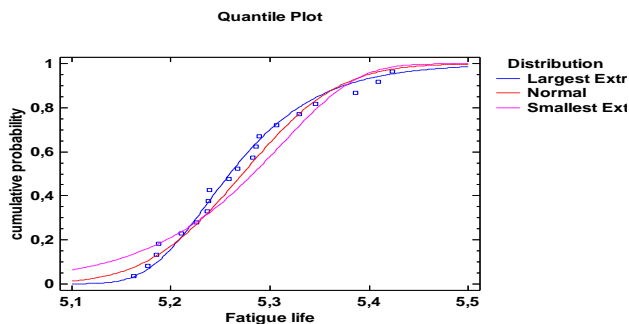
Slodzes parametru: maksimālais cikla spriegums (neto) - 120 MPa, minimālais cikla spriegums (neto) līdz 12 MPa, slodzes frekvence - 8,3 Hz tika pielikti līdz plaisas parādīšanās momentam koncentratora tuvumā (no urbuma sāna). Objektīvai plaisas rašanās momenta noteikšanai tika izmantoti stieples tenzodevēju sistēma ar stieples diametru 0,01 mm kurus aplīmēja ap koncentratoriem. Tenzodevējs nostrādāja pie noguruma plaisas garuma apmēram 0,5 mm no koncentratora urbuma malas. Paraugu pārbaudēs ar vairākiem koncentratoriem plaisu atklāšanai no katrs koncentratora, pirmā un sekojošos plaisu attīstība tika pārtraukta (apstādināta) ar plastisko deformāciju zonā pirms radušās plaisas beigu gala iespiežot puasonu ar 4 mm diametru. Puasonu iespiešanas spēks paraugā 24 kN pēc metodikas Dr.habil.sc.ing, prof. V.Pavelko¹.

Apzīmēsim koncentratoru, kurš izvietots parauga darba zonas vidusdaļā, ar terminu „inner” („iekšējais”), bet koncentratori, kuri izvietoti tuvāk satvērējiem „outer” („ārējā”).

¹ V.Pavelko, I.Savinaev. Izgudrotāja apliecība PSRSN45600, 1975

Par koncentratora ilgizturību τ pieņem logaritmu ciklu skaita N līdz parādās plaisa pie konkrētā urbuma, bet ilgizturības SF – SF veida (3.1) bez jūtības sliekšņa pēc cikliem N_0 .

Noguruma pārbaudes rezultāti Va tipa paraugiem (viens iekšējais centrs) uzrādīt 3.2 att.



3.2.att. Nogurumu ilgizturības SF paraugam ar „inner” (iekšējo) koncentratoru. LEV (2.3) ir vislabākā sakritība ar eksperimentāliem datiem

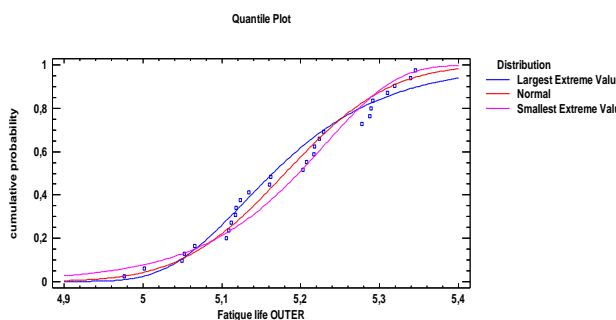
3.2. att. trīs veidu SF no 2. nodaļas tiek uzrādīti. Ir pierādījies, ka SF LEV (2.3) vislabāk atbilst eksperimentāliem datiem. Bet pēc statistikas pētījumiem NDF (2.1) tika izmantota papildus ērtībai.

Iegūtais rezultāts ir bāze, jo pārbaude tika veikta bez citu koncentratoru ietekmes.

$$\hat{a}_{in/a} = 5,27230; \hat{b}_{in/a}^2 = 0,00582; \hat{b}_{in/a} = 0,07278 \quad \hat{v}_{in/a} = \hat{b}_{in/a} / \hat{a}_{in/a} = 1,38\% \quad (3.1)$$

Legend rādītāji: in – „inner”(„iekšā”) un a- parauga tips no 3.1 att.

Paraugu Vb tipa ar ārējam („outer”) koncentratoriem noguruma pārbaudes rezultāti uzrādīti 3.3. att.



3.3. att. Nogurumu ilgizturības SF ar „outer”(ārējā) koncentratoriem. NDF(2.1) vispiemērotāk apraksta noguruma ilgizturību šajā gadījumā.

Uzskatot, ka noguruma plaisu parādīšanās momenti uz koncentratoriem ir stohastiski neatkarīgi, iegūtos ilgmūžības rezultātus ārējiem koncentratoriem var apvienot vienā atlasē grupā ar SF parametriem:

$$\hat{a}_{ot/b} = 5,18012 \quad \hat{b}_{ot/b}^2 = 0,01081 \quad \hat{b}_{ot/b} = 0,10397 \quad \hat{v}_{ot/b} = 2,0\% \quad (3.2)$$

Kārtu statistikai SF ar divu neatkarīgu koncentratoru sistēmu ar sākotnējo SF (3.1) ir sekojoša:

pirmās kārtas statistika:

$$F_{(1)}(\tau_{(ot)}) = 1 - \left[1 - \Phi\left(\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\right) \right]^2 \quad (3.3)$$

otrās kārtas statistika:

$$F_{(2)}(\tau_{(ot)}) = \Phi^2\left(\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\right) \quad (3.4)$$

Zināms, ka matemātiskās sagaidāmās vērtības un dispersijas sadalījumiem pirmās un otrās kārtas statistiskām, kā arī korelācijas koeficientam $\rho_{0(1,2)}$, saistīti ar izejas (sākotnējo) sadalījumu ar attiecībām

$$= a_o \pm 0,5642 b_o \quad b_{o(1,2)}^2 = 0,6816 b_o^2 \quad \rho_{0(1,2)} = 0,467 \quad (3.5)$$

Salīdzinot eksperimentālās vērtības dispersijā, sagaidāmām (vidējām) vērtībām, korelācijas koeficientus pirmās un otrās kārtas statistiskām ar teorētiskām vērtībām, parādīja, ka hipotēze pār neatkarīgiem novērojumiem netiek noliegta nav noraidīts².

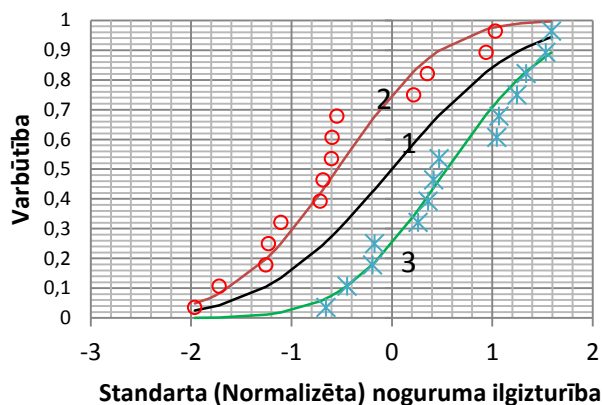
3.1. tabula

Salīdzinājums teorētisko vērtību kārtas statistikas SF ar eksperimentālajiem datiem (ārējie koncentratori).

kārtu statistiku SF parametri		Matemātiskā sagaidāmā vērtība $a^{0(1,2)}$	Dispersija $b_{0(1,2)}^2$	Korelācijas koeficients $\rho_{0(1,2)}$
Teorētiskā vērtība	1-mā	5,12146	0,00737	0,467
	2ā	5,23878	0,00737	
Eksperimenta rezultāti	1-mā	5,12165	0,00899	0,466
	2ā	5,23860	0,00610	

² Visu statistisku hipotēžu pārbaude tika veikta ar būtiskuma līmeni $\alpha = 0,05$ (1-mās pakāpes kļūda)

Ekspierimentālo un teorētisko rezultātu laba sakritība redzama 3.4.att.



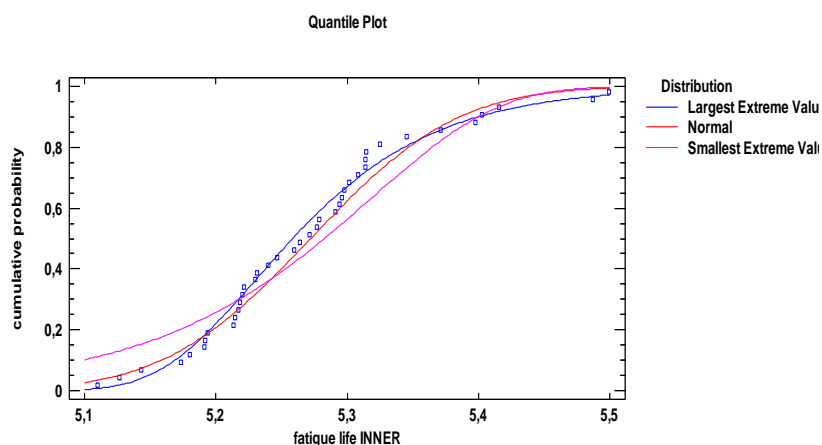
3.4.att. Pirmās un otrās kārtas statistika ārējā koncentratorā SF: 1) sākuma standarta NDF; 2) pirmās kārtas statistikas standarta CDF un normalizēta pirmās plaisas rašanās eksperimentālā noguruma ilgizturība; 3) Otrās kārtas statistikas standarta CDF un normalizētā otrās plaisas atrašanās eksperimentālā noguruma ilgizturība.

Salīdzinot ilgmūžības vidējās vērtības (3.1) un (3.2) negaidītu rezultātu par statistiski būtisku ilgizturības samazinājumu ārējiem koncentratoriem ($a_{in} = 5,27230$) salīdzinot ar iekšējiem ($a_{ot} = 5,18012$), var izdarīt secinājumu, ka pie visiem līdzīgiem pārējiem nosacījumiem konstrukcijas vājai vietai jābūt izvietotai apgabalā vai tuvumā pārejai no vienas nevienādības uz otru vai no kādas raksturīgas zonas uz citu, kura pēc kaut kādiem parametriem atšķiras no pirmās.

Izveidot analogisku analīzi eksperimenta rezultātiem Vc tipa paraugiem ar diviem iekšējiem („inner”) koncentratoriem, tika iegūti sekojoši rezultāti. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar rezultātu (3.1), parādīja, ka abas atlases ir viendabīgas un var tikt apvienotas vienā ar parametriem 3.5.att.

$$a_{in} = 5,27219 \quad b_{in}^2 = 0,00703 \quad b_{in} = 0,08387 \quad v_{in} = 1,59\% \quad (3.6)$$

Bet salīdzinošā analīze kārtas statistiku SF no parametriem parādīja statistiski būtisku stohastisko saiti starp plaisu rašanas momentu sistēmā ar diviem iekšējiem koncentratoriem.



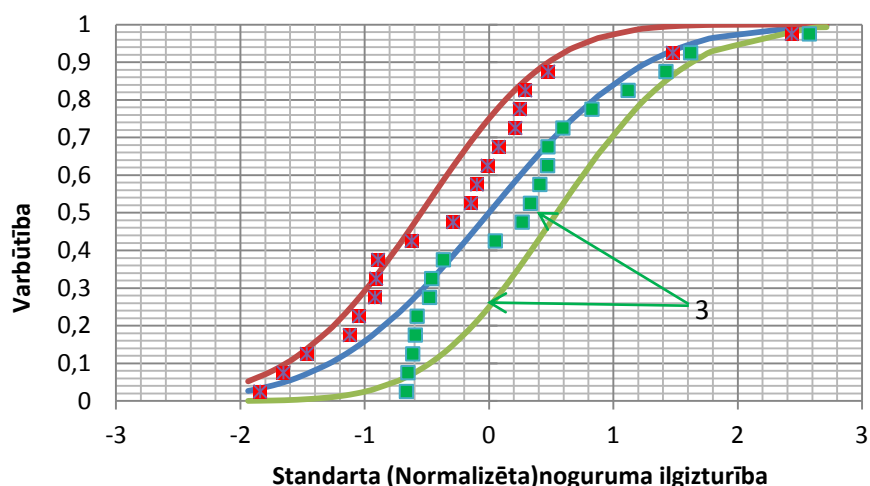
3.5.att. Nogurumu ilgmūžības SF iekšējam koncentratoram. LEV SF ir piemērotāks un vislabāk atbilst eksperimentāliem datiem

3.2. tabula

Teorētisko vērtību kārtas statistiku SF Salīdzinājums ar eksperimentālajiem datiem (iekšējie koncentratori).

Kārtu statistiku SF parametri		Matemātiskā sagaidāmā vērtība $a_{0(1,2)}$	Dispersija $b^2_{0(1,2)}$	Korelācijas koeficients $\rho_{0(1,2)}$
Teorētiskā vērtība	1-mā	5,22487	0,00479	0,467
	2-ā	5,31951	0,00479	
Eksperimenta rezultāti	1-mā	5,24662	0,00840	0,955
	2-ā	5,59766	0,00626	

Eksperimentālo rezultātu novirzi no teorētiskajām vērtībām kārtu statistikas SF labi redzamas arī 3.6. att. Tādā gadījumā izvirzītā hipotēze par noguruma plaisu neatkarīgu parādīšanos pēc šādas koncentratoru sistēmas ir noraidāma.



3.6.att. Teorētiskās un eksperimentālās kārtu statistikas SF (iekšējie koncentratori). Normalizētie eksperimentālie noguruma ilgizturība eksperimentālie dati par 1. un 2 plaisas ar diviem iekšējiem koncentratoriem: 1) sākuma standarta NDF; 2) pirmas kārtas statistikas standarta CDF un normalizētā eksperimentālā noguruma ilgizturība līdz pirmās plaisas atklāšanas), 3) otrās kārtas statistikas standarta CDF un normalizētā otrās plaisu atklāšanas eksperimentāla noguruma ilgizturība

Izdarām analīzi eksperimenta rezultātiem ar trim koncentratoriem Vd tipa (3.1.d att.) izveidotiem parauga ass un slodzes virzienā - viens iekšējais un divi ārējie koncentratori. Eksperimenta rezultāti iekšējam koncentratoram Vd tipa:

$$\hat{a}_{in/d} = 5,30935 \quad \hat{b}_{in/d}^2 = 0,00625 \quad \hat{b}_{in/d} = 0,07908 \quad \hat{v}_{in/d} = 1,49\% \quad (3.7)$$

Salīdzinot šos rezultātus ar rezultātiem Va tipa (3.1) parāda, ka nulles hipotēze par iekšējo koncentratoru ilgmūžības vienādību tiek noraidīta par labu alternatīvai par lielāku ilgmūžību iekšējam koncentratoriem Vd tipa salīdzinājumā ar ilgmūžības izolētiem iekšējiem koncentratoriem Va un Vc tipa. Iekšējo koncentratoru ilgmūžība salīdzinot ar (3.2) palika nemainīga:

$$\hat{a}_{ot/d} = 5,17258 \quad \hat{b}_{ot/d}^2 = 0,00916 \quad \hat{b}_{ot/d} = 0,0840 \quad \hat{v}_{ot/d} = 1,62\% \quad (3.8)$$

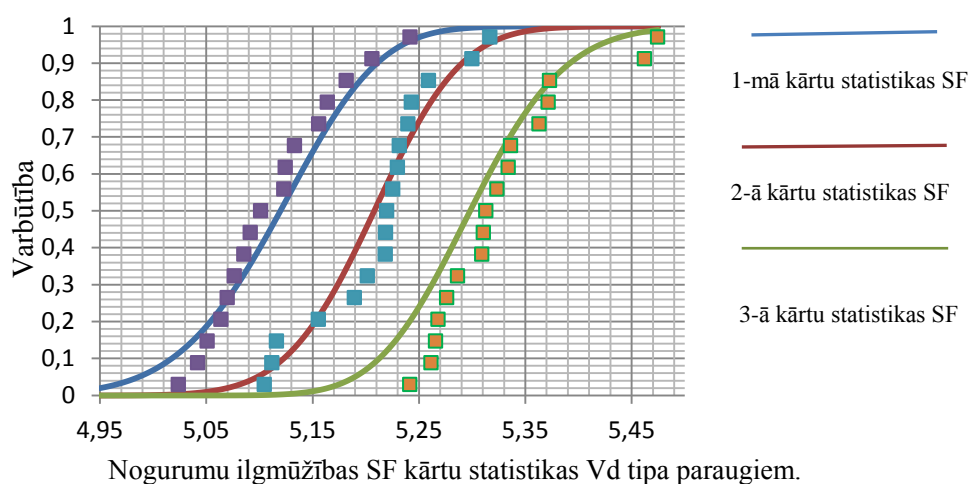
Bet salīdzinot pirmās kārtas statistiku SF parametrus ārējiem koncentratoriem no sistēmas ar trim koncentratoriem.

$$\hat{a}_{ot/d} = 5,11363; \quad \hat{b}_{ot/d}^2 = 0,00367; \quad \hat{b}_{ot/d} = 0,06062; \quad \hat{v}_{ot/d} = 1,19\%; \quad (3.9)$$

ar analogiskiem datiem Vb tipa paraugiem (3.2 tab.) uzrādīja statistiski būtisku atšķirību teorētiskām vērtībām no eksperimentālam par labu hipotēzei stohastisko saišu esamība koncentratoru sistēmā Vd tipa. Apskatot koncentratoru sistēmu Vd kā divu sistēmu apvienojumu: sistēmu ar vienu iekšējo koncentratoru (kā Va tipu) un sistēmu ar diviem ārējiem koncentratoriem (kā Vb tipu) iegūsim:

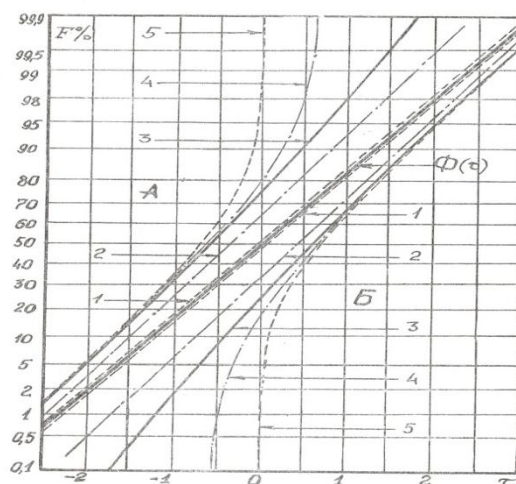
$$\begin{aligned}
 F_{(1)}(\tau) &= 1 - [1 - \Phi\{\frac{\tau - a_{in}}{b_{in}}\}][1 - \Phi\{\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\}]^2 \\
 F_{(2)}(\tau) &= \Phi^2\{\frac{\tau - a_{in}}{b_{in}}\} + 2\Phi\{\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\}\Phi\{\frac{\tau - a_{in}}{b_{in}}\}[1 - \Phi\{\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\}] \\
 F_{(3)}(\tau) &= \Phi\{\frac{\tau - a_{in}}{b_{in}}\}\Phi^2\{\frac{\tau - a_{ot}}{b_{ot}}\}
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

kur sākuma parametri noteikti pēc (2.2) un (2.3).



3.7 att. Ilgizturības SF kārtu statistikas Vd tipa paraugiem. Ekperimentālie punkti un teorētiskās SF diagrammas

Vienkāršojot un nezaudējot kopību atrodam SF izteiksmi divdimensiju normālajam sadalījumam ar dažādām korelācijas matricām.



3.8.att. SF kārtu statistiskām divdimensiju normālajam sadalījumam 1) - $\rho = +1,0$ 2) - $\rho = +0,7$
3) - $\rho = -0,7$ 4) - $\rho = -1,0$

Pie $\rho = +1,0$ divdimensiju normālais sadalījums pārtop vien dimensiju (3.1.) ar tādām pašām kārtu statistiskām (3.7.) un (3.8).

Pie $\rho = -1,0$ SF pārtop formā:

$$\begin{aligned}
 F_{(1)}(\tau) &= 2\Phi(\tau) & \text{vai } \tau \leq 0 \\
 F_{(1)}(\tau) &= 1,0 & \text{vai } \tau > 0 \\
 F_{(2)}(\tau) &= 0 & \text{vai } \tau \leq 0 \\
 F_{(2)}(\tau) &= 2\Phi(\tau) - 1 & \text{vai } \tau > 0
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Pie dažādām korelācijas koeficientu vērtībām SF kārtu statistikas parādītas 3.8 att.

Plaisu parādīšanos (rašanos) uz pirmajiem koncentratoriem PALĒNINA plaisu rašanos (pie negatīvas korelācijas saites) uz nākošiem koncentratoriem veidojot ar šo kādu paātrinātu plaisu uzkrāšanās zonu (pozitīva korelācijas saite) skat. 3.7.att. un to palēninājuma zonu.

Pārbaudām nulles hipotēzi par stohastiskās saites neesamību koncentratoru sistēmā pēc iekšklases korelācijas koeficienta (IKK) vērtības izskaitļošanas, kur klašu skaits (koncentratoru skaits paraugā) ir $k=3$:

$$\bar{r} = \frac{1}{k-1} \left(k \frac{\overline{b_{\tau}^2}}{b^2} - 1 \right)
 \tag{3.12}$$

kur r - atlasses IKK;

k - locekļu skaits klasē, mūsu gadījumā, koncentratoru skaits paraugā ($k=3$);

$\overline{b_{\tau}^2}$ - klases vidējā ilgmūžība;

b^2 -pilnas (visas) atlasē dispersiju attiecībā pret kopējo vidējo $\bar{\tau}$ koncentratoru ilgumžību;
 b^2_{τ} - atlasē dispersijas no vidējām vērtībām klasēs $\bar{\tau}_k$.

Iegūstam

$$b^2 = 0,01140; \quad b^2_{\tau} = 0,00125 \quad r^2 = -0,336^2 \quad (3.13)$$

IKK kritiskā vērtība pie būtiskuma līmeņa $\alpha = 0,05$ $r_{\alpha} = -0,10$. Tad empīriskā vērtība izskaitļotajam IKK atrodas aiz liela iespēju daudzuma pieņemšanas nulles hipotēzi.

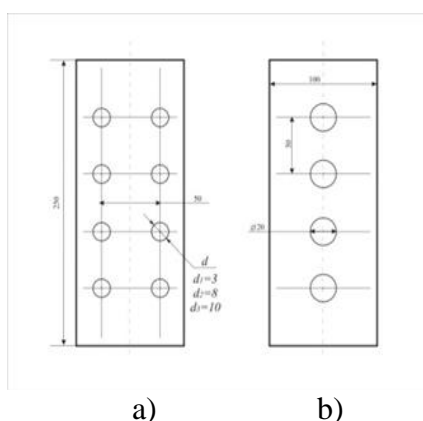
Balstoties uz iegūtajiem eksperimentu rezultātiem var izdarīt sekojošus secinājumus:

- stohastiskās saites lieluma noteikšanai tika izmantots iekšklases korelācijas koeficients, kas ļauj novērtēt stohastiskās saites līmeni novērojumu grupā neatkarīgi no to rašanās momenta;

- sakarība starp noguruma bojājumu uzkrāšanos koncentratoros, kas novietoti gar parauga darba daļu vai paralēli pieliktai slodzei ir negatīva korelācijas sakarība. Negatīva korelācijas saites (sakarības) klātbūtne liecina par lokalizētu noguruma bojājumu uzkrāšanos pie viena no koncentratoriem;

- sakarība starp noguruma bojājumu uzkrāšanos koncentratoros, kas novietoti pa darbs daļas platumu vai perpendikulāri slodzei ir pozitīva korelācijas sakarība. Pozitīva korelācijas saites klātbūtne starp koncentratoru ilgumžību nozīmē, ka viena (pirmā) no visiem koncentratoru sagraušana paātrina pārējo sagraušanu. Nākošo koncentratoru secīgu sagraušanu vai uzskatīt kā pirmās izveidojušās plaisas izplatību.

Izvedam korelācijas analīzi balstītu uz IKK paraugiem ar koncentratoriem W tipa⁴.



3.9. att. Paraugi no alumīnija sakausējuma Д16Т ar apaļu koncentratoru sistēmām

³ Jāatzīmē, ka IKK ir asimetriska attiecībā uz nulli. Pie pati absolūtā vērtība IKK negatīvām vērtībām izteikt vairāk atkarību nekā pozitīvām vērtībām. Lauks esamība IKK ir robežās $1 / (k-1) \leq r \leq 1,0$

⁴ D.h.Sc.I., prof. V.Pavelko bija ieguvis šo izmēģinājumu dati.

3.3. tabula

Sakarība starp no iekšklases korelācijas koeficientu un koncentratora diametru.

Urbuma diametrs, mm	Atlases IKK, r	Atlases apjoms	Kriteriālās statistikas atlases lielums T	Kriteriālās statistikas kritiskā vērtība ($\alpha = 0,05$)
3	0,91	40	9,48	2,02
8	0,76	32	5,50	2,04
10	0,63	40	4,60	2,02
20	0,28	16	1,10	2,13

IKK r tiek noteikts no (3.12), bet kritiskā statistika nosakāma kā:

$$T = (z - z_0)\sqrt{(2n-3)/2}$$

$$z = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)$$

Redzama tendence samazināties stohastiskai saitei palielinoties attālumam starp koncentratoriem.

3.4. tabula

Atkarība iekšklasēs no korelācijas koeficienta no attāluma starp koncentratoru centra

Attālums starp urbumu centriem, mm	Koncentratoru skaits klasē, k	Atlases IKK, \hat{r}	Atlases apjoms	Kriteriālās statistikas atlases lielums T	Kriteriālās statistikas kritiskā vērtība ($\alpha = 0,05$)
50	2	-0,80	24	4,99	2,07
100	3	-0,45	48	1,89	2,01
150	4	-0,29	32	1,13	2,04

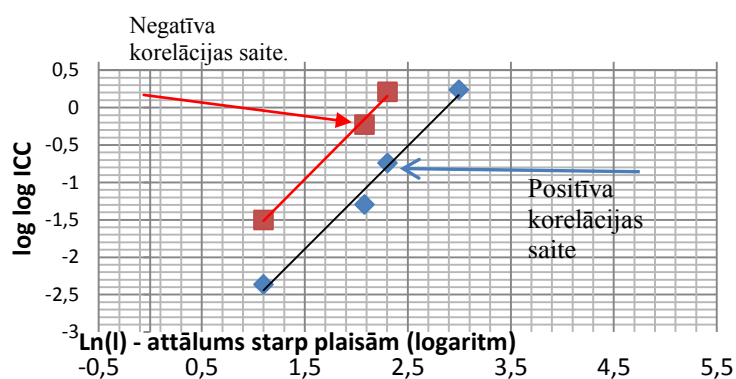
Sastādīts matemātiskais modelis, kas apraksta IKK izmaiņas vadoties no attālumu palielinājuma. Pēc virknes vienkāršu pieņēmumu un vienam mērījumam iegūta izteiksme IKK izmaiņām atkarībā no attāluma:

$$R(l) = \exp\left\{-\int_0^l \mu(x) dx\right\} = e^{-\varphi(l)} \quad (3.14)$$

kur $\varphi(l) = Cl^m - C$ un m – modeļa parametri.

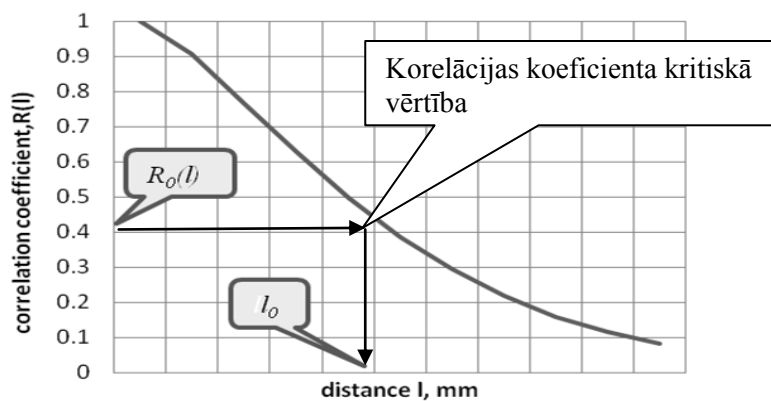
Izejas dati lokālās zonas izmēru noteikšanai.

	Šķērsām pieliktajai slodzei				Gar pielikto slodzi		
$\emptyset, (l), mm$	3	8	10	20	50	100	150
$Ln(l)$	1,10	2,08	2,30	3,0	3,91	4,61	5,01
$R(l)$	0,91	0,76	0,62	0,28	-0,80	-0,45	-0,29
$Ln(-Ln(R))$	-2,36	-1,29	-0,74	0,24	-1,50	-0,23	0,21



3.10.att. IKK izmaiņas atkarībā no attāluma starp noguruma plaisu rašanās vietām.

Iegūstot izejas vērtības modeļa parametriem.



3.11. att. Lokālās zonas izmēru noteikšana

Pozitīvai korelācijas saitei šo parametru vērtības ir:

$$\hat{C} = 0,0192 \quad \hat{m} = 1,3716$$

Negatīvai korelācijas saitei šo parametru vērtības ir:

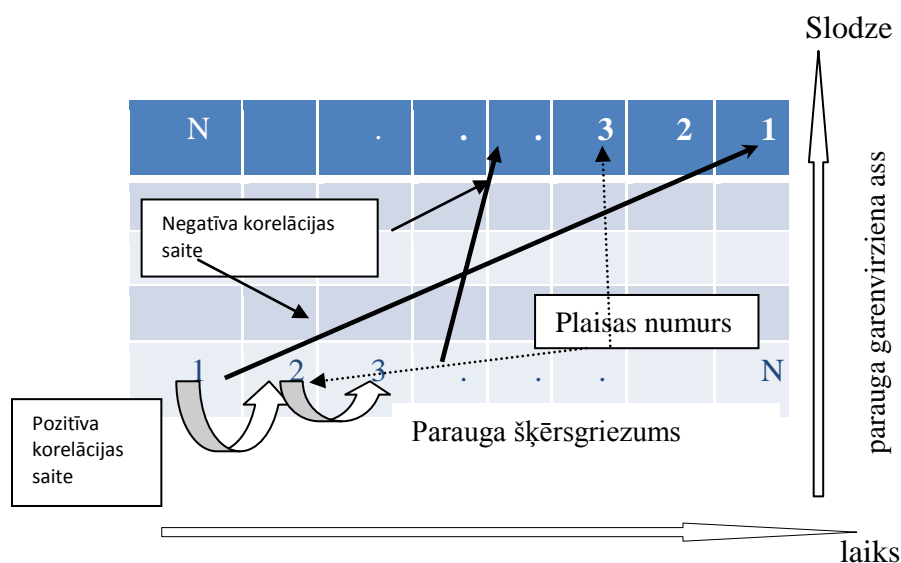
$$\hat{C} = 0,00047 \quad \hat{m} = 1,590$$

vai

$$l_{hor.} = 14,9 \text{ mm.}$$

$$l_{vert} = 106,0 \text{ mm}$$

Ar šo ir pierādīta lokālo zonu esamība ar atkarīgiem nogorumu bojājumu uzkrājumiem
Paskaidrojam to 3.12 att.



3.12. att. Lokālās zons attiecību stohastisko saišu raksturs.

Kādā viendabīgas konstrukcijas daļā pēc laika rodas pirmais bojājums. Pie pozitīvas korelācijas saites esamības šķērsām pieliktās slodzes vektoram, nākošā bojājuma varbūtība pirmā tuvumā pieaug. Pie otrās rašanās, blakus esošais bojājums – liela varbūtība tāpat rasties tiešai utt. Var uzskatīt šādu procesu kā maģistrālās plaisas izveidošanos, pie kam šim procesam nav jābūt secīgam. Radusies bojājumu plūsma formē lokālu perēkli nākošajai plaisai un šķēlumā nosaka bojājumu uzkrāšanas, izplatīšanās raksturu un ātrumu. Acīmredzami, kā agrīni izveidojies bojājumu noved pie ātras maģistrālās plaisas veidošanās stadijas un sekojošas konstrukcijas sagraušanas. Šāda uzkrāto bojājumu attīstības stadija raksturīga stipri slogotiem izpētes objektiem. Ja pirmais bojājums šajā šķēlumā radīsies vēlāk, tad arī sekojošie bojājumi šajā šķēlumā radīsies nedaudz vēlāk, tādējādi mazinot varbūtību maģistrālās plaisas izcelsmei.

Pozitīva korelācijas saite paredz, ka vēl līdz tam, kad nākošais bojājums tiks atklāts virzienā, kas perpendikulārs pieliktai slodzei, jau ir agrāk atklāts bojājums. Tad var pieņemt, ka otrās plaisas rašanās ir pirmās izplatīšanās (turpinājums) radot iespēju veidoties maģistrālai plaisai. Līdz ar to šādu atsevišķu plaisu saplūšana maģistrālajā nosaka ilgmūžību visai lokālai zonai.

Ja apskatāmajā šķēlumā agrīni veidojies bojājums provocē nākošo bojājumu parādīšanos, tad esošā stohastiskā negatīvā saite aizkavē jaunu bojājumu rašanos citos šķēlumos, lokalizējot nākošo izcelsmes perēkli pie pirmā bojājuma (protams, agrāk aplūkotās sakarības zonas ietvaros). Šis gadījums arī noved pie vairāku zonu izveidošanās, bet liela slogojuma gadījumā - daudzu perēkļu sagraušana aplūkojama šķēlumā. Pie novēlota bojājuma rašanās šķēlumā

negatīvā stohastiskā saite izprovocē agrīnu plaisu rašanās perēkli citos šķēlumos. Tāpēc arī vēlāka bojājumu rašanās raksturo sekojošu bojājumu plūsmu paātrinātā tempā un izkļiedētu visā apskatāmajā zonā. Turpretim negatīva korelācijas saite, kas darbojas pieliktās slodzes virzienā, noved pie tā, ka iepriekš izveidojusies plaisa piebremzēs noguruma bojājumu veidošanos pieliktā spēka virzienā lokālajā zonā, bet vēlāk izveidojusies plaisa novedīs pie ātras visas zonas saplaisāšanas. Būtu jāatzīmē, ka negatīva saite darbojas lielākā attālumā kā pozitīvā. Izveidojas paradoksāla situācija, kad agrīni izveidojusies plaisa ļauj nodrošināt kontroli pār tās izplatīšanos, bet vēlāk veidojusies plaisa ir signāls visas konstrukcijas paātrinātai plaisāšanai.

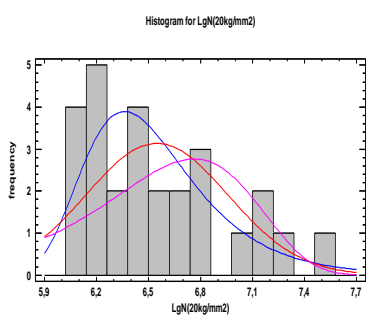
Augšminētais apstiprina hipotēzi par noguruma bojājumu uzkrāšanos lokālajās zonās.

4.nodaļa. Lokālās zonas nogurumu ilgizturības modelis.

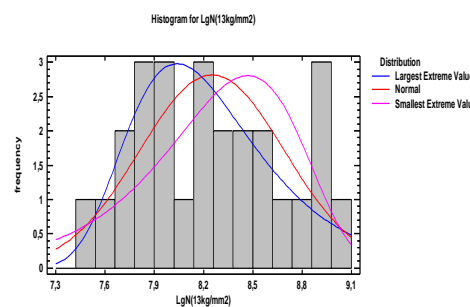
Šajā nodaļā aplūkots parametriskais modelis lokālās zonas noguruma pretestībai, kas ļauj aprakstīt noguruma līkni, ilgizturības SF, SF robežas ilgizturībai un ciklu jutības sliekšni tikai ar četriem parametriem, balstoties uz noguruma pārbaužu rezultātiem. Šis modelis, ņemot vērā iepriekš minētās noguruma ilgizturības SF veida LEV (2.3) apvieno noguruma stiprības īpašības tikai pēc četriem parametriem. Visbiežāk lietotais salīdzinājums trīs veidu SF minēts 2. nodaļā, liecina, ka PRIEKŠROKA no noguruma īpašības jāpieņem no LEV SF apraksta.

Noguruma testu datus īpaši labi attēlo paraugu analīzes vairāk kā no 2 000 paraugiem zem sloojuma atšķirīga līmeņa demonstrē un pierāda LEV priekšrocību pret citu CDF. Uz 4.1.att. demonstrē eksperimentālais varbūtības blīvuma DF diagrammas un trīs viņas apraksts galvenais labais DF (NDF, SEV, LEV). Īsta petījumā darbā tiek dota orgīnālu izmēģinājumu uz nogurumu un paraugu izmēģinājumu īpaši prezentatīvi atlašu rezultātu analīze, veikto M.Stepnov (vairāk, kā 2 000 paraugu). Kā piemēru še iesnieg varbūtības blīvuma DF diagrammas darbojas paraugu noguruma izmēģinājumiem zem spriegumu slodzes līmeņa 20 kg/mm² un 13,5 kg/mm²⁵

⁵ Aprēķini ir veikti, izmantojot Statistikas programmu "Statgraphic Centurion" 16.1.17 XYI. versija (novērtēšanas režīma).



a)



b)

4.1 att. Paraugu lietošana maim probability blīvuma izplatīšanās funkcijas salīdzinājums: a) - 20 kg/mm²; b) - 13 kg/mm²

4.1. tabula

Labums-atbilstība Kolmogorov-Smirnov LgN izmēģinājuma testiem

Tipveida apjoms 600 paraugu				Tipveida apjoms 50 paraugi			
<i>Spriegums 20kg/mm²</i>	<i>Largest Extreme Value SF</i>	<i>Normal SF</i>	<i>Smallest Extreme Value SF</i>	<i>Spriegums 13/mm2</i>	<i>Largest Extreme Value SF</i>	<i>Normal SF</i>	<i>Smallest Extreme Value SF</i>
DPLUS	0,145635	0,131531	0,147069	DPLUS	0,0818195	0,103213	0,11574
DMINUS	0,082505	0,118338	0,178423	DMINUS	0,0734303	0,084682	0,08521
DN	0,145635	0,131531	0,178423	DN	0,0818195	0,103213	0,11574
P-Value	0,615832	0,738575	0,359496	P-Value	0,994983	0,944609	0,87704

Kur: DPLUS ir maksimālā pozitīvā eksperimenta punkta novirze no teorētiskās vērtības;

DMINUS eksperimenta punkta maksimālā negatīvā novirze no teorētiskās DN eksperimenta punkta maksimālā novirze;

P - varbūtība iegūt testa statistiku vismaz tikpat daudz kā tādu, kas patiešām ir ievērota, pieņemot, ka nulles hipotēze ir patiesa.

Lai mēs varētu skatīt mazākā sprieguma līmeni, vairāk LEV jāpielāgo, lai noteiktu varbūtības blīvuma SF, lai pārņemtu labāko, kur mazāks-spriegums konstrukcijās(augsta uzticamības pakāpe), tad SEV SF modelis ir apstiprināts.

Vēl svarīgāks ir fakts, ka labums ar vislābākais SF kreisās puses galā, kur ir mazas atteices varbūtības, zināmas kā ilgizturības ciklu robeža.

Mazāku SF astes zona (p if $X \leq x$) priekš LgN

Tipveida apjoms 600 paraugiem				Tipveida apjoms 50 paraugiem			
20kg/mm ²	Largest	Normal SF	Smallest	13kg/mm ²	Largest	Normal SF	Smallest
X (Lg N)	Extreme Value SF		Extreme Value SF	X (LgN)	Extreme Value SF		Extreme Value SF
5,23856	8,63762E-18	0,000739	0,028759	6,60117	7,34736E-19	9,46868E-5	0,0103042
5,89337	0,00985306	0,055975	0,124801	7,42632	0,00742421	0,0309904	0,0749089
6,54819	0,580863	0,5	0,456088	8,25147	0,562294	0,5	0,44308
7,20301	0,93812	0,944025	0,93808	9,07661	0,93463	0,96901	0,987725
7,85783	0,992517	0,999261	0,999997	9,90176	0,992093	0,999905	1,0

Te ir skaidri redzams, ka SF kreisā zona ir plūdes kā ciklu robeža parādīšanās, kas ievērojami ietekmē drošības novērtējumu (ierobežo) kalpošanas laiku.

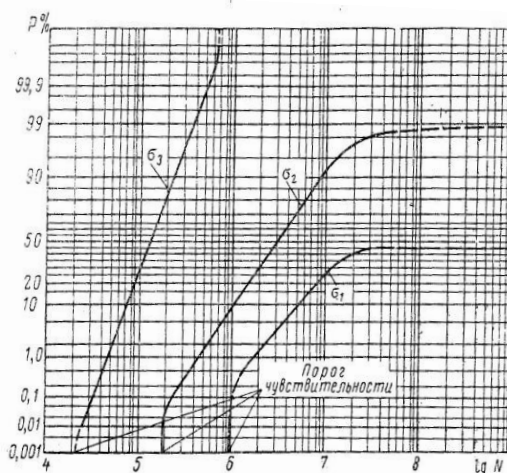


Fig.4.2. Eksistences ciklu robeža N_0 aviācijas elementi noguruma izmēģinājumā laikā⁶ ;
(spriegums: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$)

Tāpēc ir iespējams pieņemt pieņēmumu, kas atbilstoši apraksta noguruma ilgizturību, un jāpieņem LEV SF no ekspluatācijas slodzēm.

⁶ From the book М.Миль и др. "Вертолеты. Расчет и проектирование. т.2 Москва, Машиностроение, 1967.

Varbūtības (astes kreisās puses SF) vērtības aprēķins un salīdzinājums, NDF (2.2), Veibula-LEV (2.1) un DESF-LEV (2.3))

kvantilis limeni p	0.001	0.01	0.1	0.2
NDF	-3,090	-2,326	-1,281	-0,841
Weibull (SEV)	-4,935	-3,136	-1,304	-0,719
DESF (LEV)	-1,057	-0,741	-0,200	0,079

Kur: kvantilis NDF = $\Phi^{-1}(p)$;

kvantilis SEV = $(\log(-\log(1-p)) - \Gamma'(1))\sqrt{6/\pi}$;

kvantilis LEV = $(-\log(-\log(p)) - \Gamma'(1))\sqrt{6/\pi}$;

Tātad, ja konstrukcija (vai viņas nogurumu vietējā zona) saskaņā ar NTM līdzsekošanu, vai ir droši saugraušanas elementi, vislabāk izmantot DESF (LEV), lai novērtētu drošas ekspluatācijas laiku.

Lai novērtētu uzticamību vietējā zonā, nozīmīgiem jautājumiem ir noteikt un noformēt atteikšanos no brīža, kad vietējā zona (lēmumu pieņemšanas stāvokli vai atteices kritēriju).

Ir ierosināts noraidīt šādu kļūmi, vietējās zonas kritēriji:

- kritiskā vērtība, blīvums konstatēts zaudējumiem (plaisas stiegra, segu un citi stiprības dzīslām noteiktā zonā;

- kritiskais skaits jaiznīcina stiprības elementu noteiktā zonā;

- kritiskā noguruma plaisu skaits, kas, paplašinot darbību virzienā pozitīva korelācija attiecības (3. nodaļa) īpaši centīgus pēc tam apvienojas vienā galvenā plaisa;

- paātrināta augšana vienā no galvenajām plaisām apšuvumā;

- veikt turpmāko remontu, astei un ķīļa sijai ar iepriekšminētajiem kritērijiem, kas apvieno, lai palielinātu objekta dīkstāves stendizmēģinājumos.

Pieņemsim, ka SF noguruma ilgizturības pie zemiem spriegumu līmeņiem atteicas uz vienu SF saimi, vai tieši uz DESF saimi, bet SF izmaiņas atkarībā spriegumu lieluma atkarīgas tikai no tās parametru izmaiņām:

$$F(\tau | \sigma) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{\tau - a(\sigma)}{b(\sigma)} \right) \right] \quad (4.1)$$

kur matemātiskā sagaidāmā vērtība: $M\{\sigma\} = a(\sigma) - b(\sigma)\Gamma'(1)$; (4.2)

$\Gamma'(1) = -0,5772\dots$ Eilera konstanta;

Dispersija: $D\{\sigma\} = \pi^2 b^2(\sigma) / 6$ (4.3)

Ievadam apzīmējumu $\varphi(\tau, \sigma) = \frac{\tau - a(\sigma)}{b(\sigma)}$ (4.4)

Funkcijai (4.1) būs sadalījuma funkcijas īpašības, ja izpildīsies nosacījumi:

pie $\sigma = 0$ $\varphi(\tau, \sigma) \rightarrow -\infty$

pie $\sigma \rightarrow \infty$ $\varphi(\tau, \sigma) \rightarrow \infty$

Viegli ieraudzēt, ka šos nosacījumus apmierina funkcijas (3.4) proporcionalitāte sprieguma σ logaritmam. Apzīmējam $s = \lg \sigma$.

$$\varphi(\tau, \sigma) \propto s$$

Zināms, ka pie sprieguma pieauguma dispersija un variācijas koeficients samazinās:

Variācijas koeficients SF (4.1) pie zināmām izteiksmēm (4.2) un (4.3)

$$v(\tau, \sigma) = \frac{\pi / \sqrt{6}}{\frac{a(\sigma)}{b(\sigma)} + \Gamma'(1)} \quad (4.5)$$

Var paredzet

$$b(\sigma) = C/s^m \quad (4.6)$$

$$\frac{a(\sigma)}{b(\sigma)} = \gamma \cdot s^m + \theta \quad (4.7)$$

Ievietojot (4.2) uz teiksmē (4.3), ņemot vērā (4.5) un ieviedot apzīmējumu

$$\gamma C = \tau_0; \quad \left[\theta - \Gamma'(1) \right] C = P; \quad M\{\tau\} = \tau_{cp} \quad (4.8)$$

iegūstam noguruma līknes vienādojumu vidējām ilgizturības vērtībām:

$$(\tau_{cp} - \tau_0)s^m = P \quad (4.9)$$

Ievietojot (4.4) un (4.5) izteiksmē (4.1), un divreiz logaritmējot jauniegūto izteiksmi, iegūstam noguruma līkni p-kvantiļu līmenī:

$$(\tau_{cp} - \tau_0)s^m = C(-f(p) + \theta) \quad (4.10)$$

kur

$f(p) = \ln(-\ln p)$, p – uzdotais sadalījuma kvantiļis.

Ievedot apzīmējumus:

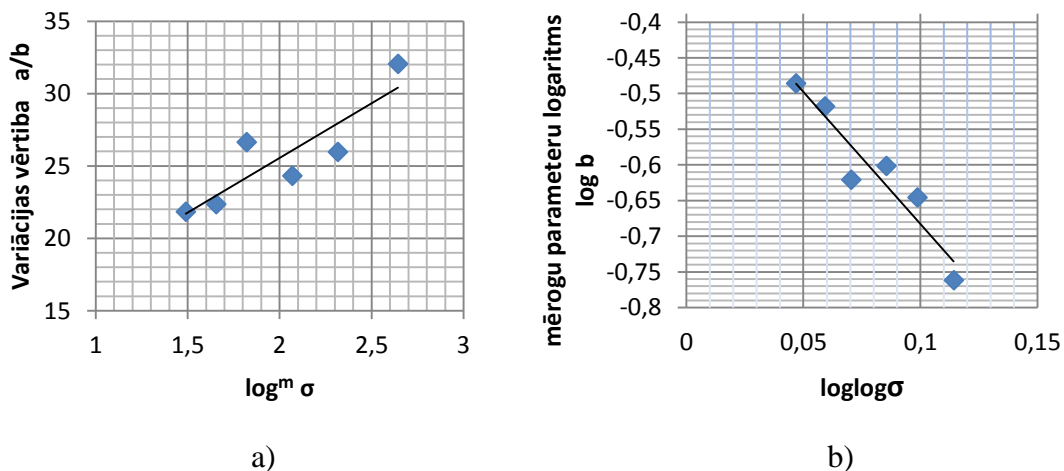
$$A\{\tau\} = \theta \cdot C / (\tau - \tau_0); \quad B\{\tau\} = C / (\tau - \tau_0); \quad (4.11)$$

Iegūstam

$$F(\sigma | \tau) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{s^m - A\{\tau\}}{B\{\tau\}} \right) \right] \quad (4.12)$$

Redzam, ka sadalījuma funkcija ilgūzīības robežām lokālai zonai uz pieņemtās bāzes arī ir DESF veida.

Pieņemtā modeļa parametru novērtējums tika veikts pēc pārbaudes rezultātiem no vairāk kā 2000 paraugiem:



4.3.att. Noguruma ilgizturības izkliedes palielinājums atkarībā no konstrukcija sprieguma samazinājuma a) – mērogu parametrs pret $\log \log \sigma$, b) – korelācijas koeficients pretēja vērtība.

Parametru (4.6) novērtējumi:

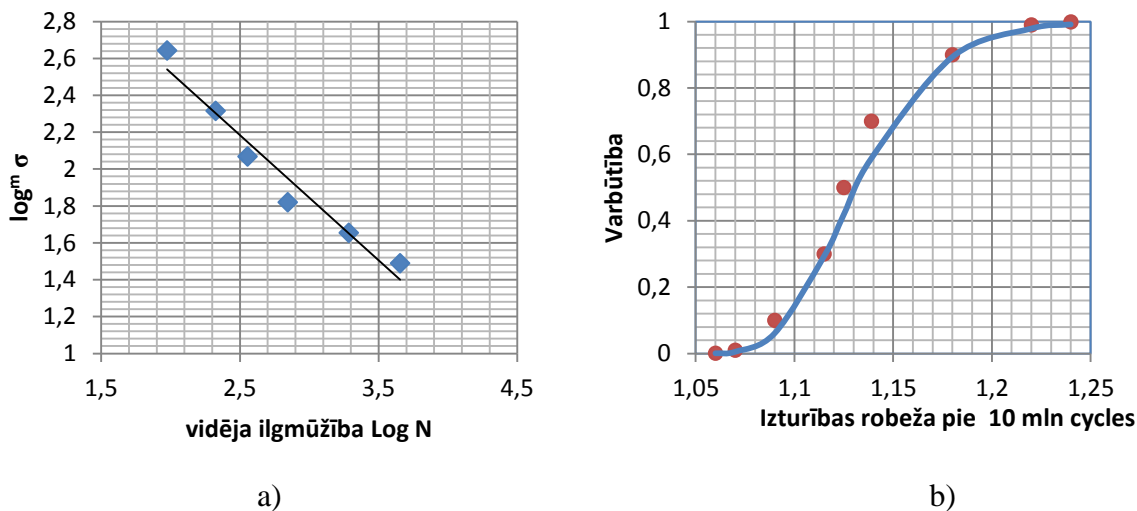
$$m = 3,6936, \quad \log C = -0,313207, \quad C = 0,4862$$

Līdzīgi, lai (4.7)

$$a/b = 10,43 + 7,55847 \cdot s^m$$

kur

$$\gamma = 7,55847, \quad \theta = 10,43$$



4.4. att. Noguruma līkne (a) un SF izturības robeža (b).

Balstoties uz pieņemto modeli, noguruma ilgmūžības attēlojumu kā DESF un noguruma līknes fragmentāri-lineāra attēlojumu var izveidot sekojošu tabulu.

4.1. tabula

Noguruma līknes fragmentāri-lineārais attēlojums.

Ilgmūžības apgabals ar vienu sagraušanas mehānismu (slodzes cikli)	Parametrs m noguruma līknē	Ilgmūžības sadalījuma funkcija
līdz 1 mln	4	Veibula (2.1)
no 1 mln līdz 10 mln	6	Logaritmiski-normālais (2.2)
no 10 mln līdz 100 mln	8	Logaritmiski-normālais (2.2)
no 100 mln līdz 1 000 mln	10	Divpakāpju eksponenciālais (2.3)
pār 1 000 mln	12	Divpakāpju eksponenciālais (2.3)

“ m ” noguruma parametru S-N līkne mainās (palielinās), ja maiņas mehānismu nogurumu bojājumu uzkrāšanas vai slodzes līmenis samazinās. Šis pārejas punkts, pārtraukums noguruma līknē ir novērots bieži.

Sastādīts un dots, kā piemērs, ilgizturības aprēķins lokālai zonai (helikoptera Mil-26 astes un galu siju resurs) pēc stendizmēģinājumu rezultātiem).

Zināma resursa (drošs ekspluatācijas laiks)l vērtība .

$$R = \frac{N_{\min work}}{\eta_N}$$

Kur R - drošs ekspluatācijas laiks,

$N_{\min work}$ - minimālās slodzes ciklu skaits pēc tās ekstrapolācijas (noguruma līkne $m = 12$ ekspluatācijas apgabalā)- pēc stendizmēģinājumu rezultātiem; mūsu gadījumā N_{\min} darba 175400 lidojuma stundu,

$$\eta_N = \exp(2,303\beta \ln v) - \text{drošības koeficients,} \quad (4.13)$$

$$\beta = \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi} - \text{ilgizturības mēroga parametrs (4.3.) ekspluatācijā;}$$

σ - LgN vidējā kvadrātiskā novirze, ekspluatācijas apstākļos;

$$P_{norm} \prod_{i=0}^{n-1} \left(\frac{v}{n-1} + 1 \right) = 1 \quad (4.14)$$

v - noteikts ar (4.14);

P_{nom} -uzdotā sagraušanas varbūtība, pieņem $P_{nom} = 0,001$, tad $v = 999$ ($n=2$).

$n=2$ konstrukciju skaits izmēģinājumā.

Aviācijas praksē noguruma jutīgu elementu aprēķināšana $\sigma_{lgN}/m = 0,025$, tad $\sigma_{lgN} = 0,30$ un $\beta = 0,234$

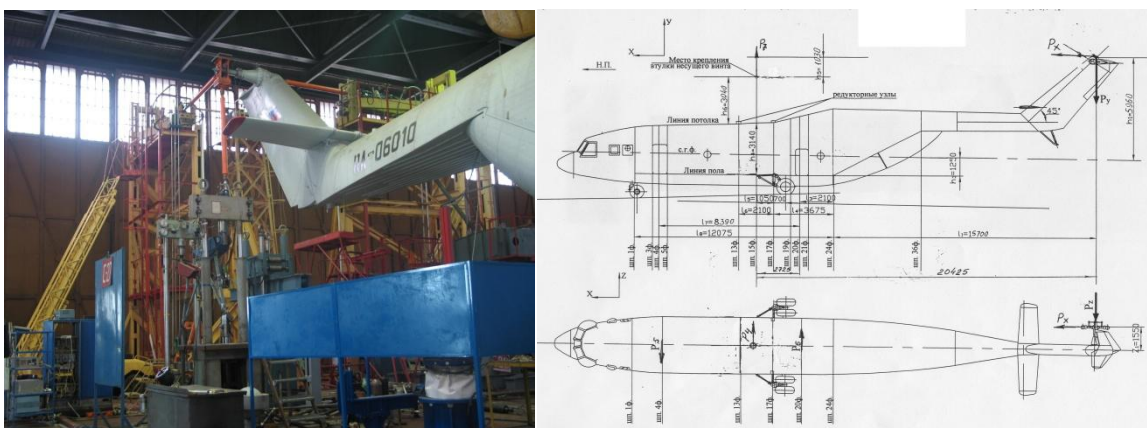
Iegūstam $\eta_N = 41,35$. Iegūtie stendizmēģinājumu dati, reducēti uz ekspluatācija nosacījumiem $N_{\min work} = 175\ 400$ darba stundas. Tad helikoptera resurss sastāda $4\ 200 + 1000$ (lidojumu stundas ekspluatācijā pret stendizmēģinājumiem) ne vairāk ka $5\ 200$ darba stundas ekspluatācijā⁷.

5. nodaļa. Tehniskā stāvokļa monitoringa organizēšana lielizmēra konstrukcijas lokālām zonām

Mūsdienu nesagraujošā testēšana ir vispiemērotākā, lai pārraudzītu lokālo zonu uzrādīšanu. Akustiskās emisijas (AE) metode tika izvēlēta kā vispiemērotākā lietojamā metode noguruma stendizmēģinājuma laikā. AE- metodi izmanto, lai veiktu dažādus testus un dažādu gaisa kuģa spēka elementu eksperimentālās noguruma pārbaudes SIA " Aviatest ", kas ļauj noteikt pirmās

⁷ Aprēķins ir piemērs un nēsā novērtējuma raksturu.

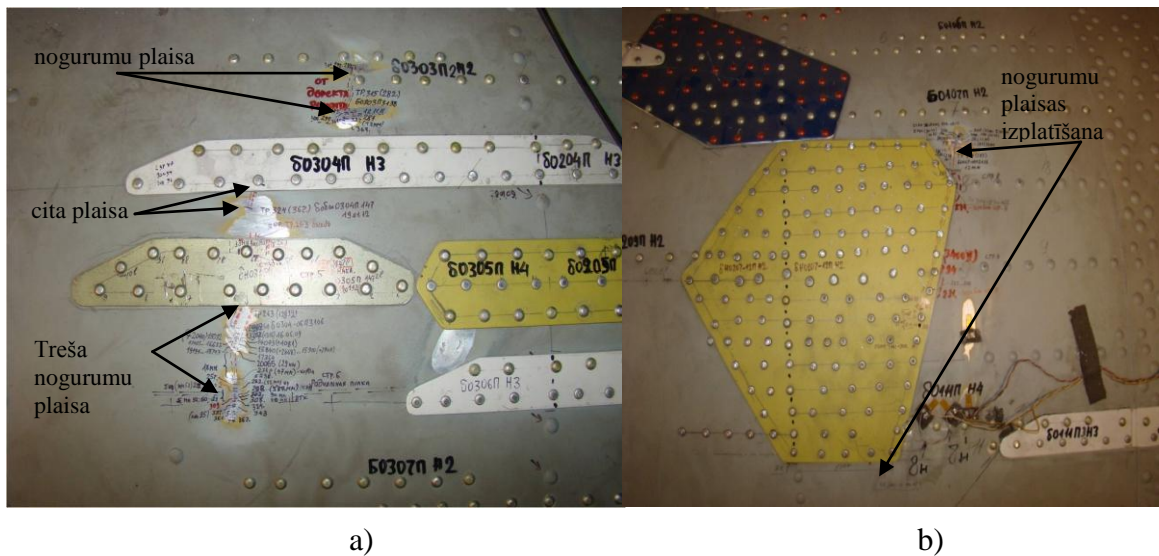
sākuma noguruma pazīmes, pirms ir radušās noguruma plaisas. Šaj AE-metodes īpašībai ir gandrīz neaizstājama nozīme uzraudzības standu testos, lokālo zonu apvidus noteikšanā kā „īpašas uzmanības” zonas. Bez tam, AE-metodei ir vēl viena priekšrocība- iespēja piešķirt oficiālu statusu eksperimentāliem datiem ciparu formātā un līdzīgi kā iekārta „Thermovision” ar attēlu pierāda, ka pieņēmums par lokālo zonu hipotēzi ir pareizs.



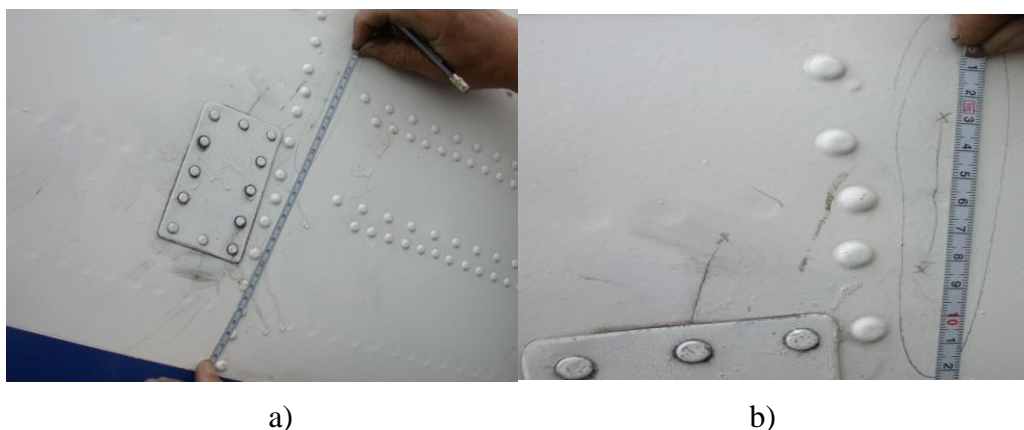
5.1 att. Helikoptera Mi-26T ķīļa un astes siju kopskats(a) un sloģošanas shēma (b).



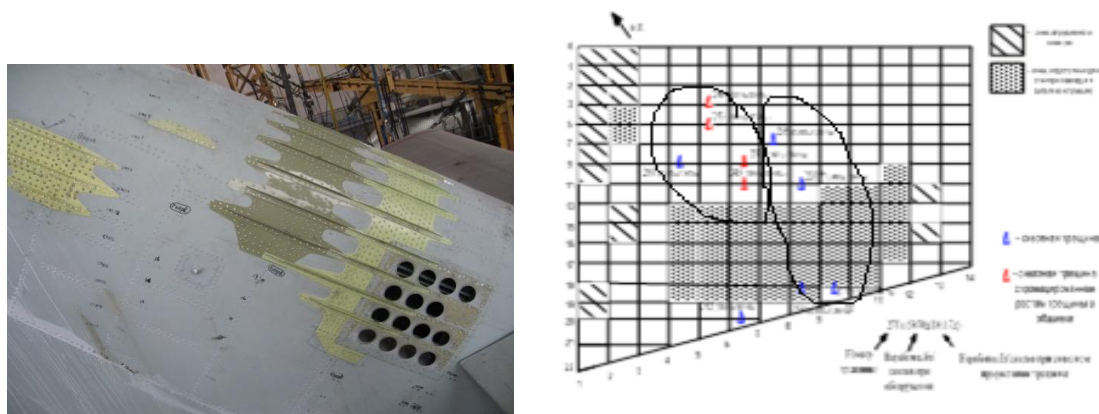
5.2 att. Lokālo Zonu plaisāšanas piemēri uz ķīļa sijas a) ķīļa sijas kopskats, b) ķīļa sija kā viena Lokāla Zona.



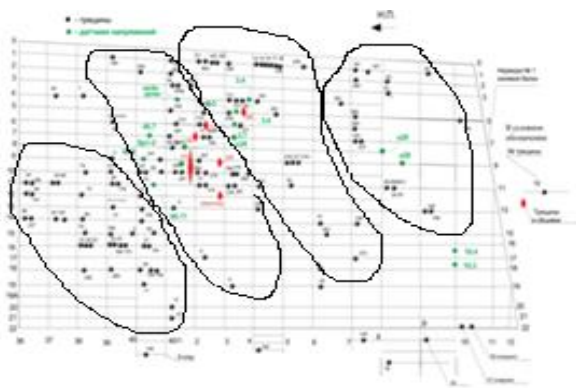
5.3. att. Lokālo Zonu plaisāšanas piemēri a) – nogurumu plaisu veidošanās, kas potenciāli veido vienu maģistrālo (pozitīva korelācijas saite); b) – noguruma plaisu izplatīšanās zem remonta uzlikām.



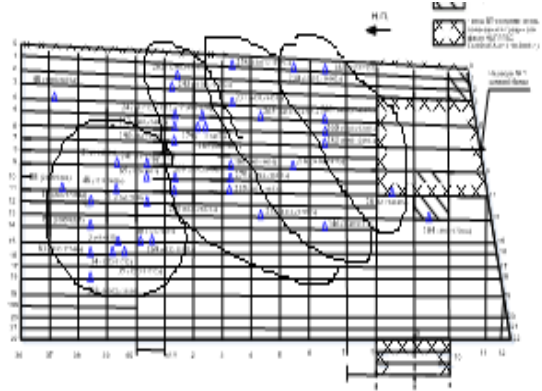
5.4. att. Noguruma plaisas uz ķīļa sijas, kas radušās zem remonta uzlikām (a) un plaisu veidošanās vienā Lokālā Zonā (b) ekspluatācijā.



5.5.att. Noguruma plaisas uz ķīļa sijas a) - ķīļa sijas kopskats; b) – nogurumu plaisu Lokālās Zonas uz ķīļa sijas (labējs borts, skats no iekšpuses).



a)



b)

5.6. att. Nogurumu bojājumi uz helikoptera Mil-26 astes sijas: a) visu plaisu vispārējā shēma (skats no iekšpuses), b) bīstamu noguruma plaisu shēma

Mil-26 helikoptera astes sijā atrodas četras lokālas zonas (5.6. att.) noteiktas ar Kraskeļa – Volisa kritēriju:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) = 15,05 \quad (5.1)$$

kur

$$N = \sum k_i = 7+5+12+18 = 42,$$

$$k = 4 \text{ lokālās zonas skaits,}$$

$$R_i = \sum_1^k R_i^j - \text{kārtas numuri summa } k_i \text{ zonā}$$

$$n_i - \text{novērojumu skaits } i\text{- zonā,}$$

statistiski būtiski apstiprina zonu neviendabību.

Analoģisku nogurumu plaisu iespējas izveidoties divās lokālās zonās (5.5.att.). Pārbaudīsim šo pieņēmumu.

Salīdzināsim divas lokālās zonas uz ķīļu sijas ar Man-Vitni kritēriju:

$$U4 = mn + 1 / 2m (m + 1) - R4 = 15 + 6 - 9 = 12$$

$$U5 = mn / 2 n (n + 1) - R5 = 15 + 15 - 27 = 3$$

Salīdzinot iegūto vērtību ar kritisko statistikas $U_{cr} = 2$ var secināt, ka ir viendabīgs paraugs (būtiskuma līmenis $\alpha = 0,05$ - pirmās pakāpes kļūda).

Tad var uzskatīt ķīļu siju kā vienu Lokālu Zonu.

Piedāvāta sekojoša secīga organizēšana tehniskā stāvokļa monitoringam lielizmēra konstrukcijas agrīnai noguruma bojājumu atklāšanai:

1.etaps. Sākotnēja konstrukcijas saspriegojuma stāvokļa izpēte pirms noguruma izmēģinājumiem: galējo elementa modeļu analīze, tenzometrēšana, termovīzija, AE devēju uzstādīšana un signālu analīze statistiskā slogojumā.

2.etaps.

Koriģētu sensoru uzstādīšanas vietas un pārbaudes, NTM apskates biežums, parauga zonu lokalizācija. Pēc montāžas uzstāda izvēlētās vietās NTM sensorus darbības "on-line" režīmā, tā ir informācijas iegūšana par parametriem AE - signāli, rakstura izmaiņas deformācijām vai citiem sensoriem un noguruma plaisu rašanās vietas un zaudējumus. Ja ir nepietiekams skaits sensoru, tad - tiek organizēta informācijas iegūšana ar "vēdekļa" veidu. Šādu korekciju un datu apstrādi, ietverot korelācijas analīzi, AE-signālus no noguruma plaisu veidošanās, un, ja vajadzīgs, citas metodes, stohastisko procesu datu apstrādei.

3.etaps. *Lokālo zonu tehniskā stāvokļa monitorings un noguruma bojājumu uzkrājumu ātruma izpēte: secīga datu analīze no konstrukcijas plaisāšanas, no kopējiem nesagraujošās kontroles rezultātiem (akustiskās emisijas, termovīzijas). Šajā etapā vērojama noguruma plaisu koncentrācija atsevišķās zonās, kuru iekšienē noris stohastiski atkarīgi (ar pozitīvu saišu) plaisu rašanās procesi, un kura brīžiem relaksē plaisu izveidošanos (negatīva korelācijas saite) citās zonās. Tādā veidā rodas dažādas lokālas zonas ar saviem noguruma pretestības rādītājiem.*

Šajā pētījumu posmā lokālās zonas lielumu, tās mijiedarbe stendizmēģinājumos, rakstura izmaiņas, sākotnējo analīžu noguruma plaisu rašanos, drošumu un citas īpašības-izturību, uzticamību lokālā zonā, var noteikt visas konstrukcijas drošticamību. Lokālo zonu vizuālā kontrole ("īpašu uzmanību" zonās) veic bieži un, ja nepieciešams, var pielāgot citas NT metodes: Termovīzijas, ultraskaņas, virpuļstrāvas u.c.

4.etaps. Lēmums par izmēģinājumu turpināšanas scenāriju: apskatot noguruma bojājumu uzkrāšanu neatkarīgi katrai zonai atsevišķi, vai izdalīt zonu ar paātrinātu plaisāšanu un kura turpmāk noteiks ilgmūžību (resursu) visai konstrukcijai.

5.etaps. Rekomendāciju izstrāde balstoties uz pārbaudes rezultātiem: kritisko zonu monitorings, ļauj realizēt vienu no ekspluatācijas principiem pēc stāvokļa, bet pie noteiktas šīs zonas konstruēšanas arī principu-droša sagraušana.

SLEDZIENS

1. Parādīt un apstiprināti priekšlikumi ieteiktai Lokālo Zonu Hipotēzei:
 - lielizmēra konstrukcija vai tikt uzskatīta, ka dažu Lokālo Zonu apvienojums;
 - Lokālajās Zonās noguruma bojājumu uzkrāšanās notiek stohastiskas atkarīgi;
 - jaunu bojājumu veidošanās ārpus Lokālās Zonas stohastiski neatkarīgi no sakumā zonas.
 - palielinoties attālumam no sākotnējā bojājuma, stohastiskā attiecība starp noguruma bojājumiem rašanās brīdī samazinās;
 - atsevišķas konstrukcijas elementus var uzskatīt par vienu Lokālo Zonu;
 - Lokālas Zonas noturība, ilgizturība un citi nogurumu parametri nosaka visas lielizmēra konstrukcijas drošumu.

2. Izstrādāti un uz experimentāliem datiem apstiprināti:
 - fenomenoloģiskie modeļi ar lokālo zonas noguruma bojājumu uzkrāšanos;
 - modificēta metode noguruma jutīgas konstrukcijas faktiskā resursa novērtējumam;
 - matemātiskais modelis Lokālās Zonas noguruma drošībai, kas nosaka visas lielizmēra konstrukcijas drošumu;
 - matemātiskais modelis izcelsmi un Lokālo Zonas lielumam.

3. Ieguti eksperimentāli dati no paraugiem ar caurumu koncentrātoriem kā uz viendabīga ķermeņa modeļa-analoga:
 - izvēlēts skaits ar vairākiem caurumu veida koncentrātoriem (konfigurācija ar pilnīgu randomizācijas izmēģinājuma procedūru);
 - apstrādāti no citiem autoriem iegūti noguruma pārbaudes rezultāti;-izveidots noguruma jutīgums reālām nogurums aviācijas konstrukcijām.

4. Pierādīts, ka NT metožu izlase, kas ir pielāgota lietojumam stendizmēģinājumos lielizmēra konstrukcijās, ir akustiskās emisijas un termovīzijas metodes. Piemērota metodoloģija (algoritms) no izvēlētās metodes NT stendizmēģinājumiem, laikus konstatējot sākuma zaudējumus un atšķirīgu scenāriju, ir izstrādāta. konstrukcijas (vai to Lokālo Zonu) uzticamība.

5. No kopsavilkuma visbūtiskākā ir atzīme par nākamo izmeklēšanu:
 - lokālās zonas stohastiskās saites (gan pozitīvās, gan negatīvās) ierobežo izvietošanu sākotnējiem bojājumiem, ko var vēlāk uzskatīt kā vienu bojājumu. Negatīva saite noved pie citu lokālo zonu veidošanās. Vēlākie sākotnējie nogurumu bojājumi rodas no iepriekšējiem

nogurumu bojājumiem, kas izveido citu vietējo zonu, kas noved uz konstrukcijas "nogurumu pārkaršanu" kā paātrinātu plūsmas bojājumu. Sākumā izveidojušies noguruma bojājumi ļauj pielietot NT un citu tehniskos paņēmienus lokālās zonas uzraudzībai un izmantot drošības bojājumu principu (drošs postījums or Fail Safe Concept);

- Lokālās Zonas ilgizturības sadalījuma funkcija tiek definēta kā divpakāpju eksponenciālais sadalījums ar logaritmu no slodzes cikliem (Largest Extreme Value –LEV);

- noguruma stiprības raksturojums, Lokālo Zonu noguruma ilgizturības sadalījuma funkcijas parametri, nogurumizturības robežas sadalījuma funkciju, noguruma līkni, noguruma ciklu sliekšni, var raksturot tikai ar četriem parametriem;

- akustiskās emisijas metode ļauj aklāt pirms veidojas redzami bojājumi kāda veida ir bijusi slodze (statiska, dinamiska, termiska). Šajā gadījumā Lokālā Zona var kalpot kā indikators noguruma bojājumu uzkrājumiem visām konstrukcijām, kas ļauj attīstīt drošības principus.

6. Lokālo Zonu Hipotēze, kā arī piemērojot NT ļauj pārvaldīt lielizmēra konstrukciju un samazināt laiku, materiālu un cilvēku resursus un panākt agrīno bojājumu noteikšanu izmēģinājumu vai ekspluatācijas laikā.

7. Noguruma bojājumu uzkrājumu lokalizācija (noguruma plaisu rašanās) noteiktās zonas ļauj organizēt konstrukcijas tehniskā stāvokļa monitoringu agrīnās maģistrālās plaisas atklāšanai un realizēt ekspluatācijas principu pēc tehniska stāvokļa vai drošu sagraušanu (Fail Safe Concept).