

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Aviācijas institūts

Aleksandra Paramonova

Aviācijas transporta doktora programmas doktorante
Doktoranta apliecības, nr. 991RMM004

KOMPOZĪTA MATERIĀLA IZTURĪBAS MODELĒŠANA

Nozare - Transports un satiksme
Apakšnozare - Gaisa transports un infrastruktūra

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:
Dr.habil.sc.ing., profesors
Mārtiņš KLEINHOFS

RĪGA, 2005

Darba aktualitāte. Kompozītmateriāli tiek plaši izmantoti aviorūpniecība - kaujas, sporta un īpaša pielietojuma vieglo lidaparātu korpusu būvē, kā arī smago pasažieru lidaparātu korpusu būvē, piemēram, "Boeing-777" un projektējamā "A380-800". Šo lidaparātu drošuma un ilgizturības nodrošināšanai nepieciešams zināt attiecīgo kompozītmateriālu statistiskās izturības un noguruma ilgizturības raksturlielumu saistību, jāspēj prognozēt šo lielumu izmaiņas, ja tiek mainītas kompozītmateriāla komponentu īpašības. Šo uzdevumu veikšanai tiek veltīts šis darbs.

Darba mērķis: vienvirziena kompozītmateriāla noguruma ilgizturības matemātiskā fenomenoloģiskā modeļa izstrāde. Modeļa parametriem jābūt saistītiem ar komponentu statistiskās izturības sadalījuma parametriem. Modelim jāspēj no vienotas pozīcijas attēlot gan noguruma līkni, gan noguruma izraisītu bojājumu uzkrāšanos programmas slodzes apstākļos.

Šī mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Veikt kompozītmateriāla elementu (šķiedru, grīstu utt.) statistiskās izturības sadalījuma likumu pētījumus. Veikt esošo statistiskās izturības modeļu analīzi.
2. Izstrādāt matemātisku modeli, kas apmierina darba sākumā nosprausto mērķi.
3. Izstrādāt modeļa parametru novērtēšanas metodi.
4. Balstoties uz izstrādāto modeli, iegūt kompozītmateriāla noguruma līknes aprakstu, kā arī ilgizturības prognozēšanas metodi programmas slodzes apstākļos.
5. Pārbaudīt modeli, izmantojot eksperimentālus datus.

Pētījumu metode

1. Teorētiskās metodes:

- varbūtības un Markova ķēžu teorija;
- matemātiskā statistika;
- materiālu un konstrukciju mehānika.

2. Eksperimentālās metodes:

- statistiskās izturības un noguruma ilgizturības pārbaudījumi

Zinātniskā novitāte

1. Izmantojot Markova ķēžu teoriju tika iegūti jauni vienvirziena kompozītmateriāla noguruma ilgizturības matemātiskie modeļi, kas ļauj aprakstīt noguruma līkni un noguruma izraisītu bojājumu uzkrāšanās likumsakarības programmas slodzes apstākļos.
2. Modelis ļauj aprakstīt ne tikai vidējo ilgizturību, bet arī tās sadalījuma funkciju.
3. Pie fiksēta slodzes ilguma ar nemainīgiem cikla parametriem, modelis ļauj noteikt noguruma ierobežotās ilgizturības robežu sadalījumu.
4. Modeļa parametri ir saistīti ar kompozītmateriāla elementu statistiskās izturības sadalījuma funkcijas parametriem.
5. Izstrādāta modeļa parametru novērtēšanas metode, izmantojot eksperimentālus datus.
6. Izstrādāts programmu komplekss, kas ļauj modelēt kompozītmateriāla statisko un noguruma izturību.
7. Izstrādāts programmu komplekss, kas ļauj novērtēt modeļa parametrus.

Metodiskās novitātes ietvaros ir piedāvāti:

1. Jauns varbūtības papīra veids, kurā inversās sadalījuma funkcijas vērtības tiek aizvietotas ar atbilstošo kārtas statistiku sagaidāmajām vērtībām.
2. Jauns noguruma līknes veids ar eksperimenta kārtas statistiku salīdzināšanu ar to teorētiski sagaidāmajām vērtībām.
3. Jauns saderības kritērijs sadalījumiem ar lokācijas un mēroga parametriem, kā arī programmu pakotne, lai aprēķinātu kritērija jaudu, kas Jauj aprēķināt nepieciešamo novērojumu skaitu.

Praktiskā nozīme

Modeli var lietot:

- noguruma līknes nelineārās regresijas analīzes veikšanai;
- lai prognozētu noguruma līknes parametru izmaiņas, ja tiek mainīti
- kompozītmateriāla komponentu statistiskās izturības sadalījuma parametri;
- lai prognozētu noguruma ilgizturību programmas slodzes apstākļos. Izstrādātais programmu komplekss var tikt lietots zinātniskos un praktiskos nolūkos, kā arī mācību procesā.

Galvenie rezultāti ir publicēti 17 starptautiskos izdevumos rakstu un tēžu veidā. Tie ir izklāstīti 13 starptautiskās konferencēs un semināros.

Pirmajā nodaļā ir sniegts pārskats par nozīmīgākajiem darbiem, kas veltīti mehānisko konstrukciju un, it īpaši, kompozītmateriālu izturības un noguruma ilgizturības pētīšanas problēmām. Pirmos trauslā sabrukuma statistiskās teorijas pētījumus veicis V. Veibulls (1939), kā arī J. I. Frenkels un T. A. Kontorova (1941). Šajā darbā aplūkotas problēmas, no matemātiskā viedokļa, iztirzājis B. V. Gņedenko (1941). V. Veibulla sadalījums ir viens no noturīgā minimuma sadalījuma variantiem: vienādu paraugu ķēdītes izturības sadalījums atbilst viena atsevišķa parauga izturības sadalījuma tipam. Mainās vienīgi sadalījuma parametri. Šis efekts ir t.s. trauslā sabrukuma mēroga faktora izskaidrojuma pamatā: izturība samazinās, ja pārbaudāmā parauga izmērs palielinās.

V. Veibulla idejas izmantoja A. Freidentāls un F. Gumbels (1956), kā arī V. V. Bolotins (1971, 1977, 1981, 1990) noguruma ilgizturības problēmas risināšanai. Balstoties uz šīm idejām, tika izstrādāta noguruma līknes statistiskā teorija. Līdzīgu modeli detalizēti pētījuši F. Paskuals un V. Mikers (1999). Vājā ķēdes posma modelis nosaka, ka materiālam ir vairākas vājās vietas, kuru tuvumā noguruma uzkrāšanās procesi ir visai viendabīgi un norisinās neatkarīgi viens no otra. Parauga ilgizturība kopumā atbilst vājākās vieta ilgizturībai, līdz ar to atbilst V. Veibulla sadalījumam. Pretējā traktējuma pamatā ir pieņēmums, ka starp vājajām vietām notiek spriegumu pārdalīšanās process un mainās noguruma izraisīto bojājumu uzkrāšanas. Sabrukums notiek brīdī, kad uzkrājušies bojājumi pārsniedz noteiktu robežu. Vienkāršāko šīs klases modeli aplūkojis G. V. Družiņins (1967), kas pieņēma, ka bojājumu uzkrāšanās ātruma sadalījums ir normāls. Līdzīgu, taču nedaudz vispārīgāku, hipotēzi izvirzījis F. Basteners (1972).

Nedaudz sarežģītāk var iegūt sadalījumu, ko piedāvājis S. N. Bernšteins (1927). To pēc tam 1969. gadā vēlreiz piedāvājis Z. Bimbaums un S. Saunderss (1969). Līdz šim brīdim nav veiktas plašas un pārliecinošas šī sadalījuma pārbaudes, taču diezgan plaši tiek izmantots noguruma ilgizturības lognormālais sadalījums. H. B. Kordonskis piedāvāja Iognormālā sadalījuma rašanās matemātisko modeli. Vērtējot pēc Pīrsona kritērija, šis sadalījums ar diviem parametriem ir piemērotāks par Veibulla sadalījumu. Nākamajos H.

B. Kordonska un J. F. Frīdmana darbos (1976) noguruma ilgizturības datu apstrādei tika izmantots difūzijas sadalījums, kuru agrāk ir izpētījis M. S. Bartletts (1958).

Ir vairākas publikācijas, kas veltītas kompozītmateriālu un to komponentu izturības un ilgizturības statistisko datu analīzei. Vērtīgi šo publikāciju pārskati atrodami J. Nemeča, S. V. Serensena, V. S. Streļajeva (1970), kā arī V. P. Tamuža un V. D. Protasova (1986) rediģētajos darbos. Šķiedru izturības statistisks pārskats izklāstīts T.A. Kontorovas (1945), G.M. Barteņeva (1960,1964,1966), L.G. Sedrakjana (1958) u. c. autoru darbos. Eksperimentālo datu apstrādei tiek izmantoti minētie sadalījumi: Veibulla, lognormālais un normālais sadalījums. V.P. Tamužs, J.A. Gutāns (1984), V.V.J. Padget (1995), A.S. Watson, R.L.Smith (1985), W.A. Curtin (2000) piedāvā tādu Veibulla sadalījuma uzlabojumu, kas ļauj labāk ņemt vērā parauga garumu. J. Andersons, R. Joffe, M. Hojo, S. Ochiai (2002) šo piedāvājumu lietoja savos eksperimentālajos stikla šķiedru izturības sadalījuma pētījumos. Piedāvāts izmantot arī sadalījumu ortogonālos polinomos, kas pazīstams kā A tipa Grama-Šarljē rinda. L.G. Sedrakjans (1958) ieteic izmantot četru parametru sadalījumu, kas būtībā ir Veibulla sadalījuma vispārinājums (ieviests zemākais un augšējais ilgizturības sliekšnis).

Pāreju no kompozītmateriāla komponentu raksturlielumu sadalījuma uz kompozītmateriāla raksturlielumiem kopumā pirmo reizi pārrunāja F. Peirss (1926) un H.Danielss (1945,1986). H. Danielss ieguva fundamentālu rezultātu: viņš pierādīja, ka neatkarīgi no atsevišķu šķiedru izturības sadalījuma veida sagraujošās slodzes sadalījums kūlim, kas sastāv no N šķiedrām, tiecas uz normālu sadalījumu, ja šķiedru skaits ir pietiekami liels.

D.Gjusers un J.Gurlands (1962) ierosināja aplūkot kompozītmateriālu kā ķēdi, kas sastāv no noteikta kritiska garuma šķiedru kūļiem.

Pēc sabrukuma šķiedras nevis sabrūk pilnībā, bet gan sadalās līdz noteiktam kritiskam garumam. Ievērojot šo pieņēmumu, B. Rozens (1964) veica šķiedru kompozītmateriālu sabrukuma analīzi, pieņemot, ka to veido secībā savienotu kūļu ķēde, kas tiek iekļauta slogojuma uzņemšana šķiedras neefektīvajā garumā.

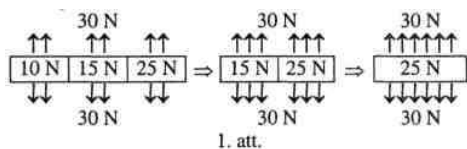
C. Zvēbens (1968, 1970) aprēķinos ieviesa spriegumu koncentrēšanos, ņēma vērā sabrukuma secību defekta vietā, kas veidojas pēc blakus esošo šķiedru grupas sabrukuma, kā arī pierādīja, ka visas slāņainās paketes sabrukumam pietiek arī ar dažiem (2 - 3) līdzās esošiem sabrukumiem.

V. P. Tamužs un V. S. Kuksenko (1978) savos darbos piedāvāja, dispersa sabrukuma teoriju saliktā sprieguma apstākļos. Šī teorija ir L. M. Kačanova (1958) pakāpeniskā bojājamības parametra pieauguma ideju, kā arī N. N. Afanasjeva (1953) statistiskās noguruma teorijas vispārinājums. Izklāstītā modeļa ietvaros ietilpst arī statistiskā izturības aprēķina teorija, ko izvirzījis S. D. Volkovs (1960).

V. V. Bolotina (1990) kompozītmateriālu sabrukumu mehānikai veltītajā darbā vērojama vispārīga pieeja kompozītmateriālu sabrukuma problēmai un tā pamatā ir kinētisko modeļu izmantošana. Bet ir vajadzīgs liels sākuma informācijas apjoms, lai aprēķinātu noguruma ilgizturību, izmantojot šo teoriju.

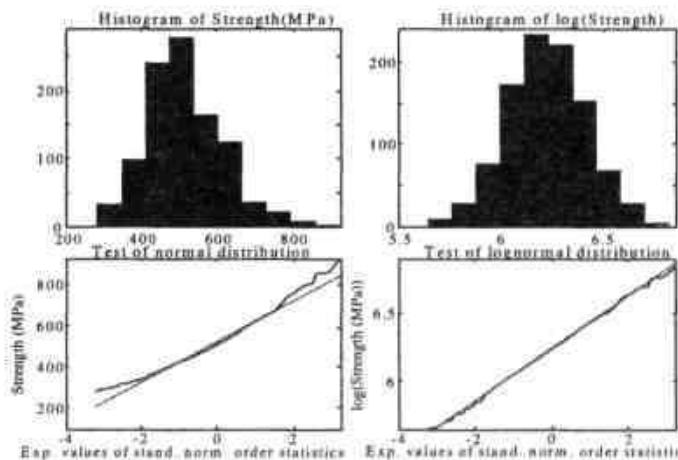
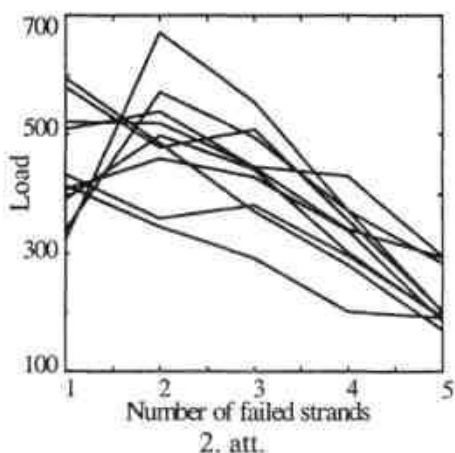
Markova procesu teorijas lietošana bojājumu uzkrāšanās statistiskajā teorijā ir izsmeļoši aplūkota Dž. Bogdanova un F. Kozina darbā (1989). Autori ieguvuši formulas, pēc kurām aprēķina sadalījuma funkcijas t.s. vienīgā lēciena modeļa laiku līdz absorbēšanai. Modeļa parametrus nav iespējams saistīt ne ar statistiskās izturības sadalījuma parametriem, ne ar ciklisku spriegumu režīma parametriem. Tādēļ šo modeli nav iespējams lietot ne noguruma līknes noteikšanai, ne prognožu izstrādei programmas slodzes apstākļos.

Otrajā nodaļā veikta esošo kompozītmateriāla statistiskās izturības modeļu analīze. Fakts, ka kompozītmateriāla komponentu statistiskās izturības izkliede lielā mērā nosaka kompozītmateriāla izturību, pierāda vienkāršs piemērs: trīs paralēli komponenti ar dažādu izturību 10 N, 15 N un 25 N pie vienāda slodzes sadalījuma kopā spēj izturēt tikai 30 N, t.i. abiem pēdējiem komponentiem izturības izkļedes rezultātā īstenojas tikai vājākā komponenta izturība. Sabrukuma process shematiski parādīts 1. attēlā. Reālā statistiskās komponentu izturības izkliede un tās atkarība no



parauga struktūras redzama šajā darbā sniegtajos izlīdzināšanas rezultātos, kas apkopoti uz lognormāla varbūtību papīra. Tajā ir apkopoti šķiedras, grīstes, 10 garenu grīstu izturības dati utt. līdz pat daudzslāņu

kompozītmateriālam. Redzams, ka maksimālā izturības vērtība piemīt šķiedrai. Sarežģītākās struktūrās izturība pazeminās; nedaudz pazeminās arī dispersija. H. Daniels (1945, 1986) pierāda, ka šķiedru kopuma stiprības sadalījums ir normālais sadalījums ar standarta novirzi, kas ir apgriezti proporcionāls \sqrt{n} . Taču praksē normālā sadalījuma vietā parasti lieto logaritmiski normālo un Veibulla sadalījumus. Netiek izpildīts arī standarta novirzes prognozējamais samazinājums apgriezti proporcionāli \sqrt{n} . Šajā darbā parādīts, ka novērotās novirzes no H. Danielsa modeļa acīmredzot var izskaidrot ar to, ka pieņēmums par vienmērīgu spriegumu sadali starp (vēl darba stāvoklī) elementiem ir nepatiess. Kompozītmateriālā, atšķirībā no savstarpēji nesaistītu pavedienu kūļa, sabrukuma attīstība nenotiek vienmērīgi visā tā šķērsgrīzumā, bet bojājuma tuvumā. Šī sabrukuma mehānismu var aprakstīt kā procesu, kas sākas ar noteikta kritisko elementu kopuma sabrukumu (kas atrodas parauga virspusē). Pēc tam sabrukums pārvietojas pa parauga šķērsgrīzumu, rezultātā sagraujot to pilnībā. Pat „aptuvenu vienmērību” var sagaidīt tikai ierobežotā parauga tilpumā, kas pakāpeniski maina savu pozīciju. Piemēram, no 10 grīstēm veidotam mikroparaugam aprēķinātā un eksperimenta standarta novirzes vērtība sakrīt tikai tad, ja pieņem, ka kritiskā kopuma „izmērs” ir vienāds ar 5. Šim gadījumam atbilstošie aprēķini tika veikti, izmantojot 10 gadījuma lielumu



vērtību, kas iegūti ar Monte-Karlo metodi. Rezultāti ir parādīti 2. attēlā. 3. attēlā ir 1000 aprēķinu rezultātu histogrammas un to izlīdzināšanas rezultāti modificētajā varbūtību papīrā, dabīgajā un logaritmu skalās.

Aprēķinu rezultāti - vidējā vērtība un izturības standarta novirze - izrādījās ļoti tuvi eksperimentālajiem datiem. Kā parādīts 3. attēlā, 5 grīstu izturības sadalījuma attēlošanai vislabāk noder tieši lognormālais sadalījums.

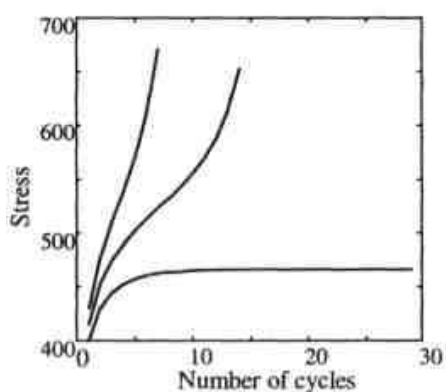
Trešā nodaļa veltīta trauklā noguruma modeļa aprakstam un mēģinājumam, balstoties uz šī modeļa, iegūt tādu noguruma līknes vienādojumu, kura parametri būtu saistīti ar statistiskās izturības sadalījuma parametriem. Šī problēma ir ļoti svarīga. F.G. Pascual un V. Meeker (1999) salīdzina septiņus noguruma līknes vienādojumus (kurus piedāvā pazīstama Velera vienādojuma vietā) un izvēlās labāko variantu. Tomēr pat labākajā variantā nav saistības ar statistiskās izturības sadalījuma parametriem. Šajā nodaļā ir mēģinājums šādu saistību atrast, balstoties uz Danielsa modeļa "izvērsanu laikā".

Sprieguma izmaiņu secību $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$ sabrūkot šķiedru daļai $F(s)$, kuras izturība izrādījies mazāka, kā uz tām izdarītā slodze, aprēķina pēc formulas

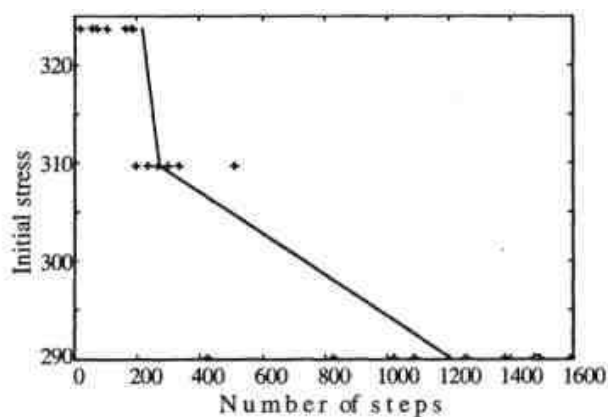
$$s_{(j+1)} = \frac{S_0}{1 - F(s_0)}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \text{ kur } S_0 - \text{sakuma maksimālais spriegums cikla pie cikliskas}$$

slogošanas ar pastāvīgu nominālo slodzi.

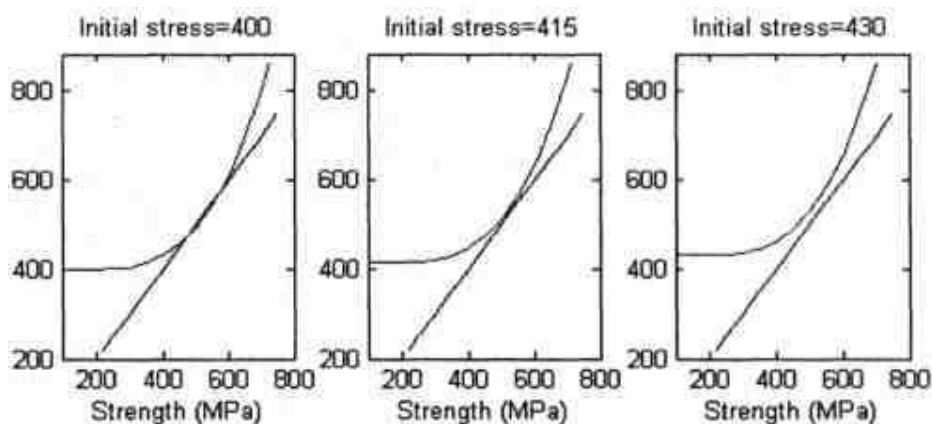
4. attēlā ir parādīti secības $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$, kas atbilst dažādiem sākuma spriegumiem S_0 . Līdzīgas līknes mēs redzam noguruma izmēģinājumos, ievērojot kompozītmateriāla parametru izmaiņas.



4.att.



5.att.



6. att.

Vienādojuma $S_0 / (1 - F(s)) = s$ atrisinājums ir parādīts 6. attēlā. Ja šo vienādojumu ir iespējams atrisināt, tad secībai $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$ ir robeža, un spriegumu kāpināšana tiek pārtraukta. Tas ir atkarīgs no S_0 . Atbilstošo maksimālo spriegumu S_0 var pieņemt kā noguruma robežu (6.att.). Ja spriegums S_0 ir lielāks par noguruma robežu, tad

funkciju $S' = S$ un $S'' = \frac{S_0}{1 - F(S)}$ grafiki nekrustojas. Spriegumu kāpināšana netiek pārtraukta un notiek parauga sabrukums. Mēs varam aprēķināt ciklu skaitu līdz sabrukumam un iegūt noguruma līkni. Ir parādīts, ka noguruma līkne var būt aprakstīta ar tuvinātu formulu

$$S = C_1 - C_2 \tan(N(S) / C_3 - \pi / 2).$$

Šo formulu ir vieglāk izmantot nekā secības veidā $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$.

4. attēlā ir redzamas lielas izmaiņas ciklu skaitā līdz sabrukumam no dažiem cikliem (augšējā līknē) un līdz bezgalībai (apakšējā līknē). Tāpēc šis modelis var būt lietots tikai sprieguma šaurā intervālā. Noguruma līknes piemērs ir parādīts 5. attēlā. M. Kleinhofa eksperimentu dati ir parādīti ar (+) un aprēķina rezultāti ir parādīti ar taisnas līnijas fragmentiem.

Tika mēģināts uzlabot šo modeli, ņemot vērā matricas paliekošo deformāciju. Bet atbilstošiem aprēķiniem ir nepieciešams liels laiks. Perspektīvāka pieeja ir aplūkota nākamajā nodaļā.

Ceturtajā nodaļā tiek aplūkots noguruma izraisītu bojājumu uzkrāšanās modelis un attiecīgi noguruma līknes modelis, kuru pamatā ir Markova ķēžu teorijas lietošana. Paraugs tiek aplūkots, kā paralēlu elementu (piemēram, grīstes) kopums, bet stāvokļa maiņa Markova ķēdē (MĶ) - kā viena atsevišķa vai dažu elementu sabrukums. Pieņemts, ka ir r neatgriezeniskie stāvokļi un viens absorbējošs stāvoklis, atbilstošs r elementu sabrukumam. Ja sākuma stāvoklis ir pirmais stāvoklis, tad sadalījuma funkcija un sadalījuma likums ir aprakstīti ar formulām

$$F_T(t) = aP^t b, \quad p_T(t) = F_T(t) - F_T(t-1), \quad \text{kur } P \text{ ir pāreju}$$

varbūtības matrica

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & \dots & p_{1r} & p_{1(r+1)} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} & \dots & p_{2r} & p_{2(r+1)} \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & \dots & p_{3r} & p_{3(r+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & p_{rr} & p_{r(r+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$a = (100\dots 0)$ ir rindas vektors, $b = (00\dots 01)'$ ir slejas vektors.

Galvenā problēma ir norādīt varbūtību saistības ar kompozītmateriāla komponentu statiskās izturības sadalījuma parametriem, kā arī ar slodzes lielumu. Ir aplūkoti šīs saistības divi varianti. Pirmajā variantā ir pieņemts, ka vienā Markova ķēdes solī iespējams ne vairāk kā viena paralēlā komponenta (piemēram, grīstes) sabrukums. Mēs saucam šo modeļi par Viena Soļa - vai Bernulli Markova modeli (VSMM vai BRMM). Piezīme: gadījuma lielumam - Markova ķēdes vienā solī elementu sabrukšanas skaits - ir Bernulli sadalījums.

Pieņemot, ka kad vēl ir „dzīvi” ($R-i$) paralēlie komponenti (kad MK ir $(i+1)$ stāvoklī) ar vienādu statiskās izturības sadalījuma funkciju $F(s)$, tad vēl viena elementa sabrukšanas varbūtība ir $p_{i+1} = 1 - (1 - F_{i+1}(s_{i+1}))^{R-i}$, kur R ir elementu izejas skaits noteiktā kritiskā tilpumā (kas sākumā atrodas parauga virspusē), $F_{i+1}(\cdot)$ - viena elementa stiprības nosacīta (pēc i elementu sabrukšanas) sadalījuma funkcija (pieņemsim, ka $F_{i+1}(s) = F(s)$); s_{i+1} - spriegums, kas atbilst vienmērīgam sprieguma sadalījumam uz atlikušajiem ($R-i$) elementiem un ir vienāds ar

$$s_{i+1} = \frac{SR - S_f i}{R - i} = \frac{S(1 - S_f i / SR)}{1 - i / R},$$

kur S ir sākotnējais spriegums; S_f ir aplūkotajā šķērsgriezumā spriegums elementos, kuri sabruka citos šķērsgriezumos.

Vispārīgos gadījumos tiek piedāvāts izmantot statistiskās izturības sadalījumu ar pozīcijas un mēroga parametriem. Vairākās zinātniskās publikācijās ir pierādīts, ka iespējams izmantot lognormālo statistiskās izturības sadalījumu $F(s) = \Phi((g(s) - \theta_0) / \theta_1)$, kur $\Phi(\cdot)$ ir standarta normālā sadalījuma funkcija, $g(s) = \log(s)$; θ_0 un θ_1 ir izturības logaritma matemātiskā sagaidāmā vērtība un vidējā kvadrātiskā novirze.

Modeļa otrajā variantā (saucam šo variantu Binomiālais-Markova-Modelis (BMM)) mēs pieņemsim, ka MK var būt "lēciens" no i -tā stāvokļa uz kādu citu stāvokli j , $j = i, i + 1, i + 2, \dots, r + 1$. Tad Binomiālais sadalījums ir piemērots

$$P(i, j) = \binom{r+1-i}{k} p_{i,i}^k (1 - p_{i,i})^{r+1-k}, \quad k = j - i, \quad \text{kur } p_{i,i} = F(s_i).$$

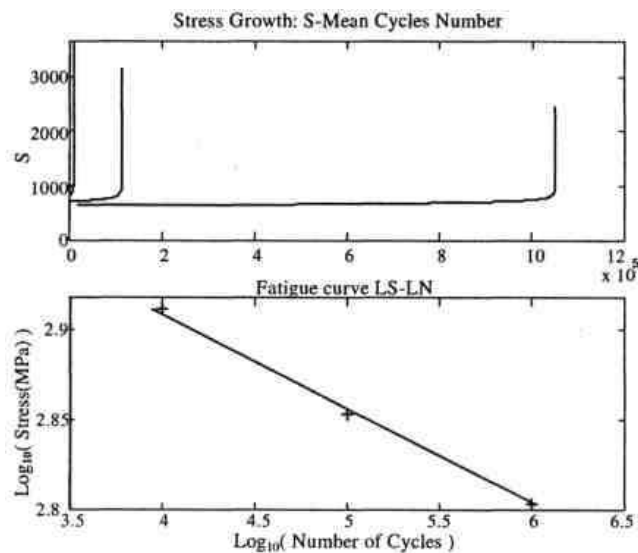
Tiek pieņemts, ka viens Markova ķēdes solis vispārīga gadījuma atbilst k_M cikliem. Tagad modeļa parametrs ir vektors $\eta = (\theta_0, \theta_1, r, R, k, S_f)$ ar 6 komponentēm, kurām ir "fizikālā" interpretācija. Ja modeļa parametri ir zināmi, tad ir iespējams izveidot vidējo un p -kvantiles noguruma līkni, kā arī ierobežotās noguruma robežas sadalījuma funkciju (ar fiksētu t). Ja zināmi ilgizturības dati, pie kuriem tiek veidota eksperimentālā noguruma līkne, tad modeļa parametrus var novērtēt, izmantojot nelineāras regresijas metodes (tā ir matemātiskas statistikas problēma).

Piemēram, BRM modeļa ietvaros vidējā vērtība $E(T(S_j))$ un $t_p(S_j)$ - noguruma ilgizturības p -kvantils pie sprieguma S_j ir aprakstīti ar formulām

$$E(T(S_j)) = \sum_{i=1}^r 1/p_i(S_j, \eta), \quad t_p(S_j) = F_T^{-1}(p; S_j, \eta).$$

Ceturtajā nodaļā galvenokārt ir aplūkoti pirmā uzdevuma (varbūtības uzdevuma) risinājuma piemēri. Daži Modeļa parametri tika izvēlēti vienādas statistiskās izturības parametriem, citi - lai minimizētu atšķirību ar eksperimentālajiem datiem, kad šo starpību novērtē vienīgi vizuāli.

7. attēla augšējā daļā ir parādīta lokāla sprieguma pieauguma līknes organoplastika noguruma izmēģinājumos ar pulsējošu sprieguma izmaiņu ciklu (trim sākuma spriegumiem). Ņemot vērā pārejas no viena stāvokļa uz otra nejaušību, 7. attēla augšējā daļā gar horizontālo asi ir atzīmēts vidējais laiks, kas nepieciešams atbilstošās spriedzes sasniegšanai. Aprēķina un eksperimentālā noguruma līknes ir parādītas attēla apakšējā daļā. Jāpievērš uzmanība arī apmierinošajai noguruma līknes aproksimācijai, kā arī tam, ka spriedzes pieauguma līkne līdzinās raksturīgajām atsevišķu fizikālu parametru izmaiņu līknēm noguršanas procesā.



7. att.

Piektajā nodaļā aplūkots (matemātiskās statistikas uzdevums) modeļa parametru novērtēšana, izmantojot maksimālās ticamības (MT) metodi, kā arī oglekļaplasta paraugu stiepes (M. Kleinhofa dati) un lieces (F. Pascuaļa un V. Meekera) noguruma izmēģinājumu rezultātus. Iepriekš minētās formulas būtībā nosaka nelineārās regresijas modeli. Tomēr vispārīgā gadījumā sešu dimensiju parametra 77 atrašana ir grūts un darbietilpīgs uzdevums.

Pētījumi, kas aprakstīti šajā nodaļā, aprobežojās ar mērķi novērtēt parametrus θ_0 , θ_1 , r , R un (vienā piemērā) k_M , pieņemot, ka $S_f = 0$. Regresijas analīzē parametru vērtības dispersijas samazinājās, kad ir parametru skaits samazināts. Parametri S_f un k_M ir rezerve sarežģītu uzdevumu risināšanai.

Šo parametru MT tiek meklētas, izmantojot secīgās tuvināšanas metodi. Iepriekš parametru θ_0 , θ_1 vērtības var pieņemt vienādas ar statistiskās stiprības parametriem vai novērtētas, izmantojot nelineārās regresijas modeli:

$$y_i = F_0^{-1}(D_f / E(T(S_i))) = -\theta_0 / \theta_1 + (1/\theta_1)g(S_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i, \quad x_i = g(S_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Noguruma līknes "gamma- aproksimacija" ir

$$E(T(S)) = \frac{D_f}{F_0((g(S) - \theta_0) / \theta_1)}.$$

Parametru r var vērtēt pēc variācijas koeficienta. Parametru R , ja zināmas r un r/R attiecības, var vērtēt, izmantojot Danielsa modeli. Lai atvieglotu aprēķinu veikšanu (jāaprēķina P^*t ar lieliem t), $F_T(t; s, ij)$ tiek aproksimēts ar lognormālo sadalījumu. Noguruma izmēģinājumu laiks ir ierobežots, tāpēc logaritmiskajā skalā ticamības funkciju var rakstīt šādā veidā:

$$l(\eta) = \ln(L(\eta)),$$

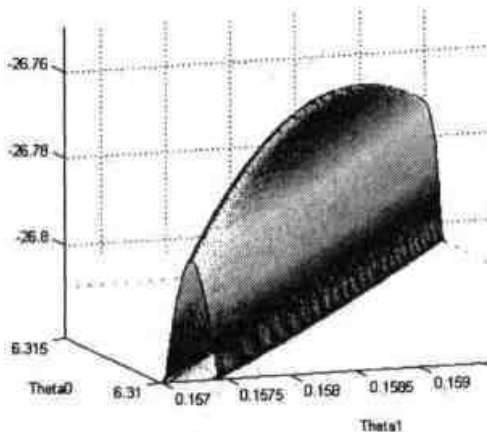
kur, $L(\eta) = \prod_{i=1}^n f_i^{A_i} (1 - F_i)^{1 - A_i}$ kur (fiksētajam η un atbilstošajam S) f_i ; F_i ir ilgizturības T blīvuma

vērtības un (lognormālā) sadalījuma funkcijas

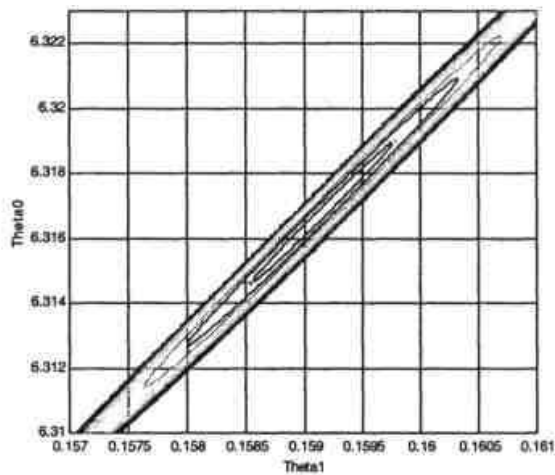
$$F_i = \Phi\left(\frac{\log(t_i) - \theta_{0LT}}{\theta_{1LT}}\right), \quad f_i = \frac{1}{t_i \theta_{1LT}} \varphi\left(\frac{\log(t_i) - \theta_{0LT}}{\theta_{1LT}}\right).$$

A_i ir vienāds ar 1, ja izmēģinājuma rezultāta paraugs sabruka. Tas ir vienāds ar 0, ja ierobežota izmēģinājuma ilguma dēļ (cenzūras) paraugs nesabruka.

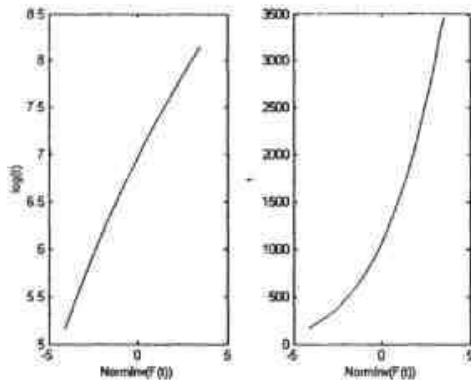
Turpmāk aplūkotos eksperimentālos datus ieguvuši T. Šimokava un Y. Hamaguči, veicot piecu sprieguma līmeņu lieces izmēģinājumus pēc četru balstu shēmas ar 125 oglekļaplata paraugiem ar epoksīda matricu. Divu mazākā sprieguma līmeņu gadījumā notika izmēģinājumu ilguma ierobežošana (cenzūra pa labi). Pēc M. Kleinhofa datiem, ticamības funkcijas izskats un ticamības funkcijas (tās maksimuma tuvumā) vienāda līmeņa līnijas projekcijas ir parādītas 8. un 9. attēlā (izmantots BRM -modeļa variants).



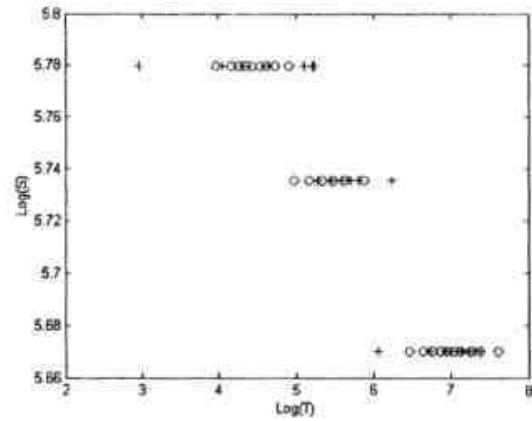
8. att.



9. att.



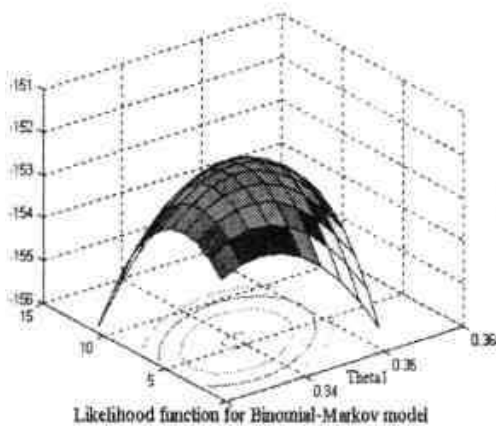
10. att.



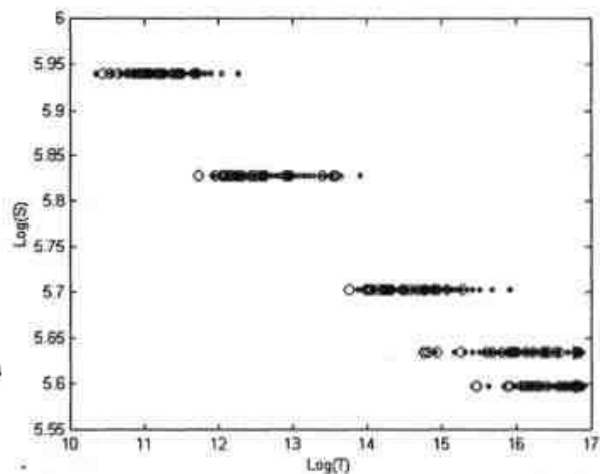
11. att.

10. attēlā parādīts, ka lognormālā aproksimācija ir labāk piemērota nekā normālā aproksimācija funkcijai $F_T(t;s,\eta)$. 11. attēlā parādīts M.Kleinhofa noguruma izmēģinājuma rezultātu fragments (+), kā arī aprēķina noguruma ilgzturības kārtas statistiku vidējās vērtības (o).

F. Pascuala un V. Meekera eksperimenta datus apstrādāja, izmantojot BRM- un BNM -variantus. Apstrādes rezultāti (ticamības funkcija un noguruma līkne), izmantojot BNM -variantu, ir parādīti 12. un 13. attēlā .



12. att.



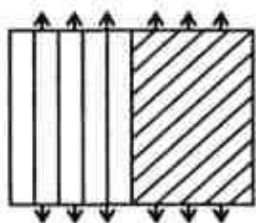
13. att.

Ņemot vērā, ka tika atrastas tikai aptuvenas maksimālās ticamības vērtības, var atzīt, ka ir iegūta pietiekami apmierinoša eksperimentālo un aprēķināto datu sakritība. Vizuāli ļoti grūti izvēlēties labāku variantu. Saskaņā ar Akaike informācijas kritēriju, izrādās, ka BNM - variants ir labāks un tam ir mazāks parametru skaits. Bet atšķirība ir ne visai liela. Abus variantus var izmantot specifiskos apstākļos.

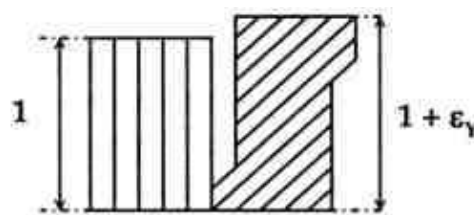
Šos modeļus var lietot arī ilgzturības sadalījuma funkcijas noteikšanai, ja ir programmētā sloģošana. Iepriekšējie aprēķini pierādīja, ka to rezultāti ir tuvi noguruma bojājumu summēšanas lineārajai hipotēzei. Attiecībā uz kompozītmateriāliem, šo hipotēzi apstiprina vairākās eksperimentu datu publikācijās, taču acīmredzot tā notiek tikai

gadījumos, kad kompozītmateriāla ilgizturības nodrošināšanā matricas loma nav liela. Matricas ietekme tiek pētīta modelī, kas ir aplūkots nākamajā nodaļā.

Sestajā nodaļā ir aplūkots jauns matemātiskais modelis, kurā tiek ņemts vērā kompozītmateriāla matricas plastiskums. Tiek parādīts, ka šo modeli var izmantot gan noguruma līknes sastādīšanai, gan arī noguruma izraisīto bojājumu uzkrāšanās procesu aprakstīšanai, ja ir programmētā sloģošana. Šis modelis ļauj iegūt apmierinošu eksperimentu datu aprakstu, ja spriegumu režīms tiek mainīts vienu reizi. Šī modeļa shēma parādīta 14. attēlā. Tiek pieņemts, ka kompozītmateriāla paraugs sastāv no divām daļām: cietas un plastiskas. 15. attēlā abas kompozītmateriāla sastāvdaļas ir attēlotas atsevišķi viena no otras. Pēc novērotās plūstamības, plastiskās daļas garums palielinās par noteiktu garumu e_{YI} .



14. att



15. att.

Kompozītmateriāla cietā un plastiskā daļa turpina darboties kopā, tādēļ pēc nobīdes un ārējā sprieguma noņemšanas paraugā rodas iekšējais spriegumi - stiepe cietajā daļā un spiede plastiskajā. Šī iemesla dēļ pieaug spriegums cietajā daļā un palielinās iespēja, ka sagraus kaut kāds (viens vai otrs) cietais komponents. Noteikta kritiska skaita cieto elementu sabrukums ir visa parauga sabrukšanas iemesls. Ja plūstamības aktu skaits pārsniedz noteiktu maksimālo skaitu, notiek matricas, kā arī visa parauga sabrukšana. Šo procesu var aprakstīt ar Markova ķēdi ar pārejas varbūtības matricu, kas ir veidota no vairākiem atsevišķiem blokiem. Bloku skaits ir vienāds ar $(1+r_Y)$, kur r_Y ir plūstamības aktu kritiskais skaits, kas atbilst parauga sabrukumam. Stāvokļu skaits katrā blokā ir vienāds ar $(1+r_R)$, kur r_R ir kritisks cieto elementu skaits, arī atbilstošs parauga sabrukumam.

Ja, piemēram, parauga sabrukšana notiek, ja $r_R = 2$ (A notikums), vai $r_Y = 2$ (B notikums), vai kad ir sakrituši A notikums un B notikums, tad pārējās varbūtības matricas tiek noteiktas atbilstoši 1. tabulai. Šajā tabulā stāvokļi S_1, S_2, \dots, S_9 atbilst deviņiem Markova ķēdes stāvokļiem (trīs (0,1,2) - iespējamais cietu elementu sabrukumu skaits reizināts ar trīs (0,1,2) - iespējamais plūstamības aktu skaits). Varbūtības p_{R0}, p_{R1}, \dots ir cieto elementu sabrukuma varbūtības, p_{Y0}, p_{Y1}, \dots ir plūstamības aktu varbūtības.

1. tabula

		j_Y	1			2			3		
		j_R	1	2	3	1	2	3	1	2	3
i_Y	i_R	$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	$P_{R0}P_{Y0}$	$P_{R1}P_{Y0}$	$P_{R2}P_{Y0}$	$P_{R0}P_{Y1}$	$P_{R1}P_{Y1}$	$P_{R2}P_{Y1}$	$P_{R0}P_{Y2}$	$P_{R1}P_{Y2}$	$P_{R2}P_{Y2}$
	2	2	0	$P_{R0}P_{Y0}$	$P_{R1}P_{Y0}$	0	$P_{R0}P_{Y1}$	$P_{R1}P_{Y1}$	0	$P_{R0}P_{Y2}$	$P_{R1}P_{Y2}$
	3	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	4	0	0	0	$P_{R0}P_{Y0}$	$P_{R1}P_{Y0}$	$P_{R2}P_{Y0}$	$P_{R0}P_{Y1}$	$P_{R1}P_{Y1}$	$P_{R2}P_{Y1}$
	2	5	0	0	0	0	$P_{R0}P_{Y0}$	$P_{R1}P_{Y0}$	0	$P_{R0}P_{Y1}$	$P_{R1}P_{Y1}$
	3	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	1	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	2	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Apzīmējumiem tabulā ir vienīgi simboliska nozīme. To faktiskās vērtības ir atkarīgas no MĶ stāvokļa. Aplūkotajā piemērā ir doti pieci absorbējošie stāvokļi: S_3 atbilst 2 cietu elementu sabrukumam bez plūstamības aktiem, S_6 - pēc viena plūstamības akta, bet S_7, S_8 , - kad parauga sabrukums ir noticis divu plūstamības aktu dēļ, S_9 - kad ir šo notikumu sakrišana.

Pārējās varbūtības bija aprēķinātas Binomiālā variantā, jo šim variantam ir priekšrocības, salīdzinot ar Bernulli variantu. Ja n_R - vēl nesabrukušo cieto elementu skaits, tad notikuma "sabrukušo cieto elementu skaits ir vienāds ar k_R " varbūtība ir

$$P_R(i, j) = \binom{n_R}{k_R} (F_R(S_R(i_R, i_Y)))^{k_R} (1 - F_R(S_R(i_R, i_Y)))^{n_R - k_R}$$

Kur $i = (r_R + l)(i_Y - l) + i_R$; $j = (r_R + l)(j_Y - 1) + j_R$; $n_R = r_R - i_R$, $k_R = j_R - i_R$, $0 \leq k_R \leq n_R$, $1 \leq n_R \leq (r_R - l)$; $F_R(\cdot)$ - statistiskās stiprības sadalījuma funkcija (vēl nesabrukušo cieto elementu); $S_R(i_R, i_Y)$ - spriegums cietajā daļā, kad MĶ ir stāvoklī $i = r_R(i_Y - 1) + i_R$.

Ar līdzīgu formulu nosaka varbūtību notikumam "plūstamības aktu skaits ir vienāds ar k_Y ":

$$P_Y(i, j) = \binom{n_Y}{k_Y} (F_Y(S_Y(i_R, i_Y)))^{k_Y} (1 - F_Y(S_Y(i_R, i_Y)))^{n_Y - k_Y}$$

kur $n_Y = r_Y - i_Y$; $k_Y = j_Y - i_Y$; $0 \leq k_Y \leq n_Y$; $1 \leq n_Y \leq (r_Y - 1)$; $F_Y(\cdot)$ - lokālā p spriegumu sadalījuma funkcija; r_Y - plūstamības aktu kritiskais skaits; j_Y - plūstamības aktu skaits, $S_Y(i_R, i_Y)$ - spriegums plastiskajā daļā, kad MĶ ir stāvoklī $i = r_R(i_Y - 1) + i_R$.

Piedāvāto modeli ir ērti lietot noguruma ilgzturības aprēķināšanai, veicot programmētās sloģošanas izmēģinājumus.

Ja ciklu slodzes spriegumi mainās saskaņā ar zināmu secību $\{S_1, S_2, S_3, \dots\}$, tad ilgzturības sadalījuma funkciju aprēķina pēc formulas:

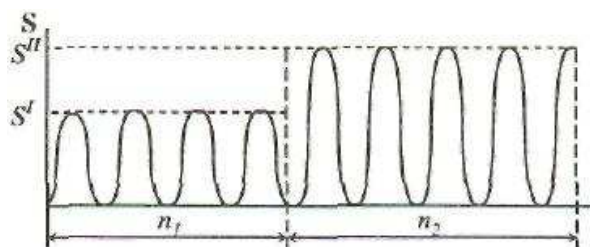
$$F_T(t) = a \left(\prod_{i=1}^t P_i \right) b,$$

kur matrica P_i , atbilst spriegumam S_i , $i = 1, 2, 3, \dots$; $a = (1 \ 0 \ 0 \dots 0)$; $b = (0 \ \dots 0 \ 1 \dots 0)$, kur "1" nozīmē, ka atbilstošs stāvoklis ir absorbējošs.

Ja noguruma izmēģinājumu programma ir tāda, kā ir parādīta 16. attēlā, tad ilgizturības sadalījuma funkciju nosaka ar formulu

$$F_T(t) = \begin{cases} a(P_{S^I}^t)b, & \text{if } t \leq n_1, \\ a(P_{S^I}^{n_1} P_{S^{II}}^{t-n_1})b, & \text{if } t > n_1. \end{cases}$$

kur P_{S^I} , $P_{S^{II}}$ - matrices, kas atbilst S^I un S^{II} .

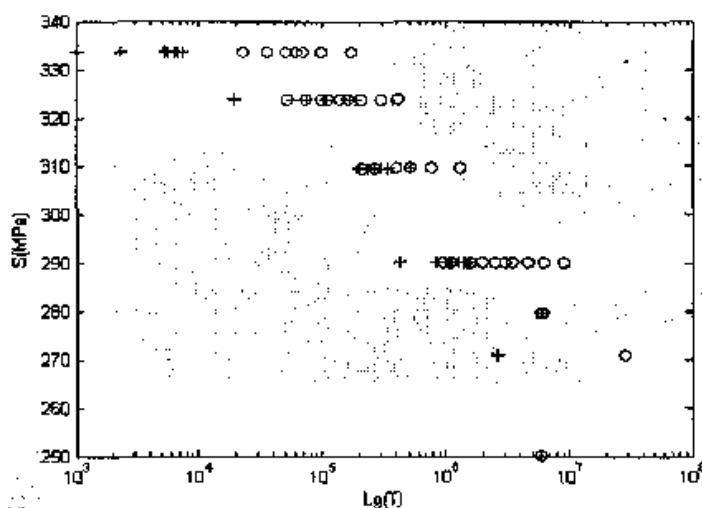


16. att.

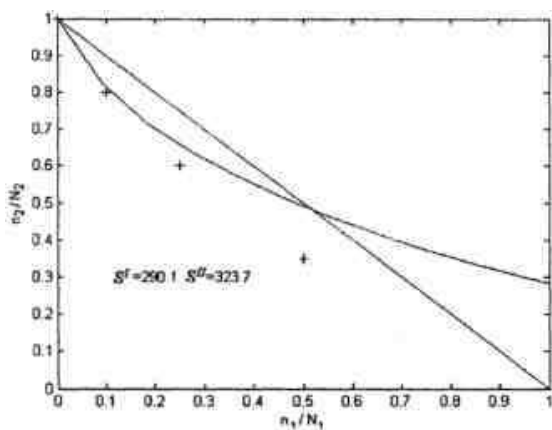
Atliku ilgizturības T_2 nosacīta sadalījuma funkciju (paraugiem, kas nesabruka pirmajā režīmā ar $S = S^I$) nosaka ar formulu

$$F_{T_2}(t) = \frac{F_T(n_1 + t) - F_T(n_1)}{1 - F_T(n_1)}.$$

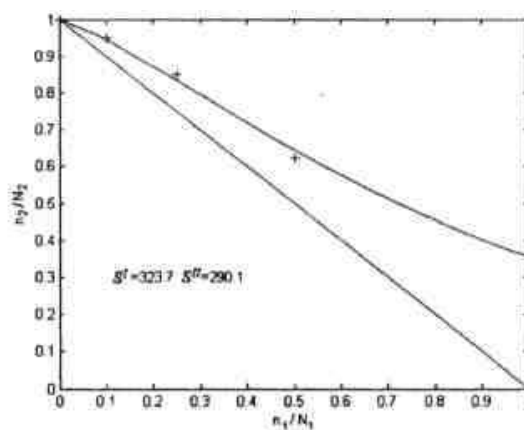
Lai pārbaudītu, vai modelis ir adekvāts, tika apstrādāti M. Kleinhofa dati, kurus ieguva, veicot izmēģinājumus ar oglekļa šķiedru kompozītmateriālu. Mērķis bija iegūt noguruma līkni un izpētīt atlikto ilgizturību pie programmētās slogošanas, saskaņā ar programmu divos variantos: $S^I < S^{II}$ un $S^I > S^{II}$. Šo datu apstrādes rezultāti parādīti 17., 18. un 19. attēlā.



17. att.



18.att.



19. att.

17. attēlā noguruma līknes eksperimentālie dati parādīti ar krustiņiem „+”. Ar aplīšiem attēlā parādīti kārtas statistiku (tās atbilst eksperimentālo datu paraugu kopas apjomam) sagaidāmo vērtību aprēķinu rezultāti. Relatīvās atlikušās ilgizturības (n_2/N_2) atkarība no relatīvā bojājuma (n_1/N_1) programmētās cikliskās slogošanas pirmajā etapā parādīta 18. un 19. attēlā. Aprēķinu rezultāti apzīmēti ar nepārtrauktām līnijām, bet eksperimentālie dati - ar krustiņiem „+”.

Redzams, ka $n_2/N_2 > 0$ pie $n_1/N_1 = 1$, tādēļ ka pirmajā režīmā pie $n_1/N_1 = 1$ sabrūk tikai aptuveni 50% paraugu. Parasti citu autoru darbos (piemēram, V. V. Bolotina darbos) ir kļūda: $n_2/N_2 = 0$ pie $n_1/N_1 = 1$.

Darba nobeigumā noteikti disertācijā aplūkoto modeļu perspektīvākie attīstības virzieni, kā arī apspriestas to izmantošanas sfēras. Modeļi, kuros netiek ņemta vērā matricas atlikušās deformācijas uzkrāšanās, sniedz ticamākus rezultātus vienvirziena kompozītmateriālu analīzei. Modeļus, kuros tiek ņemta vērā deformācijas uzkrāšanās, labāk lietojam sarežģītāku struktūru analīzei.

Noslēgums

1. Promocijas darbā tika izstrādāti jauni matemātiskie modeļi, kas, atšķirībā no citiem modeļiem, no vienotām pozīcijām apraksta noguruma izraisīto bojājumu uzkrāšanos slāņainā kompozītmateriālā pie nemainīgiem cikla raksturlielumiem (nolūkā noteikt noguruma līkni) un pie programmētās slogošanas. Noguruma līkni aprakstošo modeļu parametrus var fiziski interpretēt kā vietējās statistiskās izturības sadalījuma parametrus.
2. Šos modeļus var izmantot noguruma līknes nelineārajai regresijas analīzei ar nolūku prognozēt tās parametru izmaiņas, ja tiek mainīti kompozītmateriāla komponentu statistiskās izturības sadalījuma parametri, kā arī prognozēt materiāla ilgizturību pie programmētās slogošanas. Turklāt kā pie mainīgā, tā pie nemainīgā spriedzes režīma modeļus var lietot, lai aprakstītu ne tikai vidējo ilgizturību, bet arī tās sadalījuma funkciju.
3. Pie fiksēta sprieguma ilguma un nemainīgiem cikla raksturlielumiem modeļi ļauj iegūt ierobežoto noguruma robežu.

4. Modeļu ticamība ir pārbaudīta, izmantojot eksperimentālus datus.
5. Ir izstrādāts programmu komplekss statikās un noguruma izturības modelēšanai un modeļu parametru novērtēšanai.

Publikāciju saraksts

1. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov YuM.* Parameter estimation of Markov chain model of fatigue life of composite material// *Mašīnzinātne un transports*, 6.sērija, 8. sējums. *Transports, Aviācijas transports*, - Rīga, RTU, 2002.- 15. - 25. lpp.
2. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov Yu.M.*, The use of Markov chains theory for approximation fatigue curve of composite material. // *Proceedings of Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability. Methodology and Practice*, June 17-20, 2002, Norway, - NTNU, Trondheim, 2002 - 509-512 pp.
3. *Yu. Paramonov, M. Kleinhof and A. Paramonova*, Probability model of the fatigue life of composite materials for fatigue curve approximation. // *Abstracts of 12th International Conference "Mechanics of Composite Materials"*, June 9-13, 2002, Latvia; - Riga, 2002, -p. 12.
4. *Парамонов Ю.М., Клейнхоф М. А., Парамонова А.Ю.*, Вероятностная модель усталостной долговечности композита для аппроксимации кривой усталости// *Механика композитных материалов. № 6*, - Рига, 2002, - С. 741-750.
5. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov YuM.* Wave model of fatigue damage accumulation in laminate // *Mašīnzinātne un transports*, 6. sērija, 11. sējums. *Transports, Aviācijas transports*. - Rīga, RTU, 2002. - 82.-89.lpp.
6. *Paramonov YuM., Kleinhof M.A., Paramonova A.Yu.*, Probabilistic Model of fatigue life of composite material for fatigue curve approximation.// *New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers*, 2002 - pp. 485-491.
7. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov YuM.* The estimation of parameters of fatigue curve of composite material . // *AVIATION* , V.7, #1 Vilnius: Technika. 2003, - pp. 28-35.
8. *Парамонова А.Ю., Клейнхоф М. А., Парамонов ЮМ.* Кривая усталости углепластика при испытании на изгиб// *Mašīnzinātne un transports*, 6. sērija, 11. sējums. *Transports, Aviācijas transports*. - Rīga, RTU, 2003.- 70.- 81. lpp.
9. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov Yu.M.* Rigidity and yielding of laminate in framework of Markov model of fatigue life. // *Mašīnzinātne un transports*, 6. serija, 13. sejums. *Transports, Aviācijas transports*. - Rīga, RTU, 2003. - 13.-22.lpp.
10. *Парамонов Ю.М., Клейнхоф М. А., Парамонова А.Ю.* Markov Models of Composite Degradation in Fatigue Test// *in Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology*, Volume 1, - St.Petersburg, 2004,- pp. 217-234.
11. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov Yu. M.* Markov model of fatigue life of composite with two reasons of failure //"*International conference on scientific aspects of unmanned aerial vehicle*", May 19-21, 2004, Poland, - *Politechnika Swie_tokrzyska, Kielce*, 2004, - pp. 355-367.
12. *Kleinhof M.A., Paramonov Yu. M., Paramonova A.Yu.*, Regression model based on Markov chain theory for composite fatigue curve approximation//*Acta et Commentationes Universitatis Tartuensis de Mathematica*, Volume 8, 2004 - pp. 143-153.

13. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov Yu. M.* Binomial version of Markov model of fatigue life of composite with two reasons for failure. // AVIATION , V.8, #2 Vilnius: Technika. 2004, - pp. 15-20.
14. *Paramonov Yu.M., Kleinhof M.A., Paramonova A. Yu.* Estimating of fatigue curve parameters of composite material // Book of abstracts .13. starptautiska zinātniska konference "Mechanics of Composite Materials", May 16-20, 2004, Riga, Latvia.- p. 146.
15. *Paramonova, M. Kleinhof, Y. Paramonov.* Fatigue Curve Approximation Using Markov Chains Theory // Book of abstracts of Sixth International Seminar on RECENT RESEARCH AND DESIGN PROGRESS IN AERONAUTICAL ENGINEERING AND ITS INFLUENCE ON EDUCATION, Riga, Latvia, 14-16 October, 2004-p.34
16. *Paramonova A.Yu., Kleinhof M.A., Paramonov Yu.M.* Modelling of fatigue life of composite. // Abstracts of International conference RELIABILITY AND STATISTICS IN TRANSPORTATION AND COMMUNICATION (RelStat'04). 14-15 October 2004 Riga, Latvia,- p.80
17. *Ю.М. Парамонов, М. А. Клейнхоф, А.Ю. Парамонова.* Оценка параметров кривой усталости композитного материала// Механика композитных материалов; - N1, 2005. -С. 1-12.

Piedalīšanas konferencēs

1. Starptautiskā zinātniskā konference "Aviation Reliability (AviaRel'99)". 1999. gada 20.-21. aprīlī, Rīga, Latvija.
2. Third International Conference on Mathematical Methods In Reliability, Methodology and Practice. June 17-20, 2002, NTNU, Trondheim, Norway.
3. 12. starptautiska zinātniska konference "Mechanics of Composite Materials", June 9-13, 2002, Riga, Latvia; 2002. gada 9. - 13. jūnijā, RTU, Rīga, Latvija.
4. RTU 43.starptautiskā zinātniskā konference "Production Engineering and Transport", 2002. gada 10. - 14. oktobrī, RTU, Rīga, Latvija.
5. Starptautiskā zinātniskā konference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'02)". 2002. gada 17. - 18. oktobrī, Rīga, Latvija.
6. The 7th Tartu Conference on Multivariate Statistics. August 7-12, 2003. Satellite Meeting of ISI 54th session in Berlin, Tartu. Estonija.
7. Starptautiska zinātniska konference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'03)". 2003. gada 16. - 17. oktobrī, Rīga, Latvija.
8. RTU 44. starptautiskā zinātniskā konference veltīta lidojumu simtgadei, 2003. gada 17. - 18. decembrī, Rīga, Latvija.
9. 13. starptautiskā zinātniskā konference "Mechanics of Composite Materials", May 16-20, 2004, Rīga, Latvija.
10. International conference on "Scientific aspects of unmanned aerial vehicle", May 19-21, 2004, Kielce, Poland.
11. 3d Russian-French International Conference "Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology (LAD'2004)", June 7-9, 2004, St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia.
12. Starptautiskā zinātniskā konference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'04)" 2004. gada 14.-15. oktobrī, Rīga, Latvija.
13. 6. starptautiskais zinātniskais seminārs "Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and Its Influence on Education", 2004. gada 14. - 16. oktobrī, Rīga, Latvija.