

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Materiālu un konstrukciju institūts
Kompozīto materiālu un konstrukciju katedra

Edgars EGLĪTIS

**KOMPOZĪTO ČAULU
DINAMISKĀ NOTURĪBA**

**DYNAMIC BUCKLING
OF COMPOSITE SHELLS**

Mehānikas nozare
Cietvielu mehānikas apakšnozare (P-03)

Promocijas darba kopsavilkums
Summary of Doctoral Thesis

Zinātniskais vadītājs / Scientific supervisor
Dr. sc. ing.
Kaspars KALNIŅŠ

2011

UDK 624.016+620.173.26(043.2)

Eg 730 k

Eglītis E. Kompozīto čaulu dinamiskā noturība.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2011. – 48
lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Materiālu un Konstruksiju
institūta 2010. gada 22. novembra lēmumu, protokols Nr.
40.



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

ISBN

Satura rādītājs / Table of contents

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte.....	4
Darba mērķis	5
Pētījuma uzdevumi	5
Darba zinātniskā novitāte	5
Darba praktiskā vērtība.....	6
Aizstāvēšanai tiek izvirzīts.....	6
Darba sastāvs un apjoms	6
Darba aprobācija un publikācijas	7
Darba struktūra	8
Darba saturs.....	9
Pirmā nodaļa.....	9
Otrā nodaļa	11
Trešā nodaļa	13
Ceturtnodaļa.....	16
Piektā nodaļa	20
Secinājumi	23

THESIS OVERALL REVIEW

Topicality of Thesis.....	24
Aims of Thesis.....	25
Research objectives	25
Scientific novelty of Thesis	25
Practical value of Thesis.....	26
Results presented for the defence	26
Composition and volume of Thesis	26
Approbation and publications of Thesis	27
Structure of Thesis.....	28
Thesis contents	29
First chapter	29
Second chapter.....	31
Third chapter	33
Fourth chapter.....	36
Fifth chapter	40
Conclusions	43

Literatūras saraksts / References	44
Publikāciju saraksts / List of Publications.....	45

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Kompozīto materiālu pielietojums aviācijā, vēja enerģētikā, autobūvē un sporta aprīkojuma ražošanā pēdējos gadu desmitos ir nepārtraukti pieaudzis. To augstie stinguma un stiprības rādītāji padara tos ļoti piemērotus konstrukcijām, kurām ir būtiski minimizēt svaru. Tomēr, par kompozītajām konstrukcijām nav uzkrātas tik plašas zināšanas kā par tradicionālajām metāla konstrukcijām, un to specifisko īpašību radītais svara samazināšanas potenciāls ne vienmēr tiek pilnībā izmantots.

Zinātniskajā literatūrā ir identificētas vairākas jomas, kuras nav pietiekoši izpētītas un ierobežo kompozīto konstrukciju svara efektivitātes potenciālo uzlabojumu: konstrukciju darbība pēc-noturības (*post-buckling*) apgabalā, konstrukciju bojājumu pielaides (*damage tolerance*), ģeometrisko nepilnību ietekme (*imperfection sensitivity*), kā arī īslaicīga slogojuma dinamika. Kompozīto konstrukcija pēc-noturība un sabrukums tiek īpaši pētīts, lai radītu modelēšanas rīkus drošai projektēšanas praksei un precīzētu projektēšanas vadlīnijas. Kompozīto čaulu ģeometriskās neprecizitātes un to ietekme uz čaulu noturību tiek pētītas, lai aizstātu novecojušo nestspējas samazinājuma koeficientu (*knock-down factor*) pieeju, kura ir definēta no sešdesmitajos gados veiktām metāla čaulu pārbaudēm. Jaunas, mūsdienu ražošanas tehnoloģijām un kompozītu īpatnībām pielāgotas pieejas izstrāde ļautu samazināt kompozīto čaulu svaru. Vairāki pētījumi parāda, ka pie dažādiem īslaicīgiem dinamiskajiem slogojumiem, konstrukcijām kritiskie spēki var būt gan augstāki, gan zemāki nekā pie statiska slogojuma. Savukārt, šobrīd projektēšanas vadlīnijas paredz pieņemt slodzes kā kvazistatiskas, pielietojot konservatīvus drošuma koeficientus. Tādēļ, īslaicīga slogojuma dinamiskā rakstura ievērtēšana projektēšanas gaitā nākotnē varētu dot drošākas un vieglākas kompozītās konstrukcijas.

Lai realizētu īslaicīgi dinamiski slogotu kompozīto konstrukciju svara samazināšanas potenciālu, nemazinot to drošumu, nepieciešams radīt ticamu aprēķinu metodoloģiju. Savukārt, lai aprēķinu metodoloģiju varētu uzskatīt par uzticamu, ir nepieciešama tās eksperimentāla validācija. Zinātniskās literatūras analīze liecina, ka, uz šo brīdi, ir publicēti tikai dažu kompozīto konstruktīvo elementu dinamiskās noturības eksperimentālu pētījumu rezultāti. Pie tam, tikai daži no publicētajiem skaitliskajiem kompozīto čaulu dinamiskās noturības pētījumiem ietver skaitlisko modeļu eksperimentālu validāciju. Tādēļ, promocijas darbs veltīts kompozīto čaulu noturības eksperimentāliem un teorētiskiem pētījumiem. Līdztekus, ir izstrādāta un eksperimentāli validēta gludu un ribotu kompozīto čaulu dinamiskās noturības aprēķinu metodika.

Darba mērķis

Šobrīd kompozīto konstrukciju, kuras bieži ir pakļautas īslaicīgām, dinamiskām slodzēm, projektēšanas vadlīnijās ir paredzēts slodzes apskatīt kā kvazistatiskas un pielietot konservatīvus drošības koeficientus. Ievērtējot slodžu dinamiku, nākotnē būtu iespējams projektēt vieglākas, lētākas un reizē arī drošākas kompozītās konstrukcijas.

Promocijas darba mērķis ir dinamiskās noturības aprēķina procedūras, kas būtu pielietojama inženieru darbā, izstrāde un eksperimentāla validācija.

Pētījuma uzdevumi

- Izstrādāt dinamiski slogotu kompozīto konstrukciju noturības aprēķina procedūru;
- Izstrādāt aprēķina modeļu validācijai nepieciešamo kompozīto čaulu paraugu izgatavošanas metodi;
- Izveidot kompozīto čaulu noturības pie statiska un dinamiska slogojuma eksperimentālo pārbaužu procedūru;
- Validēt izstrādāto aprēķina procedūru ar iegūtajiem eksperimentālajiem rezultātiem;
- Eksperimentāli izpētīt slogošanas ātruma ietekmi uz kompozīto čaulu noturību;
- Skaitliski izpētīt slogojuma dinamikas ietekmi uz kompozīto konstrukciju noturību, izmantojot eksperimentāli validētus skaitliskus modeļus.

Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbā eksperimentāli pētīta kompozīto čaulu noturība pie īslaicīgas slodzes. Lai paveiktu šo pētījumu, ir izstrādāta eksperimentāla kompozīto čaulu noturības pie statiska un īslaicīga, dinamiska slogojuma pārbaužu procedūra.

Izstrādāta metodika dinamiski slogotu cilindrisku kompozītu čaulu noturības skaitliskai modelēšanai. Pēc šīs metodikas ir izveidoti stiklaplasta čaulu nelineārie galīgo elementu aprēķina modeļi un validēti ar statikas un dinamikas eksperimentu rezultātiem.

Novērtētas izmaiņas cilindrisku stiklaplasta čaulu jutībā pret ģeometriskajām nepilnībām atkarībā no slogojuma ekscentritātes. Eksperimentāli un skaitliski ir izpētīta to noturība pie centriska un ekscentriskā slogojuma.

Noteikta dinamiskā slogojuma ilguma un veida ietekme uz cilindrisku stiklaplasta čaulu un liektu, ribotu oglekļplasta panelu kritisko spēku, kā arī noturības zuduma formu. Skaitliski izpētīta šo konstruktīvo elementu noturība pie

dažādiem dinamiskiem slogojumiem, izmantojot eksperimentāli validētus skaitliskus modeļus.

Darba praktiskā vērtība

Dinamiski slogotu kompozīto konstrukciju noturības eksperimentu labā prakse tika aprobēta Rīgas Tehniskajā universitātē. Jaunieviestā testēšanas prakse ļauj paplašināt un kvalitatīvi uzlabot kompozīto konstrukciju noturības pētījumus.

Darbā izstrādātā statistiski un dinamiski slogotu gludu un ribotu kompozīto čaulu noturības aprēķinu procedūra ir validēta ar eksperimentāliem rezultātiem un var tikt izmantota dinamiski slogotu plānsienu kompozīto konstrukciju, piemēram, jahtu, lidmašīnu, vēja turbīnu un citu konstrukciju, inženieraprēķiniem.

Parādīti slogojuma veidi, kuros gludu un ribotu kompozīto čaulu kritiskā slodze palielinās, un kuros samazinās, salīdzinot ar statistiska slogojuma gadījumu. Līdz ar to, ir atrasts potenciāls vieglāku konstrukciju projektēšanai un ir identificēti dinamiskie slogojumi, pie kuriem konstrukciju drošumam ir jāpievērš īpaša uzmanība.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts:

- Statiski un dinamiski slogotu cilindrisku kompozīto konstrukciju eksperimentālu noturības pārbaužu procedūra;
- Dinamiski slogotu cilindrisku stiklaplasta čaulu dinamiskās noturības eksperimentu rezultātu datubāze;
- Cilindrisku stiklaplasta čaulu skaitliskas modelēšanas metodika, kas iekļauj paraugiem nomērītās ģeometriskās neprecizitātes, un ir validēta ar dinamisko noturības eksperimentu rezultātiem;
- Sakarības starp slogojuma dinamiku un kompozīto cilindrisku čaulu un liktu, ribotu paneļu noturību.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un literatūras sarakstu. Darba apjoms ir 170 lappuses, 124 zīmējumi, 19 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 146 nosaukumus.

Darba aprobācija un publikācijas

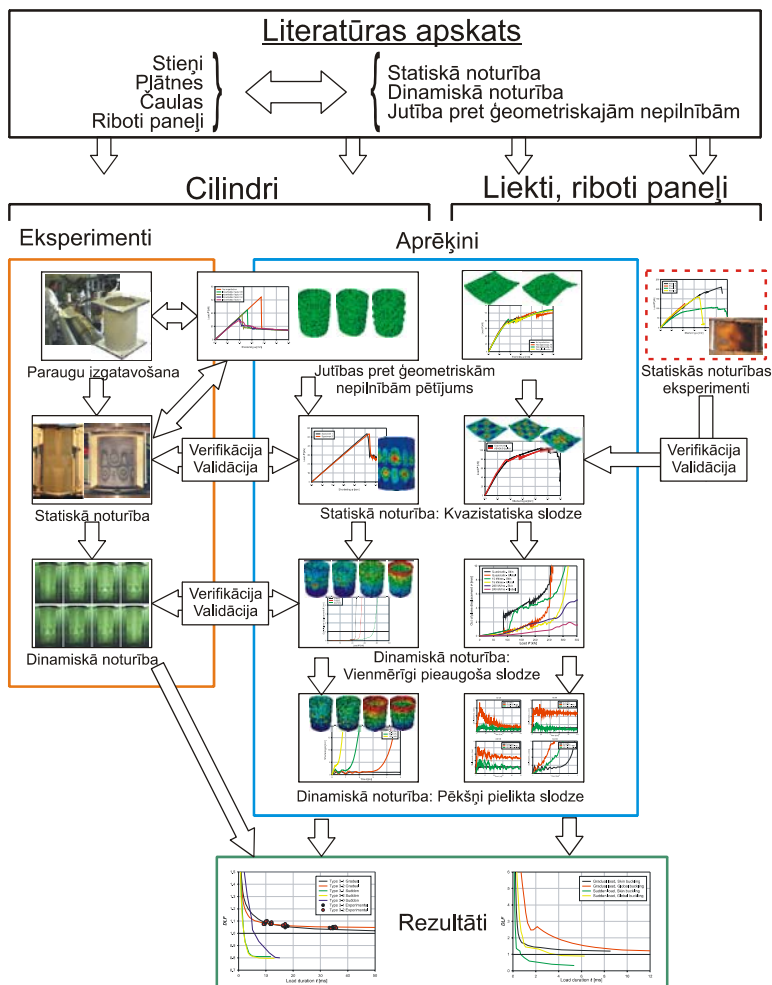
Promocijas darbā aprakstītie rezultāti ir ziņoti un apspriesti starptautiskās konferencēs un zinātniskos semināros:

- 27. ICAS Kongress (Nica, Francija, 2010);
- IV Eiropas Skaitliskās mehānikas konference (Parīze, Francija, 2010);
- Latvijas Nacionālās mehānikas komitejas seminārs (Rīga, Latvija, 2010);
- 51. RTU zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2010);
- 50. RTU zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2009);
- Kompozītmateriālu mehānika 2008 (Rīga, Latvija, 2008);
- 20. Ziemeļvalstu Skaitliskās mehānikas seminārs (Gēteborga, Zviedrija, 2007);
- 4. Materiālu un konstrukciju stiprības, izturības un stabilitātes konference (Palanga, Lietuva, 2007).

Disertācijā aprakstītie rezultāti ir iekļauti 19 publikācijās, no kurām 4 iekļautas EBSCO datu bāzē, un viena ir *Springer Science+Business Media, Inc.* žurnāla publikācija.

DARBA STRUKTŪRA

Disertācijas ietveros veikto pētījumu shēma (1. att.), kas parāda saistību starp veiktajiem soļiem.



1. att.

Disertācijas ietveros veikto pētījumu shēma

DARBA SATURS

Pirmajā nodaļā ir veikts literatūras apskats un analīze par plānsienu konstrukciju noturību pie dažādiem slogojumiem. Apskatot pieejamo literatūru, tika konstatēts, ka dinamiskās noturības eksperimentālie pētījumi ir veikti galvenokārt ar izotropām čaulām, lielākoties pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados. Lai apzinātu akumulētās zināšanas plānsienu konstrukciju dinamiskās noturības eksperimentālo pētījumu jomā, literatūras apskatā analizēti pēdējos 50 gados veiktie čaulu noturības pētījumi.

Sākotnējo cilindrisku čaulu noturības eksperimentālo pētījumu rezultāti tika salīdzināti ar lineārās klasiskās teorijas aprēķiniem un novērota liela eksperimentālo rezultātu izkliede. Turklāt, eksperimentāli iegūtās kritiskās slodzes bija būtiski zemākas, nekā aprēķinātās. Nesaiste starp teorētiskajiem un eksperimentāli iegūtajiem kritiskajiem spēkiem radīja izpratni par cilindrisku čaulu jutību pret ģeometriskajām nepilnībām. Ģeometrisko nepilnību mērījumi kļuva par cilindru noturības eksperimentu labas prakses būtisku sastāvdaļu septiņdesmito gadu beigās, un vairums kopš tā laika veikto skaitlisko pētījumu ietver ģeometriskās nepilnības, kas izmērītas reāliem paraugiem.

Eksperimentāli oglekļplasta kompozīto cilindru noturība ir tikusi pētīta kopš sešdesmitajiem gadiem, kad sāka izmantot kompozītmateriālus. Sākotnēji tika apskatīti cilindri, kas izgatavoti ar tišanas tehnoloģiju. Šādus cilindrus ir relatīvi vienkārši izgatavot, bet to modelēšana sagādā grūtības dēļ īpatnējā šķiedru sakārtojuma. Iepriekš-impregnēšanas tehnoloģijas attīstība ļāva uzlabot kompozītu veiktspēju un brīvāk variēt ar slāņu sakārtojumiem. No iepriekš-impregnētām oglekļa šķiedru lentēm izgatavotu cilindrisku oglekļplasta čaulu noturība tika pētīta Vācijas Aviācijas Centrā DLR. Zimmermann (1996) pētīja slāņu sakārtojuma ietekmi uz kritisko spēku, bet Geier un līdzautori (1991) atrada slāņu sakārtojumus, pie kuriem čaulas jutība pret ģeometriskajām nepilnībām būtu minimāla. Degenhardt un līdzautori (2010) lietoja nenoteiktības un noteiktības pieejas, lai piedāvātu uzlabojumus konservatīvajā *nestspējas samazinājuma koeficientu* pieejā.

Plaši kompozīto cilindru noturības pie dažādiem slogojumiem pētījumi ir tikuši veikti Milānas Politehniskajā universitātē, kur Giavotto un līdzautori (1991) izstrādāja īpaši precīzas eksperimentālās metodes, kas nodrošināja skaidri zināmus robežnoteikumus un vienmērīgu slodzes sadalījumu. Bisagni un Cordisco (2006) turpināja šo eksperimentu labo praksi pētīt arī ribotu kompozīto cilindru un paneļu konstrukciju noturību un sabrukumu pie spiedes, vērpes un kombinēta slogojuma.

Līdz ar virsskaņas lidmašīnu, kosmosa kuģu un raķešu izstrādi, plānsienu konstrukciju noturība pie dinamiska slogojuma ieguva pastiprinātu interesi. Sākotnējie pētījumi parādīja izmaiņas konstrukciju noturībā, ja tās tika slogotas ar lielu ātrumu. Roth un Klosner (1964) bija starp pirmajiem autoriem, kas ir teorētiski pētījuši cilindrisku čaulu noturību pie dinamiska slogojuma. Viņi

konstatēja būtisku kritiskās slodzes pieaugumu, samazinoties slodzes iedarbības laikam. Humpherys un Zatlerys (1965) eksperimentāli pārbaudīja Roth un Klosner (1964) teoriju un konstatēja labu sakritību starp eksperimentālajiem un teorētiskajiem rezultātiem. Šajos un citos agrīnajos eksperimentos pielietotās metodes izmantoja kontrolētas eksplozijas pēkšņi pieliktu slodžu realizācijai, un tādēļ šie eksperimenti bija vairākkārt dārgāki un komplicētāki par statiskās noturības testiem, tādēļ līdz pat šai dienai pietrūkst dinamiskās noturības eksperimentālo pētījumu rezultātu. Dinamiskās noturības gadījumā arī identificēt noturības zudumu ir sarežģītāk, tā kā dinamiskās noturības kritēriji nav tik skaidri kā statiskajai noturībai. Gadu gaitā ir piedāvāti vairāki dinamiskās noturības kritēriji, bet Budiansky un Hutchinson (1964) piedāvātais kritērijs tiek izmantots visplašāk. Tas balstās uz konstrukcijas maksimālā pārvietojuma – slodzes parametra grafika izveidi, kurā kritiskā slodze ir tā, pie kuras konstrukcijas maksimālais pārvietojums pieaug visstraujāk.

Plaši konstruktīvo elementu noturības pie dinamiskajām slodzēm pētījumi notika Izraēlas Tehnoloģijas institūtā kopš astoņdesmitajiem. Eksperimentālajos pētījumos tika izmantotas trieciena slodzes, un vienkāršākajiem konstruktīvajiem elementiem tika iegūta laba sakritība ar teoriju. Stieņu un plātņu dinamiskās noturības pētījumu rezultātus ir publicējuši Ari-Gur un līdzautori (1982), Weller un līdzautori (1989), Abramovich un Grunwald (1995). Šiem pētījumiem ir kopīgs secinājums, ka kritiskā slodze pieaug, samazinoties slodzes iedarbības laikam, taču tā kļūst mazāka par kritisko slodzi statiska slogojuma gadījumā, kad slodzes iedarbības laiks ir vienāds ar konstrukcijas pašsvārstību pusperiodu. Yaffe un Abramovich (2003) ribotu alumīnija cilindru noturību pie dinamiskas slodzes pētīja gan skaitliski, gan eksperimentāli. Eksperimenti tika veikti izmantojot triecientorni, un cilindrisko alumīnija čaulu dinamiskā noturība tika novērota, taču praktiski izmantojami rezultāti iegūti netika. Skaitliskie rezultāti kārtējo reizi parāda, ka kritiskā slodze pieaug, samazinoties slogojuma laikam, pat ja slogojuma ilgums atbilst cilindra pašsvārstību pusperiodam. Taču kritiskā slodze mazāka par kritisko slodzi pie statiska slogojuma tika novērota, kad slogojuma ilgums bija vienāds ar laiku, kas nepieciešams skaņas vilnim, lai izietu no viena cilindra gala līdz otram, atstarotos, un atnāktu atpakaļ.

Literatūras apskata rezultāti ļāva identificēt galvenos pētījumu virzienus, kas ir būtiski slogojuma dinamikas radītā svārstību samazināšanas potenciāla izmantošanai:

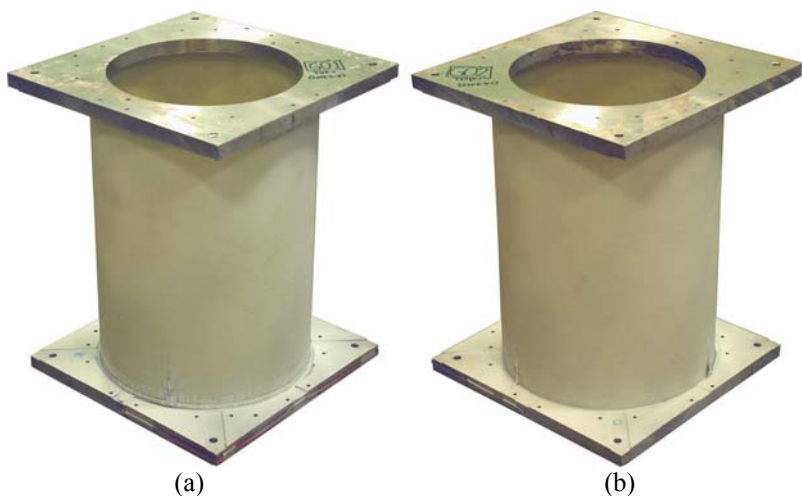
- Konstrukciju ģeometrisko nepilnību ietekmes izpēte;
- Dinamiskās noturības eksperimentu metodikas izstrāde un aprobācija;
- Tīcīmas dinamiskās noturības aprēķina metodikas izstrāde un eksperimentāla validācija;
- Plānsienu konstrukciju noturības izpēte pie dažādiem dinamisko slogojumu veidiem visā to diapazonā.

Otrajā nodaļā ir aprakstīti darba ietvaros izmantotie materiāli un eksperimentālo pētījumu metodes. Ņemot vērā, ka zinātniskajā literatūrā ir atrodami tikai daži eksperimentāli kompozīto konstrukciju noturības pie īslaicīgām slodzēm pētījumi, eksperimentu metodikai, plānošanai un paraugu sagatavošanai tika pievērsta īpaša vērība, un tāpēc veikts detalizēts izklāsts. Izstrādājot eksperimentālajiem pētījumiem paredzēto paraugu izgatavošanas tehnoloģiju, četras paraugu sērijās tika izgatavoti 35 cilindriskas stiklaplasta čaulas. Izgatavošanas metodika tika uzlabota ar katru paraugu sēriju un tika lietoti dažādi stikla šķiedras audumi, sveķi un ražošanas tehnoloģijas. Paraugu ģeometriskie raksturlielumi tika pieņemti: garums L no 400 līdz 700 mm, iekšējais rādiuss R 150 mm vai 250 mm. Lai aprēķinos varētu pielietot plāno čaulu teorijas, rādiusa attiecība pret sienas biezumu R/t tika izvēlēta robežās no 125 līdz 240. Visi paraugi tika projektēti lai, zūdot noturībai, tajos nerastos bojājumi, un tos varētu testēt atkārtoti.

Saskaņā ar ISO 527-4:1997 standartu tika veikti stiklaplasta stiepes paraugu mehānisko īpašību testi. Identifikācijas testos izmantotie paraugi tika izgriezti no plakanām plāksnēm, kas izgatavotas pēc tādas pašas tehnoloģijas, kā atbilstošie cilindri, vai arī no pašiem cilindriem pēc to noturības pārbaužu pabeigšanas.

Īpaša uzmanība tika pievērsta pieliktās slodzes vienmērībai (vai nevienmērībai), jo, kā to ir atzīmējuši daudzi pētnieki, tā būtiski ietekmē cilindrisko čaulu noturību. Pirmajai cilindru sērijai gali tika pastiprināti ar papildus stiklaplasta slāņiem. Taču, šis risinājums nenodrošināja pietiekoši vienmērīgu slodzes sadalījumu, un cilindri zaudēja noturību pie ļoti zemām slodzēm un ar neregulārām noturības zuduma formām. Tādēļ, otrās sērijas paraugu gali tika ielīmēti saplākšņa plātnēs, un šis risinājums būtiski uzlaboja slodzes sadalījumu, kā rezultātā tika iegūtas augstākas kritiskās slodzes, un dažu paraugu gadījumā regulāras noturības zuduma formas. Tomēr, saplākšņa deformācijas mitruma ietekmē noveda pie nenoslogotu paraugu saspriegta stāvokļa un, līdz ar to, ievērojamas eksperimentālo rezultātu izkliedes. Trešā un ceturtā paraugu sērijas tika ielīmētas precīzi izgatavotās alumīnija plāksnēs, kas vēl labāk nodrošināja vienmērīgu slodzes sadalījumu un stingri noteiktus robežnoteikumus. Pēdējā paraugu sērija ir parādīta 2. att.

Pēdējo divu paraugu sēriju ģeometrisko nepilnību mērīšanai tika izveidota speciāla iekārta, kas sastāv no rotējoša galda, kas ļauj mērīt nepilnības pa aploci, un vertikālās ass, kas ļauj mērīt nepilnības gareniskā virzienā. Cilindru virsmas rādīālā novirze tika mērīta ar Keyence LK-501 CCD lāzera pārvietojumu sensoru, kas piestiprināts vertikālajai asij. Jāpiezīmē, ka mērījumi tika veikti tikai paraugu ārējām virsmām, tādēļ cilindru biezuma variācijas palika nezināmas.



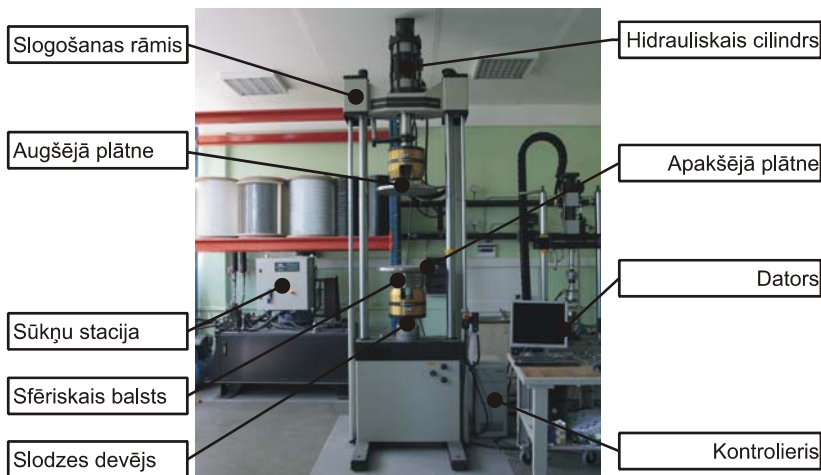
2. att.

Cilindrisko stiklaplasta čaulu paraugi: 3-1 (a) un 3-2 (b)

Pēdējās divas stiklaplasta paraugu sērijas tika aprīkotas ar trīs līdz septiņiem pāriem ekstensometru, atkarībā no parauga, spiedes un lieces deformāciju novērošanai statiskās un dinamiskās noturības eksperimentu laikā. Šie mērījumi parādīja, ka slodzes devējs kļūst neprecīzs pie dinamiskā slogojuma, un tika lietoti pieliktās slodzes aplēsēm.

Statiskās un dinamiskās noturības eksperimentiem tika izmantotas divas dažādas hidrauliskās testēšanas iekārtas. Slogošanas iekārta Instron 8802, kas parādīta 3. att., nodrošina slodzi līdz 250 kN un maksimālo pārvietojuma ātrumu līdz 190 mm/s, un ar to tika testēti visi paraugi, izņemot trešo sēriju. Trešās sērijas paraugi tika testēti MTS iekārtā, kura un nodrošina slodzi līdz 100 kN un maksimālo pārvietojuma ātrumu līdz 80 mm/s. Hidraulisko iekārtu ierobežotie pārvietojuma ātrumi atsaucās uz minimālo slodzes impulsa ilgumu, kas bija 30 ms Instron iekārtai un 50 ms MTS iekārtai.

Dinamiskās noturības eksperimenti ar trešās sērijas paraugiem tika veikti arī izmantojot triecientorni. Šī eksperimentālā metode bija daudz neprecīzāka, taču ar to tika sasniegti daudz mazāki slodzes impulsa ilgumi nekā ar hidrauliskajām iekārtām. Vienkāršā eksperimenta iekārta sastāvēja no triecientorņa kolonnām un krītoša atsvara ar palaišanas mehānismu, novietojot dažādas tērauda šūnu starplikas starp paraugu un atsvaru. Izvēloties atbilstošu trieciena enerģiju un variējot starplikas stingumu, tika iegūti dažādi slodzes impulsa parametri. Slodzes un pārvietojuma dinamikas noteikšanai tika izmantoti slodzes devēja, akselerometra un tenzometru mērījumi.



3. att.

Hidrauliskā slogošanas iekārta Instron

Visiem stiklaplasta cilindru un oglekļplasta liektu, ribotu čaulu noturības aprēķiniem tika lietota ABAQUS/Explicit galīgo elementu aprēķinu programma. ABAQUS ir aviācijā sertificēts galīgo elementu modelēšanas programmatūras komplekss ar lineāru un nelineāru, statisku un dinamisku aprēķinu iespējām. ABAQUS/Explicit ir balstīts uz kustības vienādojumiem un izmanto atklātās integrācijas formulas, kas to padara īpaši piemērotu nelineāru īslaicīgu procesu, tādu kā dinamiskā noturība, simulācijai. ABAQUS lineāro aprēķinu iespējas arī tika izmantotas, veicot konstrukciju pašsvārstību frekvenču un tām atbilstošo formu aprēķinus.

Ribotu oglekļplasta čaulu validācijai tika izmantoti Eiropas Komisijas 6. Ietvara programmas projekta COCOMAT (Degenhardt un līdzautori, 2006) ietvaros Izraēlas Tehnoloģijas institūta un Vācijas Kosmosa aģentūras veiktie statistiskās noturības eksperimentu rezultāti.

Trešajā nodaļā stiklaplasta cilindru statiskā noturība tika pētīta skaitliski un eksperimentāli. Izmantojot 35 paraugus, tika veikti vairāk kā 250 statistiskās noturības eksperimentu. Rezultātiem, kas iegūti atkārtoti testējot vienu un to pašu paraugu, uzlabojās atkārtotamība, un kopumā kritiskās slodzes samazinājums atkārtotos eksperimentos netika novērots. Lai iegūtu vairāku eksperimentu rezultātus no identiskiem paraugiem, katrs paraugs tika testēts atkārtoti.

Pirmo divu paraugu sēriju eksperimentālās pārbaudes parādīja lielu rezultātu izkliedi, ar kritiskā spēka standartnovirzi 21% no vidējās vērtības nomināli identiskiem paraugiem. Pakāpeniska izgatavošanas tehnoloģiju un testēšanas metodikas uzlabošana ļāva būtiski samazināt šo izkliedi, samazinot to līdz 2.5%

standartnovirzei nomināli identiskiem paraugiem. Taču cilindrisku čaulu jutība pret ģeometriskajām nepilnībām tika skaidri novērota visos eksperimentos, un augstākie eksperimentāli iegūtie kritiskie spēki bija tikai 65% no vērtībām, kas iegūtas aprēķinos bez ģeometrisko nepilnību ievērošanas.

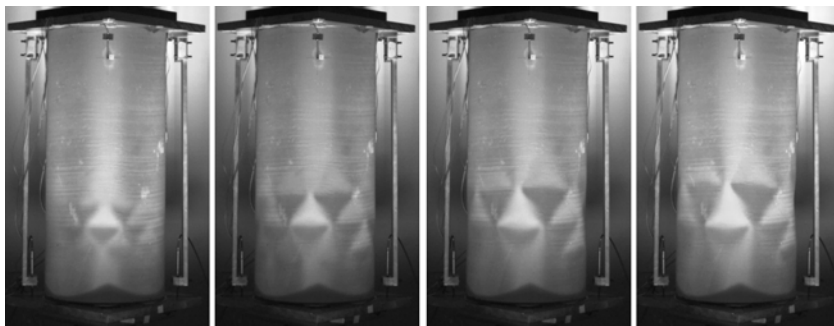
Tika novērota būtiska atšķirība starp eksperimentālajiem un skaitliskajiem rezultātiem gan kritiskā spēka, gan noturības zuduma formu ziņā, tādēļ tika veikts skaitlisks pētījums, lai novērtētu ģeometrisko nepilnību ietekmi uz pētāmo cilindru noturību. Tas parādīja, ka, ieviešot īpašvērtību aprēķinā iegūtās formas veida ģeometriskās nepilnības ar amplitūdu $1/8$ no sienas biezuma, tika iegūts kritiskās slodzes samazinājums par 30%. Nepilnību amplitūdas palielināšana līdz $1/1$ no sienas biezuma samazināja kritisko slodzi vēl vairāk, līdz 45% no sākotnējās vērtības ģeometriski perfektam cilindram. Noturības zuduma formas izmaiņas netika novērotas līdz nepilnību amplitūdai $1/2$ no sienas biezuma, taču šī forma būtiski izmainījās pie lielākās apskatītās nepilnību amplitūdas. Šis pētījums tika turpināts eksperimentāli un skaitliski apskatot sloģojuma ekscentritātes ietekmi uz spiestu kompozīto cilindru jutību pret ģeometriskajām nepilnībām. Statiskās noturības eksperimenti tika atkārtoti, novirzot paraugu garenasis attiecībā pret sfēriskā balsta rotācijas centru. Tika novērots, ka nestspējas samazinājuma koeficients (*KDF*), kas noteikts kā attiecība starp eksperimentā iegūtajiem kritiskajiem spēkiem pret ģeometriski perfektiem cilindriem aprēķinātajiem, palielinās, palielinoties slodzes ekscentritātei. Šāda tendence tika apstiprināta arī ar paralēli veiktajam skaitliskajam pētījumam, kurā nepilnības tika ieviestas īpašvērtību aprēķinos iegūto formu veidā.

Teorētisku ģeometrisko nepilnību formu ieviešana skaitliskajos modeļos izskaidroja atšķirības starp eksperimentālajiem un aprēķinu rezultātiem, taču, lai skaitliskie rezultāti atbilstu eksperimentālajiem, ģeometrisko nepilnību amplitūda bija jāpiemeklē atbilstoši testu rezultātiem. Tādēļ, lai varētu validēt stiklaplasta cilindru skaitliskās modelēšanas metodoloģiju, bija jāizmēra paraugu ģeometriskās nepilnības un eksperimenti jāveic ļoti uzmanīgi, lai visi eksperimenta apstākļi būtu skaidri zināmi un varētu tikt nomodelēti. Otrajā nodaļā aprakstītā ģeometrisko neprecizitāšu mērījumu iekārta tika darbināta manuāli, un cilindra virsmas radiālās novirzes tika mērītas pa aploci ar 7.5 mm soli, atkārtojot mērījumus ar vertikālu soli 7.5 mm. Šis mērījumu biežums atbilst galīgo elementu tīklam, kas tika lietots skaitliskajos modeļos, un tādēļ mērījumu rezultātus nevajadzēja interpolēt, lai tos ieviestu skaitliskajos modeļos.

Trešajai stiklaplasta cilindru paraugu sērijai nomērītās ģeometriskās nepilnības tika ieviestas skaitliskajos modeļos un noveda pie ļoti līdzīgiem samazinājuma koeficientiem, neskatoties uz būtisko maksimālo radiālo noviržu atšķirību: vienam paraugam tās bija $4/5$ no sienas biezuma t , bet otram tikai $1/6$ no sienas biezuma t . Šī atšķirība norādīja uz to, ka var būt nozīmīgākas un mazāk nozīmīgas ģeometrisko nepilnību formas. Lai atrastu ģeometrisko nepilnību formu

būtiskās un nebūtiskās komponentes, tika veikts skaitlisks pētījums, izmantojot šos nepilnību mērījumus. Katras cilindra asij paralēlās mērījumu punktu līnijas dati tika aproksimēti ar taisni, un šīs taisnes veidoja nepilnību *globālo* komponenti. Atlikušās nepilnības tika uzskatītas par *lokālo* komponenti. Ieviešot skaitliskajos modeļos tikai globālo nepilnību komponenti, kritiskais spēks abiem modeļiem samazinājās par 9.7% un 2.5% salīdzinot ģeometriski perfektiem modeļiem, kamēr, ieviešot tikai lokālo nepilnību komponenti, kritiskais spēks samazinājās par, attiecīgi, 36% un 32%, kas ir ļoti tuvu samazinājumam, ko ieguva iekļaujot visas nomērītās nepilnības. No tā ir secināts, ka maksimālā ģeometrijas novirze no ideālās kā tāda ir daudz mazsvarīgāka par ģeometrisko nepilnību formu, un, ka nepilnību formas, pie kurām cilindra sienīņa saglabājas taisna garenvirzienā, kritisko spēku ietekmē mazāk, nekā pārējās.

Statiskās noturības eksperimenti, kuros izmantoti trešās sērijas paraugi, tika filmēti ar ātrdarbīgu videokameru, ar ātrumu 1000 kadri sekundē. Tas ļāva novērot noturības zuduma formas rašanos un attīstību. Viena šāda eksperimenta laikā novērotā noturības zuduma formas attīstība ir parādīta 4. att.

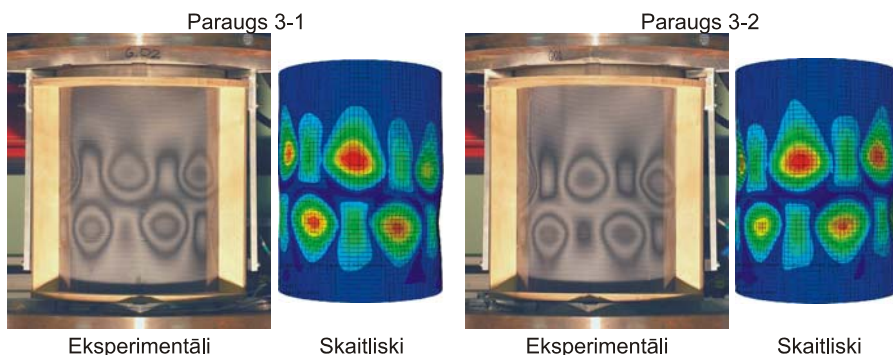


4. att.

Noturības zuduma formas attīstība pie kvazistatiska slogojuma

Ceturtās stiklaplasta cilindru paraugu sērijas izgatavošanā tika izmantota ar iepriekšējiem paraugiem iegūtā pieredze, lai iegūtu pilnvērtīgus rezultātus, kas ļautu izvērtēt izveidotās modelēšanas pieejas precizitāti. Īpaša vērība tika pievērsta detaļām, kas potenciāli varētu ietekmēt cilindru noturību, kā, piemēram, gala plātņu plakanums un paralelītāte. Pirms noturības eksperimentiem šiem paraugiem tika nomērītas sākotnējās ģeometriskās nepilnības. Rūpīgā paraugu izgatavošana un testēšana, kā arī informācija par paraugu ģeometriskajām nepilnībām ļāva izveidot precīzus skaitliskus modeļus, kas ABAQUS/Explicit galīgo elementu aprēķinā deva kritisko spēku, kas atšķiras no vidējā eksperimentāli iegūtā mazāk par 6% ar 95% ticamību. Skaitlisko simulāciju precizitāti apstiprina arī noturības

zuduma formu, kas tika novērotas eksperimentā, precīzā atbilstība skaitliskajās simulācijās iegūtajām, ko var uzskatāmi redzēt 5. att.



5. att.

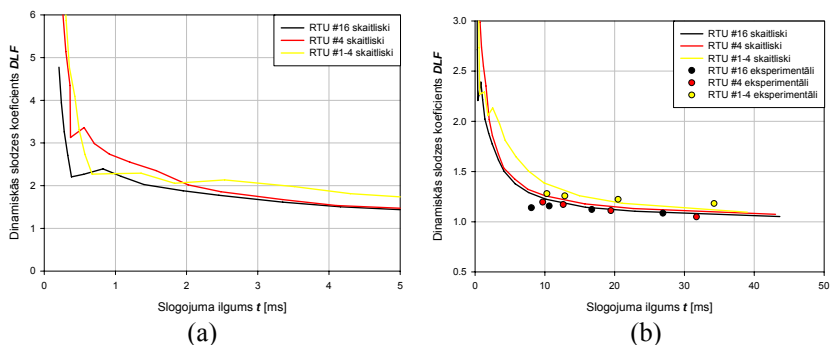
Eksperimentāli un skaitliski iegūto noturības zuduma formu atbilstība

Ceturtajā nodaļā tika pētīta stiklaplasta cilindru noturība pie īslaicīgiem dinamiskiem slogojumiem. Tika veikti vairāk nekā 300 dinamiskās noturības eksperimenti ar slogojuma laikiem no 12 līdz 120 ms, izmantojot hidrauliskās slogošanas iekārtas un triecientorni. Katrā eksperimentā ir atrasts dinamiskās slodzes koeficients (DLF), kas izteikts kā kritiskā spēka pie dinamiska slogojuma attiecība pret kritisko spēku pie statiska slogojuma.

Dinamiskās noturības eksperimenti ar otrās sērijas paraugiem tika veikti ar eksperimentālo iekārtu Instron, nodrošinot slodzes impulsa ilgumus no 30 ms līdz 120 ms. Rezultātā iegūti DLF robežas no 0.98 līdz 1.46, kas uzrāda vispārēju sakarību, ka palielinoties slogojuma ātrumam, pieaug DLF . Tomēr, izvērtējot šos rezultātus, ir jāņem vērā ar šiem paraugiem iegūto eksperimentālo rezultātu lielā izkliede, kas vēlāk tika samazināta uzlabojot paraugu izgatavošanas un testēšanas metodes.

Skaitliski modeļi ar ģeometriskajām nepilnībām, kuru forma atbilst lineārā īpašvērtību noturības aprēķinā iegūtajai formai, ir izstrādāti un pieskaņoti eksperimentālajiem rezultātiem, kas iegūti ar tiem otrās sērijas paraugiem, kas nodrošināja labāko eksperimentu atkārtojamību. Šie modeļi tika izmantoti, lai pētītu stiklaplasta cilindru noturību pie slogošanas ātrumiem, kas būtiski pārsniedz pētījumā izmantoto eksperimentālo iekārtu kapacitāti. Pie ļoti īsa slogojuma ilguma ir grūti noteikt kritisko slodzi, ja tiek uzdots pārvietojums, kā tas notiek eksperimentā, tādēļ šajā pētījumā modelim tika pielikta slodze ar dažādiem slodzes pieauguma ātrumiem. Lai noteiktu kritisko slodzi, katrai simulācijai tika veidots Budiansky-Hutchinson (Budiansky un Hutchinson, 1964) grafiks, kurā uz vienas ass ir pieliktā slodze, bet uz otras – čaulas maksimālais radiālais pārvietojums, un

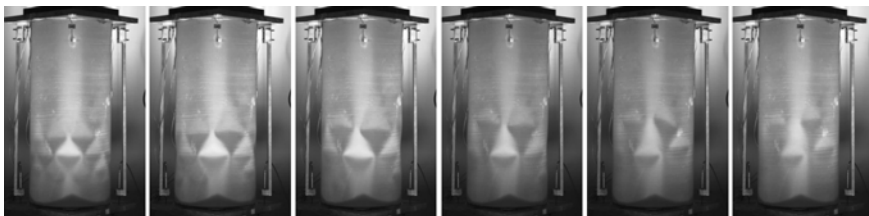
par kritisko slodzi pieņemta tā, pie kuras šis maksimālais pārvietojums pārsniedz noteiktu lielumu. Kritiskais maksimālais pārvietojums tika pieņemts tāds, lai izslēgtu dinamiskā sloģojuma izraisītās čaulas svārstības un identificētu tieši noturības zuduma punktu. Pētījumā iegūtie DLF atkarības no slodzes iedarbības ilguma grafiki ir parādīti 6. att. divos dažādos mērogos, kopā ar atbilstošajiem eksperimentālajiem rezultātiem. Ir redzams, ka DLF palielinās gandrīz nepārtraukti, līdz ar sloģojuma laika samazināšanos un ātruma palielināšanos. Tomēr, nelieli kritumi DLF līknēs ir novērojami visiem trīs modeļiem slodzes ilguma intervālā no 0.5 ms līdz 1 ms. Šis laiks aptuveni atbilst laikam kas nepieciešams, lai sprieguma vilnis izietu cauri paraugam no viena gala līdz otram un atpakaļ. Saskaņā ar Abramovich un Yaffe (2003) skaitliski iegūtajiem rezultātiem, pie šādiem sloģojuma ilgumiem DLF var kļūt mazāks par 1.00, tas ir, kritiskā slodze pie dinamiskā sloģojuma var būt zemāka, nekā pie statiskā, taču, tas netika novērots šajā pētījumā.



6. att.

DLF -laika grafiki, kas iegūti, izmantojot otrās sērijas paraugus
(a) – skaitliskie rezultāti; (b) – skaitliskie un eksperimentālie rezultāti

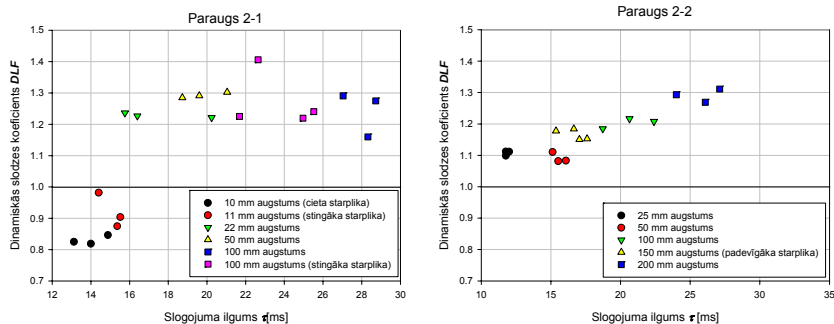
Stiklaplasta cilindru dinamiskās noturības eksperimentāls pētījums, izmantojot trešo paraugu sēriju, tika veikts, izmantojot hidraulisko sloģošanas iekārtu MTS un triecientorni, kas ļāva novērot noturības zudumu pie dažādiem sloģojuma ātrumiem un slodzes darbības ilgumiem. Hidrauliskās sloģošanas iekārtas izmantošana nodrošināja salīdzinoši skaidrus eksperimenta apstākļus un precīzus slodzes un pārvietojuma mērījumus, taču maksimālais pārvietojuma ātrums ierobežoja sloģošanas ātrumu līdz 0.8 kN/ms. Neskatoties uz to, tika iegūti DLF no 0.94 līdz 1.21, un novērota vispārēja tendence, ka DLF palielinās, palielinoties sloģošanas ātrumam. Eksperimenti tika filmēti ar ātrdarbīgu videokameru, ar ātrumu 1000 kadri sekundē, kas ļāva novērot noturības zuduma formas attīstību (7. att.) un konstatēt, ka, pie dotajiem sloģošanas ātrumiem, tā ir līdzīga kvazistatiska sloģojuma gadījumā novērotajām (4. att.).



7. att.

Noturības zuduma formas attīstība pie dinamiska sloģojuma

Dinamiskās noturības eksperimenti, izmantojot tos pašus trešās sērijas paraugus, tika veikti arī izmantojot triecientorni, kas ļāva iegūt sloģojšanas ātrumu līdz 10 kN/ms un sloģojuma ilgumu no 12 ms līdz 33 ms. Lai regulētu slodzes lielumu un ilgumu, tika izmantotas dažāda stinguma starplikas starp paraugu un krītošo atsvaru. Lielāka slodze tika iegūta ar stingākām starplikām, bet tās ilgums mainījās atkarībā no trieciena enerģijas. Šajos testos tika iegūtas *DLF* vērtības no 0.82 līdz 1.41, un to atkarība no slodzes impulsa ilguma ir parādīta 8. att. *DLF*, kas mazāks par viens, tika iegūts tikai ar vienu no paraugiem (Paraugs 2-1), pie zemākajiem slodzes darbības ilgumiem, bet pārējos gadījumos *DLF* ir šķietami neatkarīgi no slodzes darbības ilguma. Savukārt, rezultāti, kas iegūti ar otru paraugu (Paraugs 2-2) parāda *DLF* palielināšanos līdz ar sloģojuma ilguma pieaugumu. Tas savā ziņā ir pretrunā ar rezultātiem, kas šajā pētījumā iegūti ar hidrauliskajām testēšanas iekārtām, taču ir jāievēro būtiskās atšķirības starp abu testēšanas metožu pamatprincipiem.

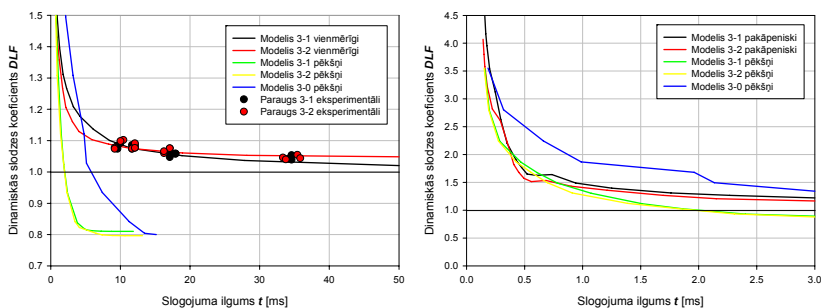


8. att.

DLF -slodzes ilguma rezultātu izklide, kas iegūta izmantojot triecientorni

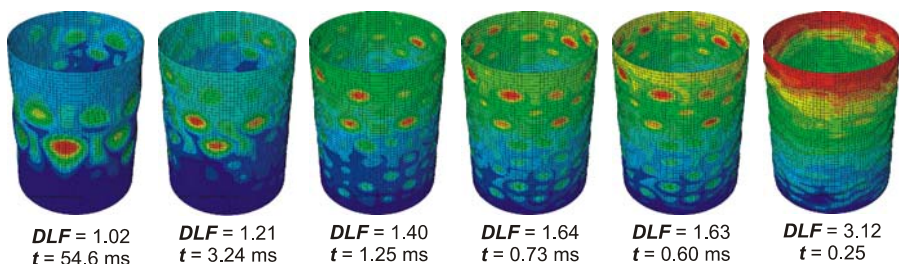
Ceturtās paraugu sērijas dinamiskās noturības eksperimenti tika veikti tikai hidrauliskajā sloģojšanas iekārtā, jo triecientornī realizēto testu rezultāti nebija precīzi un viennozīmīgi interpretējami. Sloģojšanas iekārtas maksimālais pārvietojuma ātrums ļāva sloģot paraugus ar ātrumu līdz 5 kN/ms, un tika iegūti

DLF no 1.04 līdz 1.10. Eksperimentāli iegūtā DLF atkarība no sloģojuma laika ir parādīta 9. att., kopā ar skaitlisko pētījumu rezultātiem. Izmantojot izveidotos skaitliskos modeļus, tika veiktas eksperimentu simulācijas, tādējādi veicot piedāvātās aprēķinu metodikas validāciju. Atšķirība starp eksperimentāli un skaitliski iegūtajiem kritiskajiem spēkiem pie dinamiska sloģojuma nepārsniedza 1% paraugam 3-1 un 4% paraugam 3-2. Izmantojot validētos modeļus, tika veikts skaitlisks pētījums, kurā sloģojuma ātrumu neierobežoja eksperimentālo iekārtu kapacitāte, un tika apskatīti sloģojuma ātrumi no 1 kN/ms līdz 1350 kN/ms. Skaitliskie rezultāti parāda gandrīz vienmērīgu DLF pieaugumu, samazinoties sloģojuma laikam līdz noturības zudumam. Neliels nevienmērīgums DLF pieaugumā ir novērojams ap slodzes darbības laiku 0.6 ms, kas aptuveni atbilst 1/4 no pētāmo cilindru pašsvārstību perioda. Noturības zuduma formas pakāpeniski pāriet no formām ar mazāku viļņu skaitu, kā kvazistatiska sloģojuma gadījumā, uz formām ar lielāku viļņu skaitu, līdz tās kļūst tuvas aksisimetriskai noturības zuduma formai. Šīs noturības formas zuduma izmaiņas ir parādītas 10. att. Izmantojot tos pašus validētos skaitliskos modeļus, tika pētīta arī cilindrisku stiklaplasta čaulu noturība pēkšņi pieliktas slodzes gadījumā. Arī šajā gadījumā ir novērojams vienmērīgs DLF pieaugums, samazinoties sloģojuma laikam, un noturības zuduma formas mainās līdzīgi kā pie vienmērīgi pieaugošas slodzes. Tomēr, atšķirībā no gadījuma ar vienmērīgi pieaugošu slodzi, zemākie iegūtie DLF bija 0.80 un 0.81. Salīdzinājumam, tika veiktas simulācijas, neiekļaujot sākotnējās ģeometriskās nepilnības, un šādā veidā iegūta kritiskā slodze bija tikai par 0.45% augstāka. Tas ir skaidrojams ar to, ka pēkšņā slodzes pielikšana izraisīja cilindra svārstības, kuru ietekme uz kritisko slodzi ir līdzīga kā sākotnējām ģeometriskajām nepilnībām. Līdz ar to, pēkšņai slodzei pakļauts cilindrs ir mazāk jutīgs pret sākotnējām ģeometriskajām nepilnībām, nekā kvazistatiskas slodzes gadījumā. Pētījumā iegūtie DLF atkarības no slodzes iedarbības ilguma grafiki ir parādīti 9. att. divos dažādos mērogos, kopā ar atbilstošajiem eksperimentālajiem rezultātiem.



9. att.

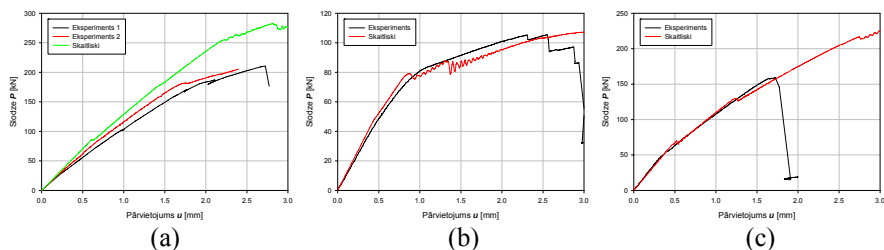
DLF -laika grafiki, kas iegūti, izmantojot ceturtais sērijas paraugus



10. att.

Noturības zuduma formas un DLF pie dažādiem sloģojuma ilgumiem

Piektā nodaļa veltīta skaitliskiem liektu, ribotu oglekļplasta paneļu statiskās un dinamiskās noturības pētījumiem. Izmantojot ABAQUS galīgo elementu programmatūru, tika izstrādāti trīs dažādu liektu, ribotu oglekļplasta paneļu skaitliski modeļi. Ar šiem modeļiem tika veikti noturības aprēķini, izmantojot programmu ABAQUS/Explicit, un to rezultāti verificēti un validēti izmantojot projekta COCOMAT ietvaros iegūtos eksperimentālos datus. Visu trīs paneļu eksperimentāli un skaitliski iegūtās slodzes-pārvietojuma līknes ir parādītas 11. att. Tā kā šajā disertācijā tiek apskatīta elastīgs noturības zudums, paraugu sabrukums netika modelēts.



11. att.

Liektu, ribotu oglekļplasta paneļu aprēķinu validācija
(a) – Panelis Nr. 1; (b) – Panelis Nr. 2; (c) – Panelis Nr. 3

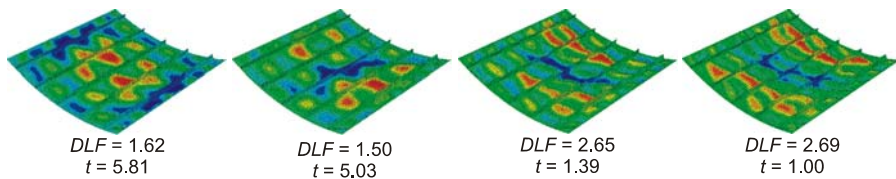
Izmantojot eksperimentāli validētos skaitliskos modeļus, ir veikts liektu, ribotu oglekļplasta paneļu jutības pret ģeometriskajām nepilnībām pētījums. Skaitliskie modeļi tika papildināti ar mākslīgām ģeometriskajām nepilnībām, kas atbilst īpašvērtību aprēķinā iegūtajām noturības zuduma formām, ar amplitūdu līdz paneļa apšuvuma biezumam, un apšuvuma noturības kritiskajam spēkam tika iegūti KDF no 0.71 līdz 0.98. Katram no paneļiem kāda no apskatītajām nepilnību formām palielināja paneļa globālās noturības kritisko spēku, līdz pat 112% , salīdzinot ar ģeometriski perfektu paneli. Paneļiem, kuru malas bija brīvi balstītas, globālās noturības gadījumā jutība pret ģeometriskajām nepilnībām bija salīdzinoši

neliela, un tika iegūti *KDF* robežās no 0.96 līdz 1.12. Turpretī, panelim, kura malas netika balstītas vispār, vienā gadījumā tika iegūts globālās noturības *KDF* 0.70. Lai arī ģeometriskās nepilnības būtiski ietekmē kritiskās slodzes, pētāmo paneļu stabilās pēcnoturības uzvedības dēļ šīs nepilnības praktiski neietekmēja slodzes-pārvietojuma līknes. Tā kā reālo paraugu ģeometriskos nepilnību dati nebija pieejami, turpmākajos dinamiskās noturības pētījumos tika lietoti ģeometriski perfekti skaitliskie modeļi.

Sekojošajā kompozīto cilindru gadījumā pielietotajai praksei, eksperimentāli validētie liektu, ribotu oglekļplasta paneļu modeļi tika izmantoti šo paneļu noturības pētījumiem pie vienmērīgi pieaugošām un pēkšņi pieliktām slodzēm. Pētījums aptvēra vienmērīgi pieaugošas slodzes no 7 kN/ms līdz 2700 kN/ms, un kritiskā spēka atrašanai tika lietoti Budiansky-Hutchinson tipa grafiki. Pēkšņi pieliktas slodzes gadījumā tika izmantota līdzīga pieeja, taču, tā kā slodze šajā gadījumā ir konstanta, slodzes ass vietā tika lietota laika ass, un atrasts slodzes darbības ilgums, pie kura panelis zaudē noturību. Abos gadījumos kritiskā slodze vai kritiskais laiks tika noteikts, kad maksimālie pārvietojumi slogojumam perpendikulārā plaknē pārsniedza zināmu vērtību.

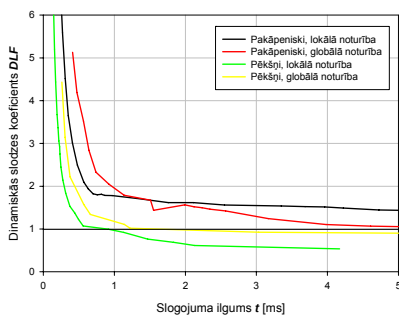
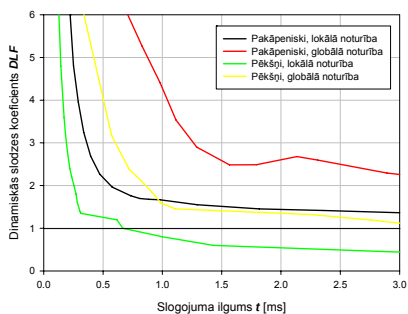
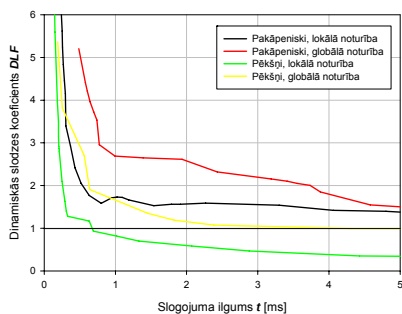
Vienmērīgi pieaugošas slodzes gadījumā, apšuvuma noturībai tika iegūti *DLF* no 1.12 līdz 9.30, bet globālajai noturībai – no 0.90 līdz 12.65. Tikai viena paneļa gadījumā kritiskais spēks pie vienmērīgi pieaugošas slodzes bija mazāks nekā pie statiskas slodzes. *DLF* atkarība no slogošanas laika ir parādīta grafiski 13. att. Ir atsevišķas līknes apšuvuma noturībai un paneļa globālajai noturībai. Līdzīgi, kā cilindrisku čaulu gadījumā, ir redzams *DLF* pieaugums samazinoties slodzes darbības laikam, taču apskatīto paneļu gadījumā šis pieaugums nav tik vienmērīgs. Vairākumā gadījumu, nevienmērības atbilst noturības zuduma formu izmaiņai, bet ne vienmēr. Piemēram, paneļa Nr.1 noturības zuduma formu izmaiņas ir parādītas 12. att.

Tie paši modeļi tika izmantoti liektu, ribotu oglekļplasta paneļu noturības pie pēkšņi pieliktas slodzes pētījumiem. Tika apskatītas slodzes no 15 kN līdz 1350 kN un iegūti *DLF* no 0.88 līdz 8.98 globālajai noturības zuduma formai, un no 0.30 līdz 15.73 apšuvuma noturības zudumam. Līdzīgi, kā cilindrisku čaulu gadījumā, zemā apšuvuma noturība pie pēkšņi pieliktas slodzes ir saistāma ar jutību pret ģeometriskajām nepilnībām un pēkšņi pieliktās slodzes izraisītajām svārstībām. Paneļa globālās noturības gadījumā, slodzes pēkšņa pielikšana nesamazina kritisko spēku tik dramatiski, jo globālo noturību ģeometriskās nepilnības ietekmē daudz mazākā mērā. Jāatzīmē, ka, atšķirībā no gludām čaulām, apšuvuma noturības zudums apskatīto paneļu gadījumā nenozīmē pilnīgu sabrukumu, jo, apšuvumam zaudējot noturību, paneļi saglabā pozitīvu stingumu. Vēl jo vairāk, ja apšuvums zaudē noturību pēkšņi pieliktas slodzes ietekmē, tas atgriežas sākotnējā līdzsvara formā, ja pieliktā slodze ir mazāka par statisko apšuvuma noturības kritisko slodzi. Tādējādi, šādas konstrukcijas ir noturīgākas pēkšņi pieliktas slodzes gadījumā.



12. att.

Noturības zuduma formu izmaiņas panelim Nr.1



13. att.

DLF -laika grafiki liektiem, ribotiem oglekļplasta paneliem
(a) – Panelis Nr. 1; (b) – Panelis Nr. 2; (c) – Panelis Nr. 3

SECINĀJUMI

Promocijas darbā skaitliski un eksperimentāli tika izpētīta gludu un ribotu kompozīto čaulu noturība pie dažāda veida īslaicīgām dinamiskajām slodzēm: pulsveida, pakāpeniski pieaugošas un pēkšņi pieliktas.

Pilnveidojot izgatavošanas un eksperimentālās metodes, ir izgatavotas un eksperimentāli pārbaudītas 35 dažādu izmēru cilindriskas stiklaplasta čaulas. Balstoties uz statistiski ticamu statiskās un dinamiskās noturības eksperimentu skaitu un validētu skaitlisko aprēķinu rezultātiem, iegūti šādi secinājumi:

I Eksperimentāli un skaitliski ir apstiprināta cilindrisko čaulu jutība pret ģeometriskajām nepilnībām. Pierādīts, ka šo nepilnību formas veidam ir daudz lielāka ietekme uz kritisko slodzi, nekā to amplitūdai.

II Ieteikts veikt reālu paraugu ģeometrisko nepilnību mērījumus, lai varētu precīzi skaitliski nomodelēt čaulas noturības zudumu un iegūtu ticamus rezultātus.

III Izstrādāta dinamiski slogotu cilindrisku kompozīto čaulu noturības eksperimentālo pārbaužu procedūra. Šī procedūra nodrošināja labu rezultātu atkārtojamību, ar 2.5% standartnovirzi, un vidējās eksperimentāli iegūtās kritiskās slodzes sakritību ar skaitliski iegūto 6% robežās, ar 95% ticamību.

IV Eksperimentālo pārbaužu metodoloģijas izstrādes laikā konstatēts, ka, lai veiktu precīzu cilindriskas čaulas noturības eksperimentu, kura rezultātus varētu izmantot aprēķina metožu validācijai, īpaša vērība ir jāpievērš stingri noteiktu robežnoteikumu nodrošināšanai un vienmērīgai slodzes izklidei.

V Eksperimentāli demonstrēts kritiskās slodzes pieaugums vienmērīgi dinamiski slogotiem kompozītajiem cilindriem, palielinoties slogošanas ātrumam. Eksperimentāli validēti skaitliskie aprēķini šo tendenci apstiprina.

VI Parādīts dinamiskā slogojuma veids, kuram visā diapazonā plānsienu kompozītajām konstrukcijām kritiskā slodze ir augstāka, nekā kritiskā slodze pie kvazistatiskā slogojuma.

VII Piedāvāta validēta kompozīto konstrukciju noturības aprēķinu metodika, kas ļautu izmantot dinamiskās noturības fenomena radīto svārstības sazināšanas potenciālu.

VIII Parādīts viskritiskākais dinamiskā slogojuma veids konstrukcijām, kas ir jutīgas pret sākotnējām ģeometriskajām nepilnībām, pie kura kritiskā slodze ir būtiski zemāka, nekā pie kvazistatiska slogojuma.

IX Demonstrēts, ka, pēkšņi pieliktas, bet ilgstošas slodzes gadījumā, konstrukcijas ģeometriskajām nepilnībām ir daudz mazāka ietekme uz tās noturību nekā pie citiem slogojuma veidiem.

REVIEW OF THESIS

Topicality of Thesis

The use of composites in aerospace, wind turbine, automotive and sports industries has been steadily increasing over the last three decades. Their high stiffness and strength characteristics make composites the material of choice in many applications requiring weight-efficiency. However, the composite structures still lack vast amount of knowledge that has been accumulated for traditional metal structures. Therefore, the composites have a weight-saving potential that could allow tailoring of light-weight structures to suit the consumer needs better.

Several areas have been identified which are not fully exploited and restrict potential improvement of weight-efficiency of composite structures: post-buckling capabilities, damage tolerance, imperfection robustness and also loading dynamics. Post-buckling and collapse of stiffened composite shells are being investigated in order to create reliable simulation tools and improve design guidelines. Research on the robustness of the composite shells is being performed to improve the obsolete knock-down factor approach. This outdated approach has been defined for metallic shells in the sixties, and updating it according to modern production methods and capabilities of modern composites present a significant potential. Different investigations show that in various cases of dynamic loading the buckling loads can be both higher and lower than the static buckling load. However, the current structural design procedures incorporate assumption of the loads as quasistatic, while maintaining reliability by applying conservative safety coefficients. Therefore, considering the load dynamics in the design procedure would lead to safer and more efficient structures.

A reliable analysis approach is needed in order to benefit from the weight-saving potential of dynamically loaded composite structures, while maintaining the reliability. The analysis approach has to be experimentally validated to be considered reliable. However, as it was concluded from the literature review, very few experimental results on dynamic buckling of composite shells have been published this far. Moreover, there are only some numerical studies where experimentally validated numerical models are used for simulation of the dynamic buckling behaviour of composite shells. Therefore, dynamic buckling of composite shells has been investigated experimentally and theoretically in this thesis. An experimentally validated approach has been developed for buckling analysis of dynamically loaded stiffened and unstiffened composite shells.

Aims of Thesis

The current design procedures for the composite structures, which are often subjected to highly dynamic loads, simplify the designing process by assuming the loads as quasistatic and applying conservative safety factors. Considering the loading dynamics would allow to produce lighter, cheaper and also more reliable composite structures for the future.

The aim of this thesis is the development and physical validation of reliable dynamic buckling and post-buckling analysis approaches suitable for engineering applications.

Research objectives

- Development of a stability analysis procedure for composite structures under the dynamic loading;
- Elaboration of a composite shell production method for experimental validation of the developed analysis procedure;
- Establishment of a testing procedure for composite shells under quasi-static and dynamic loads;
- Validation of the developed analysis approach with the experimental results;
- Experimental evaluation of the loading rate influence on buckling behaviour of the composite shells;
- Numerical evaluation of the dynamic loading type and duration influence on dynamic buckling behaviour of composite structures using the validated models.

Scientific novelty of Thesis

In present thesis, dynamic buckling of composite cylinders has been studied experimentally. To perform these experiments, a procedure has been established for static and dynamic buckling tests of cylindrical composite structures.

An approach for numerical modelling the buckling behaviour of cylindrical composite shells under static and dynamic loads has been elaborated. Non-linear finite element models of cylindrical GFRP shells have been created and validated against the results of static and dynamic buckling experiments.

The changes in imperfection sensitivity of cylindrical GFRP shells due to the eccentricity of loading have been evaluated. Buckling tests and simulations of these shells under axial and eccentric compression have been performed.

Thesis has revealed the influence of the loading type and duration on the buckling behaviour of unstiffened and stiffened shells. Buckling of cylindrical

GFRP shells and curved stiffened CFRP panels under various dynamic loadings has been studied using experimentally validated numerical models.

Practical value of Thesis

The established buckling testing procedure has been approbated at Riga Technical University. This testing procedure will allow further expansion of the research on buckling of composite structures under static and dynamic loads.

The developed analysis approach for the buckling simulations of stiffened and unstiffened composite shells has been validated with experimental results and can be applied for buckling analysis of thin-walled composite structures under static and dynamic loads e.g. sail boats, aircraft and wind turbines.

The loading conditions, which increase the buckling load, and the loading conditions, which decrease the buckling load, have been identified by means of the numerical studies. Therefore, a weight-saving potential has been found and reliability issues have been revealed for the improvement of the designing procedures.

Results presented for the defence of Thesis

- A static and dynamic buckling testing procedure for cylindrical composite structures;
- A database of experimental results on dynamic buckling of cylindrical GFRP shells;
- Numerical models of the cylindrical GFRP shells updated with measured imperfections and validated using the results of dynamic buckling experiments;
- Relation between the loading dynamics and the buckling behaviour of composite cylindrical shells and curved, stiffened panels.

Composition and volume of Thesis

Doctoral thesis contains 5 chapters, conclusions and references. Thesis volume includes 170 printed pages, 124 figures, 19 tables and references to the literature containing 146 publication titles.

Approbation and publications of Thesis

Results of this doctoral thesis have been reported and discussed at the following international conferences and scientific meetings:

- 27th ICAS Congress (Nice, France, 2010);
- IV European Conference on Computational Mechanics (Paris, France, 2010);
- Latvian National Committee of Mechanics meeting (Riga, Latvia, 2010);
- 51st RTU Scientific conference (Riga, Latvia, 2010);
- 50th RTU Scientific conference (Riga, Latvia, 2009);
- Mechanics of Composite Materials 2008 (Riga, Latvia, 2008);
- 20th Nordic Seminar on Computational Mechanics (Gothenburg, Sweden, 2007);
- 4th Conference on Strength, Durability and Stability of Materials and structures (Palanga, Lithuania, 2007).

The results of the thesis have been stated in 19 publications, 4 of which are cited in the EBSCO database and one is a *Springer Science+Business Media, Inc.* journal publication.

STRUCTURE OF THESIS

The flowchart of the research performed within this thesis is presented in Fig. 14 describing the interconnections between the research steps.

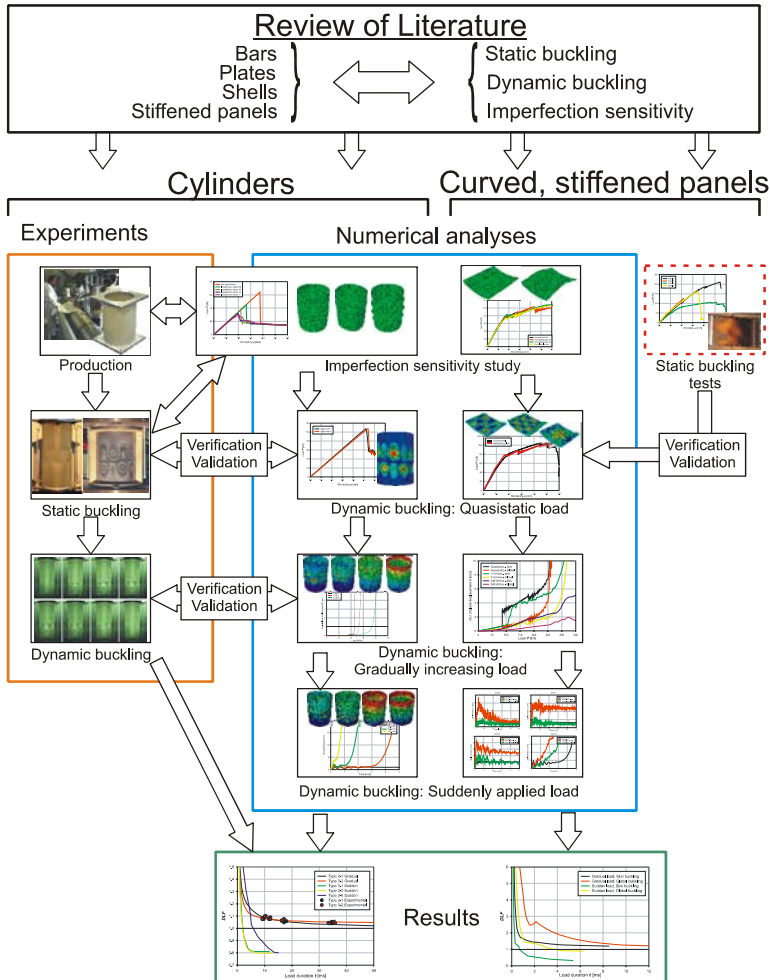


Fig. 14
Structure of the research described within this thesis

THESIS CONTENTS

In the first chapter, the literature review on buckling of thin-walled structures under various loadings is presented. It was found that most of the experimental investigations on dynamic buckling of shells have been performed on isotropic specimens, and many of them have been published in the sixties. In order to gather the accumulated knowledge on experimental investigations of dynamic buckling of shells, number of significant publications from the second half of the last century has been reviewed.

Early experimental results on buckling of cylindrical shells have been compared with the analytical solutions of the linear classical theory and experiments. A significant scatter among the experimental results has been outlined by many authors and experimental values were always much lower than theoretical ones. This discrepancy between the theoretical and experimental buckling loads led to the awareness of the imperfection sensitivity of the cylindrical shells. Since seventies, measurements of geometric imperfections have become an integral part of a properly carried out shell buckling tests, and majority of numerical studies consider the imperfections measured on real specimens.

Since the introduction of the composites in the sixties, investigations on buckling of composite cylinders have been performed. This early research concerns mostly filament-wound cylinders, which are relatively easy to produce, but difficult to model because of the specific fibre alignment. Development of pre-impregnation technology allowed improving the performance of composite structures by tailoring the stacking sequences more easily. The influence of the stacking sequence on the buckling load of a cylinder has been studied by Zimmermann (1996), and Geier et al. (1991) found stacking sequences which would increase the robustness of a shell. Degenhardt et al. (2010) had been using probabilistic and deterministic approaches to suggest improvements in the overly-conservative knock-down factor approach.

Extensive studies on buckling of composite cylinders under various loadings have been carried out at Politecnico di Milano, where sophisticated experimental methods have been elaborated by Giavotto et al. (1991) to obtain consistent loading and boundary conditions. This research has been extended by Bisagni and Cordisco (2006) by also investigating buckling and collapse of stiffened composite cylinders and assemblies of stiffened composite panels under compression, torsion and combined loadings.

With the development of supersonic aircraft, spacecraft and launch and re-entry vehicles, buckling of lightweight structures under dynamic loads gained significant interest. Early investigations have shown alterations in the buckling behaviour of structures if they are loaded at high loading rates. The effect of applying a load over a short time has been studied by Roth and Klosner (1964)

identifying a significant increase in the dynamic buckling stress with a reduction of loading duration. Humphereys and Zatlars (1965) performed experiments to verify the theory of Roth and Klosner (1964) and found a good correlation of the experimental and theoretical results. The early experimental methods for verification of the derived theories used blast loadings and were much more expensive and complicated comparing to the static buckling and still there is lack of experimental data on dynamic buckling phenomena. Besides, in case of dynamic loadings, it is more difficult to identify the buckling, as the dynamic buckling criteria are not as clear as for static buckling. Multiple criteria have been developed over the years and dynamic buckling criterion by Budiansky and Hutchinson (1964) is the most recognised. This criterion is based on plotting the maximum response measure of a structure versus a load parameter, and finding the load parameter at which the steepest rise of the response measure occurs.

Extensive research on dynamic buckling has been performed at the Israel Institute of Technology since eighties. Impact loads have been used in their experimental studies, and good correlation with theory has been achieved for simple structural elements. Some experimental results on dynamic buckling of columns and plates are presented by Ari-Gur et al. (1982), Weller et al. (1989), Abramovich and Grunwald (1995). The common finding in these investigations was that the buckling load is generally higher at shorter load durations, but it suddenly gets lower than the static buckling load when the load duration corresponds to half of the natural bending period of the structure. Buckling of aluminium cylindrical stringer stiffened shells under dynamic axial loading has been investigated both experimentally and numerically by Yaffe and Abramovich (2003). In the experiments, the load was introduced by a dropping mass and the dynamic buckling of the shell was observed; however, no test results were obtained to form a sound experimental database. The numerical results have shown that the dynamic buckling load of their numerical models is higher at shorter load durations, even when the load duration corresponds to the half of the natural bending period of the shell. However, the dynamic buckling load falls below the static buckling load when the load duration corresponds to the time that takes for a stress wave to travel from one end of the cylinder to the other and back.

Results of the literature review allowed identifying the main research goals, which are important for improvement of the weight-efficiency of composites structures by considering the dynamics of the load:

- Estimation of the imperfection influence on structural stability;
- Development and approbation of a dynamic buckling testing procedure;
- Development and experimental validation of a modelling methodology for dynamic buckling of thin-walled composite structures;
- Identification of the influence of various dynamic loading types and parameters on buckling behaviour of thin-walled composite structures.

In the second chapter, the materials and experimental methods used within the thesis have been presented. Taking into account the fact that no experimental results on dynamic buckling of composite shells have been published to date, the experimental methods and planning and specimen production have been described in detail. Specimen production technology has been elaborated delivering 35 glass fibre reinforced plastic (GFRP) cylindrical specimens. The production technology has been gradually improved through the research, and variety of glass fibre fabrics, resins and production technologies have been tested. The free length L of the prototyped cylinders varied from 400 to 700 mm and the inner radius R was either 150 or 250 mm. In order to apply thin shell theories in the analyses, the radius to the shell wall thickness ratio R/t has been chosen from 0.62 to 1.2 mm. All the specimens were designed to withstand the buckling deformations without significant damage accumulation, so they could be used for repetitive buckling tests.

Small coupon material mechanical property tests have been performed at RTU IMS according to the relevant ISO 527-4:1997 standard for laminates. Both flat composite plates, produced using the same technology and materials as the cylinders, and cut outs from cylinders have been used for coupon preparation.

A special attention has been given to the uniformity (or non-uniformity) of the applied load because, as outlined by many authors, it influences the buckling behaviour of the cylindrical shells significantly. The testing procedure has been gradually improved to address this issue. The first series of the cylinders had the edges reinforced by additional layers of GFRP. However, it was concluded that this was not enough to ensure the even load distribution, as the cylinders buckled at very low loads and had irregular buckling patterns. The second series of specimens had the edges potted into plywood plates, which improved the load distribution, as indicated by the increased buckling loads and buckling shape regularity for some specimens. On the downside, the deformations of the plywood plates due to humidity resulted in prestressed state of some of the specimens, which led to inconsistent results in those test series. Precisely machined aluminium plates have been used to ensure the even load distribution and consistent boundary conditions for last two series of specimens. The specimens from the final series are shown in Fig. 15.

A geometrical imperfection measuring set-up has been assembled to perform the imperfection scans of last two series of the specimens. The set-up consisted of rotating table for measuring geometry in circumferential direction and vertical axis for measuring in longitudinal direction. The radial imperfections were recorded using Keyence LK-501 CCD laser displacement sensor, attached to the vertical axis. It should be noted that only the external surface of the cylinder could be measured using this device, leaving the shell thickness variations unknown.

The last two series of the GFRP had from three to seven pairs of strain gauges, depending on the specimen, bonded in order to monitor the compressive and bending strains during the static and dynamic buckling tests. The strain measurements indicated that the load cell measurements become inaccurate in the dynamic tests and used for axial load estimations.

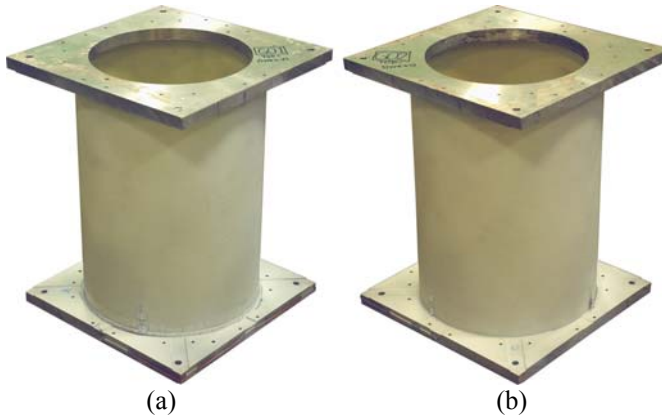


Fig. 15
GFRP cylinder specimens: Type 3-1 (a) and Type 3-2 (b)

Two distinct hydraulic testing rigs have been used for both static and dynamic buckling experiments. All of the specimens, except the third series, have been tested in the Instron 8802 loading frame pictured in Fig. 16. It has the maximum load capacity of 250 kN and the maximum velocity of the actuator about 190 mm/s. The MTS machine is similar, but smaller, with 100 kN capacity and maximum velocity of the actuator about 80 mm/s, and it has been used for testing the third series of specimens. The limited velocities resulted in very limited minimum load pulse durations, namely, 30 ms in case of the Instron test rig and 50 ms in case of the MTS.

Dynamic buckling experiments have been performed also using a drop tower. This method turned out to be less accurate; however, pulse durations of 12 ms could be achieved using this method. The simple drop-tower based dynamic buckling test setup consisted of the drop-tower columns and the dropping mass with the release mechanism, and a steel honeycomb insert between the mass and the specimen. The parameters of the load pulse were altered by changing the stiffness of the insert and the impact energy. The load-time and displacement-time histories have been estimated from the measurements of a load cell, accelerometer and strain gauges.

All numerical buckling simulations of the cylindrical GFRP shells and stiffened curved CFRP panels in this thesis was the ABAQUS/Explicit finite element code. ABAQUS is a general purpose finite element software package certified for aviation, with linear and non-linear, static and dynamic capabilities. ABAQUS/Explicit is based on the equations of motion approach and uses direct time integration, which makes it very efficient and especially suitable for simulation of non-linear dynamic processes, such as dynamic buckling. The linear capabilities of ABAQUS have also been used for linear buckling analyses of the models, finding the natural and eigenfrequencies and corresponding modes.

Results of static buckling tests of stiffened curved CFRP panels performed at Israel Institute of Technology and German Aerospace Centre within the European Commission 6th Framework Programme research project COCOMAT (Degenhardt et al., 2006) have been used for validation of the corresponding numerical models.

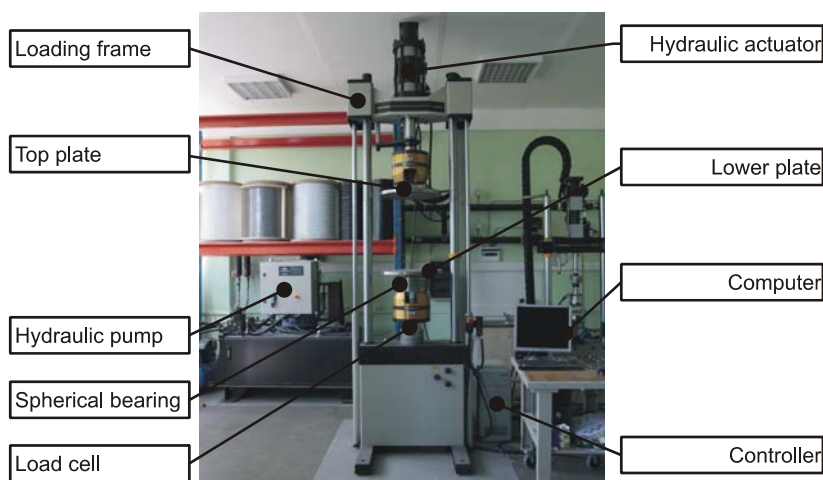


Fig. 16
Specimens of the 4th series

In the third chapter, static buckling of GFRP cylinders has been studied both experimentally and numerically. More than 250 static buckling experiments have been performed on total of 35 specimens. The results obtained with a single specimen during repeated tests were much more consistent than the results among nominally identical specimens, and the buckling loads were not necessarily decreasing with each consecutive test. In order to have multiple experimental results with identical structures, all the specimens have been tested repeatedly.

The first two series of GFRP cylindrical specimens resulted in great scatter between the experimental results, with 21% standard deviation of the buckling load

among nominally identical specimens. Gradual improvement in the specimen production technology and the testing methods led to the decreasing of standard deviation of buckling loads achieving only 2.5% for nominally identical specimens. However, the highest experimentally obtained buckling loads were only 65 % of the buckling loads numerically predicted for geometrically perfect shells thus confirming the imperfection sensitivity of the axially compressed cylinders.

Since a significant discrepancy between the experimental and numerical results has been observed both in terms of buckling loads and buckling shapes, a numerical study has been performed to evaluate the imperfection influence on the buckling behaviour of the cylinders under investigation. It revealed that adding eigenmode-shaped imperfections with amplitude $1/8$ of the wall thickness resulted in the drop of buckling load by 30%. Further increase of the imperfection amplitude until $1/1$ of the skin thickness decreased the buckling load to 45% of the buckling load of a geometrically perfect model. Almost no change in the buckling shape of the cylinders has been observed with the imperfection amplitudes up to $1/2$ of the skin thickness, but significantly different buckling mode shapes have been obtained once highest imperfection amplitude was considered. This study was extended further by experimental and numerical investigation of eccentrically compressed cylinders to see if the imperfection sensitivity changes when the eccentricity of loading is introduced. The static buckling experiments were repeated on the second series of the specimens, introducing the load with various eccentricities by displacing the specimens in relation to the spherical bearing. A general trend has been observed that the knock-down factor (the ratio of the buckling load of the imperfect structure to the theoretical buckling load of a perfect structure) increases with the increase of the eccentricity. This trend has been confirmed by the supporting numerical study where eigenmode-shaped imperfections were used.

The use of eigenmode-shaped imperfections in the numerical studies justified the discrepancy between the experimental and theoretical results. However, reasonable agreement between these results could only be obtained by adjusting the magnitudes of assumed imperfection shapes according to the test results. In order to validate the numerical modelling methodology for the GFRP cylinders, exact imperfection data of the test specimens was needed and the experiments had to be performed extremely carefully, so all the conditions of the test would be known and could be modelled. Therefore, imperfection measurement equipment has been assembled and used to measure the imperfections of the third and fourth series of the specimens. The measurement equipment has been operated manually, performing series of radial imperfection scans along the circumference with 7.5 mm steps, and with vertical steps of 7.5 mm. This measurement grid corresponds

to the finite element model used for numerical analysis and therefore the imperfect shape could be applied to the model directly, without employing any interpolation.

The imperfections measured on the third series of the specimens have been used to update the numerical models, and resulted in similar knock-down factors, despite the difference between the maximum mean deviations from the perfect shape: it was 0.52 mm for one of the specimens, and 0.14 mm for the other. This difference suggested that there are more and less significant imperfection shapes, therefore a numerical study aimed at separation the significant and insignificant component of the imperfections has been performed using this imperfection data. Each data set of imperfections on each longitudinal line of the measurement grid has been approximated by a straight line, and these lines formed the global component of the imperfections. The rest of imperfections were considered the local component. Updating the models of perfect shells with the global component of the imperfections resulted in drop of the buckling load by 9.7% and 2.5%, while updating the perfect models with the local imperfection component resulted in drop of buckling load by 36% and 32%, which is very close to the drop due to inclusion of the actual imperfection shape. Therefore, it is concluded that the magnitude of the imperfections itself is much less important than the imperfection shape, and the imperfection shapes where the shell's wall is always straight in longitudinal direction are less crucial than others.

Buckling initiation and development of the buckling shape has been observed by recording the static buckling experiments performed on the third series of specimens using a high-speed camera with a frame rate of 1000 frames per second. The buckling shape development during one of the static buckling experiments is presented in Fig. 17.

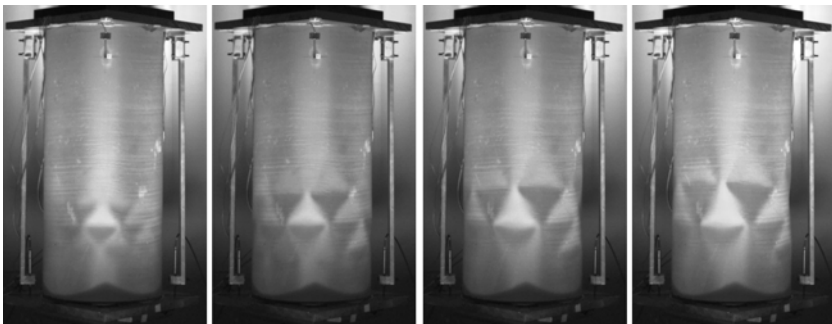


Fig. 17

Development of a buckling shape during static test

The experience gained with production and testing of the previous specimen series has been used to produce the final series of the GFR, paying attention to

details that potentially affect buckling behaviour of the cylinders, such as alignment and planarity of the edge plates. The initial imperfections of the specimens have been measured before performing the buckling tests. The careful production and testing of specimens and imperfection data measurements allowed producing very accurate numerical models of the specimens and the average experimental buckling load was within 6% of ABAQUS/Explicit finite element analysis results with 95% confidence. The accordance of the buckling modes experienced during the experiment and the numerically predicted ones, as presented in Fig. 18, also confirm the accuracy of numerical simulations.

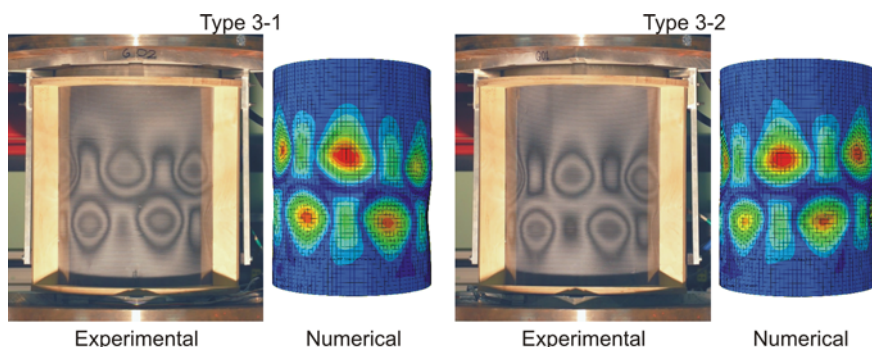


Fig. 18

Correlation of buckling shapes between experiments and numerical simulations

In the fourth chapter, dynamic buckling of GFRP cylindrical shells has been studied. More than 300 dynamic buckling experiments with load pulse durations from 12 to 120 ms have been performed on cylindrical GFRP shells using hydraulic load frames and a drop tower, and dynamic load factor (DLF, ratio of dynamic buckling load to static buckling load) has been calculated for each test.

Dynamic buckling experiments on the second series of the specimens have been performed using the Instron testing rig providing the load pulse durations from 30 ms to 120 ms. The DLFs from 0.98 to 1.46 have been obtained indicating a general tendency of increase of the DLF along with increase of loading. However, the large scatter of the results on these specimens must be considered when evaluating these results.

Numerical models updated with eigenmode-shaped imperfections have been tuned using the experimental results obtained with the specimens that gave the most consistent results within the second series to perform a numerical study on dynamic buckling of the GFRP cylinders at loading rates much higher than could be obtained using the Instron hydraulic machine. For shorter loading durations it is difficult to determine the critical load for a displacement-controlled simulation and therefore in order to study the dependency of DLF on the loading rate, the load is

applied at given rates, and the out-of-plane displacements are monitored. From these data, a Budiansky-Hutchinson plot (Budiansky and Hutchinson, 1964) is constructed for each simulation, and the load is considered critical when the maximum out-of-plane displacement of a node reaches certain critical value. This arbitrary tolerance has been selected to exclude oscillations caused by dynamic loading. The obtained DLF versus time plots are presented in Fig. 19 in two different scales along with the relevant experimental results. It is evident that the DLF grows almost consistently with increase of the loading rate and decrease of the loading time. However, slight drops in the DLFs can be observed in all the three curves at load durations in the interval from 0.5 ms to 1 ms. This time roughly corresponds to the time which is necessary for a stress wave to travel through the specimen from one end to the other and back. According to Abramovich and Yaffe (2003) $DLF < 1.00$ can be expected at such load durations, yet, it has not been observed in this investigation.

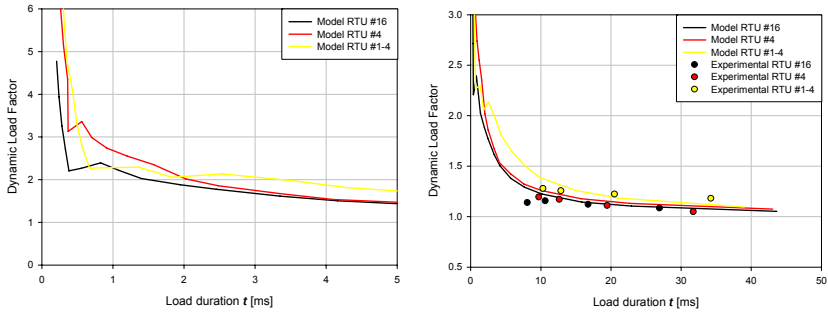


Fig. 19
DLF versus time plots obtained with the second series of specimens

An experimental study on dynamic buckling of CFRP cylinders has been performed on the third series of the specimens in Politecnico di Milano. Hydraulic testing rig and a drop tower have been used to investigate the buckling behaviour of the cylinders at various loading rates and load durations. The hydraulic testing rig provided relatively clear testing conditions and accurate load and displacement measurements, but the maximum velocity of the actuator limited the loading rate of the specimens to 0.8 kN/ms. Nevertheless, DLFs from 0.94 to 1.21 have been obtained, and a general trend of increase of the DLF with increase of the loading rate has been observed. The experiments were filmed using a high-speed camera at a frame rate of 1000 frames per second and the development of the buckling shape (Fig. 20), where it can be observed that the buckling shape development is very similar to the one observed during the static tests (Fig. 17) at the given loading rates.

The same specimens have been subjected to dynamic buckling tests in a drop tower, which allowed achieving of loading rates up to 10 kN/ms for the same specimens and load pulse durations from 12 ms to 33 ms. Inserts of varied stiffness between the dropping mass and the specimen assembly have been used to control the load magnitude and duration in the drop-tower tests. The higher load magnitude has been achieved by stiffer inserts and longer duration by softer inserts in combination with greater impact energy. DLFs from 0.82 to 1.41 have been obtained during the tests on the two specimens of the third series, and the scatter plots of DLF versus load durations are presented in Fig. 21. The $DLF < 1.00$ has been obtained only in case of one of the specimens (Type 2-1), at the lowest load durations, and the results with $DLF > 1.00$ seem independent of the load duration. The results of the other specimen (Type 2-2) indicate increase of the DLF with the increase of the load duration. It is somewhat contradicting the results obtained in this thesis using the hydraulic testing rigs, yet, the significant differences in the two testing methods have to be considered.

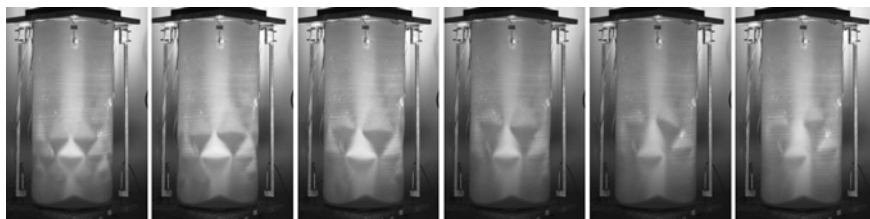


Fig. 20

Development of a buckling shape during dynamic test

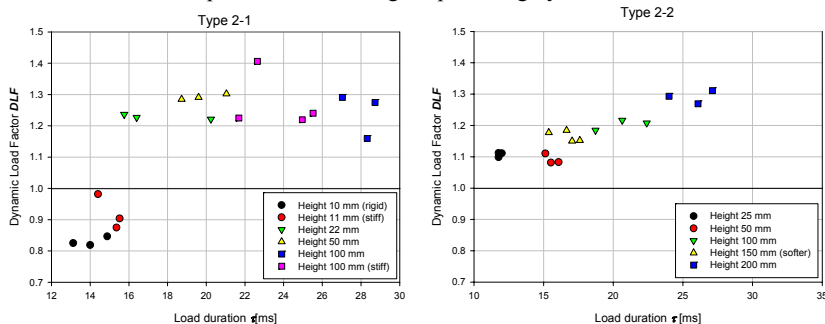


Fig. 21

DLF versus load duration plots obtained with the third series of specimens

The dynamic buckling experiments on fourth series of specimens have been carried out only using the hydraulic machine because the results of the drop tower tests were inaccurate and ambiguous. This series of the specimens that were used

to validate the numerical models of the CFRP cylindrical shells have been subjected to dynamic buckling tests at RTU IMS. The loading rates of up to 5 kN/ms have been achieved and the DLFs from 1.04 to 1.10 have been obtained. The DLF versus time duration results are presented in Fig. 22. The experiments have been simulated using the numerical models of the specimens for validation purposes. The difference between the numerical and experimental dynamic buckling loads was within 1% for one and within 4% for the other specimen. Dynamic buckling of the composite cylinders has been studied further using the validated numerical models of real specimens at loading rates from 1 kN/ms to 1350 kN/ms. The numerical results show almost consistent increase of the DLF from 1.02 to 4.48 as the loading duration until the buckling decreases. There is a slight inconsistency in the increase of the DLF for both models around 0.6 ms, which roughly corresponds to a 1/4 natural bending period of the cylinders. The buckling shapes gradually transform from lower-order modes similar to the static buckling modes into higher order modes with more waves along the length and circumference and then into almost axisymmetric buckling mode. The changes in buckling shape for one of the models are presented in Fig. 23. Buckling of the cylindrical GFRP shells under sudden loads has also been studied. A consistent increase of DLF has been observed as the load duration decreases, and a similar buckling mode shape progression as in case of gradually applied load. However, the lowest DLFs obtained in such case were 0.80 and 0.81. For comparison, dynamic buckling under sudden loads has been studied on the same models, but without inclusion of initial geometrical imperfections. The lowest buckling load was only 0.45 % higher in this case due to the harmonic response of a cylinder to the suddenly applied load which acts as initial geometric imperfections, thus making the cylinder less imperfection sensitive and decreasing the buckling load compared to the static buckling load. The numerical DLF versus load duration curves obtained using the validated numerical models are presented in Fig. 22 in two different scales along with the experimental results.

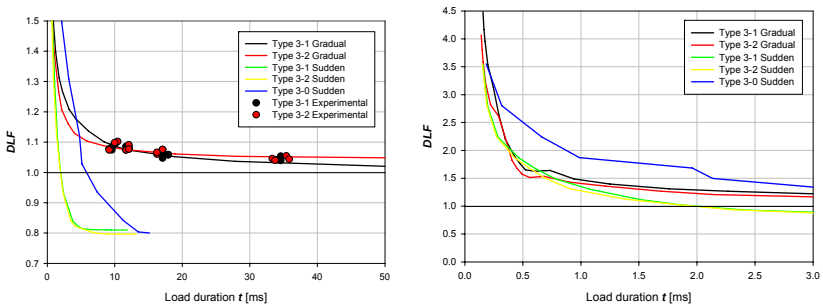


Fig. 22
DLF versus time plots obtained with the second last of specimens

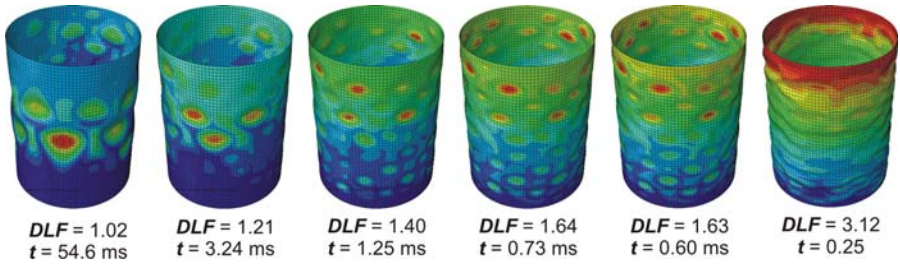


Fig. 23

Buckling shapes obtained at different loading rates

The fifth chapter is dedicated to the research of static and dynamic buckling of stiffened curved CFRP panels. Numerical models of three different curved, stiffened CFRP panels which were produced and tested within EC Framework Programme research project COCOMAT have been elaborated using ABAQUS finite element package. The numerical simulations have been performed using ABAQUS/Explicit solver and the results have been verified and validated using the available experimental data. The experimentally and numerically obtained load-shortening curves of the three panels are presented in Fig. 24. Since this study focuses on the elastic buckling behaviour of the structures, no damage models have been implemented.

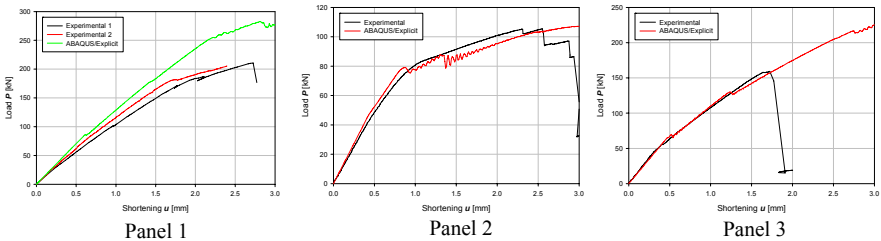


Fig. 24

Validation of numerical models of the stiffened curved CFRP panels
(a) – Panel 1; (b) – Panel 2; (c) – Panel 3

A numerical imperfection sensitivity study has been performed using the experimentally validated models of curved, stiffened CFRP panels. Artificial, eigenmode-shaped imperfections with magnitudes up to skin thickness of the panels have been used and knock-down factors from 0.71 to 0.98 and for skin buckling load. All of the panels had a certain imperfection shape that increased the global buckling load, up to 112 % of a panel with a reference shape. While the panels with simply supported unloaded edges had nearly no imperfection

sensitivity in global buckling mode, featuring knock-down factors from 0.96 to 1.12, the panel with unsupported edges exhibited significant imperfection sensitivity with lowest obtained knock-down factor of 0.70. Nevertheless, inclusion of these artificial imperfections did not alter the load-shortening curves significantly and due to the lack of imperfection data of the tested panels no imperfections were used during the numerical study of their dynamic buckling behaviour.

Following the methodology used for cylindrical CFRP shells, buckling behaviour of stiffened curved CFRP panels under gradually increasing and suddenly applied loads has been studied numerically on the models validated using experimental static buckling results. Gradually increasing loads from 7 kN/ms to 2700 kN/ms have been considered and Budiansky-Hutchinson plots have been used to find the buckling loads. An adapted approach similar to Budiansky-Hutchinson criterion has been used in case of suddenly applied load. The displacements were plotted against time, not the load, because load is a constant in this case, and the critical load duration is considered the time when the out-of-plane displacements exceed the defined tolerance. The same out-of-plane displacement tolerances have been used to find the critical load durations at each value of suddenly applied load in order to have a reasonable comparison of DLF-load duration curves for gradually increasing and sudden loading.

DLFs from 1.12 to 9.30 have been obtained for skin buckling mode and from 0.90 to 12.65 for global buckling mode in case of gradually applied load. The $DLF < 1.00$ has been observed in case of only one of the panels. The DLF-load duration curves for the three panels are presented in Fig. 25., where Separate curves for Skin buckling and Global buckling modes and for gradually and suddenly applied loads are given. The augmentation of the DLFs along with increase of the loading rate is evident as in case of cylindrical shells, however, there are more inconsistencies and slight drops in the curves. Usually, but not always, these drops occurs at load durations where the buckling modes change. Examples of such mode changes are given for Panel 1 in Fig. 26.

The buckling behaviour of stiffened CFRP panels under suddenly applied loads with magnitudes from 15 kN to 1350 kN has also been studied using the same models. DLFs from 0.88 to 8.98 have been observed for global buckling mode and from 0.30 to 15.73 for the skin buckling mode.

Similarly as in case of cylindrical shells, the low DLFs for the skin buckling mode arise from the imperfection sensitivity of the buckling load in this mode, and the harmonic response of the panels to the sudden load. The lowest DLFs of the global buckling mode are higher because of the lower imperfection sensitivity in the global buckling mode. However, the low skin buckling DLFs do not mean catastrophic failure of the stiffened CFRP panels in case of suddenly applied load because of the stable post-buckling behaviour of the panels. If a sudden load,

which is lower than static skin buckling load, is applied to the structure and skin buckling occurs, the stiffened panel regains the equilibrium shape for the corresponding static load. Therefore such designs are more tolerant to suddenly applied loads.

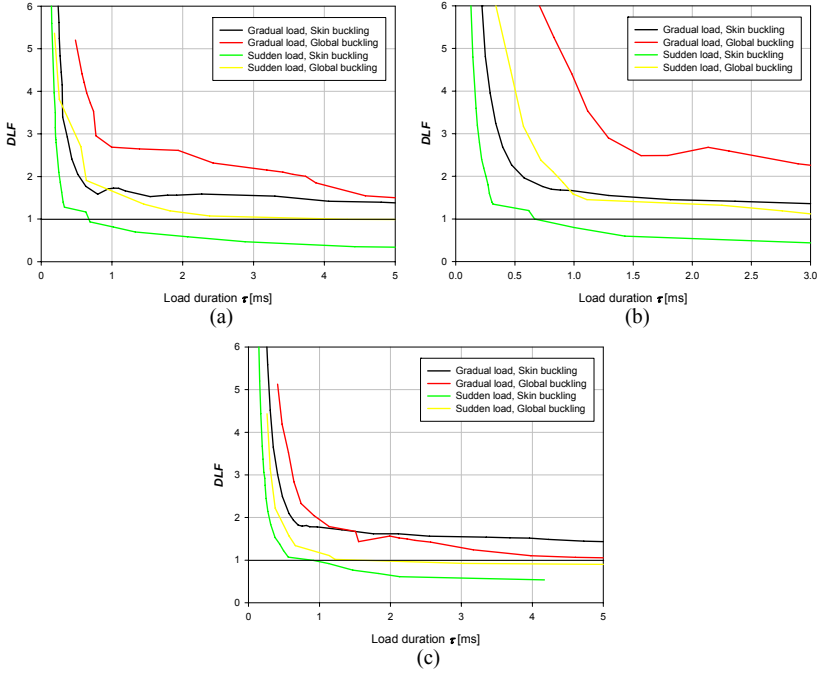


Fig. 25
DLF versus time plots for the curved stiffened CFRP panels
(a) – Panel 1; (b) – Panel 2; (c) – Panel 3

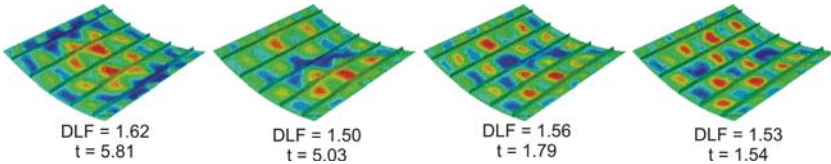


Fig. 26
Buckling shapes changes near drops in DLF-time plots

CONCLUSIONS

Dynamic buckling behaviour of unstiffened and stiffened composite shells under pulse, gradually increasing and suddenly applied loads has been studied numerically and experimentally within this thesis.

A total number of 34 cylindrical GFRP shell specimens with various dimensions have been produced while developing the fabrication and buckling testing technologies. Based on the statistically credible number of static and dynamic buckling tests and results of experimentally validated analyses, the following conclusions have been made:

I The high sensitivity of cylindrical shells to the geometrical imperfections has been confirmed. It has been demonstrated that the imperfection shape has greater influence on the buckling load than its magnitude.

II It is recommended to perform the geometric imperfection measurements on real shell specimens in order to model the buckling of a shell accurately and obtain reliable results.

III A testing procedure for static and dynamic buckling of cylindrical shells has been developed. This procedure provided consistent experimental results with 2.5% standard deviation and ensured the accordance of experimental and numerical results within 6% with a confidence of 95%.

IV It was found during the development of this procedure that particular attention has to be paid to assure strictly consistent boundary conditions and load distribution in order to obtain accurate results that could be used for the validation of the numerical methods.

V It has been demonstrated experimentally that the buckling load of cylindrical GFRP shells increases with the increase of the loading rate. This trend has been confirmed numerically using the validated finite element models.

VI A loading type has been identified which increases the buckling load of the composite structures compared to the static buckling load across the whole dynamic loading range.

VII A modelling approach has been suggested for dynamic buckling simulations of composite structures to take advantage of the weight-saving potential created by the dynamic buckling phenomenon.

VII A worst-case dynamic loading type has been identified which lowers the buckling load of imperfection sensitive structures significantly compared to the static buckling load.

IX It has been demonstrated that in case of suddenly applied load of infinite duration, the composite cylindrical structures are less sensitive to the initial geometrical imperfections than in cases of other loading types.

LITERATŪRAS SARAKSTS/REFERENCES

- Abramovich H., Grunwald A. Stability of axially impacted composite plates. *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 151-158.
- Ari-Gur J., Weller T., Singer J. Experimental and Theoretical Studies of Columns under Axial Impact. *International Journal of Solids and Structures*, Vol.18, 1982, pp. 619-641
- Bisagni C., Cordisco P. Post-buckling and collapse experiments of stiffened composite cylindrical shells subjected to axial loading and torque. *Composite Structures*, Vol. 73, 2006, pp. 138-149.
- Budiansky B., Hutchinson J.W. Dynamic buckling of imperfection sensitive structures. *Proc International Congress of Applied Mechanics*, Munich, Germany, Vol. 11, pp 637-651, 1964
- Degenhardt R., Kling A., Bethge A., Orf J., Karger L., Zimmermann R., Rohwel K., Calvi A. Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells. *Composite Structures*, Vol. 92, 2010, pp. 1939-1946.
- Degenhard R., Rolfes R., Zimmerman R., Rohwer K. COCOMAT – improved material exploitation of composite airframe structures by accurate simulation of postbuckling and collapse. *Composite Structures*, Vol. 73, 2006, pp. 175-178.
- European Standard / Plastics – Determination of tensile properties – Part 4 (EN ISO 527-4:1997)
- Geier B., Klein H., Zimmermann R. Buckling Tests with Axially Compressed Unstiffened Cylindrical Shells Made from CFRP. *Proceedings of Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air* - Lyon, September 1991, pp. 498-507
- Giavotto V., Poggi C., Castano D., Guzzetti D., Fezzani M. Buckling Behavior of Composite Shells under Combined Loading. *Proceedings of 17th European Rotorcraft Forum* - Berlin, September 1991, pp. 84-1 – 84-13.
- Humphreys, J.S., Zatlars J. Experiments on the Dynamic Response of Shells Under Shock Wave Loading. *RAD-S330-T-243*, February 25, 1965
- Roth R.S., Klosner J.M. Nonlinear response of cylindrical shells with initial imperfections subjected to dynamic axial loads. *Proc. Aerospace Sciences Meeting*, New York, N.Y., January 20-22, 1964, paper no. 64-76.
- Weller T., Abramovich H., Yaffe R. Dynamic buckling of beams and plates subjected to axial impact. *Computers and Structures*, Vol. 32, Nos. 3-4, 1989, pp. 835-851.
- Yaffe R., Abramovich H. Dynamic buckling of cylindrical stringer stiffened shells. *Computers and Structures*, Vol. 81, 2003, pp. 1031-1039
- Zimmermann R. Buckling Research for Imperfection Tolerant Fiber Composite Structures. *Proceedings of Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing - Noordwijk*, The Netherlands, March 1996, pp. 411-416.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS/LIST OF PUBLICATIONS

1. Eglitis E., Kalnins K., Ozolinsh O. The influence of loading eccentricity on buckling of axially compressed imperfect composite cylinders. *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 46, 2010, pp. 483-492.
2. Eglitis E., Kalnins K., Bisagni C. Study on buckling behaviour of laminated shells under pulse loading. *Proc. International Council of the Aeronautical Sciences 2010 Congress*, Nice, France, September 19-24, 2010, 8 p. (CD edition)
3. Eglitis E., Bisagni C., Kalnins K., Ozolinsh O., Dzelzitis K. Dynamic buckling of axially impacted cylindrical composite shells. *Abstracts IV European Conference on Computational Mechanics*, Paris, France, May 16-21, 2010, 2 p. (available online at <http://www.eccm2010.org>)
4. Eglitis E., Kalnins K., Ozolinsh O., Teters G. An experimental and numerical study on the dynamic buckling of cylindrical composite shells. *Abstracts XV International Conference Mechanics of Composite Materials*, Riga, Latvia, May 26-30, 2008, p. 76.
5. Eglitis E., Kalnins K., Ozolinsh O. Experimental and numerical study on buckling of axially compressed cylinders. *Scientific proceedings of RTU, section "Construction science"*, 2nd series, 10th issue, 2009, pp. 33-49.
6. Eglitis E., Kalnins K. Benchmarking of FE post-buckling analysis of stiffened composite panels with experimental validation. *Proc. of 4th Conference on Strength, Durability and Stability of Materials and structures*, Palanga, Lithuania, September 11-13, 2007, pp. 32-38.
7. Eglitis E., Kalnins K., Ozolinsh O., Rikards R. Numerical study of geometrical imperfection response on composite cylinders under axial loading. *Proc. of 20th Nordic Seminar on Computational Mechanics*. Gothenburg, Sweden, November 23-24, 2007, pp. 101-104.
8. Eglitis E., Kalnins K., Ozolins O. The influence of loading eccentricity on buckling of axially compressed imperfect composite cylinders. *Abstracts XVI International Conference on Mechanics of Composite Materials*, Riga, Latvia, May 24-28, 2010, p. 64.
9. Eglitis E., Ozolinsh O., Gluhih S., Barkanov E. Finite element buckling analysis of stiffened composite panels. *Scientific proceedings of RTU, section "Construction science"*, 2nd series., 7th issue, 2006, pp. 105-112.
10. Barkanov E., Gluhih S., Ozolinsh O., Eglitis E., Almeida F., Bowering M.C., Watson G. Optimal weight design of laminated composite panels with different stiffeners under buckling loads. *Proc. International Council of the Aeronautical Sciences 2010 Congress*, Nice, France, September 19-24, 2010, 8 p. (CD edition)

11. Barkanov E., Gluhih S., Ozolinsh O., Eglitis E., Almeida F., Bowering M.C., Watson G. Optimal weight design of composite lateral wing upper covers. *Proc. of 29th Annual International Scientific-Practical Conference and Accompanying Exhibition "Composite Materials in the Industry"*, Yalta, Ukraine, June 1-5, 2009, pp. 349-352.
12. Barkanov E., Gluhih S., Ozolinsh O., Eglitis E., Almeida F., Bowering M., Watson G. Optimal design of composite lateral wing upper covers based on non-linear buckling analysis. *Proc. of the 9th International Conference on Computational Structures Technology*, Athens, Greece, September 2-5, 2008, pp. 295-308.
13. Kalnins K., Bisagni C., Rikards R., Eglitis E., Cordiso P., Chate A. Metamodels for the optimization of damage tolerant composite structures. *Proc. of 26th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Anchorage, Alaska, USA, September 14-19, 2008, 7 p. (CD edition)
14. Kalnins K., Bisagni C., Abramovich H., Cordiso P., Eglitis E., Rikards R. Metamodels for optimum design of composite stiffened structures under torsion loading. *Proc. of 48th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences*, Tel Aviv/Haifa, Israel, February 27-28, 2008, 4 p. (CD edition)
15. Kalnins K., Auzins J., Janushevskis J., Janushevskis A., Eglitis E., Rikards R. Sequential metamodeling for optimization of stiffened composite structures. *Proc. of 7th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. Seoul, May 21-25, 2007, pp. 1145-1150.
16. Kalnins K., Eglitis E., Jekabsons G., Rikards R. Metamodels for optimum design of laser welded sandwich structures. *Proc. of International Conference on Welded Structures*, Miskolc, Hungary, April 24-26, 2008, pp. 119-126.
17. Ozolinsh O., Dzelzitis K., Eglitis E. Experimental Evaluation of Damage Influence on Buckling Performance of Stiffened CFRP Shells. *Scientific proceedings of RTU, section "Construction science"*, 2nd series, 10th issue, 2009, pp. 79-92.
18. Jekabsons G., Kalnins K., Eglitis E. Polynomials in metamodeling of glass fibre bar stability. *Scientific proceedings of RTU, section "Computer science"* 5th series, 24th issue, 2008, pp. 150-158.
19. Kalnins K., Jekabsons G., Janushevskis J., Eglitis E., Rikards R. Different approximation functions in surrogate modelling of sandwich structures. *Optimization and Engineering*, 11 lpp. (in review)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts Rīgas Tehniskās universitātes (RTU-P03) Cietvielu mehānikas un Biomehānikas apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē, Rīgā, Kaļķu ielā 1, 119. auditorijā 2011.gada 23. martā pl. 14:00.

Adrese: Āzenes iela 16, LV-1048, Rīga, Latvija
Tālr.: +371 67089164, Fakss: +371 67089254

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Vācijas Kosmosa aģentūras pētniecības centra vadošais pētnieks
Dr. Rihards Degenhardts

Rīgas Tehniskās universitātes profesors
Dr. hab. Felikss Bulavs

Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūta vadošais pētnieks
Dr. Andrejs Aņiskēvičs

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kurš iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Edgars EGLĪTIS.....(paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā un sastāv no ievada, 5 nodaļām, secinājumiem un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 170 lapaspuses, 124 zīmējumi, 19 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 146 nosaukumus.

