

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Biomateriālu un biomehānikas institūts
Biomateriālu un biomehānikas profesora grupa

Zoja VEIDE

Biomateriālu un biomehānikas doktora programmas doktorante

**ŽOKĻA KAULA VISKOELASTĪGO ĪPAŠĪBU
EKSPERIMENTĀLĀ PĒTĪŠANA UN MODELĒŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
Dr.sc.ing., profesors
M. DOBELIS
Dr.hab.ing., profesors
I. KNĒTS

Rīga 2010

UDK 611.716(043.2)
Ve 170 ž

Veide Z. Žokļa kaula viskoelastīgo īpašību eksperimentālā pētīšana un modelēšana. Promocijas darba kopsavilkums. -R.:RTU, 2010.-36 lpp.

Iespiests saskaņā ar Biomateriālu un biomehānikas institūta 2010. gada 30. septembra padomes sēdes lēmumu, protokols Nr.4/2010.

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 02. decembrī plkst. 16:00 RTU Kaļķu ielā 1, 119 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing., profesors A. Lukoševičius
Institute of Biomedical Engineering, Kaunas University of Technology

Dr.hab.ing., profesors J. Brauns
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Būvkonstrukciju katedra

Dr.sc.ing., profesors I. Tipāns
Rīgas Tehniskā universitāte, Transporta un mašīnzinību fakultāte, Mehānikas institūts

APSTIPRINĀJUMS

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

Zoja Veide.....(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 63 attēlus un 16 tabulas, kopā 142 lappuses. Literatūras sarakstā ir 122 avoti.

SATURS

IEVADS	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķis	6
Promocijas darba uzdevumi	6
Darba zinātniskā novitāte	7
Darba praktiskā vērtība	7
Darba sastāvs, apjoms un struktūra	8
Darba aprobācija	9
Publikāciju saraksts	10
1.KAULAUDU UZVEDĪBA ILGLAICĪGĀS STATISKĀS SLOGOŠANAS REŽĪMĀ UN PIE CIKLISKĀM SLODZĒM	11
2.KAULAUDU PĀRBAUŽU METODIKA	14
2.1 Materiāls un metodika viskoelastīgo īpašību noteikšanai	14
2.2 Materiāls un metodika kaulauda uzvedības noteikšanai pie cikliskām slodzēm	15
3.KOMPAKTO KAULAUDU ILGLAICĪGĀS STATISKĀS SPIEDES SLOGOŠANAS EKSPERIMENTI.....	17
4.KOMPAKTO KAULAUDU EKSPERIMENTĀLĀ PĒTĪŠANA PIE CIKLISKĀM SLODZĒM.....	21
4.1 Ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no sprieguma, paraugu lokalizācijas apakšžoklī un tā blīvuma	21
4.2 Sagraušanas prognoze	23
4.3 Kaulaudu noguruma stiprības modelis	24
5.CILVĒKA APAKŠŽOKĻA GALĪGO ELEMENTU ANALĪZE	27
5.1 Mandibulas lūzuma fiksējošās sistēmas skaitliskā modelēšana	27
5.1.1 Ģeometriskais modelis	28
5.1.2 Materiāla īpašības	28
5.1.3 Robežnosacījumi un noslogošanas režīms	29
5.1.4 Rezultātu analīze.....	30
SECINĀJUMI	35

IEVADS

Sakarā ar nepārtraukto interesi par dabas biomateriāliem, biokompozīta – kompakto kaulaudu dažādo mehānisko īpašību pētīšanai tiek veltīta sevišķa uzmanība no dažādu augsto tehnoloģiju nozares speciālistu puses. Racionālu kaulaudu struktūru un efektīvu mehānisko slodžu pretestību var izmantot kā prototipu jaunu kompozītu materiālu veidošanai kā tautas saimniecības tehniskajām vajadzībām, tā arī lietošanai medicīniskajā praksē.

Pirmie darbi, kuros tika pētītas kompakto kaulaudu mehāniskas īpašības, parādās jau deviņpadsmitajā gadsimta vidū. Tomēr, neskatoties uz to, kompakto kaulaudu uzvedības daži aspekti pie mehāniskām slodzēm ir izpētīti nepietiekoši. Tajā skaitā apakšžokļa kaulauda biomehāniskas īpašības ir maz pētītas.

Tēmas aktualitāte

Sakarā ar to, ka mandibula tiek pakļauta dažādām operatīvām darbībām lūzumu ārstēšanas vai zobu stāvokļa korekcijas un protezēšanas gadījumos, žokļa kompaktajās daļās rodas deformācijas un spriegumi ilglaicīgas vai cikliskas slodzes iedarbības rezultātā. Pareizas ārstēšanas metodikas izstrādei nepieciešams zināt doto slodžu darbības sekas.

Cikliska sprieguma iedarbība, kas raksturīga normālas fizioloģiskas aktivitātes apstākļos, var traucēt sākotnēju implanta fiksāciju un var radīt kaulauda sagraušanu, kaulauda un implanta sasaistīšanās zudumu. Veiksmīgai implanta dizaina izstrādāšanai jāzina kompakto kaulaudu uzvedību pie cikliskām slodzēm.

Viens no galvenajiem kritērijiem implantu materiālu izmantošanai ir abu materiālu – kaulaudu un implanta – biomehāniskā saderība, jo implantam ir jādarbojas arī mehāniski kā tiem audiem, kurus tas aizvieto. Tāpēc ir svarīgi izziņāt bioloģisko audu mehāniskās īpašības, deformatīvo uzvedību dažādu slodžu ietekmē, kaulauda uzvedību pie konstantām ilglaicīgām slodzēm un visa tā rezultātā novērtēt kaulauda un implanta biomehānisko saderību.

Skaitliskām metodēm, tādām kā galīgo elementu metode, kuras veiksmīgi izmanto *in vivo* izmeklējumos, tai skaitā pētot kaulu reakciju uz ortodontas procedūras vai zobu implantācijas praksē, ir nepieciešami eksperimentālie dati par apakšžokļa mehāniskajām īpašībām. Precīzākas

modelēšanas gadījumā ar galīgo elementu metodi, nepieciešams ievērot arī no laika atkarīgās mehāniskās īpašības.

Tāpēc dotā darba pētījuma objekts ir apakšžokļa kompaktie kaulaudi. Izmeklējumi saistīti ar laikā mainīgām biomehāniskām īpašībām: aktīvo šļūdi un kaulaudu uzvedību pie cikliskām slodzēm. Izvēlētās spiedes slodze ļoti bieži ir sastopama reālajā dzīvē fizioloģiskās slodzes apstākļos. Cikliska deformēšana notiek pie dažādiem spriegumu līmeņiem un pie frekvences, kura raksturīga cilvēkam normālas fizioloģiskas aktivitātes apstākļos.

Sakarā ar straujo datortehnikas attīstību galīgo elementu metode pēdējos gados ir kļuvusi par galveno rīku bioloģisko objektu mehāniskas uzvedības pētīšanai. Modelēšanas izmantošana palīdz izvairīties no eksperimentiem, kuri atsevišķos gadījumos ir neparocīgi, dārgi un sarežģīti. Dotajā darbā tika attīstīts cilvēka apakšžokļa lūzuma galīgo elementu modelis ar mērķi novērtēt fiksējošās sistēmas lūzuma risku un kaulaudu rezorbcijas iespēju.

Promocijas darba mērķis

Dotā darba mērķis ir apakšžokļa kompakto kaulaudu viskoelastīgo īpašību eksperimentālā pētniecība pie spiedes slodzēm un mehānisko īpašību noteikšana pie cikliskām slodzēm, kā arī matemātiskā un skaitliskā modeļa izveidošana.

Promocijas darba uzdevumi

Mērķa sasniegšanai darba saturs sastāv no sekojošu pamatuzdevumu risinājumiem:

- cilvēka žokļa kaula kompaktās daļas viskoelastīgo raksturojumu eksperimentālā noteikšana;
- kompakto kaulaudu uzvedības matemātiskā modeļa izveidošana šļūdes deformēšanas režīmā;
- apakšžokļa kompakto kaulaudu uzvedības pētījumi pie cikliskām slodzēm;
- apakšžokļa kompaktās daļas noguruma ilgizturības prognozēšanas modeļa izveidošana;
- apakšžokļa galīgo elementu modeļa izstrādāšana.

Darba zinātniskā novitāte

Dotā darbā ir pētīts apakšžoklis – kaulu sistēmas sastāvdaļa, kas ir ļoti maz izpētīta no mehānisko īpašību viedokļa. Izmeklējumi ir saistīti ar no laika atkarīgām mandibulas kompakto kaulaudu īpašībām – šļūdi un nogurumu – par kādiem vispār nav informācija literatūras avotos.

Izstrādāts cilvēka apakšžokļa kompakto kaulaudu aktīvās šļūdes matemātiskais modelis.

Pētījumos pie cikliskām slodzēm katra parauga slodzes līmenis ir noteikts, izmantojot izstrādāto metodiku, kuras pamatā ir eksperimentāli noteikta sakarība blīvums-tecēšanas robežas spriegums.

Izpētīta cūkas mandibulas kompaktais daļas uzvedība pie cikliskām slodzēm un izstrādāts nogurumu stiprības matemātiskais modelis, kas ievēro noslogotā parauga tilpuma konkrētu vērtību.

Darba praktiskā vērtība

Eksperimentāli iegūtos datus var izmantot kā datu bāzi skaitliskām metodēm, tādām kā galīgo elementu metode, modelējot dažādos kaulaudu procesus, kas izraisa ortodontas procedūras, implanta ievietošanu vai ķirurģiskas darbības.

Noteiktās kaulaudu viskoelastīgās īpašības var izmantot jauno biomatēriālu izstrādei, jo biomateriālu īpašībām jābūt pēc iespējas pietuvinātām bioloģisko audu īpašībām.

Noteiktos kaulaudu uzvedības raksturojumus var izmantot zobārstniecībā pareizas ārstēšanas metodikas izstrādei vai labākas zobu korekcijas plāksnītes vai žokļa fiksācijas plāksnītes veidošanai, jo ilglaicīgas statiskas un cikliskas slodzes iedarbojas uz apakšžokļa kaulaudiem normālas aktivitātes laikā un kaulauda reakcija uz tām ir ļoti svarīga.

Iegūtie rezultāti ir nepieciešami zobu implantu formas un izmēru efektivitātes un drošības novērtēšanai. Cikliskās slodzes izraisītā sprieguma un deformācijas novērtējums ir būtisks aspekts iespējamo implanta bojājuma riska prognozēšanai.

Galīgo elementu modelēšanas rezultāti var būt izmantoti seju ķirurģijā jauno fiksējošo sistēmu īpašību novērtēšanai, kā arī individuālas ģeometriskas formas miniplākšņu izstrādei. Turpmāk modelis var būt attīstīts ar mērķi ievērot arī no laika atkarīgās materiālu īpašības.

Darba sastāvs, apjoms un struktūra

Promocijas darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 63 attēlus, 16 tabulas, kopā 142 lappuses. Literatūras sarakstā ir 122 nosaukumi.

Promocijas darba izklāsts sastāv no ievada, 5 nodaļām un secinājumiem.

Ievadā ir pamatota veikto pētījumu aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, pamatota darba zinātniskā novitāte un pierādīta darba praktiskā vērtība.

Pirmā nodaļa ietver literatūras apskatu par kompakto kaulaudu mehāniskām īpašībām. Šajā nodaļā ir aprakstītas kompakto kaulaudu un mandibulas struktūra, dažu faktoru ietekme uz kaulaudu mehāniskām īpašībām, kā arī kaulaudu viskoelastīgās īpašības un kaulaudu uzvedība pie cikliskām slodzēm un noguruma sagraušanas modeļi. Analizējot dažādu pētnieku rezultātus, izdarīti secinājumi par apakšžokļa kompakto kaulaudu pētījumu nepieciešamību.

Otrajā daļā ir aprakstīta pārbaužu metodika. Otrās daļas pirmā nodaļa satur materiāla izvēles pamatojumu un darbības, kas saistītas ar paraugu sagatavošanu. Otrajā nodaļā tiek izklāstīta izstrādātā metodika viskoelastīgo īpašību noteikšanai un kaulaudu uzvedībai pie cikliskām slodzēm, kā arī aprakstītas izmantotās iekārtas.

Trešajā daļā tiek analizēti ilglaicīgas statiskas spiedes složošanas eksperimentu rezultāti. Šļūdes deformācijas dati tika aproksimēti ar eksponenciālo funkciju un izstrādāts šļūdes matemātiskais modelis.

Ceturtajā daļā tiek analizēti rezultāti, kas saistīti ar kaulauda uzvedību pie cikliskām slodzēm, kā arī tiek veikta sagraušanas prognoze, izstrādāts noguruma stiprības modelis un ar šo modeli veiksmīgi veikta stiprības prognoze kā mazo izmēru paraugiem, tā arī veselai mandibulai.

Piektajā daļā tika attīstīts apakšžokļa lūzuma un tā fiksējošās sistēmas galīgo elementu modelis. Modelis novērtēts ievērojot sakodiena spēka vērtības un lūzuma sadzīšanas stadijas ietekmi un tika dotas rekomendācijas, kas saistītas ar fiksējošās sistēmas uzlabošanu. Darba beigās doti galvenie secinājumi.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti 7 starptautiskās konferencēs.

1. RTU 46. Starptautiskā zinātniskā konference. Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš. Cilvēka žokļa kompakto kaulaudu šļūde. 13.–15. oktobris 2005. gads, Rīga.
2. The 9th International Conference „Biomedical engineering”. Z. Veide, M. Dobelis, J. Laizāns, V. Vītiņš. Creep mathematical model development of human jaw compact bone. October 27-28, 2005, Kaunas, Lithuania.
3. The 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering CMBBE 2006. Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš, Viscoelastic properties of the human mandible for finite element simulation. March 22–25, 2006, France.
4. The 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering CMBBE 2006. Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, V. Vītiņš, Biomechanical peculiarities of physiologically wet compact bone in cyclic three point bending. March 22–25, 2006, France.
5. The International Conference „Biomechanics 2006”. Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš. Compression creep properties of compact bone tissue. September 6–8, 2006, Zakopane, Poland.
6. The International Conference of the Polish Society of Biomechanics „Biomechanics 2010”. Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. The fatigue properties of the pig mandible compact bone tissue. August 25–28, 2010, Warsaw, Poland.
7. RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference. Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. Žokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma uzvedība. 14.–16. oktobris 2010. gads, Rīga.
8. RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference. Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns. Mandibulas lūzuma fiksējošās sistēmas galīgo elementu analīze. 14.–16. oktobris 2010. gads, Rīga.
9. The 14th International Biomedical Engineering Conference. Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. Experimental Investigation of the Pig Mandible Fatigue Behaviour. October 28-29, 2010, Kaunas, Lithuania.

Publikāciju saraksts

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 9 publikācijās starptautiskos žurnālos un rakstu krājumos, no kurām 7 ir publicētas, bet 2 ir pieņemtas publicēšanai.

Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš. Cilvēka žokļa kompakto kaulaudu šļūde. RTU zinātniskie raksti. 1. sēr., Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 10. sēj., 2005, 76-84 lpp.

Z. Veide, M. Dobelis, J. Laizāns, V. Vītiņš. Creep mathematical model development of human jaw compact bone. Proceedings of the 9th International Conference BIOMEDICAL ENGINEERING, October 27-28, Kaunas, Lithuania, Technologija, Kaunas, 2005, pp. 17-22.

Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš, Viscoelastic properties of the human mandible for finite element simulation. Proceedings of 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering, March 22–25, France, 2006, 7p.

Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, V. Vītiņš, Biomechanical peculiarities of physiologically wet compact bone in cyclic three point bending. Proceedings of 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering CMBBE 2006, March 22–25, France, 2006, 7 p.

Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns, V. Vītiņš. Compression creep properties of compact bone tissue. Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, nr 26/2006, The International Conference „Biomechanics 2006” September 6–8, Zakopane, Poland, 2006, pp. 371-376.

Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. The fatigue properties of the pig mandible compact bone tissue. Book of abstracts of the International Conference „Biomechanics 2010” August 25–28, Warsaw, Poland, 2010, pp. 243-245.

Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. Žokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma uzvedība. RTU zinātniskie raksti. Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 2010, (6 lpp., pieņemta publicēšanai).

Z. Veide, M. Dobelis, I. Knēts, J. Laizāns. Mandibulas lūzuma fiksējošās sistēmas galīgo elementu analīze. RTU zinātniskie raksti. Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 2010, (6 lpp., pieņemta publicēšanai).

Z. Veide, O. Ozoliņš, M. Dobelis, I. Knēts. Experimental Investigation of the Pig Mandible Fatigue Behaviour. Proceedings of the 14th International Biomedical Engineering Conference, October 28-29, Kaunas, Lithuania, Technologija, Kaunas 2010, pp. 202-206.

1 KAULAUDU UZVEDĪBA ILGLAICĪGĀS STATISKĀS SLOGOŠANAS REŽĪMĀ UN PIE CIKLISKĀM SLODZĒM

Kā bioloģiskajiem audiem, kompaktajiem kaulaudiem piemīt galveno sastāvdaļu (I tipa kolagēna un kalcija karbonāta) hierarhiskais sakārtojums [Valenta J. et al 1993]. Kaula struktūras augstā sarežģītība no vienas puses nodrošina kaulauda stiprību un no otras puses kalpo par kaulaudu daudzfaktoru sagraušanas iemeslu, kas iekļauj katru auda strukturālo līmeni. Kompaktie kaulaudi ir nelineārs materiāls, kura mehāniskās īpašības būtiski mainās mehānisko un bioloģisko faktoru ietekmes rezultātā.

Starp kompakto kaulaudu dažādu pētījumu datiem ir vērojama liela izkliede dažādu faktoru ietekmes dēļ (nevienmērīga parauga struktūra, pārbaudes paraugu ģeometriskās formas pareizība, izmēru precizitāte, paraugu virsmas gludums un apstrādes apstākļi, u.c.).

Kaulam piemīt viskoelastīgās īpašības, t.i., spriegums ietekmē ne vien deformāciju, bet arī kaula deformācijas vēsturi laikā [Natali A.N. et al 2003]. Šāda kaula uzvedība var izpausties kā šļūde, kas izpaužas vienmērīgā deformācijas pieaugumā nemainīga sprieguma iedarbībā vai kā sprieguma relaksācija, kas izpaužas paraugā kā pakāpenisks sprieguma samazinājums pie pastāvīgas deformācijas [Lakes R. S. et. al 1974, 1979]. Viskoelastīgās īpašības nosaka arī akustisko un ultraskaņas viļņu pavājināšanos vai enerģijas izkliedi (disipācija) dinamiski slogotā kaulā [Saha S. et. al 1977].

Kaulu pētījumu eksperimentālās metodes bāzējas uz katra iepriekš minētā fenomena lietojumu. Rezultāti tika transformēti vispārīgā priekšstatā ar lineārās viskozitātes-stingrības teorijas savstarpējo sakarību palīdzību, lai būtu iespējams tiešs rezultātu salīdzinājums. Stiepes/spiedes nodaļā ir vērojama nozīmīga atšķirība starp publicētajiem rezultātiem. Šīs atšķirības var būt radušās kaulu nelineārās viskoelastīgās uzvedības rezultātā vai iespējamo sagrozījumu dēļ eksperimenta laikā. Nodaļā par bīdes deformācijām savukārt ir laba atbilstība starp dažāda veida eksperimentos iegūtajiem rezultātiem [Lakes R. S. et. al 1979, 1980; Yang J. et. al 1981].

Kompaktajiem kaulaudiem piemīt lineāra šļūde slogošanas diapazonā līdz 0,5 no graujošā sprieguma σ^* un nelineāras šļūdes īpašības pie slodzēm vairāk nekā $0,5\sigma^*$ [Knets I. 2002] Kaulaudu padevība ir lielāka, jo lielāks ir apkārtējās vides mitrums eksperimenta laikā un jo jaunāks ir kauls. Šļūdes bojājumu uzkrāšanās notiek ātrāk pie temperatūras palielināšanas.

Kaulaudu viskoelastīgā uzvedība daudz vairāk izpaužas jaunā vecumā. Tas saistīts ar jauno kaulaudu nelielu mineralizācijas pakāpi un līdz ar to ar relatīvi lielu kolagēna saturu. Kaulaudiem novecojot, minerālkomponentu aktīvā virsma samazinās, kauls kļūst mazāk ķīmiski aktīvs un rezorbcijas procesi prevalē pār kaulaudu veidošanās procesiem. Tas var būt viens no iemesliem šķūdes īpašību heterogenitātes samazināšanai dažādās kaula šķērsriezuma zonās atkarībā no vecuma.

Kaulaudu viskoelastīgā slāpēšana – zudumu leņķa tangenss – sasniedz minimālo vērtību 0,01 pie frekvences no 1 līdz 100 Hz [Lakes R. S. 1982]. Šīs frekvences ir saistītas ar normālu aktivitāti. Kaulu amortizējoša nozīme bija motivēta, pamatojoties uz tā viskoelastīgo reakciju. Tomēr novērotais zudumu leņķa tangensa minimums runā pretī dotai interpretācijai. Kaulu viskoelastība var būt kaulaudu sastāvdaļas blakusefekts. Piemēram, cementējošās līnijas rada kaula stingrību un, sakarā ar savu padevību, arī rada viskoelastību. Nozīmīgas zudumu leņķa tangensa vērtības konstatēja pie zemas frekvences, kā arī novēro pie ilglaicīgas kaulaudu šķūdes. Viskoelastības fiziskais cēlonis ir saistīts ar cementējošām līnijām, bet bioloģiskā nozīme nav zināma.

Spēja uzkrāt mikrobojājumus, vienlaicīgi novēršot sagraušanu, kas ir izraisīta plaisu rašanās un apvienošanās procesā, ir viens no galvenajiem aspektiem, kas dod kompozītmateriāliem stingrību un noguruma pretestību [Cowin C. 2001]. Materiāliem, izturīgiem pret strukturālo nogurumu, bieži rodas spēja uzkrāt mikroplaisas sakarā ar to izturību pret plaisu palielināšanu, nevis rezistenci pret plaisu rašanos. Cementa līnijas un lamelu interfeiss ir svarīgas mikrostruktūru sastāvdaļas, kas darbojas, lai pārtrauktu vai apturētu plaisu veidošanās progresēšanu, aizkavējot mikroplaisu apvienošanās, tādējādi novēršot letālas plaisas izveidošanos. Ar mikroplaisu uzkrāšanos ir saistīti elastības moduļa, stinguma, izturības, stiprības samazinājumi, kā arī kompakto kaulaudu pretestība plaisu uzsākšanai.

Dažādi autori pētīja noguruma fenomenu kaulaudu paraugos, kas izpaužas kā stiprības un stinguma samazinājums ar pielikto sloģošanas ciklu skaitu palielinājumu [Kruzic J.J. et. al 2006]. Dotais rezultāts ir atkarīgs no dažādiem aspektiem, tai skaitā no maksimālās un minimālās deformācijas vērtības, no sprieguma un deformācijas vidējās vērtības un, galvenokārt, no cikliskās deformācijas veida. Runājot par kaulaudu uzvedību pie noguruma slodzes, jāatzīmē, ka kompaktie kaulaudi rada elastīgiem metāliem līdzīgas S/N līknes. Samazinot sprieguma amplitūdu (σ_a), nosloģošanas ciklu skaits līdz sagraušanai (N_f) palielinās. Noguruma stiprība

palielinās pie augstām frekvencēm un pie istabas temperatūras eksperimenta laikā [Carter D.K. et. all 1976, Caler W.E. et. all 1989]

Kaulaudu nepārtrauktā atjaunošanās ir visa kaula stiprības noteicošais faktors [Nakamura M. et. all 2006]. Ja atjaunošanās procesi palēninās, vidējā mineralizācija un mineralizāciju viendabīgums palielinās. Attiecīgi, pie kaula rekonstrukcijas pakāpes samazināšanās, samazinās kolagēna daļa. Turklāt augstas rekonstrukcijas pakāpes rezultātā ir vairāk aktīvu rezorbciju zonu, kas darbojas kā spriegumu koncentrējošas vietas un ir lielāka kompakto kaulaudu porainība. Ļoti zema kaulaudu rekonstrukcija ir saistīta ar palielinātu mikroplaisu daudzumu esamību.

Lūzumi, kas rodas ar laiku, slogošanas ciklu vai/un ilglaicīgas slogošanas iedarbības rezultātā ir bieži sastopami medicīniskajā praksē [Iwamoto J. 2003, Meurman K.O. 1980]. Šajā sakarā ir ļoti svarīgi izpētīt kompakto kaulaudu mehānisko uzvedību pie noguruma slodzes ar mērķi attīstīt bāzi lūzumu prognozēšanai. Lai varētu prognozēt noslogošanas ciklu skaitu līdz sagraušanai, kā cikliska sprieguma un deformācijas funkciju, ievērojot arī tādus svarīgus faktoros, kā cikliskās frekvences vērtība, temperatūra eksperimenta laikā, kaula veids, utt., ir vajadzīgi eksperimentālie dati turpmāko matemātisko modeļu izstrādei un precizēšanai.

Tomēr kompakto kaulaudu sagraušanas mehānisms vēl nav saprotams līdz galam. Šajā pētījumu sfērā ir tikai hipotēzes, sākot ar domu, ka sagraušanas iemesls ir mikroplaisas, kas veidojas uz lamelu interfeisa, un beidzot ar pieņēmumu par lokāla audu moduļa neviendabīguma ietekmi uz mikroplaisu apvienošanu makroplaisās [Jepsen K.J. et. all 1999; Zioupos P. et. all 2007].

Kaulaudu noguruma bojājumu modeļus var izmantot, lai prognozētu neelastīgu uzvedību un sagraušanas uzkrāšanās procesus pie cikliskām slodzēm. Svarīgi, ka tās var izmantot kopā ar eksperimentāliem pētījumiem ar mērķi precizēt kaulaudu noguruma uzvedību. Tomēr, ir daudzas īpatnības tādas kā slogošanas virziens, slogošanas veids, slogošanas ātrums, utt., kuru ietekmi vēl nepieciešams pētīt [Cowin C. 2001]. Ņemot vērā kompakto kaulaudu sarežģīto struktūru un sarežģītās mehāniskās īpašības, kaula bojājumu modeli jāpapildina ar eksperimentāliem pētījumiem kompakta kaulauda noguruma uzvedības virzienā.

Analizējot rezultātus no literatūras avotiem, var secināt, ka dažādu pētnieku iegūtajiem datiem piemīt vāja savstarpēja sakarība un ir neatrisināti, bet teorētiski un praktiski svarīgi jautājumi:

- kompakto kaulaudu viskoelastīgā uzvedība nelineārā posmā ir praktiski neizpētīta;

- kaulaudu laikā mainīgās mehāniskās īpašības, it sevišķi šķīdes īpašības, ir pētītas nepietiekoši;
- praktiski nav datu par cilvēka žokļa kaula kompakto daļas mehāniskām īpašībām, un it sevišķi viskoelastīgām īpašībām;
- apakšžokļa kompakto kaulaudu heterogenitātes šķīdes īpašības ir neizpētītas;
- maz datu par žokļa kompakto kaulaudu uzvedību pie cikliskas slodzes;
- apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma īpašības ir neizpētītas.

2 KAULAUDU PĀRBAUŽU METODIKA

Viskoelastīgo īpašību noteikšanai tika izmantota pieejamā cilvēka mandibula, bet eksperimentos pie cikliskām slodzēm – cūkas apakšžoklis, pamatojoties uz to, ka cūkas un cilvēka atsevišķu kaulaudu mikroarhitektūra, fizioloģija, biomehāniskās īpašības un, it sevišķi, kompakto kaulaudu rekonstrukcijas procesi ir ļoti līdzīgi.

2.1 Materiāls un metodika viskoelastīgo īpašību noteikšanai

Paraugi ilglaicīgās statiskās spiedes eksperimentiem tika izgatavoti no pieciem 49 līdz 56 gadus vecu cilvēku apakšžokļiem, kuri iegūti autopsijā. Ar frēzes palīdzību no apakšžokļa molāras un premolāras zonas tika izgrieztas plāksnītes. Dotās zonas tika izvēlētas kā vislielāko kompakto kaulaudu daudzumu saturošie slāņi. Sakarā ar to, ka izgatavot pietiekoši lielus vienādus paraugus žokļa konstrukcijas dēļ praktiski nebija iespējams, ģeometriskie izmēri bija tikai līdzīgi $(3-5) \times (4-6) \times (4-6)$ mm. Kaula paraugi no paņemšanas brīža līdz mehāniskā eksperimenta sākumam tika turēti 10 % formalīna buferšķīdumā, $+2 - +4$ °C temperatūrā.

Cilvēka žokļa kaulaudu paraugu ilglaicīgās statiskās spiedes eksperimentos tika izmantota speciāli izstrādātā ilglaicīgas sloģošanas sistēma. Konstrukcijas izveidē lietoti sviru svaru elementi, lai nodrošinātu parauga sloģošanu ar nelielu atsvaru palīdzību.

Eksperimentālo datu savākšanai tika izmantots personālais dators PC un Lawson Labs, Inc. USA CVI Model 201 analogu-ciparu pārveidotājs ar attiecīgu datu uzkrāšanas programmu. Eksperimenta rezultātu apstrādei materiāla mehānisko īpašību noteikšanai tika izmantota Microsoft Excel programmatūra.

Visi mehāniskie eksperimenti tika veikti 20 ± 2 °C temperatūrā un paraugu visu laiku mitrinot. Spiedes slodze kaula paraugam tika pielikta perpendikulāri sakodiena plaknei. Šļūdes eksperimentu realizēja ar nemainīgu slodzes lielumu. Tā kā šķērsriezuma laukums kompaktiem kauliem pie dotajām slodzes vērtībām laikā mainās nenozīmīgi, pirmajā tuvinājumā var uzskatīt, ka arī spriegums paraugā slogošanas laikā ir nemainīgs.

Kontroles eksperimentā noteica, ka nepieciešamais šļūdes reģistrācijas laiks pie dotajiem spriegumiem ir apmēram 300 minūtes. Šļūdes līknes tika pierakstītas 300 minūšu laikā spriegumu diapazonā no 5 līdz 40,8 MPa. Katrā konkrētajā gadījumā, ja parauga deformācija laikā vairs nenotika, eksperiments tika pārtraukts. Visu eksperimentālo individuālo paraugu šļūdes līknes tika reģistrētas laika diapazonā no 60 līdz 268 minūtēm.

2.2 Materiāls un metodika kaulauda uzvedības noteikšanai pie cikliskām slodzēm

Cūkas mandibulas kompakto kaulaudu slāņa kvalitāte, biezums un blīvums dažādās žokļa šķērsriezuma zonās un to atkarība no šķērsriezuma izvietojuma kaulā tika novērtēta, izmantojot datortomogrāfijas metodi. Konstatēts, ka mandibulas ārējās – vaiga zonas kompakto kaulaudu slāņa struktūra ir visvienveidīgākā salīdzinājumā ar apakšžokļa mēles un apakšējo zonām. Kaulaudu kompakts daļas materiāla slāņa biezums vislielākais ir cūkas apakšžokļa vaiga zonā. Kompakto kaulaudu blīvuma vērtība noteiktajās Haunsfilda vienībās vislielākā ir mandibulas molārā un premolārā reģionu aizmugures daļas vaiga zonas augšējā un vidējā daļā. Līdz ar to paraugu sagatavošanai tika lietots visvairāk piemērotais apgabals cūkas apakšžokļa molārā reģiona un premolārā reģiona aizmugures daļas vaiga zonā.

Paraugi noguruma eksperimentiem tika izgatavoti no trim 2 gadus vecu cūku apakšžokļiem. Žokļa molāras un premolāras zonas gan no kreisās gan no labās puses paralēli zoba garenasij tika sazāģētas plāksnēs ar biezumu 10 mm. No plāksnēm ar frēzes un lentas slīpmašīnas palīdzību tika izgriezti 26 kompakto kaulaudu paraugi statistiskiem eksperimentiem teorētiskās sakarības blīvums-tecēšanas robežas spriegums noteikšanai un 30 paraugi eksperimentiem pie cikliskām slodzēm. Sakarā ar žokļa specifisko konstrukciju, paraugiem bija taisnstūra prizmas forma ar izmēriem $3\times 5\times 7$ mm ar precizitāti $\pm 0,5$ mm. Pēc izgatavošanas paraugus vizuāli pārbaudīja un eksemplārus ar redzamiem defektiem izslēdza no eksperimenta.

Cūkas žokļus līdz mehāniskai apstrādei uzglabāja hermētiskos polietilēna maisīņos pie temperatūras -18°C . Kaula paraugus ietina mitrā marlē, kuru saslapināja ar sāls šķīdumu, ievietoja plastmasas kastītē. Paraugi līdz eksperimenta sākumam tika uzglabāti $+2$ – $+4$ $^{\circ}\text{C}$ temperatūrā.

Pirms mehāniskiem eksperimentiem visiem paraugiem noteica blīvumu ar svēršanas paņēmienu. Statiskiem spiedes eksperimentiem graužoša sprieguma noteikšanai un noguruma izmēģinājumiem tika izmantota servohidrauliskā testēšanas sistēma INSTRON 8872. Lai nodrošinātu eksperimentu gaitā paraugu nostiprināšanu un aizsardzību no žūšanas, tika izstrādāta speciāla palīgierīce. Paraugi atradās caurspīdīgā plastmasā vannā, kas tika aizpildīta ar ūdeni. Vannas iekšā paraugs tika nostiprināts ar plastmasu turētāju. Pirmajā etapā 26 paraugi tika pakļauti statiskas spiedes slodzes darbībai. Spiedes slodze kaula paraugam tika pielikta perpendikulāri sakodiena plaknei ar deformācijas ātrumu $1,0$ mm/min līdz paraugu sagraušanai. Eksperimentu rezultātā katram paraugam tika iegūti tecēšanas robežas spriegums un spiedes graužošais spriegums. Izmantojot eksperimenta datus noteica regresijas sakarību blīvums-tecēšanas robežas spriegums:

$$\sigma_y = 228,73\rho - 377,74, \quad (2.1)$$
$$r^2 = 0,922,$$

kur σ_y – tecēšanas robežas spriegums, MPa un ρ – blīvums, g/cm³, r^2 – determinācijas koeficients. Izmantojot iegūto formulu, tika aprēķināts tecēšanas robežas spriegums visiem noguruma eksperimenta paraugiem. Tā katram paraugam tika noteikts individuāls slodzes līmenis dotajā pētījuma veidā.

Otrajā pētījuma etapā 30 cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu paraugus cikliski slogoja pie slodžu līmeņiem – 60 %, 70 %, 80 % un 90 % no tecēšanas robežas sprieguma. Noguruma testi tika veikti pie kontrolējamiem spiedes spriegumiem, izmantojot sinusoidālu slogošanas profilu. Maksimālais cikliskais spriegums bija no $-0,5$ līdz -1 MPa, minimālā cikliskā sprieguma vērtība katram paraugam tika aprēķināta ņemot vērā parauga tecēšanas robežas spriegumu un izvēlēto slodzes līmeni.

Cikliskie spiedes eksperimenti tika veikti pie frekvences 2 Hz un slogošanas virziena perpendikulāri sakodiena plaknei. Testu gaitā tika reģistrēta sakarība deformācija-laiks, bet sagraušana tika konstatēta tad, kad deformācija palielinājās vairākas reizes salīdzinājumā ar iepriekš reģistrēto deformācijas vērtību. Visi eksperimenti tika veikti 20 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ temperatūrā un paraugi testu laikā atradās ūdenī.

3 KOMPAKTO KAULAUDU ILGLAICĪGĀS STATISKĀS SPIEDES SLOGOŠANAS EKSPERIMENTI

Cilvēka žokļa kaulaudu kompakts daļas materiāla ilglaicīgās statiskās spiedes slogošanas (šļūdes) eksperimentos tika iegūtas tipveida sakarības deformācijas izmaiņai laikā. Raksturīgi, ka, pamatā no individuālā materiāla parauga pētīto spiedes spriegumu diapazonā tika iegūtas dažādas šļūdes līknes, kas apstiprina to, ka materiāla īpašības mainās atkarībā no sprieguma vērtības.

Eksperimentāli noteikts, ka kompaktiem kaulaudiem piemīt lineāra šļūde pie sprieguma $\sigma_{11} < 0,28 \sigma_{11}^*$ vai pat $\sigma_{11} \leq 0,5 \sigma_{11}^*$, kur σ_{11}^* ir graujošais spriegums kaula garenass virzienā. Apakšžokļa kompaktiem kaulaudiem eksperimentāli noteiktais spiedes graujošais spriegums ir 127 MPa. Mūsu pētījumos izmantotajā spriegumu diapazonā no 5 līdz 40,8 MPa kaulaudu šļūdi var uzskatīt par lineāru. Vispārīgajā gadījumā anizotropā viskoelastīgā vidē deformāciju tenzors ε_{ij} ir sprieguma tenzora σ_{kl} un laika t funkcija: $\varepsilon_{ij}(t) = F_{ij}(\sigma_{kl}, t)$ ($i, j, k, l = 1, 2, 3$). Ja materiālam piemīt lineāras šļūdes īpašības, tad: $\varepsilon_{ij}(t) = F_{ij}(t) \sigma_{kl}$. Aprakstot cilvēka kompakto kaulaudu lineāro šļūdi pie konstanta sprieguma, tika lietota funkcija $F_{ij}(t)$ eksponenciālā formā.

Tad cilvēka žokļa kaulaudu šļūdes deformāciju virzienā, kas ir perpendikulāri sakodiena plaknei, aprakstīsim ar sakarību (3.1):

$$\varepsilon = C \sigma \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [1 - \exp(-\alpha_i t)] \quad (3.1)$$

kur C – materiāla padevība, kas noteikta kā šļūdes deformācijas attiecība pret sprieguma σ vērtību, kad $t \rightarrow \infty$;

α_i – relaksācijas laika apgrieztā vērtība;

n – relaksācijas laiku skaits, t.i., eksponenšu skaits.

Materiāla konstantes tika aprēķinātas pie noteikuma, lai mērķa funkcijai (3.2) būtu minimums.

$$\Phi = \sum_{j=1}^m \left[\frac{\varepsilon_j^{(t)} - \varepsilon_j^{(e)}}{\varepsilon_j^{(e)}} \right]^2 \quad (3.2)$$

$\varepsilon_j^{(t)}$ – teorētiskā šļūdes deformācija laika momentā t_j ;

$\varepsilon_j^{(e)}$ – eksperimentāli noteiktā šļūdes deformācijas vērtība tajā pašā laika momentā;

m – eksperimentālo punktu skaits.

Eksperimenta rezultātu datu aproksimācija tika veikta ar divām un ar trim eksponentēm.

Tad šļūdes deformācija divu eksponenšu gadījumā var aprakstīt ar sakarību (3.3):

$$\varepsilon = \frac{1}{2} C \sigma [2 - \exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (3.3)$$

bet triju eksponenšu gadījumā var aprakstīt ar sakarību (3.4):

$$\varepsilon = \frac{1}{3} C \sigma [3 - \exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t) - \exp(-\alpha_3 t)] \quad (3.4)$$

Noteiktas cilvēka kompakto kaulaudu šļūdes īpašību raksturojumu vērtības sakārtotas 3.1. un 3.2. tabulās.

3.1. tabula

Cilvēka kompakto kaulaudu šļūdes īpašību raksturojumu vērtības divu eksponenšu gadījumā.

Parauga Nr.	C, [MPa ⁻¹]	α_1 , [min ⁻¹]	α_2 , [min ⁻¹]	S _y
1	0,000602	0,091491	0,015559	0,005007
2	0,029105	0,475045	0,033658	0,005119
3	0,027389	0,011008	0,205355	0,002416
4	0,007409	0,204550	0,018503	0,001459
5	0,023062	0,639039	0,008230	0,000830
6	0,009555	0,914393	0,006609	0,001509
7	0,029972	0,322063	0,015049	0,001269
8	0,050968	0,011166	0,395523	0,001643
9	0,021112	0,637133	0,022978	0,002145
10	0,006615	1,223140	0,230358	0,001684
11	0,009287	0,156623	0,012591	0,002643
12	0,007716	0,069928	0,007312	0,002035
13	0,013583	0,328487	0,010846	0,000964
14	0,036128	0,932898	0,019795	0,001097
15	0,016305	0,466614	0,011630	0,000724

3.2. tabula.

Cilvēka kompakto kaulaudu šļūdes īpašību raksturojumu vērtības triju eksponenšu gadījumā.

Parauga Nr.	C , [MPa ⁻¹]	α_1 , [min ⁻¹]	α_2 , [min ⁻¹]	α_3 , [min ⁻¹]	S_y
1	0,000663	0,131196	0,016168	0,016168	0,004195
2	0,029323	1,099660	0,045217	0,045216	0,002117
3	0,030944	0,010279	0,436888	0,010273	0,000763
4	0,007290	0,430576	0,019302	0,039607	0,000969
5	0,022966	0,005148	1,542098	0,053200	0,000953
6	0,008094	0,167618	2,038170	0,009108	0,002030
7	0,036273	0,495388	0,004068	0,024836	0,000480
8	0,056837	0,004462	0,906802	0,026194	0,001284
9	0,031753	0,654332	0,008789	0,008777	0,001508
10	0,006623	0,907297	0,166557	0,906737	0,001677
11	0,009699	0,346265	0,015126	0,015126	0,001291
12	0,008034	0,126498	0,008858	0,008858	0,001250
13	0,018782	0,382597	0,000666	0,013821	0,000904
14	0,040858	1,379739	0,004874	0,094162	0,000546
15	0,021412	0,529012	0,000504	0,014179	0,000678

S_y – vidējā kvadrātiskā novirze no vidējā aritmētiskā starp teorētiskām un eksperimentālām līknēm.

3.1. tabulā doti rezultāti aproksimācijām ar divām eksponentēm laika intervālos no 60 līdz 268 minūtēm un sprieguma intervālos no 5 līdz 40,8 MPa. Šie spriegumi sastāda no 3 līdz 24,4 % no graužoša sprieguma. 3.2. tabulā doti rezultāti aproksimācijām ar trim eksponentēm iepriekšminētajos laika un sprieguma intervālos.

Analizējot aproksimācijas rezultātus, var secināt, ka triju eksponenšu lietošanas gadījumā S_y samazinās vidēji par 30 %. No visiem 15 eksperimentāli pārbaudītajiem un individuāli aproksimētajiem paraugiem tika atlasīti tie paraugi, kuriem maksimālā eksperimentālā šļūdes deformācija atrodas intervālā no 0,05 līdz 0,3 % un izdarīts mēģinājums aproksimēt 9 paraugu eksperimentālos datus ar kopējām šļūdes vienādojuma konstantēm.

Lai atņemtu paraugus ar krasi atšķirīgiem aproksimācijas rezultātiem, tika veikta eksperimentālā sadalījuma viendabīguma analīze. Aproksimācijas rezultātus novērtēja izmantojot Romanovska kritēriju, kas ir visefektīvākais nelielu izlašu gadījumā. Pēc dotā kritērija, pārbaudāmo izlases elementu var izslēgt no eksperimenta rezultātiem, ja izpildās nosacījums:

$$|\bar{x} - x_i| > k_R S, \quad (3.5)$$

kur \bar{x} – izlases elementu vidējā vērtība bez pārbaudāmā elementa,

x_i – pārbaudāmā elementa vērtība,

k_R – Romanovska kritērija teorētiskā vērtība, S – izlases elementu vidējā kvadrātiska novirze bez pārbaudāmā elementa.

Pēc S_y analīzes saskaņā ar Romanovska kritēriju, no 9 paraugiem tika atnesti vēl 4 paraugi un veikta atkārtota aproksimācija. Līdz ar to iegūtie kopējie rezultāti 5 paraugiem reprezentē cilvēka žokļa kompakto kaulaudu šļūdes vidēji statistiskās īpašības. Atmesto paraugu ievērojamās izkliedes var saistīt ar tādu faktoru ietekmi, kurus šajā eksperimentā nevarēja kontrolēt vai novērtēt, kā, piemēram, nevienmērīga parauga struktūra, paraugu atrašanās vieta kaulā, pārbaudes parauga ģeometriskās formas pareizība, izmēru precizitāte, parauga virsmas gludums un apstrādes apstākļi, parauga žūšana eksperimenta laikā.

3.3. tabulā doti rezultāti aproksimācijām ar kopējām šļūdes vienādojuma konstantēm 5 paraugiem sprieguma intervālos no 10,4 līdz 20,48 MPa divu un triju eksponenšu gadījumā. Konstatēts, ka paraugu grupas aproksimācijai S_y mainās nenozīmīgi (triju eksponenšu lietošanas gadījumā samazinās tikai par 0,65 % attiecībā pret divām eksponentēm).

3.3. tabula.

Cilvēka kompakto kaulaudu kopējās šļūdes īpašību raksturojumu vērtības 5 paraugu grupai divu un triju eksponenšu gadījumā.

Eksponeņu skaits	C , [MPa ⁻¹]	α_1 , [min ⁻¹]	α_2 , [min ⁻¹]	α_3 , [min ⁻¹]	S_y
2	0,007624	0,151668	0,014158	-	0,008017
3	0,007605	0,258850	0,011936	0,035335	0,007965

Analizējot iegūtos rezultātus var secināt:

Cilvēka žokļa kaulaudu kompakts daļas materiāla ilglaicīgās statiskās spiedes slogošanas eksperimentos noteiktā aktīvā šļūde raksturo apakšžokļa kaulaudu kompakts daļas materiāla šļūdes vidējās īpašības spriegumu diapazonā no 10,4 līdz 20,48 MPa, kas ir no 3,3 līdz 27 % no graužoša sprieguma. Deformācijas izmaiņu eksperimentālie dati tika aproksimēti ar eksponenciālo funkciju divos variantos – ar diviem un ar trim relaksācijas laikiem visiem 15

paraugiem atsevišķi. Triju eksponenšu lietošanas gadījumā aproksimācijas precizitāte palielinās vidēji par 30 % attiecībā pret divām eksponentēm.

Vidējās šļūdes īpašību raksturojumu vērtības noteiktas no 9 paraugu grupas, no kuras nekontrolējamo mehānisko un bioloģisko faktoru ietekmes dēļ izslēgti 4 paraugi. Atkārtoti aproksimējot 5 paraugu grupu, tika iegūti apakšžokļa kaulaudu kompaktās daļas materiāla šļūdes vidējās īpašības. Triju eksponenšu lietošanas gadījumā aproksimācijas precizitāte palielinās tikai par 0,65 % attiecībā pret divām eksponentēm.

Iegūtos rezultātus var izmantot galīgo elementu analīzes aprēķinos, modelējot, piemēram, kaula rekonstrukciju procesus ar mērķi optimizēt un uzlabot ārstēšanas metodes.

4 KOMPAKTO KAULAUDU EKSPERIMENTĀLĀ PĒTĪŠANA PIE CIKLISKĀM SLODZĒM

4.1 Ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no sprieguma, paraugu lokalizācijas apakšžoklī un tā blīvuma

No 30 paraugiem sagatavotiem noguruma mēģinājumiem, 29 tika testēti veiksmīgi un vienam paraugam neizdevās pabeigt pārbaudi tā sagraut nespējas dēļ. Noguruma eksperimentu rezultātā tika iegūta ciklu skaita līdz sagraušanai sakarība no pieliktā cikliskā sprieguma. Eksponenciāla datu regresija rāda, ka sprieguma ietekme uz ciklu skaitu līdz sagraušanai var aprakstīt ar sekojošu formulu:

$$N = F\Delta\sigma^G, \quad (4.1)$$

kur N – ciklu skaits līdz sagraušanai,

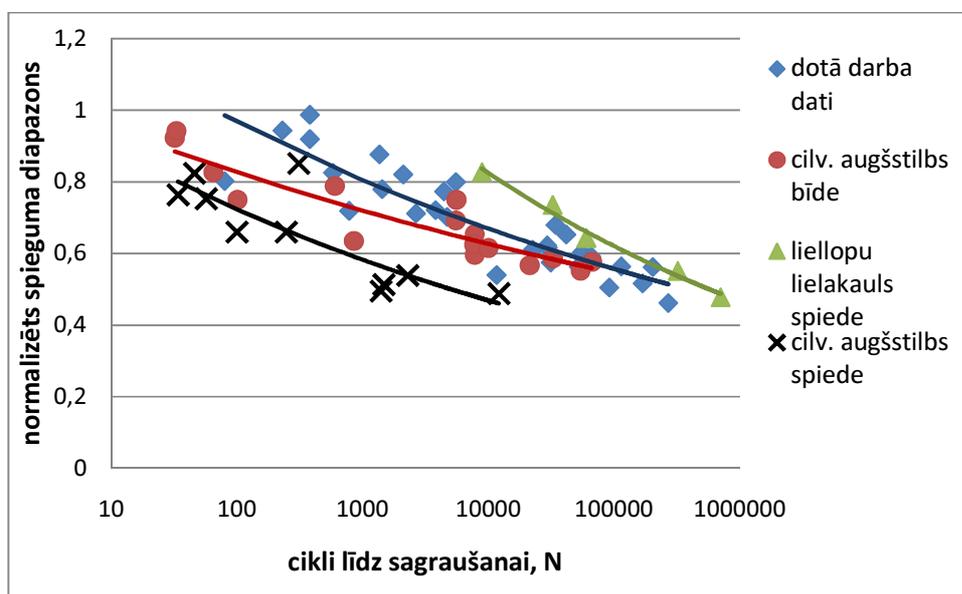
$\Delta\sigma$ – spriegumu diapazons (MPa) $\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$,

F un G – empīriskas konstantes.

Vienādojuma konstantes tika noteiktas no cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma līknes (4.1. attēls): $F = 1,47 \cdot 10^{20}$; $G = -10,05$; $r^2 = 0,804$.

Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma testu rezultātu salīdzināšanai ar kompakto kaulaudu mehāniskās uzvedības pētījumiem no literatūras avotiem, tika izmantoti darbi, kur pētīti kaulaudi spiedē un bīdē. Paraugi bija ņemti no cilvēka augšstilbā vai no liellopu lielakaula. Kompakto kaulaudu noguruma stiprība tika normalizēta pret graujošo spriegumu

(cūkas apakšžokļa – pret 61 MPa; cilvēka augšstilba – 182 MPa; liellopu lielā lielakaula – 272 MPa; cilvēka augšstilba bīdes noguruma stiprība – pret 52 MPa). Doto pētījumu līknes spieguns-cikli līdz sagraušanai kopā ar eksperimentālajiem datiem no literatūras avotiem pēc normalizācijas ir parādīti 4.1. attēlā. Var redzēt, ka starp noguruma līknēm nav ievērojamas atšķirības. Salīdzinot visus rezultātus, var konstatēt, ka cilvēka, liellopu un cūkas kompakto kaulauda noguruma uzvedība ir līdzīga, pie tam, testu paraugi tika ņemti no dažādiem kauliem. Starp kaulaudu noguruma uzvedību spiedē un bīdē arī nav ievērojamas atšķirības.



4.1. att. Dažādo pētījumu noguruma datu salīdzinājums pēc normalizācijas pret graužošo spriegumu.

Izmantojot eksperimentu datus, tika konstatēta ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no parauga lokalizācijas apakšžoklī. Paraugiem no premolārās zonas ciklu skaits līdz sagraušanai ir lielāks, nekā paraugiem no molārās zonas. Tāda sakarība ir raksturīga kā vaiga zonai augšējā daļā, tā arī vidējai daļai neatkarīgi no pieliktā cikliskā sprieguma līmeņa. Vidēji paraugiem no vaiga zonas augšējās daļas premolārās zonas ciklu skaits līdz sagraušanai ir par 31% lielāks nekā molārai zonai, savukārt paraugiem no vaiga zonas vidējās daļas premolārās zonas ciklu skaits ir par 18% lielāks nekā molārai zonai.

Bāzējoties uz pētījuma datiem, tika noteiktas kompakto kaulaudu blīvuma sakarības no ciklu skaita līdz sagraušanai. Analizējot iegūtās līknes, var konstatēt, ka cūkas apakšžokļa

kompakto kaulaudu noguruma ilgizturība palielinās, samazinoties kaulaudu blīvumam. Tāda tendence ir redzama kā pie zema cikliska sprieguma līmeņa, tā arī pie augsta. Noguruma īpašību uzlabošanās pie blīvuma samazināšanās var izskaidrot ar kompakto kaulaudu nelineāro uzvedību.

Dažādi autori pētīja un eksperimentāli pierādīja mehānisko īpašību atkarību no ūdens satura kaulaudu paraugā. Vispārīgi ņemot, stiprība spiedē, elastības modulis un cietība palielinās, ja palielinās ūdens saturs paraugā. Ūdens, kas ieplūda kaulaudos, izsauc hidrostatisko stiepi kaula matricā. Mitruma satura palielināšana kalpo par iemeslu kaulaudu sagraušanas veida izmaiņām (no trauslas līdz elastīgai sagraušanai): kaulaudi uzvedas kā viskoelastīgs materiāls. Mitrā kaulā hidroksilapatīta kristāli deformējas elastīgi, tajā laikā, kad kolagēna matricas uzvedība ir viskoelastīga. Paraugiem ar mazāku blīvumu t. i. ar lielāku porainību mūsu eksperimentu apstākļos mitruma saturs var būt lielāks nekā paraugiem ar lielāku blīvumu. Pamatojoties uz iepriekš minētajiem prātojumiem, var teikt, ka paraugiem ar mazāko blīvumu piemīt viskoelastīga uzvedība un pretestība sagraušanai pie cikliskām slodzēm lielākā pakāpē nekā paraugiem ar lielāko blīvumu pie noteikuma, ka složošanas spriegums tiek izvēlēts atkarībā no blīvuma un paraugi eksperimentu laikā atrodas ūdenī.

4.2 Sagraušanas prognoze

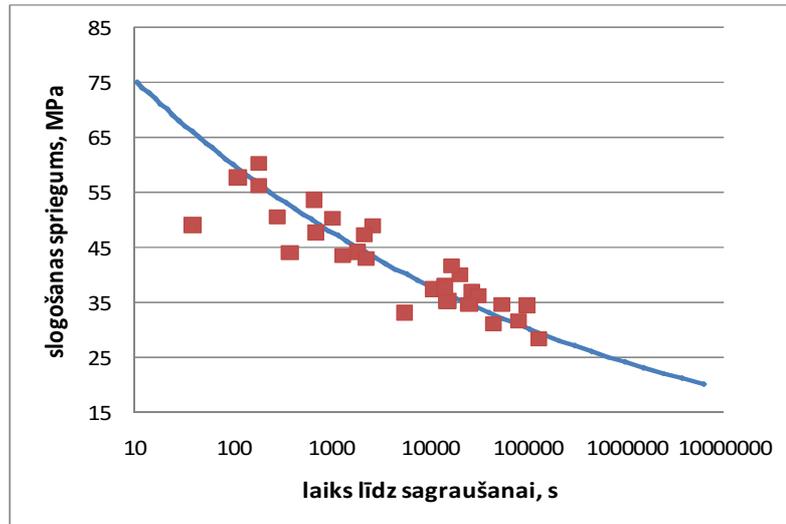
Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu laiks līdz sagraušanai tika prognozēts ar bojājumu funkciju, kas prezentē dzīvas struktūras mehānisko un bioloģisko bojājumu uzkrāšanās vispārējo modeli, pie noteikuma, ka cikliska noslogošana izsauc no ciklu skaita atkarīgo sagraušanu:

$$D_F(t) = \omega t / F \Delta \sigma^{-G}, \quad (4.2)$$

kur ω – složošanas frekvence (Hz),

t – laiks (s).

Ja parauga sagraušana notiek tikai noguruma bojājumu uzkrāšanās dēļ, tad vienādojums tiek risināts laikam līdz sagraušanai t_b pie noteikuma $D_F(t_b) = 1$ (4.2. attēls).



4.2. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu prognozētais laiks līdz sagraūšanai cikliskas spiedes slogošanas rezultātā, izmantojot bojājumu uzkrāšanās modeli salīdzinājumā ar eksperimentu datiem

4.3 Kaulaudu noguruma stiprības modelis

Noguruma stiprības modeļa veidošanai, kas ievēro noslogota tilpuma ietekmi, tika izmantots Veibula modelis, kas ir plaši lietojams noguruma sagraūšanas datu izkliedes pētījumos. Šī analīze pieņem, ka, ja praktiski vienādu paraugu sērija tika testēta, tad doto paraugu aprēķinātā noguruma stiprība mainīsies saskaņā ar:

$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\Delta\sigma_0}{\Delta\sigma_0^*}\right)^m\right), \quad (4.3)$$

kur P – varbūtība, ka doto paraugu noguruma stiprība būs zemāka vai vienāda ar $\Delta\sigma_0$, m un $\Delta\sigma_0^*$ – konstantes.

Ja parauga noslogotais tilpums ir V_0 , var pierādīt, ka sagraūšanas varbūtība paraugam ar citu tilpumu V_s būs:

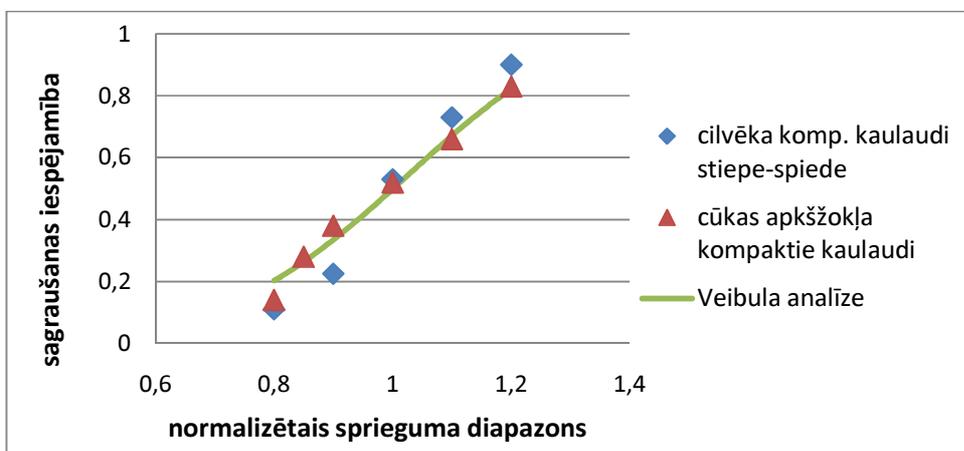
$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_s}{V_0}\right)\left(\frac{\Delta\sigma_0}{\Delta\sigma_0^*}\right)^m\right). \quad (4.4)$$

Pārveidojot vienādojumu (4.4), var noteikt noguruma stiprību, izmantojot sagraūšanas varbūtības dažādās vērtības. Noguruma stiprība samazinās, palielinoties noslogotam tilpumam:

$$\Delta\sigma_0 = \Delta\sigma_0^* \left(-\left(\frac{V_0}{V_s}\right) \ln(1 - P) \right)^{1/m}. \quad (4.5)$$

Lai izmantotu vienādojumu (4.5), nepieciešams noteikt konstantes m un $\Delta\sigma_0^*$. To var izdarīt, uzskatot izkliedes īpašības, ko aprēķina paraugiem ar identisku ģeometriju un praktiski identiskiem izmēriem. 4.3. attēlā ir parādīti noguruma eksperimentālie dati cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu paraugiem, kā arī salīdzinājumam dati no cita darba [Carter D. R. et. all 1981]. Šajā darbā autori pētīja 74 cilvēka kompakto kaulaudu paraugus pie dažādiem sprieguma līmeņiem. Testi tika veikti pie vienas stiepes-spiedes slodzes, temperatūras 37 °C un ar frekvenci 1 Hz. Kā var redzēt no attēla, dotā darba dati un cita darba dati atšķiras nenozīmīgi – tikai par 10 %. Dotajā attēlā ar nepārtraukto līniju parādīts Veibula sadalījums, kas tika aprēķināts pēc formulas (4.3). Šī formula tika izmantota konstanšu aprēķināšanai.

Eksperimentāla kompakto kaulaudu sagraušanas varbūtība bija noteikta no līknes sloģošanas spriegums-ciklu skaits līdz sagraušanai, kā datu punktu skaits, kas atrodas zem konkrētā sprieguma līmeņa, kas tika sadalīts ar kopējo datu punktu skaitu. Sloģošanas sprieguma diapazons bija normalizēts pret vidējo sprieguma līmeni $\Delta\sigma_{vid}$ – pret sadalījuma zonas centru. Šajā gadījumā var salīdzināt datus, kas iegūti pie dažādām sprieguma absolūtām vērtībām.



4.3. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu sagraušanas varbūtības eksperimentālie dati, cilvēka kompakto kaulaudu dati un Veibula sadalījuma salīdzinājums.

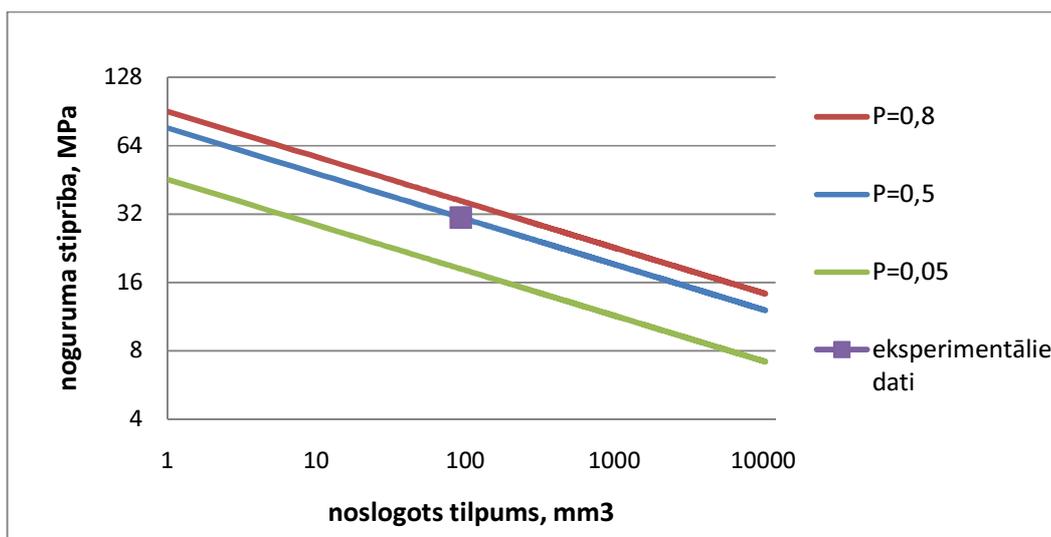
Vienādojums (4.5) tika optimizēts saskaņā ar datiem, kur konstanšu vērtības bija $m=5$ un $\Delta\sigma_0^* / \Delta\sigma_{vid} = 1.077$. Aproximācijas kļūda, kas noteikta sagraušanas varbūtības vērtībās sastāda

5 %. Tādā veidā, ja ir zināma noguruma stiprība $\Delta\sigma_0'$ kādam paraugam ar noslogotu tilpumu V_S' , var aprēķināt $\Delta\sigma_0$ kādam citam V_S :

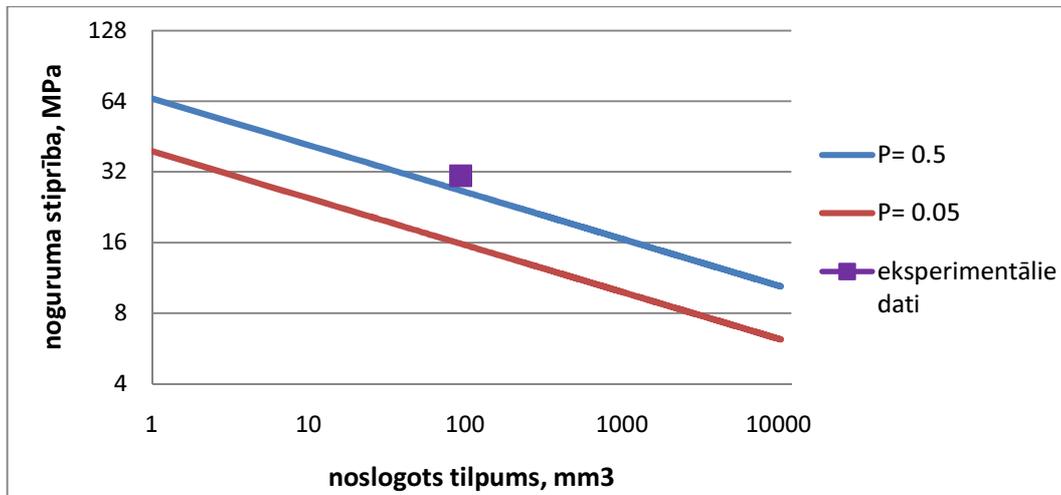
$$\Delta\sigma_0 = 1.077\Delta\sigma_0' \left(-\left(\frac{V_S'}{V_S}\right) \ln(1 - P) \right)^{1/5}. \quad (4.6)$$

Noguruma stiprības prognozei tika izmantoti eksperimentu dati, kas iegūti pie vidēja sprieguma diapazona 30 ± 2 MPa. Šajā līmenī, cikliskais spriegums ir pietiekami zems, lai likvidētu jebkādu šļūdes ietekmi, tāpēc rezultāti būs pietuvināti kaulauda uzvedībai fizioloģiskajos apstākļos. Dotam sprieguma līmenim atbilst vidējais ciklu skaits līdz sagraušanai $N_{vid}=134775$. Savukārt 4.4. attēlā parādīta cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu teorētiskā noguruma stiprība kā noslogotā tilpuma funkcija, kā arī ir redzami eksperimentālie dati. Noguruma stiprība tika aprēķināta, izmantojot vienādojumu (4.6) pie varbūtības vērtībām 0,5, 0,8 un 0,05. Atbilstība starp prognozes datiem un eksperimentāliem datiem bija ļoti laba, ar kļūdu tikai 2 % noguruma stiprībai, kas atrodas eksperimentālās kļūdas robežās šāda veida testiem.

Ar mērķi veikt prognozi pēc iespējas tuvāk fizioloģiskajiem apstākļiem, tika noteikta noguruma stiprība pie ķermeņa temperatūras (37 °C). Kā zināms, parēja no istabas līdz ķermeņa temperatūrai samazina stiprību 1.16 reizēs un prognozei kopā ar vienādojumu (4.6) tika izmantots dalītājs 1.16. Tā 4.5. attēlā parādīta noguruma stiprība kā noslogota tilpuma funkcija pie sagraušanas varbūtības 0,5 un 0,05 un pie fizioloģiskās frekvences un ķermeņa temperatūras salīdzinājumā ar eksperimentāliem datiem.



4.4. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma stiprība pie 134775 cikliem līdz sagraušanai atkarībā no noslogotā tilpuma pie fizioloģiskās frekvences un istabas temperatūras.



4.5. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma stiprība pie 134775 cikliem līdz sagraušanai atkarībā no noslogotā tilpuma pie fizioloģiskas frekvences un ķermeņa temperatūras

Veibula analīzes izmantošanas rezultāti bija ļoti veiksmīgi: modelis varēja apvienot parauga lieluma, temperatūras, slodzes sprieguma ietekmi, tādā veidā, lai prognozētu cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma stiprību ar augstu precizitāti.

Izmantojot doto modeli, var prognozēt noguruma stiprību kā ļoti maziem paraugiem (ar tilpumu 1 mm³ un mazāk), tā arī ļoti lieliem. Iespējams, ka visvairāk interesi modina metodes izmantošana vesela kaula – veselas mandibulas noguruma stiprības prognozēšanai. Bet te nepieciešams ievērot, ka kaulaudu atjaunošanās procesi ir aktīvi un tie spēj reaģēt uz noguruma bojājumu rašanos mēneša laikā. Kaula sagrūšanas varbūtība *in vivo* tika pētīta un noteikta kā 0,02–0,07. Analizējot līknes (4.4. un 4.5. att.), var secināt, ka mandibulas teorētiskā noguruma stiprība *in vivo* ir pietiekoši augsta pie izmantotā ciklu skaita līdz sagrūšanai. Tomēr vienmēr kādā ierobežotā populācijā ir indivīdi, kas būs pakļauti lūzumu riskam jau pie ļoti zema cikliskā sprieguma līmeņa.

5 CILVĒKA APAKŠŽOKĻA GALĪGO ELEMENTU ANALĪZE

5.1 Mandibulas lūzuma fiksējošās sistēmas skaitliskā modelēšana

Žokļa kaulaudu sintēze pēc lūzuma savienošanas ar miniplāksni ir kļuvusi par standartu apakšžokļa lūzuma ārstēšanā un rekonstrukcijas gadījumā sejas un žokļu ķirurģijā. Lai izvairītos

no pēcooperācijas skrūves savienojuma patvaļīgas atslābināšanās, ir svarīgi noteikt sprieguma sadalījumu kaulaudos, kas ieskauj biomateriālu. Skrūves savienojuma atslābināšanās un kaulu rezorbcija ir saistītas ar maksimāliem spriegumiem interfeisā kaulauds-implants tuvākajā pēcooperācijas posmā. Lai analizētu šo neiederību, ievērojot sarežģīto biomehānisko apakšžokļa uzvedību, tika izmantota galīgo elementu analīze.

5.1.1 Ģeometriskais modelis

Iepriekšējos darbos izveidotais apakšžokļa ģeometriskais modelis ar lūzumu fiksējošo plāksni tika ievērojami modificēts un uzlabots: mandibulas materiālam tika piešķirtas īpašības, kas vairāk atbilst reāliem kaulaudiem, izveidots jauns kontakta veids starp apakšžokli un fiksējošo plāksni, spēku robežnosacījumos ietverti par 5 vairāk darbojošos muskuļu pāru. Mandibulas un fiksējošās sistēmas skrūves savienojuma modelēšanai apakšžoklī tika izveidoti urbumi ar diametru 1,8 mm un garumu 4,5 mm, kā arī fiksējošā sistēma tika papildināta ar speciālām galvskrūvēm. Apakšžokļa virsmas neregulāras formas dēļ starp plāksni un kaulu tika paredzēta sprauga. Plāksnes un mandibulas ģeometriskā modeļa pārveidojumi tika veikti ar SolidWorks 2008 programmatūras palīdzību un tālāk eksportēti uz galīgo elementu aprēķinu programmatūru ANSYS v.11, izmantojot par starpformātu IGES datu failu formātu.

5.1.2 Materiāla īpašības

Apakšžokļa kompaktie kaulaudi tika modelēti kā ortotrops, heterogēns, kompozītmateriāls, mandibulas trabekulārā daļa – kā izotropas materiāls. Mandibulas materiāla īpašības – elastības modulis E , Puasona koeficients μ un bīdes modulis G – atkarībā no reģiona un kaulaudu veida ir parādītas 5.1. tabulā.

Tabulā 5.2 apzīmējumi X , Y , Z nosaka materiāla lokālās koordinātu sistēmas virzienus, kur X virziens sakrīt ar žokļa garenvirzienu, Y – ar tangenciālo virzienu un Z – ar radiālo. Lokālās koordinātu sistēmas plaknes apzīmētas ar XY , XZ , YZ . Žokļa gareniskā ass sakrīt ar līkni, kas iet pa apakšžokļa centru no mandibulas labās locītavas līdz kreisās locītavas virsmai. Ass Y virziens tika izvēlēts perpendikulāri X asij un tangenciāli katram saistītam žokļa šķērsgrīzumam. Materiāla Z ass ir perpendikulāra plaknei, kas veido X un Y asis.

5.1. tabula

Galīgo elementu modelī izmantotās cilvēka apakšžokļa materiāla mehāniskās īpašības

[Sukhun J. et. all 2007]

Lokalizācija	Materiāla īpašības								
	E, GPa			μ			G, GPa		
	X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
Kompaktie kaulaudi (zoda zona)	22,9	14,2	10,5	0,19	0,31	0,29	6,0	3,7	4,8
Kompaktie kaulaudi (premolāra zona)	25,5	14,5	10,2	0,15	0,30	0,25	6,2	3,4	6,23
Kompaktie kaulaudi (molāra zona)	19,5	13,6	10,2	0,39	0,20	0,55	6,2	4,1	5,9
Kompaktie kaulaudi (mandibulas zars)	17,0	6,9	8,2	0,31	0,33	0,31	4,6	2,9	2,8
Trabekulārie kaulaudi	0,38	0,38	0,38	0,47	0,47	0,47			

Fiksējošā plāksne ar skrūvēm tika modelēta kā viena mehāniska sistēma. Titāns tika izvēlēts kā plāksnes un skrūvju materiāls. Galīgo elementu modelī izmantoja sekojošas titāna īpašības: elastības modulis – 100 GPa, Puasona koeficients – 0,3. Lūzums tika modelēts ar plāna (0,8-1,2 mm) starpslāņa palīdzību. Šis starpslānis bija novietots starp kaula fragmentiem. Slāņa materiāla uzvedība tika raksturota kā izotropā, homogēna un lineāri elastīga. Lūzuma dzīšanas un jauno kaulaudu ģenerācijas gaitā slāņa materiāla īpašības mainījās.

5.1.3 Robežnosacījumi un noslogošanas režīms

Trīsdimensiju pārvietojumu ierobežojumi tika novietoti divpusēji uz deniņu kaulu virsmām. Šie ierobežojumi imitēja statisko apakšžokļa kustību ar mandibulas locītavas fiksāciju pie galvaskausa. Šajā gadījumā tika pieņemts, ka abas locītavu galvas ir centrētas savā locītavu iedobē. Modelis bija ierobežots arī no vertikālās kustības ar mērķi modelēt zobu rindu standarta sakļaušanos. Modelējot sakodiena punktus, ierobežojumi tika novietoti uz molāro reģionu augšējām zobu virsmām.

Noslogošanas režīms tika noteikts ar muskuļu spēkiem, kas imitē košļāšanas darbību. Galīgo elementu apakšžokļa modeļa slogošana noteikta ar vairākiem spēka vektoriem, kas imitē muskuļu spēku, kas izkļieds pa muskuļa piestiprināšanas laukumu. Muskuļu grupas slodzes vērtības atkarībā no X, Y un Z asu virzienos ir parādītas 5.2. tabulā. Ordinātas X, Y un Z nosaka

muskuļu trīs dimensiju virzienus: X-Y plakne – frontālā plakne, X-Z – horizontālā plakne, Y-Z – vidējā sagitālā plakne.

5.2. tabula

Cilvēka apakšžokļa galīgo elementu modeļa muskuļu slodžu vērtības [Sukhun J. et. all 2007]

Muskuļu grupas	Muskuļa nozīmīguma koeficients, N	Muskuļa ortogonālas komponentes (N)					
		Labā puse			Kreisā puse		
		X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Superior masseter</i>	190,4	17	72	43,5	-17	72	34,5
<i>Profundus masseter</i>	81,4	5,85	8,19	-3,9	-5,7	7,98	-3,8
<i>Medial pterygoid</i>	174,8	-28,98	47,04	22,26	29,04	47,08	22
<i>Anterior temporalis</i>	158,0	34,2	122,4	0,2	-34,2	122,4	0,2
<i>Medial temporalis</i>	95,6	3,5	12,74	-7,7	-4,2	15,26	-9,1
<i>Posterior temporalis</i>	75,6	3,36	7,56	-13,56	-3,36	7,56	-13,56
<i>Inferior lateral pterygoid</i>	66,9	-37,8	-10,5	45,6	37,8	-10,5	45,6
<i>Superior lateral pterygoid</i>	28,7	17,04	1,64	14,44	17,04	1,64	14,44

Kontakts starp apakšžokli un lūzumu fiksējošo plāksni tika modelēts ar nelineāro galīgo elementu metodi kā kontakta berze. Darbā tika izmantots ortotropas berzes modelis, kas noteikts ar berzes koeficientiem. Kontakts tika modelēts starp skrūvju un apakšžokļa urbumu virsmām. Berzes koeficienta vērtība virzienā, kas ir paralēls skrūves garenasij, tika definēta kā 0,9, bet skrūves virsmas tangenciālajā virzienā – kā 0,4.

5.1.4 Rezultātu analīze

Žokļa lūzuma fiksācijas efektivitātes novērtēšanai darbā tika aprēķināta sprieguma intensitāte un totālās deformācijas intensitāte kaulaudiem un *von Mises* spriegums ar totālām deformācijām fiksējošai plāksnei ar skrūvēm. Analīzes tika veiktas pie diviem slodžu režīmiem: pie košļāšanas muskuļu slodžu vērtības, kas atbilst vidēja spēka sakodienam un pie slodzes palielināšanas par 25 %, kas atbilst stipram sakodienam. Bez tam analīze notika dažādās lūzuma

sadzīšanas stadijās: 0,1 %, kas atbilst lūzuma slāņa elastības modulim 0,01 GPa, 25 %, kas atbilst $E=5,5$ GPa un 50 %, pie $E=11$ GPa. Visi aprēķini tika veikti ar ANSYS v. 11 galīgo elementu programmatūras palīdzību.

Galīgo elementu modelēšanas rezultātu novērtēšana tika izpildīta ar plāksnes un mandibulas spriegumu un deformāciju analīzes palīdzību. Titāna fiksējošai sistēmai 5.3. tabulā ir doti maksimālais *von Mises* ekvivalentais spriegums un totālā deformācija pie kaula sadzīšanas stadijām 0,1, 25 un 50 % un pie slodzes, kas atbilst vidēja spēka sakodienam un stipram sakodienam. Tādam pašam objektam 5.1 un 5.2. attēlos parādīts sprieguma sadalījums dzīšanas stadijās 0,1 un 50 % un pie vidēja muskuļu spēka.

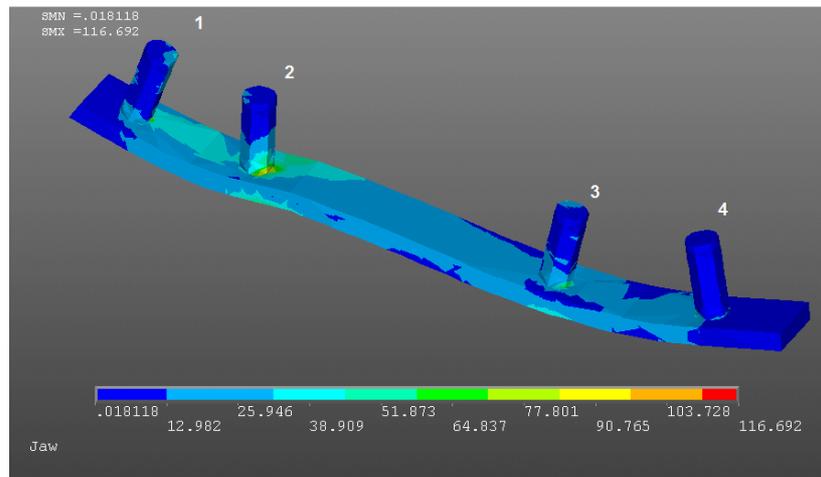
Analizējot modelēšanas rezultātus, var teikt, ka vislielākās sprieguma vērtības tika iegūtas pie kaulaudu sadzīšanas 0,1 % pie tam, palielinot muskuļu spēku par 25 %, spriegums palielinās par 31 %. Sprieguma vērtības pie 25 un 50 % sadzīšanas atšķiras nenozīmīgi un sastāda apmēram 25 % no sprieguma vērtības, kas atbilst 0,1 % sadzīšanai pie vidēja spēka sakodiena.

Totālās deformācijas uzvedība atbilst sprieguma uzvedībai, pie tam maksimālā deformācija nepārsniedz $1,98 \times 10^{-3}$ vērtību. Maksimālā ekvivalentā sprieguma lokalizācija fiksējošā sistēmā ir atšķirīga dažādos gadījumos. Pie sadzīšanas stadijas 0,1 % spriegums tika lokalizēts vietā, kur otra skrūve ir piestiprināta pie plāksnes. Pie 25 un 50 % stadijām maksimālā sprieguma lokalizācija tika konstatēta uz pirmās skrūves gala (5.1. un 5.2. att). Kā pirmajā tā arī otrajā gadījumā vislielākās sprieguma vērtības tika ievērotas fiksējošā plāksnē pie otrās skrūves. Šajā vietā pie nelabvēlīgiem apstākļiem, piemēram, pie slodzes palielināšanas, kuru izraisa košļāšanas muskuļi vai sakodiena kontaktvietu izmaiņas, var gaidīt mikroplaisu rašanos un turpmāku lūzuma vietas veidošanos.

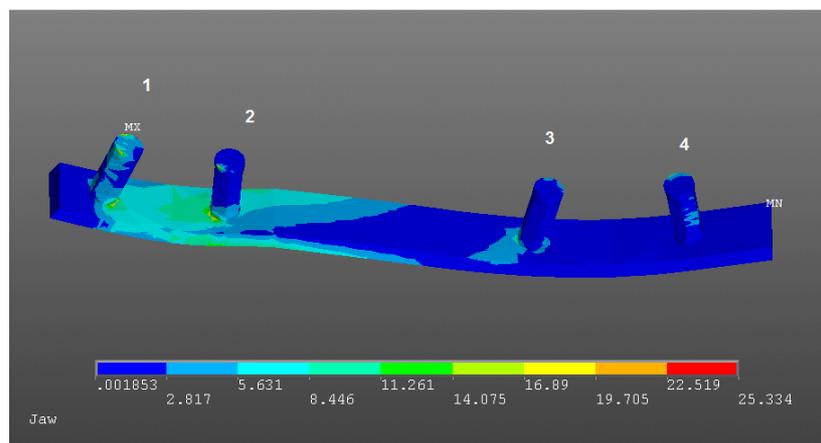
5.3. tabula

Titāna fiksējošās sistēmas maksimālais *von Mises* ekvivalentais spriegums un totālā deformācija pie kaula sadzīšanas stadijām 0,1, 25 un 50% un pie slodzes, kas atbilst vidēja spēka sakodienam (norm.) un stipram sakodienam (+25 %)

Noteiktie parametri	Slodzes režīms	Dzīšanas stadijas		
		0,1%	25%	50%
σ , MPa	norm.	116,7	27,5	25,3
	+ 25 %	152,8	33,2	32,6
ε	norm.	$1,51 \times 10^{-3}$	$0,34 \times 10^{-3}$	$0,33 \times 10^{-3}$
	+ 25 %	$1,98 \times 10^{-3}$	$0,48 \times 10^{-3}$	$0,42 \times 10^{-3}$



5.1. att. Titāna fiksējošas sistēmas *von Mises* ekvivalentais spriegums pie 0,1 % kaula sadzīšanas stadijas un vidēja muskuļu spēka



5.2. att. Titāna fiksējošas sistēmas *von Mises* ekvivalents spriegums pie 50 % kaula sadzīšanas stadijas un vidēja muskuļu spēka

Titāna tecēšanas robežas sprieguma vērtība pie statistiskas slodzes atrodas robežās no 900 līdz 1000 MPa. Nevienā aplūkotā gadījumā aprēķinātās *von Mises* ekvivalenta sprieguma vērtības nepārsniedza 900 MPa. Turklāt titāna noguruma stiprība bīdē, kas ir no 450 līdz 500 MPa, arī ir ievērojami augstāka nekā galīgo elementu simulācijā iegūtās vērtības. Var teikt, ka pie izvēlētās fiksējošās sistēmas formas un izmēriem un pie uzdotajiem slodžu režīmiem nav plāksnes vai skrūvju sagrūšanas riska plastiskas deformācijas vai noguruma rezultātā.

5.4. tabulā ir doti maksimālais spriegums un totālā deformācija, kas aprēķināti mandibulas kaulaudos skrūvju un kaula kontaktvietās. Kā var redzēt, vislielākā sprieguma intensitāte un

deformācijas tika konstatētas pie 0,1 % kaulaudu sadzīšanas pakāpes. Šajā gadījumā pie slodzes palielināšanas spriegums palielinās par 16,5 %, bet deformācija par 60 %. Nākošajās sadzīšanas stadijās lūzuma vietā pie kaulaudu izturības palielināšanās sprieguma un deformācijas vērtības mainās nenozīmīgi. Sprieguma palielināšanās sastāda vidēji 5 %, salīdzinot ar 25 un 50 % sadzīšanas stadijām un apmēram 18 % pie slodzes palielināšanas. Totālā deformācija palielinās vidēji par 8 %, salīdzinot sadzīšanas stadijas 25 un 50 %, un par 20 % pie stipra sakodiena.

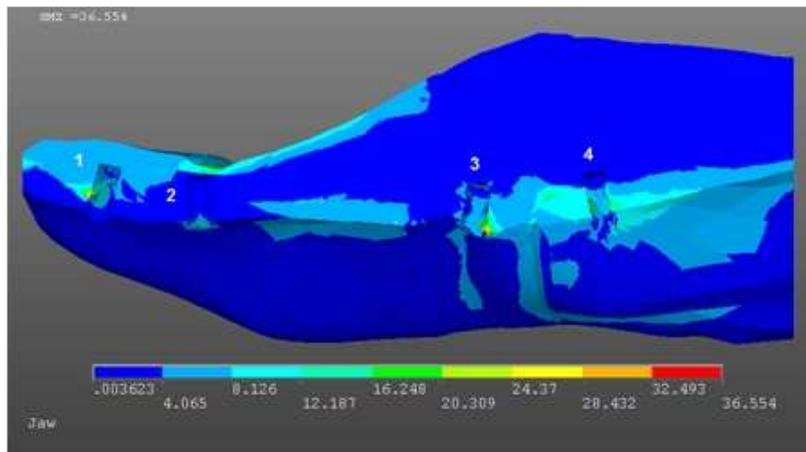
5.4. tabula

Mandibulas kaulaudos maksimālā sprieguma intensitātes vērtības un maksimālā totālā deformācija pie 0,1, 25 un 50 % kaula sadzīšanas stadijām un pie slodzes, kas atbilst vidēja spēka sakodienam (norm.) un stipram sakodienam (+25 %)

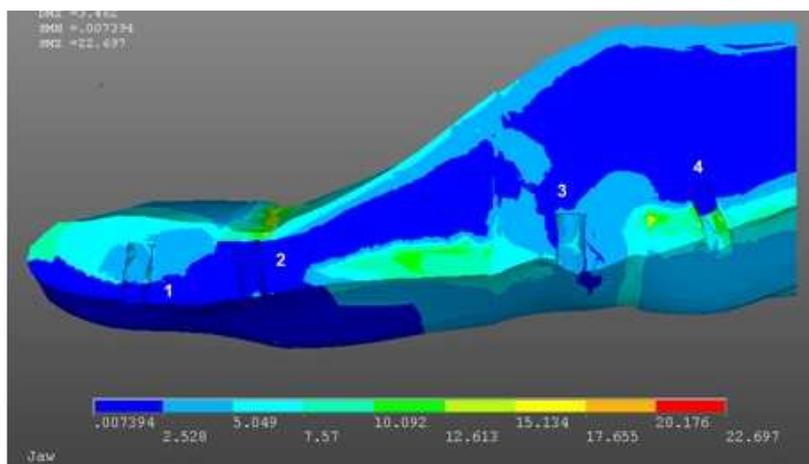
Noteiktie parametri	Slodzes režīms	Dzīšanas stadijas		
		0,1 %	25 %	50 %
σ , MPa	norm.	31,04	19,5	18,5
	+ 25 %	36,5	23,1	22,6
ϵ	norm.	0,1353	0,0114	0,0105
	+ 25 %	0,2158	0,0143	0,0132

5.3. un 5.4. attēlos parādīts sprieguma sadalījums mandibulas kaulaudos skrūvju piestiprināšanas vietās 0,1 un 50 % sadzīšanas stadijās pie muskuļu spēka, kas atbilst stipram sakodienam. Kā var redzēt, sprieguma sadalījums ir atšķirīgs dotajos divos gadījumos. Ja pirmajā gadījumā (0,1 % sadzīšanas stadija) maksimālais spriegums koncentrējas pie trešās skrūves, tad lielas sprieguma vērtības tika novērotas arī pie pirmās skrūves, bet otrajā gadījumā (50 % sadzīšanas stadija) maksimālā sprieguma lokalizācija ir konstatēta uz mandibulas virsmas no iekšējās puses netālu no otrās skrūves. Šajā gadījumā liela spriegumu koncentrācija tika noteikta iekšā kaulaudos kā starp otro un trešo, tā arī starp trešo un ceturto skrūvēm.

Analizējot deformācijas sadalījumu mandibulas kaulaudos, var konstatēt, ka vislielākās deformācijas vērtības atrodas dažādās vietās. Sākotnējā sadzīšanas stadijā maksimālās deformācijas vērtības tika iegūtas tieši lūzuma vietā – pie 50 % kaulaudu sadzīšanas vislielākās deformācijas koncentrējas pie otrās skrūves. Salīdzinot maksimālās deformācijas lokalizācijas vietu ar kopējo pārvietojumu sadalījumu sākotnējā sadzīšanas stadijā un ievērojot deformāciju un pārvietojumu lielās vērtības, var konstatēt, ka uzmodelētais lūzumu fiksācijas veids nav pietiekoši labs kaulaudu sadzīšanas pirmajā etapā. Pirmajā etapā tāda veida lūzumus nepieciešams fiksēt labāk ar divām plāksnēm. Tālāk pie 25 % sadzīšanas pakāpes lūzumu varētu fiksēt jau ar vienu plāksni.



5.3. att. Sprieguma intensitāte mandibulas kaulaudos skrūvju piestiprināšanas vietās 0,1 % sadzīšanas stadijās pie muskuļu spēka, kas atbilst stipram sakodienam



5.4. att. Sprieguma intensitāte mandibulas kaulaudos skrūvju piestiprināšanas vietās 50 % sadzīšanas stadijās pie muskuļu spēka, kas atbilst stipram sakodienam

Mūsdienās kaulaudu sagrūšanas problēma nav pilnībā izprasta. Tomēr tas ir būtisks jautājums protezēšanas lūzumu ārstēšanas nozarē. Tā kā kaulu struktūra ir ļoti sarežģīta un kaulaudu mehāniskās īpašības ir ļoti nevienmērīgas, ir grūti noteikt sprieguma vai deformācijas ticamu kritisko vērtību, kas izraisa kaulu remodelēšanas fenomenu un sekojošo kaulaudu masas zudumu. Zinātniskos darbos nav precīzi noteiktā kritiskā sprieguma līmeņa kaulaudu rezorbcijai spiedē: rezultāti variējas no 50 līdz 25 MPa. Dotajā darbā nevienā gadījumā noteiktais sprieguma līmenis nepārsniedza kritisko līmeni 50 MPa, bet spriegums 25 MPa tika pārsniegts pie 0,1 % sadzīšanas stadijas divos gadījumos: pie slodzes, kas atbilst vidēja spēka sakodienam un stipram

sakodienam. No tā var konstatēt, ka uzmodelētā lūzuma fiksācijas sistēmā varētu notikt kaulaudu rezorbcija apkārt trešajai skrūvei un kā sekas notikt skrūves patvaļīga atslābināšanās.

Vietējais sprieguma maksimums parasti neizraisīs spontānu plāksnes bojājumu. Tomēr, ja ir zināms, ka pacients izpilda vairāk par tūkstoš košļāšanas kustībām nedēļā, dinamiskā deformācija veidojas sakarā ar lielo slogošanas līmeņa izmaiņu skaitu, kas var izraisīt noguruma lūzumu plāksnes noteiktā vietā, kas ir arī apstiprināts klīniskajā praksē. Dotajā datorsimulācijā konkrētā modeļa gadījumā potenciāli bīstama vieta tika konstatēta uz fiksējošās plāksnes starp otro un trešo skrūvi.

Sakodiena pilnības pakāpe arī jāpiemin sakarā ar ietekmi uz osteosintēzi. Gadījumos, kad pacientam ir pilnīgi visi zobi ar atbilstošu sakodiena attiecību, košļāšanas spēki ir vienmērīgi sadalīti zobu sistēmā un kritiskais spriegums varētu nebūt apakšžokļa kaulaudu vai fiksējošās ierīces iekšpusē. No otras puses, pacientam ar visiem zobiem varētu būt arī paaugstināts sakodiena spēks un tāpēc lūzums un plāksnes būs pakļauti lielākai slodzei.

SECINĀJUMI

1. No literatūras apskata secināts, ka apakšžokļa kompakto kaulaudu viskoelastīgās īpašības un uzvedība pie cikliskām slodzēm ir praktiski neizpētītas, neskatoties uz to, ka dotie pētījumi ir nepieciešami zobārstniecības un implantēšanas vajadzībām.
2. Eksperimentāli noteiktās cilvēka mandibulas kompakto kaulaudu aktīvās šļūdes īpašības raksturo apakšžokļa kompakto daļas kaulaudu materiāla viskoelastīgo uzvedību spriegumu diapazonā no 3,3 līdz 27 % no graužoša sprieguma.
3. Ar eksponenciālo funkciju aproksimētie eksperimentālie dati deformācijas izmaiņām laikā dod iespēju secināt, ka triju eksponentu lietošanas gadījumā aproksimācijas precizitāte palielinās vidēji par 30 % attiecībā pret divām eksponentēm. Izveidotais šļūdes matemātiskais modelis raksturo apakšžokļa kompakto kaulaudu viskoelastīgo uzvedību spriegumu diapazonā no 10,4 līdz 20,48 MPa un var būt lietots galīgo elementu analīzes aprēķinos.
4. Cūkas apakšžokļa kaulaudu kompakto daļas materiāla cikliskas spiedes slogošanas eksperimentos noteiktā noguruma ilgizturība raksturo žokļa kompakto kaulaudu mehānisko uzvedību pie cikliskiem spriegumiem diapazonā no 30,82 līdz 57,56 MPa un pie frekvences 2Hz. Eksperimentāli iegūtā kompakto kaulaudu noguruma stiprība un

noguruma stiprības dati no literatūras avotiem tika normalizēti pret graužošo spriegumu. Iegūto rezultātu salīdzināšana pierāda, ka cilvēka, liellopu un cūkas kompakto kaulaudu noguruma uzvedība ir līdzīga, lai arī eksperimentu paraugi tika ņemti no dažādiem kauliem.

5. Eksperimentāli noteiktā ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no parauga lokalizācijas apakšžoklī raksturo vaiga premolāras zonas augšējās un vidējās daļas kā vairāk noguruma izturīgas salīdzinājumā ar molārām zonām. Atrastā negatīvā korelācija starp apakšžokļa kompakto kaulaudu blīvumu un ciklu skaitu līdz sagraušanai dod iespēju konstatēt, ka paraugiem ar mazāko blīvumu piemīt viskoelastīga uzvedība un pretestība sagraušanai pie cikliskām slodzēm lielākā pakāpē nekā paraugiem ar lielāko blīvumu pie iepriekš aprakstītās eksperimentu metodikas.
6. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu ar bojājumu uzkrāšanās funkciju prognozētais laiks līdz sagraušanai dod iespēju secināt, ka cikliskā spiedes slodze galvenokārt veido no cikliem atkarīgus bojājumus. Izveidotais noguruma ilgizturības prognozēšanas modelis, kas ievēro noslogota tilpuma lielumu, dod iespēju prognozēt cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma stiprību pie 134775 cikliem līdz sagraušanai un pie dažādiem sagraušanas varbūtības līmeņiem noslogotam tilpumam no 1 līdz 10^4 mm³.
7. Iegūtie rezultāti var palīdzēt saprast kompakto kaulaudu sagrūšanas mehānismu, kā arī var būt izmantoti skaitliskās analīzes aprēķinos, modelējot, piemēram, kaula rekonstrukciju procesus, ar mērķi optimizēt un uzlabot ārstēšanas metodes. Bez tam tie arī jāievēro jaunu biomateriālu izstrādāšanā un zobu implantu mehānisko parametru uzlabošanai.
8. Izstrādātais cilvēka mandibulas un tā lūzuma fiksējošās sistēmas galīgo elementu simulācijas modelis ļauj precīzāk izpētīt spriegumus un deformācijas, kas rodas plāksnē un kaulaudos košļāšanas laikā. Skaitliskās modelēšanas gaitā noteiktās spriegumu un deformācijas vērtības dod iespēju secināt, ka pie izvēlētās fiksējošās sistēmas formas un izmēriem un pie noteiktiem slodžu režīmiem nav plāksnes vai skrūvju sagrūšanas riska plastiskas deformācijas vai noguruma rezultātā, bet izvēlētā sistēma nevar nodrošināt lūzuma nepieciešamu fiksāciju sākotnējā kaulaudu sadzīšanas etapā. Galīgo elementu modelēšanas datu analīzes rezultātā, konstatēta fiksējošās sistēmas uzlabošanas nepieciešamība un rekomendēta divu plākšņu izmantošana.