

Žokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma uzvedība

Zoja Veide¹, Olgerts Ozolins²,
Modris Dobelis³, Ivars Knets⁴,¹⁻⁴ Riga Technical University

Kopsavilkums. Kompakto kaulaudu mehāniskās uzvedības pētījumi pie cikliskas slodzes var sagādāt svarīgu informāciju zobārstniecībai un implantēšanai. Darbā pētīta cūkas žokļa kaula kompakto kaulaudu noguruma īpašības pie spiedes slodzēm. Paraugus izgatavoja no trim 2 gadus vecu cūku apakšžokļiem. Paraugus cikliski slogoja pie dažādiem slodžu līmeņiem - 60%, 70%, 80% un 90% no tecēšanas robežas sprieguma un ar frekvenci 2 Hz. Darba sākumā atsevišķā pētījumā noteica paraugu blīvumu un spiedes stiprību, kā arī atrada teorētisku sakarību blīvuma-tecēšanas robežas spriegumam. Teorētisko sakarību izmantoja konkrētu paraugu minēto slodžu līmeņu aprēķināšanai ar nesagraujošās metodes palīdzību. Cikliskā slogojuma eksperimentā katram paraugam noteica noslogošanas ciklu skaitu līdz tā sagraušanai. Konstatēta ciklu skaita atkarība no parauga lokalizācijas un sprieguma līmeņa. Eksperimentālie dati tika aproksimēti ar pakāpes funkciju un salīdzināti ar citu pētījumu rezultātiem no literatūras avotiem. Sagraušanas prognozei tika izmantota bojājumu uzkrāšanās funkcija, kas strādā arī cikliskas slogošanas gadījumā.

Atslēgas vārdi: cikliska slodze, kompaktais kaulauds, mehāniskās īpašības, blīvums.

I. IEVADS

Pēdējā laikā pasaulē bioloģisko audu, tajā skaitā arī kaulaudu, aizvietošanai tiek izstrādāti dažādi implantu materiāli. Viens no galvenajiem kritērijiem implantu materiālu izmantošanai ir šo abu materiālu – kaulaudu un implanta – biomehāniskā saderība, jo implantam ir jādarbojas arī mehāniski kā audiem, kurus tas aizvieto. Implanta mehānisko īpašību nepareiza izvēle var radīt lielu sprieguma koncentrāciju sistēmā “bioloģiskie audi-implants”. Tāpēc ir svarīgi izziņāt bioloģisko audu mehāniskās īpašības, deformatīvo uzvedību dažādu slodžu ietekmē un visa tā rezultātā novērtēt kaulaudu un implanta biomehānisko saderību.

Apakšžoklis tiek pakļauts dažādām darbībām saistītām ar lūzumu ārstēšanu, zobu stāvokļa korekciju un protezēšanu. Lai izveidotu implantus un fiksācijas plāksnītes žokļa lūzumu ārstēšanai, nepieciešami zināt kompakto kaulaudu mehāniskās īpašības pie cikliskas slodzes. Implanta fiksācija mandibulā saistīta ar tangenciāliem spriegumiem, kuri rodas kompakto kaulaudos. Doto spriegumu relaksācija, kā arī cikliska sprieguma iedarbība, kas izceļas normālas aktivitātes apstākļos, var traucēt sākotnēju implanta fiksāciju un radīt jaunas nevēlamas slodzes. Jaunās slodzes var radīt kaulaudu sagraušanu vai kaulaudu un implanta sasaistīšanās zudumu.

Normālas aktivitātes apstākļos kauls netiek pakļauts noguruma sagraušanai, kas izpaužas kā materiāla degradācija

pie cikliskām slodzēm, ja sprieguma lielums ir zemāks par elastības robežu. Dažādos darbos tiek pētīta kompakto kaulaudu noguruma uzvedība dažādu faktoru ietekmē: frekvences, noslogošanas režīma, temperatūras, kaula veida. Kompaktam kaulaudam piemīt labākas noguruma īpašības pie lieces slodzēm [1, 2, 3, 4], nekā pie stiepes [5], spiedes [6, 7], vienass stiepes/spiedes [5] vai bīdes [8] slodzēm. Savukārt pie spiedes slodzēm noguruma ilgizturība ir nedaudz augstāka (10%–15%), nekā noguruma ilgizturība pie stiepes slodzēm [9]. Saskaņā ar darbā [9] iegūtajiem rezultātiem, ciklu skaits līdz sagraušanai var palielināties pie augstām frekvencēm. Darbā [3] konstatēts, ka temperatūras samazināšana no 45°C līdz 21°C trīs reizes palielina kompakto kaulaudu noguruma ilgizturību. Detalizētākā analizē atklājās, ka kaulaudu noguruma ilgizturība jauniem cilvēkiem ir lielāka nekā veciem cilvēkiem [10, 11]. Darbā [12] autori konstatēja, ka liellopu lielais lielakauls noguruma stiepē ir stiprāks nekā staltbrieža rags, bet kompakto kaulaudu noguruma ilgizturība liellopiem ir augstāka nekā cilvēkiem.

Pētot sagraušanas mehānismu darbā [13], autori pieņēma, ka kaulaudu sagraušanas iemesls ir mikroplaisas, kas veidojas uz lamellu interfeisa, savukārt darba [14] autori raksta par lokāla audu moduļa nevienmērīguma ietekmi uz mikroplaisu apvienošanu makroplaisās. Analīze [9] parāda, ka stiepes nogurums ir atkarīgs no laika, izmēģinājuma frekvence maz ietekmē laiku līdz sagraušanai, bet spiedes cikliska noslogošana izsauc no ciklu skaita atkarīgo sagraušanu. Konstatēts, ka pie stiepes/spiedes noslogošanas laiks līdz sagraušanai ir zemāks nekā vienkārša, no laika un no ciklu skaita atkarīgo sagraušanu summēšana. Pētnieki darbā [15], izmantojot progresīvu slogošanas metodiku [16], kas ļauj iegūt informāciju par kaulaudu mehānisko īpašību izmaiņām palielinoties deformācijai, noteica atšķirības kompakto kaulaudu enerģiju izkliedē vienass stiepē un spiedē.

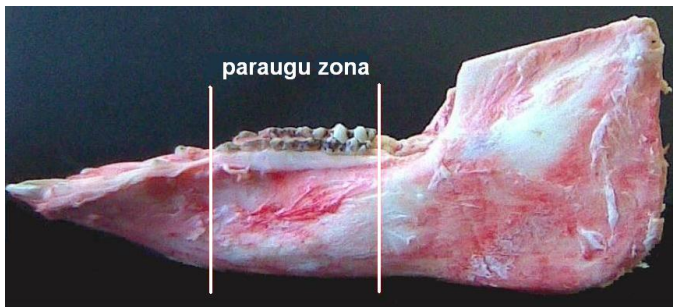
Visos iepriekšminētajos darbos tika pētīti cilvēka vai liellopu kompakto kaulaudu paraugi, kas iegūti no augšstilba vai lielā lielakaula, un nav nekādas informācijas par žokļa kompakto kaulaudu uzvedību pie cikliskām slodzēm, kas ir nepieciešama zobārstniecībā un implantēšanā. Tāpēc dotajā darbā tiek pētīta apakšžokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma īpašības pie frekvences, kas raksturīga normālas fizioloģiskas aktivitātes apstākļiem (2 Hz).

II. MATERIĀLA SAGATAVOŠANA

Pētījumiem, kas ir veikti ar cilvēka audiem, piemīt praktiski ierobežojumi, kas izpaužas kā nespēja iegūt anatomiski

adekvātas kontroles grupas un manipulēt ar pietiekamu daudzumu reģistrētiem bioloģiskiem datiem. Tāpēc noguruma eksperimentos tika izmantoti paraugi no cūkas apakšžokļa. Cūkas un cilvēka kaulaudiem ir līdzīga mikroarhitektūra, fizioloģija, biomehāniskās īpašības, it sevišķi, kompakto kaulaudu rekonstrukcijas procesi. Cūkas žokļiem ir dažādas dentālas formulas un piemīt liela kaula virsmu platība, pietiekami lieli alveolārie kauli un liels kaulaudu tilpums, kas atrodas zobu pamatnē.

Paraugi noguruma eksperimentiem tika izgatavoti no trim 2 gadus vecu cūku apakšžokļiem. Žokļa molārās un premolārās zonas (1. attēls) gan no kreisās, gan no labās puses paralēli zoba garenasij tika sazāģētas 10 mm biežās plāksnēs.



1. att. Paraugu lokalizācija cūkas apakšžoklī.

No plāksnēm ar frēzes un lentas slīpmašīnu palīdzību tika izgriezti 26 kompakta kaulauda paraugi statistiskiem eksperimentiem teorētiskās sakarības blīvums-tecēšanas robežas sprieguma noteikšanai un 30 paraugi eksperimentiem pie cikliskām slodzēm. Sakarā ar žokļa specifisko konstrukciju paraugiem bija taisnstūra prizmas forma un izmēri: 3x5x7 mm ± 0,5 mm. Pēc izgatavošanas paraugus vizuāli pārbaudīja un eksemplāri ar redzamiem defektiem tika izslēgti no eksperimenta.

Cūkas žokļus līdz mehāniskai apstrādei uzglabāja hermētiskos polietilēna maisos pie temperatūras -18°C. Kaula paraugi līdz eksperimenta sākumam tika turēti 10% sāls šķīdumā, + 2°C līdz +4 °C temperatūrā.

III. METODIKA

Pirms mehāniskajiem eksperimentiem visiem paraugiem noteica blīvumu ar svēršanas paņēmieni. Statiskiem spiedes eksperimentiem graujošā 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 posmā 26 paraugi tika pakļauti statiskās spiedes slodzes iedarbībai. Spiedes slodze kaula paraugam tika pielikta perpendikulāri sakodiena plaknei ar deformācijas ātrumu 1,0 mm/min līdz paraugu sagraušānai. Eksperimentu rezultātā katram paraugam tika iegūts tecēšanas robežas spriegums un spiedes graujošais spriegums. Izmantojot eksperimenta datus, noteica regresijas sakarību blīvums-tecēšanas robežas spriegums:

$$\sigma_y = 228,73\rho - 377,74, \quad r^2 = 0,922, \quad (1)$$

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.

1. TABULA

NOGURUMA EKSPERIMENTU PARAUGU RAKSTUROJUMI,
SLODZES LĪMENIS UN SLOGOŠANAS SPRIEGUMA VĒRTĪBAS

Parauga apzīmējums	Blīvums, g/cm ³	Teorētiskais tecēšanas robežas spriegums, MPa	Slodzes līmenis, %	Slogošanas spriegums, ± 2 MPa
1K	1,920	61,31	60	36,79
2K	1,832	41,19	80	32,95
3K	1,871	50,11	70	35,08
4K	1,900	56,91	70	39,84
5K	1,862	48,24	90	43,42
6K	1,876	51,36	60	30,82
7K	1,892	55,01	80	44,01
8K	1,918	60,98	80	48,78
9K	1,944	66,92	90	60,23
10K	1,889	54,27	70	37,99
14K	1,924	62,32	90	56,09
16K	1,878	51,83	80	41,46
1L	1,877	51,57	70	36,10
2L	1,848	45,01	70	31,51
3L	1,881	52,42	90	47,18
4L	1,840	43,01	80	34,41
5L	1,902	57,35	60	34,41
6L	1,857	46,95	60	28,17
7L	1,877	51,70	60	31,02
8L	1,866	48,98	70	34,29
10L	1,884	53,20	70	37,24
11L	1,925	62,60	80	50,08
12L	1,925	62,64	60	37,58
13L	1,949	67,95	70	47,57
16L	1,889	54,40	90	48,96
17L	1,944	66,85	80	53,48
18L	1,964	71,37	60	42,82
19L	1,891	54,83	80	43,86
20L	1,931	63,95	90	57,56
21L	1,966	71,95	70	50,37

Pētījuma otrajā posmā 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 sinusoidālo slogošanas profilu.

Maksimālais cikliskais spriegums bija 0 ± 2 MPa, minimālā cikliskā sprieguma vērtība katram paraugam tika aprēķināta, ņemot vērā parauga tecēšanas robežas spriegumu un izvēlēto slodzes līmeni. Paraugu blīvums, tecēšanas robežas spriegums un minimālais sloģošanas spriegums parādīti 1. tabulā.

Cikliskie spiedes eksperimenti tika veikti pie 2 Hz frekvences un sloģošanas 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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatūrā, un paraugi testu laikā atradās ūdenī.

IV. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN SALĪDZINĀJUMS

No 30 noguruma mēģinājumiem sagatavotajiem paraugiem 29 tika testēti veiksmīgi, un vienam paraugam neizdevās pabeigt pārbaudi, jo tas nespēja sagraut. Noguruma eksperimentu rezultātā tika iegūta ciklu skaita līdz sagraušanai sakarība no pieliktā cikliskā sprieguma. Eksponeciālā datu regresija rāda, ka sprieguma ietekmi uz ciklu skaitu līdz sagraušanai var aprakstīt ar sekojošu formulu [17]:

$$N = F\Delta\sigma^G, \quad (2)$$

kur N – ciklu skaits līdz sagraušanai, $\Delta\sigma$ – sprieguma diapazons (MPa), $\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$, F un G – empīriskas konstantes.

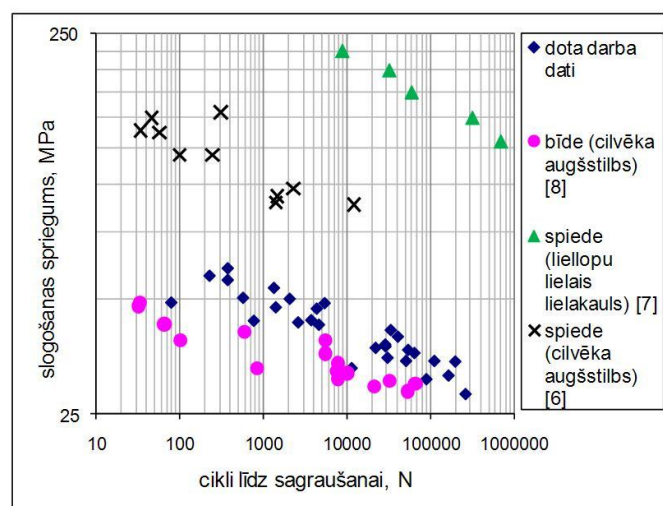
Vienādojuma konstantes tika noteiktas no cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu spiedes noguruma līknes: $F = 1,47 \cdot 10^{20}$; $G = -10,05$; $r^2 = 0,804$.

Salīdzinot pētījuma rezultātus ar kompakto kaulaudu mehāniskās uzvedības pētījumiem no literatūras avotiem, var konstatēt, ka cūkas apakšžokļa kompakta kaulauda noguruma ilgizturība ir ievērojami zemāka, nekā augšstilba vai lielā lielakaula kompakts daļas noguruma ilgizturība. 2. attēlā parādīti spiedes noguruma eksperimentu rezultāti, kas iegūti gan mūsu mēģinājumos, gan arī no citiem darbiem. Salīdzināšanai ar aizpildītiem riņķiem ir doti noguruma dati pie bīdes slodzes.

Analizējot prezentētos datus, var pieņemt, ka cūkas apakšžokļa kompakta kaula noguruma vērtības ir tuvākas bīdes vērtībām, nevis spiedes. To var izskaidrot ar žokļa kompakta kaulauda mazo spiedes stiprību, kas noteikta dotajā darbā, – vidēja vērtība $68 \pm 1,8$ MPa (salīdzinājumam: cilvēka apakšstilba kompakts daļas spiedes stiprība pie sloģošanas virziena paralēli kaula garenasij ir 193 MPa [18]). Žokļa kaulaudu mazo stiprību var saistīt ar nevienmērīgu un vāju kaulaudu struktūru, jo dzīvē žoklis tiek pakļauts mazākai slodzei nekā apakšstilbs. Bez tam būtiska ietekme ir arī tādiem faktoriem, kā pārbaudes parauga ģeometriskās formas pareizība un parauga virsmas gludums.

Analizējot pētījumu rezultātus, jāievēro eksperimentu apstākļi. Vienas spiedes testi [7] tika izpildīti pie 30 Hz frekvences, bet spiedes tests no darba [6], bīdes testi un mūsu izmēģinājumi tika izpildīti pie zemām frekvencēm – 2 Hz. Saskaņā ar darbā [9] iegūtajiem rezultātiem ciklu skaits līdz

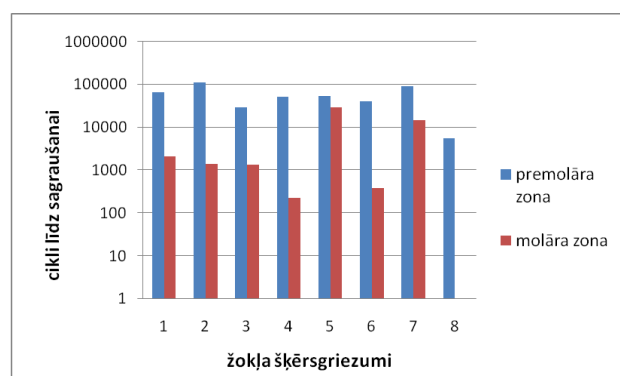
sagraušanai var palielināties pie augstām frekvencēm. Arī temperatūra eksperimenta laikā ietekmē noguruma ilgizturību. Darbā [19] konstatēts, ka pāreja no temperatūras normālas aktivitātes apstākļos uz istabas temperatūru 1,16 reizes palielina kompakto kaulaudu noguruma ilgizturību (pie 10^5 cikliem līdz sagraušanai). Tas ir svarīgi, tāpēc ka, mūsu pētījumi un viens spiedes testi tika izpildīti pie $20\text{--}22^\circ\text{C}$ temperatūras, bet bīdes un spiedes tests [6] – pie ķermeņa temperatūras (37°C).



2. att. Dotā raksta noguruma eksperimentu rezultāti salīdzinājumā ar pētījumu datiem no literatūras avotiem.

Izmantojot eksperimentu datus, tika konstruētas ciklu skaita līdz sagraušanai sakarības no parauga lokalizācijas apakšžoklī.

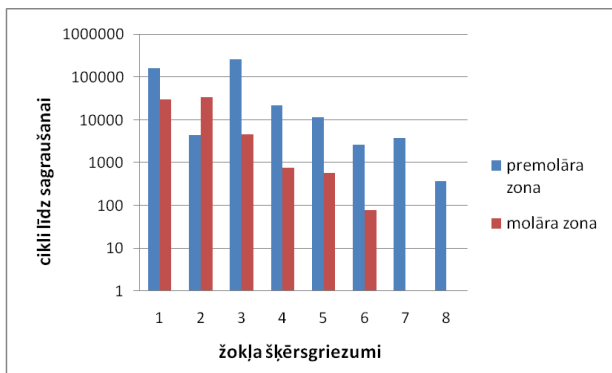
3. un 4. attēlā parādītas dotās sakarības vaiga zonas augšējai un vidējai daļai. Attēlos ir redzami dati, kas iegūti gan no apakšžokļu kreisās, gan arī no labās puses. Ar cipariem 1, 2, 3, 4 ir apzīmēti labās puses šķērsgriezumi; 5, 6, 7, 8 – kreisās puses šķērsgriezumi.



3. att. Ciklu skaita līdz sagraušanai sadalījums cūkas apakšžokļa molārās un premolārās zonās vaiga zonas augšējai daļai.

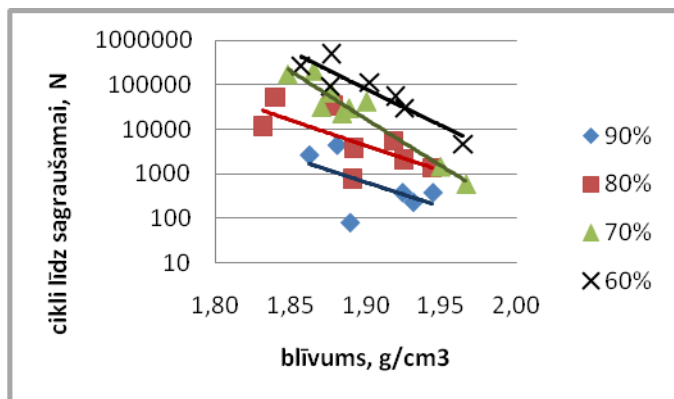
Kā var redzēt paraugos, no premolārās zonas ciklu skaits līdz sagraušanai ir lielāks, nekā paraugos no molārās zonas. Tāda sakarība ir raksturīga gan augšējai vaiga zonai, gan arī vidējai daļai neatkarīgi no pieliktā cikliskā sprieguma līmeņa. Paraugiem no vaiga zonas augšējās daļas premolārās zonas ciklu skaits līdz sagraušanai vidēji ir par 31% lielāks nekā

molārajai zonai, savukārt paraugiem no vaiga zonas vidējās daļas premolārās zonas ciklu skaits ir par 18% lielāks nekā molārajai zonai.



4. att. Ciklu skaita līdz sagraušanai sadalījums cūkas apakšžokļa molārās un premolārās zonās vaiga zonas vidējai daļai.

Bāzējoties uz pētījuma datiem, tika noteikta ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no kompakto kaulaudu blīvuma. 5. attēlā parādītas dotās sakarības pie dažādiem slogošanas sprieguma līmeņiem. Analizējot iegūtās līknes, var konstatēt, ka cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu noguruma ilgizturība palielinās, samazinoties blīvumam. Tāda tendence ir redzama gan pie zema cikliskā sprieguma līmeņa, gan arī pie augsta. Noguruma īpašības uzlabošanās, blīvumam samazinoties, var izskaidrot ar kompakto kaulaudu nelineāro uzvedību.



5. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu paraugu ciklu skaita līdz sagraušanai atkarība no blīvuma pie sprieguma līmeņiem 90%, 80%, 70%, 60% no tecēšanas robežas sprieguma.

Darbā [3] konstatēta nozīmīga kaulaudu noguruma īpašību atkarība no blīvuma. Tika atrasta trīskārtīga noguruma ilgizturības palielināšanās pie kaula blīvuma paaugstināšanās par 6% (no 1,86 līdz 1,98 g/cm³). Mūsu darbā atrasta negatīva korelācija starp kaulaudu blīvumu un ciklu skaitu līdz sagraušanai. Bet eksperimentos, kas tika aprakstīti iepriekšminētajā rakstā [3], slogošanas līmenis nebija atkarīgs no blīvuma un vienāds katrai patvaļīgi izvēlētai paraugu grupai, turpretim dotajā darbā maksimālā cikliskā sprieguma vērtība katram paraugam tika aprēķināta, ņemot vērā noteiktu sakarību blīvums-tecēšanas robežas spriegums. Šai sakarībā jāmin, ka mūsu eksperimentos paraugi visu testu laikā tika turēti ūdenī.

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 ietilpa kaulaudos, izsauca hidrostatisko spiedi 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 pašā laikā kolagēna matricas uzvedība ir viskoelastīga. Paraugiem ar mazāku blīvumu, bet 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 mazāku blīvumu piemīt viskoelastīga uzvedība un pretestība sagraušanai pie cikliskām slodzēm lielāka nekā paraugiem ar lielāku blīvumu, ar noteikumu, ka slogošanas spriegums tiek izvēlēts atkarībā no blīvuma un paraugi eksperimentu laikā atrodas ūdenī.

V. SAGRAUŠANAS PROGNOZE

Kaulaudu noguruma sagrūšana ļoti bieži ir sastopama reālajā dzīvē, kas izskaidro šī procesa prognozes nepieciešamību. Iespēja prognozēt bojājuma rezultātus funkcionālas aktivitātes laikā un kaula sastāva un organizācijas izmaiņas bojājumu uzkrāšanās rezultātā ir saistīta gan ar klīnisko medicīnu, gan arī ar biomehāniskiem pētījumiem.

Mehānisko un bioloģisko bojājumu uzkrāšanās vispārējais modelis dzīvai struktūrai, kas raksturo pašdziedināšanās procesu, darbā [20] tiek prezentēts kā bojājumu funkcija:

$$D_T = D_S - H + D_D + D_A \quad (3)$$

kur D_T – kopējais bojājums jebkurā punktā jebkurā laika momentā, D_S – bojājums pieliktas slodzes dēļ, H – bojājuma labošana dziedināšanas procesu rezultātā, D_D un D_A – bojājumi, kurus izraisa slimība vai vecums. Savstarpēja iedarbība var rasties starp jebkuriem sagraušanas komponentiem, veidojot dažādas funkcijas. Kopējā bojājumu vērtība var mainīties no 0 līdz 1 tā, ka, ja $D_T = 1$, notiek kaula sagraušana.

Doto modeli var izmantot cikliskas slogošanas gadījumā, ja slodze pielikta ilgā laika periodā. Bojājumu, kas tiek ierosināts ar pielikto spriegumu D_S , var izteikt ar no cikliem atkarīgo noguruma bojājumu frakciju D_F , aprēķinātu ar Miner-Palmgrena teorijas palīdzību:

$$D_S = D_F = \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (4)$$

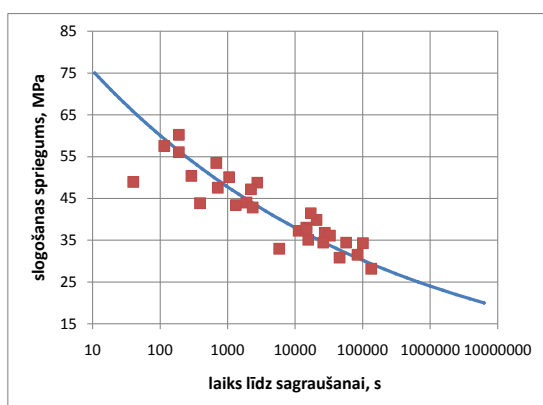
kur N_i – slogošanas ciklu skaits, kas ir nepieciešams sagraušanas izsaukšanai pie i sprieguma līmeņa, n_i – faktiskais slogošanas ciklu skaits pie i sprieguma līmeņa, m – eksistējošo spriegumu līmeņu skaits.

Dotajā darbā sagraušanas prognoze bāzējās uz iepriekš aprakstītā bojājumu uzkrāšanās modeļa, jo, kā konstatēts

pētījumā [9], spiedes cikliska noslogošana izsauc no ciklu skaita atkarīgo sagraušānu. Mūsu pētījumos var izmantot Miner-Palmgren teoriju pirmajā tuvinājumā un vienādojumus (2) un (4), lai novērtētu noguruma bojājumu frakciju D_F pie cikliskas slogošanas. Ja noguruma slodze ir prezentēta tikai ar vienu $\Delta\sigma$ līmeni, tad kopīgs noguruma bojājums:

$$D_F(t) = \omega t / F\Delta\sigma^{-G} \quad (2)$$

kur ω – slogošanas frekvence (Hz), t – laiks (s). Ja parauga sagraušāna notiek tikai noguruma bojājumu uzkrāšanās dēļ, tad vienādojums tiek risināts laikam līdz sagraušānai t_b pie noteikuma $D_F(t_b) = 1$ (6. attēls).



6. att. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu prognozētais laiks līdz sagraušānai cikliskas spiedes slogošanas rezultātā, izmantojot bojājumu uzkrāšanās modeli.

VI. SECINĀJUMI

1. 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.
2. Noteiktās ciklu skaita līdz sagraušānai sakarības no parauga lokalizācijas apakšžoklī raksturo vaiga premolārās zonas augšējās un vidējās daļas kā nogurumizturīgākas salīdzinājumā ar molārajām zonām.
3. Cūkas apakšžokļa kompakto kaulaudu ar bojājumu uzkrāšanās funkciju prognozētais laiks līdz sagraušānai dod iespēju secināt, ka nulle-spiede cikliskā slogošanā galvenokārt veido no cikliem atkarīgus bojājumus.
4. Atrastā negatīvā korelācija starp apakšžokļa kompakto kaulaudu blīvumu un ciklu skaitu līdz sagraušānai dod iespēju konstatēt, ka paraugiem ar mazāku blīvumu piemīt viskoelastīga uzvedība un pretestība sagraušānai pie cikliskām slodzēm lielāka nekā paraugiem ar lielāku blīvumu pie iepriekš aprakstītās eksperimentu metodikas.
5. Iegūtie rezultāti var palīdzēt saprast kompakto kaulaudu sagraušānas mehānismu un var būt izmantoti galīgo elementu analīzes aprēķinos, modelējot, piemēram, kaula rekonstrukcijas procesus, lai optimizētu un uzlabotu

ārstēšanas metodes, kā arī tie jāievēro jauno biomateriālu izstrādāšanā un zobu implantu mehānisko parametru uzlabošanai.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. King, A. I., Evans, F. G. Analysis of the fatigue strength of human compact bone by the Weibull method. *In: Jacobson B (ed) Digest of the Seventh International Conference on Medical and Biological Engineering.*, Stockholm, 1967, p. 514.
2. Swanson, S. A. V., Freeman, M. A. R., Day, W. H. The fatigue properties of human cortical bone. *Med. Biol. Eng.*, 1971, 9, pp. 23–32.
3. Carter, D. K., Caler, W. E. A cumulative damage model for bone fracture. *J. of Orthopaedic Research*, 1985, 3, pp. 84–90.
4. Lafferty, J. F., Raju, P. V. V. The influence of stress frequency on the fatigue strength of cortical bone. *J. Biomech. Eng.*, 1979, 101, pp. 112–113.
5. Carter, D. R., Caler, W. E., Spengler, D. M., et al. Uniaxial fatigue of human cortical bone: the influence of tissue physical characteristics. *J. of Biomechanics*, 1981, 14, pp. 461–470.
6. Pattin, C. A., Caler, W. E., Carter, D. R. Cyclic mechanical property degradation during fatigue loading of cortical bone. *J. of Biomechanics*, 1996, 29, pp. 69–79.
7. Gray, R. J., Korbacher, G. K. Compressive fatigue behaviour of bovine cortical bone. *J. of Biomechanics*, 1974, 7, pp. 287–292.
8. Turner, C. H., Wang, T., Burr, D. B. Shear Strength and Fatigue Properties of Human Cortical Bone Determined from Pure Shear Tests. *J. Calcif. Tissue Int.*, 2001, 69, pp. 373–378.
9. Caler, W. E., Carter, D. R. Bone creep-fatigue damage accumulation. *J. of Biomechanics*, 1989, 22, pp. 625–635.
10. Leng, H., Dong, X. N., Wang, X. Progressive post-yield behaviors of human cortical bone in compression for middle-aged and elderly groups. *J. of Biomechanics*, 2009, 42, 4, pp. 491–497.
11. Nyman, J. S., Roy, A., Reyes, M. J., et al. Mechanical behavior of human cortical bone in cycles of advancing tensile strain for two age groups. *J. Biomed. Mater. Res.*, 2009, 89A, 2, pp. 521–529.
12. Zioupos, P., Wang, X. T., Currey, J. D. Experimental and theoretical quantification of the development of damage in fatigue tests of bone and antler. *J. of Biomechanics*, 1996, 29, pp. 989–1002.
13. Jepsen, K. J., Davy, D. T., Krzyppow, D. J. The role of the lamellar interface during torsional yielding of human cortical bone. *J. of Biomechanics*, 1999, 32, pp. 303–310.
14. Zioupos, P., Gresle, M., Winwood, K. Fatigue strength of human cortical bone: Age, physical and material heterogeneity effects. *J. Biomed Mater Res.*, 2007, 86A, 3, pp. 627 – 636.
15. Nimr, H. A. Defuzzification of the Outputs of Fuzzy Controllers. *In: The 5th International Conference on Fuzzy Systems*, Cairo, Egypt, 1996.
16. Wang, X., Nyman, J. S. A novel approach to assess post-yield energy dissipation of bone in tension. *J. of Biomechanics*, 2007, 40, pp. 674–677.
17. Carter, D. K., Caler, W. E. A cumulative damage model for bone fracture. *J. of Orthopaedic Research*, 1985, 3, pp. 84–90.
18. Reilly, D. T., Burstein, A. H. The elastic and ultimate properties of compact bone tissue. *J. of Biomechanics*, 1975, 8, pp. 393–405.
19. Taylor, D., Lee, T. C. A crack growth model for the simulation of fatigue in bone. *Int. J. of Fatigue*, 2003, 25, pp. 387–395.
20. Nash, C. D. Fatigue of self-healing structures: A generalized theory of fatigue failure. *Am. Soc. Mech. Eng. Publ. No 66-WA/BHF-3*, New York, 1966.

Zoja Veide, *M.Sc.ing.* (1996), Riga Technical University, Researcher (2003-present), Institute of Biomaterials and Biomechanics, lecturer (2000-present), Riga Technical University.

Current and previous research interests are associated with investigation of mechanical properties of jaw bone tissue and also evaluation of didactic methods in engineering graphics and CAD.

Member of International Geometry and Engineering Graphics Association BALTRAF (2002-present), e-mail: zv@neolain.lv.

Olgerts Ozolins, *M.sc.ing.* Researcher at the Institute of Materials and Structures of Riga Technical University, , 2001.-2010. Ph.D. student at Institute of Materials and Structures, RTU, 2002. *M.Sc. Lic.* KTH, Department of Lightweight Structures (FLYG), 2001. *M.Sc.ing.* Institute of

Materials and Structures, RTU, 1993.-1997. B.Sc.ing. RTU, Faculty of Civil Engineering.

The major field of research is experimental and numerical investigations on buckling related problems for thin stiffened composite shells.

research interest buckling and post-buckling of GFRP cylindrical shells, hybrid plywood-composite sandwich panels, woven glass-fiber polypropylene composites.

Scientific awards: 2002, LAS (Latvian Academy of Science) award for young scientists in field of physics and technical sciences. 2002, Swiss Baltic Net Award for young scientists. E-mail: olgert@bf.rtu.lv

Modris Dobelis, Professor (2002-present), *Dr.sc.ing.* (1992), Riga Technical University, PhD in Engineering (1985), Institute of Polymer Mechanics, *dipl. eng.* (1975), Riga Polytechnic Institute.

Current and previous research interests include experimental determination of mechanical properties of bone tissue (1989-1994, 1996-present), introduction

of BIM and PLM concepts using contemporary Computer Aided Design methods (1996-present), Riga Technical University. Worked as a CAD engineer at the Westinghouse's subcontractor company Southern Company Services, Birmingham, AL, USA (1994-1996). E-mail: Modris.Dobelis@rtu.lv

Ivars Knets, Professor of Riga Technical University (1978-present), Ph.D. in Engineering (1965), *Dr.sc.ing.* (1977), Academician of the Latvian Academy of Science (1992), Academician of the European Academy of Sciences and Arts (2000), Member of the World Council for Biomechanics (1990-2006), Director of the Institute of Biomaterials and Biomechanics of RTU.

Research interests include determination of the biomechanical behavior of hard and soft biological tissue under different loading conditions, creation of different biomaterials used for replacement of damaged biological tissue, evaluation of the compatibility of implant materials with biological tissue.

Zoja Veide, Olgerts Ozolins, Modris Dobelis, Ivars Knets. Compressive Fatigue Behaviour of Compact Jaw Bone

Investigations of compact bone tissue mechanical behaviour under cyclic loading provide important information for oral implantology and orthodontics. Fatigue and repeated load of mandibular bone play a major role in the fixation and stability of prosthetic implants and their stems for fixation into bone cavities. Cyclic loading may compromise the initial fixation of the implant, allowing for and the establishment of a new loading environment.

The objective of this investigation was to study the fatigue behaviour of pig jaw compact bone material specimens subjected to compression tests. Samples for experiments were prepared from three 2 year old pig lower jaws. Specimens were tested under cyclic load with peak load levels that were 60%, 70%, 80%, and 90% of the compressive yield strength with a frequency of 2 Hz. For all specimens the density was measured using hydrostatic weighting method. Twenty six specimens were loaded to fracture to determine the ultimate compressive stresses and to find a correlation and regression between density and yield strength. The level of loading for 30 specimens was calculated using regression equation obtained in the previous step. Fatigue tests of pig jaw cortical bone in compression were conducted and results were summarized as peak stress versus cycles. Experimental data were approximated using reversed power function. Compressive cyclic loading and time to failure were predicted, according to the cumulative damage model, by the accumulation of cycle-dependent damage only. In the investigation it was found that fatigue properties depended from the location of specimens in jaw bone and that there was negative correlation between cycles to failure for fatigue specimens of the pig mandible compact bone tissue and bone density for all cyclic loading levels. The obtained results may help to understand the behavior of jaw compact bone tissue under cyclical loads and should be taken into account in designing treatment programs and in improvement of mechanical parameters of endosseous implants.

Зоя Вейде, Олгерте Озолинш, Модрис Добелис, Иварс Кнетс. Усталостные характеристики компактной костной ткани нижней челюсти

Исследования механических свойств компактной костной ткани при циклическом нагружении необходимы для оральной имплантологии и ортодонтии. Повторяющаяся и усталостная нагрузки нижней челюсти играют существенную роль в фиксации зубных имплантов внутри костной полости. Циклическое нагружение может нарушить начальную фиксацию импланта и привести к установлению новых нежелательных напряжений.

Объект данного исследования – это усталостные механические свойства компактной костной ткани свиной мандибулы, находящейся под воздействием динамического напряжения сжатия. Образцы для экспериментов были получены из трех челюстей свиней двухлетнего возраста. Образцы тестировались при уровнях пиковых нагрузок – 60, 70, 80, 90 % от величины напряжения предела текучести и при частоте 2 Гц. Для всех образцов была рассчитана плотность методом гидростатического взвешивания. Для определения предельного сжимающего напряжения и зависимости между плотностью и напряжением предела текучести 26 образцов были подвергнуты статическому нагружению до разрушения. Далее был рассчитан уровень циклического нагружения для 30 образцов, используемых в экспериментах при усталостных нагрузках, используя уравнение, полученное на предыдущем этапе. Результаты испытаний на усталость были суммированы в виде зависимости количества циклов до разрушения от пикового напряжения. Результаты экспериментов были аппроксимированы с помощью обратной степенной функции. Усталостное напряжение и время до разрушения были предсказаны в соответствии с моделью накопленных повреждений при аккумуляции повреждений только зависящих от циклов повреждений. Была найдена зависимость усталостных свойств компактной костной ткани от локализации образца в челюсти и негативная корреляция между количеством циклов до разрушения и плотностью костной ткани для всех уровней нагружения. Полученные результаты могут способствовать пониманию механизма разрушения компактной костной ткани мандибулы при циклическом нагружении и должны быть учтены при разработке программ лечения и при улучшении механических параметров внутрикостных имплантов.