

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Mantas Bigenis

**SPARNO LONŽERONO PAGAMINTO IŠ KOMPOZITINIŲ
MEDŽIAGŲ RESURSO TYRIMAS**

Baigiamasis magistroprojektas

Vadovas

Lekt. Nerijus Baublys

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**SPARNO LONŽERONO PAGAMINTO IŠ KOMPOZITINIŲ
MEDŽIAGŲ RESURSO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (621E20001)

Vadovas

Lekt. Nerijus Baublys

Recenzentas

Lekt. dr. Darius Mažeika

Projektą atliko

Mantas Bigenis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS KATDERA

Suderinta:

2015 m. vasario mėn. 6 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Išduota studentui: *Mantas Bigenis*

1. Darbo tema: „Sparno lonžerono pagaminto iš kompozitinių medžiagų resurso tyrimas“
„Investigation of service life of wing’s spar made of composite materials“

Patvirtinta: 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2

2. Darbo tikslas:

Išanalizuoti reikalavimus keliamus tipiniam sklandytuvo sparno lonžeronui atliekant bandymus resurso nustatymui ir išplėtimui.

3. Darbo uždaviniai ir reikalavimai:

- apžvelgti kompozitines medžiagas naudojamas aviacijoje;
- išanalizuoti ir palyginti įvairių orlaivių elementų apkrovų nustatymo būdus;
- išanalizuoti ir palyginti įvairių orlaivių resurso bandymo būdus;
- įsigilinti į orlaivių sertifikavimo ir standartizavimo reikalavimus.

4. Darbo konsultantai (nurodant projekto skyrius)¹: Nėra.

5. Užduoties išdavimo terminas: 2015 m. vasario mėn. 6 d.

Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 m. gegužės mėn. 29 d.

Vadovas:

_____ (vardas, pavardė)

_____ (parašas)

Užduotį gavau:

_____ (studento vardas, pavardė)

_____ (parašas)

¹ Esant reikalui, suderinus su katedros vedėju

Bigenis M. „Sparno lonžerono pagaminto iš kompozitinių medžiagų resurso tyrimas“ *Sausumos transporto inžinerijos magistro* baigiamasis projektas / vadovas lekt. Nerijus Baublys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Kaunas, 2015. 60 p.

SANTRAUKA

Tobulėjant transporto technikai, vis plačiau yra naudojamos kompozicinės medžiagos, nes jos tenkina nuolat didėjančius reikalavimus. Konstrukcinės medžiagos žymia dalimi sąlygoja techninės pažangos vystymąsi. Nuolat atsirandančios naujos medžiagos sudaro galimybes priimti naujus techninius sprendimus ir taikyti naujas gamybos technologijas. Daugumą šiuolaikinių konstrukcinių medžiagų sudaro kompozitai. Kompozitai – tai heterogeninės sistemos gaunamos iš dviejų ar daugiau komponentų. Šiandien šios medžiagos naudojamos įvairiuose srityse, pradedant butine technika ir baigiant įvairios paskirties skraidymo aparatais.

Didėja kompozicinių konstrukcijų panaudojimas aviacijoje dėl savų ypatingų savybių. Plačiai naudojama hibridinė kompozicinė medžiaga, sudaryta iš plonų lakštų ir tarpinių iš polimerinės kompozicinės medžiagos. Šią medžiagą sudaro termoreaktyvinės klijuojančios ir termoplastinės rišamosios medžiagos, armuotos didelio stiprumo stiklo pluoštu. Šias medžiagas panaudojus vietoj monolitinių aliuminio lakštų, konstrukcija sumažėja 15-40%, padidėja konstrukcijos patikimumas, atpinga eksploatacija. Ši medžiaga naudojama lėktuvų fiuzeliažams, sparnams gaminti, ja dengiamos durys, liukai. Tačiau tokių konstrukcijų gamyba yra sudėtinga. Gamyba sudaryta iš daugeliu sudėtingų procesų, pakeitimas vieno iš proceso etapų gali pakeisti gatavos konstrukcijos mechanines savybes. Dėl aukštų saugos reikalavimų toks sudėtingas gamybos procesas reikalauja sudėtingų kontrolės metodų. Eksploatavimo metų daugelis orlaivio mazgų yra apkraunami didelėmis jėgomis.

Kiekvieno orlaivio išskridimų (skrydžių, pakilimų) dažnis labai skiriasi, todėl kiekvieno lėktuvo apkrovos yra pastoviai registruojamos, kaupiama informacija apie jas ir duomenys apie kiekvieno orlaivio apkrovas galima gauti bet kuriuo metu. Lygiai tas pats daroma ir su sklandytuvais.

Atliekant apkrovų bandymus yra sužinoma kuriuose vietose yra įtrūkimai ir koku greičiu jie plinta, žinoma kokie būdai taikomi pažeidimams išvengti, tai įgalina nustatyti įtrūkimų metalinėse konstrukcijose atsiradimo tikimybę daug anksčiau, nei įtrūkimai pradeda rasti bei šią informaciją užfiksuoti sertifikavimo dokumentuose.

SUMMARY

With development of transport equipment, there is increasing use of composite materials, because they meet the constantly increasing requirements. The composite materials largely lead to development of technical progress. Constantly appearing new materials make it possible to introduce new technical solutions and use of new technologies. Most modern construction materials consist of composites. Composites are heterogenic systems derived from two or more components. Today, these materials are used in various fields, ranging from household appliances and multi-purpose flying machines.

The use of the composite structures in aviation is growing because of its own special features. A hybrid composite material consisting of thin sheets and intermediates of the polymeric composite material is widely used. This material consists of thermoset adhesive and thermoplastic binder material, reinforced with high-strength glass fiber. The use of these substances instead of monolithic aluminum sheets leads to reduction in structure from 15 to 40%, an increase of reliability of the structure, and cheaper operation price. This material is used to produce aircrafts fuselage and wings, cover the doors and hatches. However, production of such constructions is challenging. Manufacturing consists of many complex processes, replacement of one of the stages in the process may change mechanical properties of the finished design. Because of high safety requirements such complex production process requires complex control methods. During operation most aircraft parts are loaded with high forces.

Frequency of each aircraft take-offs (flights, take-offs) is very different, so load of each airplane is continuously recorded, with information on them, and the data on each aircraft load can be obtained at any time. Exactly the same thing is done with gliders, too.

The load tests enable to detect places where the cracks are and how fast they spread; it is known what techniques are used to prevent infringements, and this enables to identify the probability of occurrence of cracks in metal structures long before the cracks begin to appear and to record the data in certification documents.

However, completely different conditions are in the case of modern sports airplanes and gliders. They are used for various purposes (training, training flights, tourism, aerobatic flights) and their flight frequency is different, the resulting loads are not recorded.



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Mantas Bigenis

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija (621E20001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Sparno lonžerono pagaminto iš kompozitinių medžiagų resurso tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 29 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Manto Bigenio** baigiamasis projektas tema „Sparno lonžerono pagaminto iš kompozitinių medžiagų resurso tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

Įvadas	6
1. Šiuolaikinės kompozitinės medžiagos	8
1.1. Kompozitinės medžiagos, armuotos siūlais ar pluoštu	10
1.2. Sluoksniuotosios kompozitinės medžiagos	11
1.3. Kompozitai su anglies matrica	12
1.4. Kompozitinių konstrukcijų formavimas	15
1.5. Kompozitinių medžiagų taikymas aviacijoje	18
2. Nuovargio tyrimo vystymasis	20
2.1. Apkrovų spektro registravimas ir paruošimas bandymams	20
2.2. Sklandytuvų sertifikavimo reikalavimų apžvalga	24
3. Nuovargio prognozavimo teorija	27
3.1. Nuovargio skaičiavimas nesimetriniuose cikluose	27
3.2. Apkrovų sekos ir blokinio apkrovimo poveikiai nuovargio reakcijai kompozituose	35
3.3. Nuovargio pažeidimo modelio schema	39
4. Resurso apibūdinimo metodika remiantis tyrimais ir eksploatacija	42
4.1. Apkrovų pasikartojimo nustatymas	42
4.2. Sklandytuvo nuovargio tyrimai	43
4.3. Pradinio resurso nustatymas ir išplėtimas	44
5. Sklandytuvo sparno lonžerono stiprumo ir ilgaamžiškumo tyrimai	49
5.1. Bandomojo lonžerono skaitinio modelio sudarymas BEM	49
5.2. Bandomojo lonžerono statinio bandymo rezultatai	52
6. Išvados	60
7. Literatūros sąrašas	61

Ivadas

Tobulėjant transporto technikai, vis plačiau yra naudojamos kompozitinės medžiagos, nes jos tenkina nuolat didėjančius reikalavimus. Konstrukcinės medžiagos žymia dalimi sąlygoja techninės pažangos vystymąsi. Nuolat atsirandančios naujos medžiagos sudaro galimybes priimti naujus techninius sprendimus ir taikyti naujas gamybos technologijas. Daugumą šiuolaikinių konstrukcinių medžiagų sudaro kompozitai. Kompozitai – tai heterogeninės sistemos gaunamos iš dviejų ar daugiau komponentų. Šiandien šios medžiagos naudojamos įvairiuose srityse, pradedant butine technika ir baigiant įvairios paskirties skraidymo aparatais.

Didėja kompozitinių konstrukcijų panaudojimas aviacijoje dėl savų ypatingų savybių. Plačiai naudojama hibridinė kompozitinė medžiaga, sudaryta iš plonų lakštų ir tarpinių iš polimerinės kompozitinės medžiagos. Šią medžiagą sudaro termoreaktyvinės klijuojančios ir termoplastinės rišamosios medžiagos, armuotos didelio stiprumo stiklo pluoštu. Šias medžiagas panaudojus vietoj monolitinių aliuminio lakštų, konstrukcija sumažėja 15-40%, padidėja konstrukcijos patikimumas, atpinga eksploatacija. Ši medžiaga naudojama lėktuvų fiuzeliažams, sparnams gaminti, ja dengiamos durys, liukai. Tačiau tokių konstrukcijų gamyba yra sudėtinga. Gamyba sudaryta iš daugeliu sudėtingų procesų, pakeitimas vieno iš proceso etapų gali pakeisti gatavos konstrukcijos mechanines savybes. Dėl aukštų saugos reikalavimų toks sudėtingas gamybos procesas reikalauja sudėtingų kontrolės metodų. Eksploatavimo metų daugelis orlaivio mazgų yra apkraunami didelėmis jėgomis.

Transportinių ir vietinių skrydžių skraidymo aparatų taip pat kaip ir karinių orlaivių skrydžiai ar skrydžio fazės yra gerai iširtos. Pasaulyje yra pakankamai skrydžio duomenų matavimų, kas leidžia patikimai apskaičiuoti apkrovų spektrą.

Kiekvieno orlaivio išskridimų (skrydžių, pakilimų) dažnis labai skiriasi, todėl kiekvieno lėktuvo apkrovos yra pastoviai registruojamos, kaupiama informacija apie jas ir duomenys apie kiekvieno orlaivio apkrovas galima gaut bet kuriuo metu. Lygiai tas pats daroma ir su sklandytuvais.

Atliekant apkrovų bandymus yra sužinoma kuriuose vietose yra įtrūkimai ir koku greičiu jie plinta, žinoma kokie būdai taikomi pažeidimams išvengti, tai įgalina nustatyti įtrūkimų metalinėse konstrukcijose atsiradimo tikimybę daug anksčiau, nei įtrūkimai pradeda rasti bei šią informaciją užfiksuoti sertifikavimo dokumentuose.

Tačiau visiškai skirtingos sąlygos yra šiuolaikiniams sportiniams orlaiviams ir sklandytuvams. Jie naudojami įvairiems tikslams (treniruotės, mokomieji skrydžiai, turizmas, akrobatiniai skrydžiai) ir jų skraidymo dažnis yra skirtingas, nefiksuojamos atsirandančios apkrovos.

Be to šiuolaikiniai sklandytuvai (su nedidelėmis išimtimis) ir šiuolaikiniai sportiniai orlaiviai vis dažniau gaminami iš pluoštinio sustiprinto plastiko, bei anglies pluošto.

Apkrovų dydžių nežinojimas ir negalėjimas nustatyti pažeidimo priežasčių buvo paskatinimas fundamentinių ieškojimų atsiradimui atsakant į klausimą kaip ieškoti apkrovų spektrą ir nustatyti orlaivio resursą.

Temos aktualumas: įgyvendinant orlaivių sertifikavimo specifikacijas labai svarbu tinkamai atlikti orlaivio bandymus, ko pasėkoje galima prognozuoti ir nustatyti orlaivio tarnavimo laiką – resursą. Atliekant bandymus labai svarbu kad bandymai būtų atliekami kuo tiksliau atkartojant realias orlaivio eksploataavimo sąlygas.

Darbo tikslas: išanalizuoti reikalavimus keliamus tipiniam sklandytuvo sparno lonžeronui atliekant bandymus resurso nustatymui ir išplėtimui.

Tikslui pasiekti suformuoti šie uždaviniai:

- apžvelgti kompozitines medžiagas naudojamas aviacijoje;
- išanalizuoti ir palyginti įvairius orlaivių elementų apkrovų nustatymo būdus;
- išanalizuoti ir palyginti įvairius orlaivių resurso bandymo būdus;
- įsigilinti į orlaivių sertifikavimo ir standartizavimo reikalavimus.

1. ŠIUOLAIKINĖS KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS

Kompozitine medžiaga vadiname dviejų ar daugiau chemiškai skirtingų medžiagų, tarp kurių yra ryškūs skiriamieji paviršiai, derinį. Kompozitai pasižymi unikaliomis savybėmis, kurios kiekybiškai ir kokybiškai skiriasi nuo kiekvieno iš jų sudarančių komponentų. Šie komponentai parenkami taip, kad jie optimaliai papildytų vieni kitus, suteikdami bendrai medžiagai geresnių arba visai naujų savybių. Kompozitinę medžiagą sudaro:

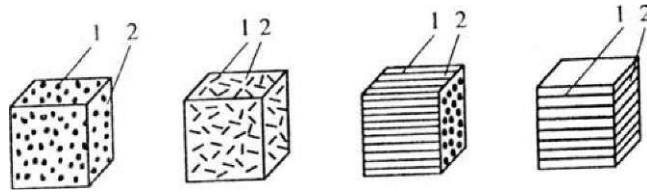
- **Matrica** (rišamoji medžiaga) – ištisinis viso medžiagos tūrio komponentas. Ji garantuoja gaminio vienalytiškumą, fiksuoja gaminio formą ir armuojančių elementų tarpusavio išsidėstymą, apkrovos tolygų pasiskirstymą visam kompozitui ir jos pasiskirstymą suirus daliai pluošto. Nuo matricos medžiagos (metalinė ar nemetalinė) priklauso dirbinių gamybos metodo bei technologinių procesų parinkimas. Metalinę matricą sudaro metalai ar jų lydiniai, nemetalinė – polimerai, keramika, anglis, stiklas bei įvairūs jų deriniai.
- **Armuojantys komponentai** (užpildai, armatūra arba kompozitą stiprinantys komponentai). Jų paskirtis – didinti matricos stiprumą (turi būti bent 2-3 kartus stipresni už matricą ir aukštesnės lydymosi temperatūros) ir standumą, keisti šilumines ir elektrines medžiagos charakteristikas ir kt. Šis poveikis gali būti skirtingas įvairiomis kryptimis visame tūryje arba tam tikroje kompozito dalyje.

Kompozitų mechaninės savybės priklauso nuo armuojančių elementų stiprumo, matricos standumo, kontakto ribos tarp matricos ir armuojančio elemento stiprumo. Matricos medžiagai keliami šie reikalavimai:

Eksploataciniai. Matricos medžiagos mechaninės, fizikinės ir cheminės savybės turi užtikrinti jos ir armuojančių elementų sąveiką esant įvairiems apkrovimo būdams. Nuo jos priklauso kompozito atsparumas šlyčiai bei temperatūros ir aplinkos poveikiui, ciklinis stiprumas ir kt.

Technologiniai reikalavimai susiję su kompozito gamybos procesais. Technologinis procesas turi užtikrinti tolygų pluošto išdėstymą jo elementams nesiliečiant tarpusavyje, išlaikyti reikiamą tūrio santykį, garantuoti pakankamą stiprumą pluošto ir matricos sandūroje. Todėl matricos medžiaga turi gerai vilgyti pluoštą, kokybiškai sujungti kompozito sluoksnius, būti žemos formavimo temperatūros, slėgio ir kt.

Kontakto ribos savybės. Nuo pluošto ir matricos adhezijos (sukibimo) priklauso kompozito savybių kitimas eksploatacijos metu. Matricos ir armuojančio elemento adhezija turi užtikrinti efektyvų apkrovos perdavimą armuojančiam elementui ir atlaikyti įtempimus, atsirandančius dėl skirtingų temperatūrinių plėtimosi koeficientų ir deformacijų traukiantis matricai. Esant blogai matricos ir užpildo adhezijai, kompozite susidaro mikroporos. Jos sumažina medžiagos stiprumą [1].



1.1 pav. Armuojančių komponentų forma ir jų pasiskirstymas matricoje:

a - miltelinis užpildas; b - chaotiškas trumpapluoštis užpildas, c - kryptinga ilgapluoštė armatūra; d - sluoksninė armatūra; 1 - armuojantis komponentas, 2 - matrica.

Pagal armuojančių komponentų formą ir jų pasiskirstymą matricoje kompozitai skirstomi į tris pagrindines grupes (1.1 pav.):

1. *Dispersinės medžiagos* (1.1 pav., a). Susideda iš vieno ar kelių labai smulkių komponentų, išsidėsčiusių matricoje.

2. *Medžiagos su pluoštiniu užpildu* (1.1 pav., b, c). Dažniausiai naudojami didelio stiprumo stiklo, anglies, boro pluoštai, metalinės vielės, karbidų, oksidų, nitridų ir kitų junginių siūliniai kristalai.

3. *Sluoksnuotosios medžiagos* (1.1 pav., d). Susideda iš dviejų ar daugiau įvairių komponentų sluoksnių (asbesto, medvilnės, anglies pluošto audinio, popieriaus ir kt.). Šiems kompozitams priskiriami bimetalai.

Pagal matricai naudojamą medžiagą kompozitai skirstomi:

- kompozitai su polimerine matrica (plastikai);
- kompozitai su anglies matrica;
- kompozitai su metaline matrica;
- kompozitai su keramine matrica;
- kompozitai su kombinuota matrica.

Metalinės – tai dažniausiai aliuminis, magnis, titanas, varis ir jų lydiniai. Bandoma matricą gaminti iš didelio stiprio plieno, sunkiai lydžių metalų ir lydinių.

- kompozitinės medžiagos, kurių pagrindas yra metališkieji junginiai. Šių medžiagų matricą sudaro cheminiai metalų junginiai su metalais. Tai palyginti nauja kompozitinių medžiagų klasė. Šių medžiagų matricai naudojami karštyje atsparūs metališkieji titano, aliuminio junginiai – Ti_3Al , $NiAl$, ir kt. Kartais šiai grupei priskiriami metalų silicidai $MoSi_2$, Nb_5Si_3 ir kt.

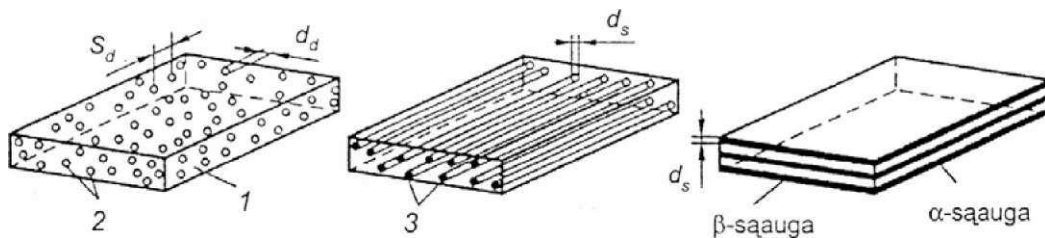
- keraminės kompozitinės medžiagos. Šių medžiagų matrica daroma iš oksidų, karbidų, nitridų. Ši medžiagų klasė yra ypač atspari aukštoje temperatūroje.

- kompozitinės medžiagos, kurių pagrindas yra nemetalinės medžiagos. Šių kompozitinių medžiagų pagrindą sudaro anglis.

- kompozitinės medžiagos, turinčios polimerinę matricą. Šių medžiagų matricai naudojamos epoksidinės, polieterinės ir kai kurios termoaktyviosios dervos ir polimeriniai termoplastai [2].

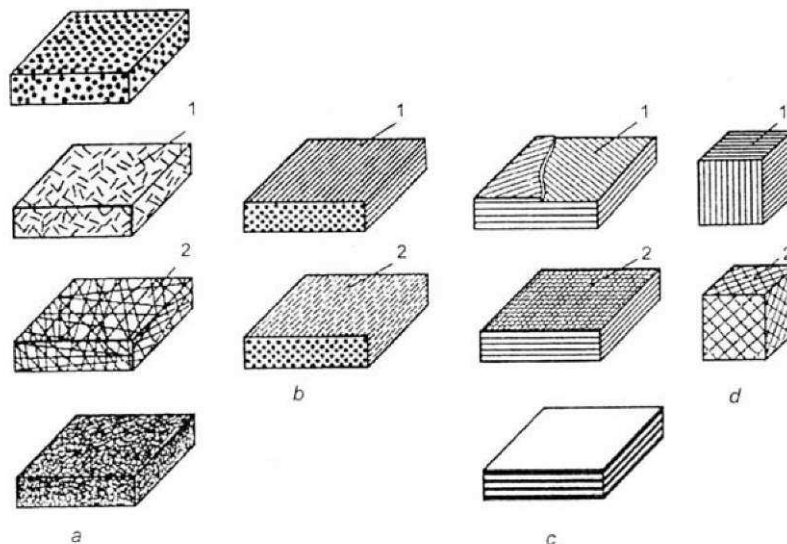
1.1. Kompozitinės medžiagos, armuotos siūlais ar pluoštu

Tai kompozitinės medžiagos, kuriose armuojantys elementai yra vienmačiai intarpai, kurių vienas matmuo yra gerokai didesnis už kitus du matmenis. Kompozitinėse medžiagose plastiškoji matrica yra armuojama plonu pluoštu, kurio storis yra nuo kelių iki 100 μm . Armavimui naudojama plona metalinė viela, kryptingai išauginti fazių kristalai, nemetalinių medžiagų pluoštas (anglies, boro), keraminis pluoštas, stiklo pluoštas, organinis pluoštas (poliamidas, polietilenas), deimanto siūlai ir kt. Armavimo pluošto kiekis medžiagoje gali būti gana skirtingas ir kartais jis užima 91 % medžiagos tūrio. Visgi realiomis sąlygomis armavimo pluošto kiekiui padidėjus daugiau kaip 80 % pluošto ir matricos tarpusavio sukibimas ir medžiagos savybės blogėja. Pluošto pasirinkimas priklauso nuo kompozitinės medžiagos paskirties, reikiamų fizinių ir cheminių savybių. Pluoštinės kompozitinės medžiagos savybės didele dalimi priklauso nuo armavimo geometrinės schemos (1.2 pav.). Chaotiškas armavimas trumpu pluoštu, armavimas trumpo ir ilgo pluošto mišiniu gali būti naudojamas beveik visų rūšių matricose. Kiti pluoštai dažniausiai naudojami tik tai polimerinės matricos kompozitinėse medžiagose.



1.2 pav. Kompozitinių medžiagų mikrostruktūros:

1 - matrica, 2 - armuojančiosios dalelės, 3 - armuojantysis pluoštas.



1.3 pav. Pluoštinių kompozitinių medžiagų klasifikavimas pagal jų konstrukcinius požymius:

a) chaotiškai armuotos: 1 - trumpas pluoštas, 2 - ilgas pluoštas, b) armuotos vieno matmens armuojančiaisiais elementais (plonu pluoštu): 1 - nepertraukiamas vienkryptis armavimas, 2 - vienkryptis armavimas trumpu pluoštu; c) armuotos dviejų matmenų armuojančiaisiais elementais: 1 - ilgais siūlais, 2 - audiniu; d) erdvinio armavimo: 1 - trijų krypčių siūlais, 2 - daugelio krypčių siūlais.

1.2. Sluoksniuotosios kompozitinės medžiagos

Šiose medžiagose fazės arba komponentai yra išsidėstę sluoksniais (1.3 pav.). Šių komponentų du matmenys gerokai viršija trečiąjį. Tokiais atvejais nėra prasmės medžiagoje skirti matricą ir armatūrą. Substruktūriniu lygmeniu sluoksninės kompozitinės medžiagos gali būti kuriamos, nusodinant medžiagos sluoksnį iš garinės fazės, o mikrostruktūriniu lygmeniu – išauginant medžiagos sluoksnį kryptingą kristalizacija. Makrostruktūriniu lygmeniu kompozitinės medžiagos sluoksniai gali būti gaunami iš garinės fazės metalas-metalas, polimeras-polimeras, metalas-polimeras. Sluoksniuotoje kompozitinėje medžiagoje skirtingų medžiagų sluoksnių storis yra nuo 100 iki 1000 μm . Skirtingų medžiagų sluoksnių paviršiniai ryšiai turi būti pakankamai stiprūs, kad veikiant temperatūrai ir apkrovai medžiagos komponentai neslystų vienas kito paviršiumi [1].

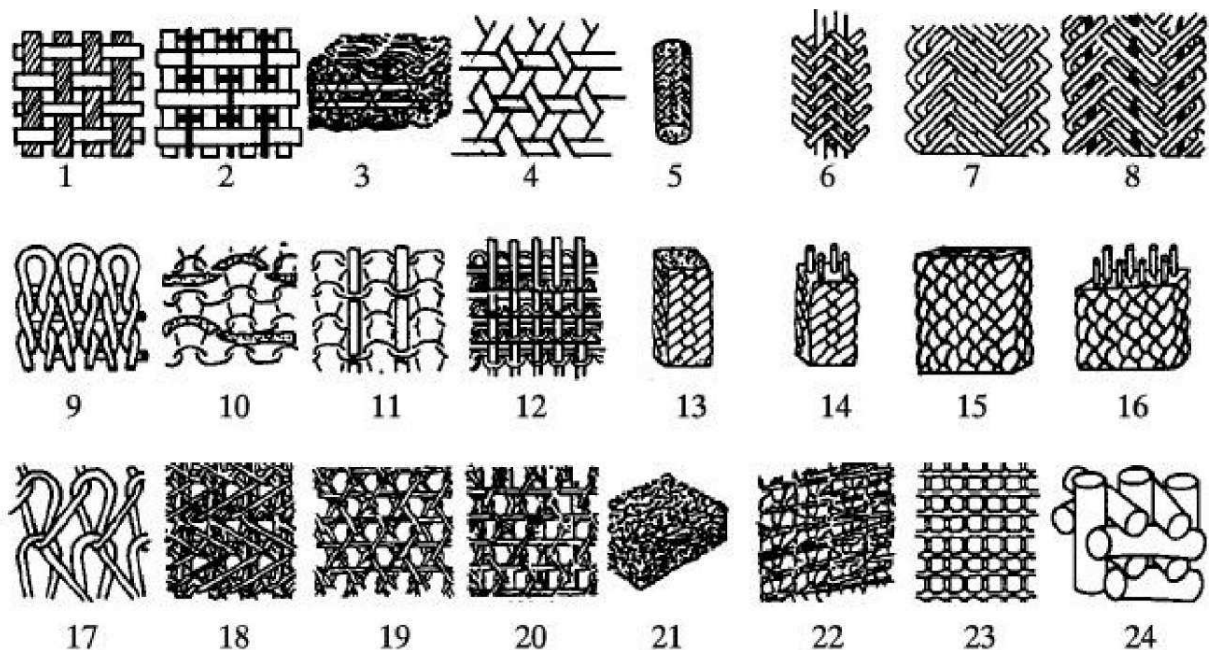
Tai nauja konstrukcinių medžiagų klasė, turinti unikalų fizinių (elektrinių, šiluminių, magnetinių ir kt.) ir mechaninių (stipris, atsparumas karštyje ir kt.) savybių rinkinį. Šios medžiagos turi optimaliai sukonstruotą struktūrą, kurioje pagal medžiagos storį kaitaliojasi ištisi pagrindinės ir armuojančiosios metališkujų junginių medžiagos sluoksniai. Pagrindinei medžiagai naudojami įvairūs metalai ar jų deriniai: magnis-aliuminis, varis-aliuminis, titanas-geležis, niobis-geležis ir kiti. Šie metalai dėl reakcinės difuzijos aukštoje temperatūroje sudaro metališkujų junginių tarp sluoksnius, kurių storį galima reguliuoti keičiant gamybos proceso parametrus. Tinkamai parinkus metališkujų junginių tarp sluoksnių sudėtį ir storį, galima gauti labai geras fizines ir mechanines medžiagos savybes. Pavyzdžiui, titano-geležies kompozitinė medžiaga 600-850 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje yra 4-9 kartus atsparesnė karščiui negu sudarantys baziniai metalai. Titano-plieno kompozitinė medžiaga 20-400 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje yra „šilumos izoliatorius“, nes jos šiluminis laidumas yra 48-62 kartus mažesnis negu plieno ir 16-18 kartų negu titano. Naudojant įvairias gamybos technologijas (suvirinimą sprogimu, valcavimą, šampavimą) galima pagaminti plokščias ir tūrines titano-plieno konstrukcijas arba įvairius profilius. Jau nuo aštuntojo praeito šimtmečio dešimtmečio kompozitinėms medžiagoms pradėtos naudoti polimerinės medžiagos. Tokią medžiagą sudaro rišami adhezijos jėgų, besikeičiantys polimero ir metalo sluoksniai. Skraidymo aparatams gaminti naudojama šios rūšies kompozitinė medžiaga, sudaryta iš aliuminio lydinio ir organinio polimero. Šios medžiagos mechaninės savybės panašios į aliuminio lydinio, tačiau medžiaga yra lengvesnė. Atsiradę nuovargio plyšiai tokioje medžiagoje plinta daug mažesniu greičiu.

1.3. Kompozitai su anglies matrica

Anglies – anglies kompozitai (AAK) pradžia galima laikyti 1958 metus, kai buvo pradėta JAV oro pajėgų kosminė programa, kurios įgyvendinimui reikėjo įvairių savybių kompleksu pasižyminčių medžiagų. AAK susideda iš anglies pluošto anglies matricoje. Nors abi sudėtinės dalys yra iš to paties elemento, kompozitų savybės gali būti labai skirtingos, priklausomai nuo anglies struktūros ir pluošto struktūros.

Armavimo karkasas audžiamas iš sausų anglies siūlų arba persiūtų anglies audinių. Anglies matrica (aukštoje temperatūroje įanglinta polimerinė matrica) yra panašių savybių, kaip ir anglies pluoštas. Ji perduoda apkrovą armuojantiems elementams, apsaugo pluoštą nuo aplinkos poveikio, izoliuoja vieną siūlą nuo kito bei varžo jų poslinkius.

AAK gamyba prasideda nuo tekstilinės preformos paruošimo, ant kurios vėliau suformuojama anglies matrica. Tekstilinė preforma reikalinga pluoštui išdėstyti tokia tvarka, kokia turi išlikti kompozito armuojančioje sistemoje po kompozito suformavimo. Armuojančią sistemą galima suskirstyti 4 grupes. Pirmajai grupei priskiriamos AS sudarytos iš neištisinio pluošto. Tokiose armuojančiose sistemose kontroliuoti pluoštinių dalelių orientaciją yra gana sunku. Antrai grupei priskiriamos AS, kurios ištisinis pluoštas turi vienkryptę orientaciją. Trečiai grupei priskiriamos AS, kuriose ištisinis pluoštas sudaro plokštuminę susimaizgusią arba persipynusią sistemą (2-D). Ketvirtai grupei priskiriamos AS, ištisinis pluoštas yra įvairiai orientuotas, tiek plokštumoje, tiek erdvėje (3-D). Tekstilinės preformos apima paskutines tris grupes. AS dar gali būti skirstomos pagal įvairius požymius (1.4 pav.).



1.4 pav. Anglies pluošto armuojančių sistemų linijinės, plokštuminės ir erdvinės struktūros:

1 - dviašis audinys, 2 - didelio modulio audinys, 3 - daugiasluksnis audinys, 4 - triašis audinys, 5 - vamzdinis pynimas, 6 - vamzdinis pynimas su metmenimis, 7 - plokštuminis pynimas, 8 - plokštuminis pynimas su metmenimis, 9 - ataudų įmezgimas, 10 - ataudų įmezgimas su ataudais, 11 - ataudų įmezgimas su metmenimis, 12 - ataudų įmezgimas

su ataudais ir metmenimis, 13 - kvadratinis pynimas, 14 - kvadratinis pynimas su metmenimis, 15 - erdvinis (3-D) pynimas, 16 - 3-D pynimas su metmenimis, 17 - metmenų pynimas, 18 - metmenų pynimas su metmenimis, 19 - ataudai įterpti į metmenų pynimą, 20 - ataudai įterpti į metmenų pynimą su metmenimis, 21 - panamos pynimas, 22 - kilpinis apjungimas metmenų kryptimi, 23 - dviašis apjungimas, 24 - XYZ išdėstymas.

Kompozitų su anglies matrica savybės priklauso nuo naudojamos dervos (fenolio formaldehidinė, epoksidinė fenolinė, poliimidinė ir kt.) savybių ir armuojančio pluošto išsidėstymo (chaotiškas, sluoksniuotas, erdvinis spiralinis).

Anglies ir anglies pluošto kompozitai atsparūs cheminiam poveikiui aukštesnėje temperatūroje (iki 227 °C), o mechaninės savybės kinta nežymiai iki 2500 °C. Jų stiprumo riba tempiant $c_{ut} \sim 600$ MPa. Šie kompozitai naudojami chemijos įrengimuose, aviacijoje, raketų varikliuose ir kt.

AAK klasifikavimas

Kompozitinės medžiagos klasifikuojamos pagal kelis požymius:

- a) pagal matricos ir armavimo komponentų medžiagą;
- b) pagal struktūrą, t. y. komponentų tarpusavio išsidėstymą, geometriją;
- c) gamybos būdą;
- d) naudojimo sritį.

Kompozitinės medžiagos užpildas arba armuote dažniausiai būna kietos medžiagos: įvairaus ilgio pluoštas, audiniai, neaustinės medžiagos. Smulkūs užpildai vadinami nulinio matmens armavimo elementais. Jiems priskiriami medžio miltai, mineralų bei metalų milteliai, suodžiai ir kt. Labai paplitusios polimerinės kompozitinės medžiagos armuotos stiklo, anglies, boro, organiniais pluoštais. Armuojančiosios medžiagos – tai metalai ir jų lydiniai (plienas, berilis, titanas ir kt.), ne metalai (anglis, boras), keramika (AUO TiC, SiC, AlN, TiB₂), stiklas (stiklas E, stiklas S), organinės medžiagos (lavsanas, kevlaras, polietilenas ir kt.).

Kompozitinių medžiagų klasifikacija yra gana sudėtinga, tačiau jas galima klasifikuoti priklausomai nuo fazių morfologijos ar komponentų geometrijos. Pagal šią klasifikaciją kompozitines medžiagas galima skirstyti į šias klases:

- dispersiškai sustiprintos kompozitinės medžiagos ir kompozitinės medžiagos, armuotos smulkiais užpildo dalelėmis;
- pluoštinės kompozitinės medžiagos;
- sluoksniuotosios kompozitinės medžiagos.

Priklausomai nuo armuojančiųjų komponentų išsidėstymo ir jų dydžio kiekvienoje klasėje galima išskirti kelias poklases:

- submikrostruktūrinės kompozitinės medžiagos, kuriose dalelių dydis ar armuojančio pluošto storis mažesnis kaip 1 μm;

- mikrostruktūrinės kompozitinės medžiagos, kuriose armuojančiųjų elementų matmenys ar sluoksnio storis yra kaip 1 μm ;
- makrostruktūrinės kompozitinės medžiagos, kuriose armuojančiųjų elementų matmenys yra mažesni arba plonesni už 0,1 mm.

Tai chemiškai labai inertiškų, mažo savitojo tankio, gerų elektrolizinių savybių, nemetalinių medžiagų grupė. Šių medžiagų šiluminio laidumo ir elektrinės varžos keitimo ribos yra labai plačios. Technikoje „anglinės medžiagos“ sąvoka tradiciškai siejama su medžiagomis, turinčiomis grafito struktūrą, kuri gali būti tiek kristalinė, tiek visiškai amorfinė. Anglies pluošto- anglies substrato kompozitinės medžiagos klasifikuojamos pagal kelis požymius:

- bazinių medžiagų sudėtį;
- gamybos būdą;
- struktūrą; funkcinę paskirtį;
- naudojimo sritį.

Šios medžiagos yra palyginti brangios ir dažniausiai naudojamos medicinoje, aviacijoje, kosminiams aparatams, termobranduolinės sintezės aparatų mazgams, automobiliams, sportiniam inventoriui gaminti. Šias medžiagas sudaro armatūrinis karkasas ir šį karkasą užpildanti anglinė matrica [2].

Armavimo karkasui naudojami anglies siūlai ar pluoštas, iš kurių daroma erdvinė konstrukcija, suteikianti galutiniam produktui kryptingą savybių anizotropiją. Čia svarbu ne tik anglies pluošto charakteristikos, bet ir erdvinė kompozitinės medžiagos armuotės konstrukcija, kuri turi didelę įtaką užpildant karkasą angline matrica.

Pagal savo mechaninių savybių lygmenį anglies pluoštas skirstomas į mažo (7-104 MPa) ir didelio (15-104-45-104 MPa) tamprio modulių pluoštus. Pluoštas (siūlai) skirstomi į tris pagrindines grupes: didelio tamprio modulio, didelio stiprio ir didelio pailgėjimo siūlus (1.1 lentelė). Anglies pluošto mechaninės savybės priklauso nuo žaliavos rūšies ir gamybos technologijos.

1.1 lentelė

Anglies siūlų savybės

Siūlių rūšis	d, μm	p, kg/m^3	G, MPa (nutraukimo)	E_x , GPa
Aukštamodulis	8,3	2000	2100	413
Didelio stiprio	7,7	1800	2400...3200	240...290
Didelio pailgėjimo	6,9...7,4	1750	2300...2900	170...200

Tūriniai anglies pluošto karkasai gaminami įvairiais metodais: sausų siūlų audimu, siūlų apvyniojimu, susiuvimu, karkaso surinkimu iš standžių strypų arba taikant įvairių metodų kombinacijas. Kompozitinės medžiagos anizotropinės savybės gaunamos keičiant armuotės klojimo architektūrą. Kokią pasirinkti armuotės schemą sprendžiama pagal temperatūros ir jėgos laukų,

veikiančių konstrukciją, pobūdį. Armavimui plačiai naudojami audiniai, turintys du, tris ar daug (n kiekį) siūlų. Karkasams, audžiamiems iš trijų ir daugiau siūlų, reikalinga sudėtinga audimo įranga. Daug paprasčiau armavimo sistemos sudaromos iš tiesialinijinių elementų (strypų). Šiuo atveju siūlų ar plaušo pluoštas pratraukiamas pro akutes ir vėliau padengiamas kietikliu. Iš kietikliu sukietintų ruošinių daromi reikiamo profilio strypai. Iš strypų daromos vienos, dviejų, trijų ir daugiau krypčių armavimo konstrukcijos. Vienakrypčio pluošto išdėstymo kompozitinės medžiagos naudojamos kaip modelinės, kurias tiriant nustatomos medžiagos savybės, sąveika tarp plaušo ir matricos, medžiagos stiprumo ir struktūrinės charakteristikos. Plonalakščiams gaminiams naudojamos dvikrypčio armavimo karkasinės medžiagos. Efektyviausias yra daugiakryptis armavimas (1.2 lentelė). Didžiausias medžiagos užpildymo tankis gaunamas naudojant vienakryptę heksagoninę armavimo schemą. Visos kitos armavimo schemas turi mažesnę tūrinio užpildymo armuojančiąja medžiaga koeficientą.

1.2 lentelė

Kompozitinės medžiagos struktūros užpildymo armuote koeficientai

Armavimo krypčių skaičius	Siūlų klojimo būdas	Užpildymo armuote koeficientas p_{ar}
Viena	Heksagoninis	0,97
Viena	Stačiakampis	0,785
Dvi	Sluoksninis (laisvas)	0,785
Trys	Stačiakampis (visose plokštumuose)	0,589
Keturi	Heksagoninis transversinis-izotropinis	0,563

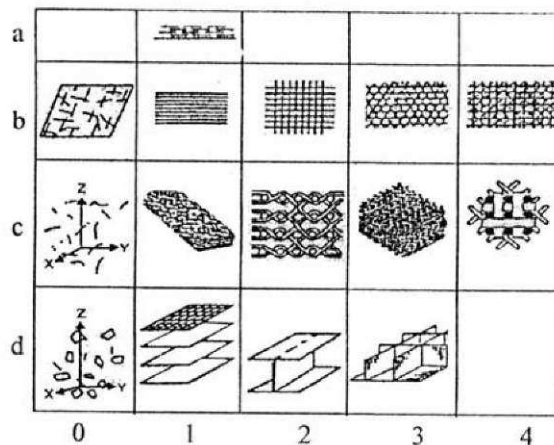
Pagal anglies matricos suformavimo būdą ant preformos, AAK gamybos būdai skirstomi į tris grupes:

- termoplastinės (mezofazinės) dervos infiltravimas-pirolizė;
- termoreaktyvios dervos infiltravimas-pirolizė;
- cheminis garų infiltravimas (CVI – chemical vapour infiltration).

Koks AAK gamybos būdas tinkamiausias didžia dalimi priklauso nuo gaminio geometrijos. Ploniems gaminiams tinkamiausias yra CVI, o storiems – dervų infiltravimo-pirolizės būdai.

1.4. Kompozitinių konstrukcijų formavimas

Gaminio stiprumas ir ilgaamžiškumas labai priklauso nuo kompozitą sudarančios polimero dervos, užpildų, armuojančio pluošto struktūros (1.5 pav.) ir savybių, pluošto būsenos polimero masėje (pluošto ilgio, jo orientavimo, gijų pynimo būdo, audinio struktūros).



1.5 pav. Kompozitus armuojančių pluoštų audinių klasifikavimas:

0-4 - armuojančių elementų tipai erdvėje (be krypties, vienos, dviejų, trijų, keturių krypčių); a - linijinis pluoštas; b - plokšti (2D) audiniai iš impregnuotų siūlų; c - erdvinės struktūros iš linijinių (3D) elementų; d - erdvinės struktūros iš plokščių elementų; di - korio tipo armatūra.

Plokštieji audiniai kompozitų armavimui audžiami, o erdvinio pynimo -pinami specialiais įrengimais, mezgimo tipo mašinomis, dažnai formuojami rankiniu būdu. Kompozitų stiprumas ir kitos eksploatacinės savybės gerinamos sudarant pluoštinius karkasus iš kelių tipų pluoštų, turinčių skirtingų savybių. Pluoštai, audiniai ir karkasai įmirkomi ir pripildomi termoplastinių polimerų arba reaktoplastų lydalais, emulsijomis, tirpalais. Gauti kompozitai formuojami specialia įranga arba rankiniu būdu. Formavimo būdai: kontaktinis, vyniojimas, tempimas, valcavimas, presavimas slėgiu ir kt.

Kompozitų formavimas panaudojus lengvas konstrukcines medžiagas

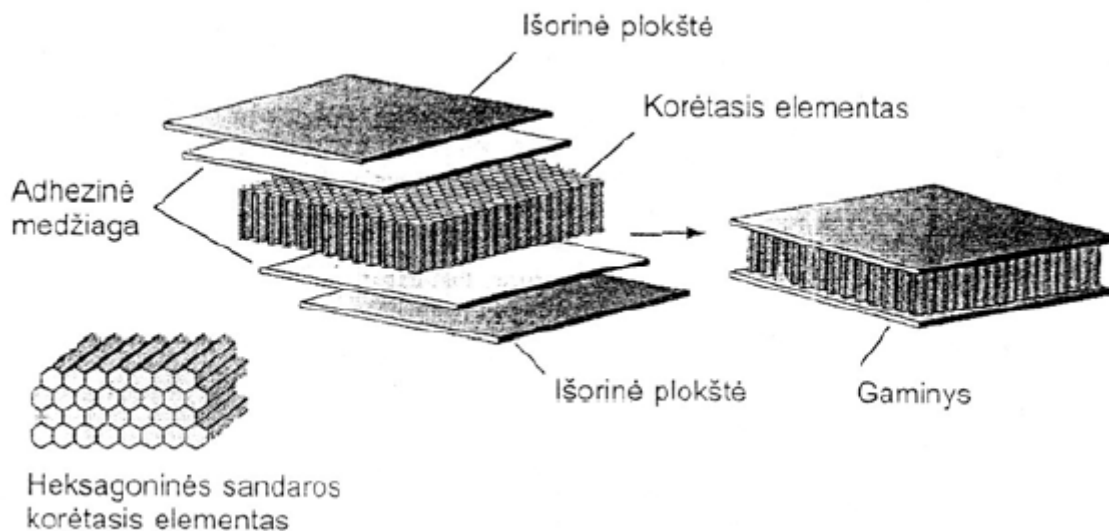
Plonasienių konstrukcijų iš kompozitų atsparumas lenkimui dažnai didinamas įterpus tarp kompozito lakštų poringo plastiko ar bičių korio formos šerdį. Atsparumas lenkimui padidėja iki kelių kartų, masė – mažiau kaip 10%. Poringi ir koriniai intarpai pagerina kompozito mechanines savybes, sumažina šilumos laidumą, padidina garso izoliacines savybes ir atsparumą ugniai.

Lengvosios konstrukcinės medžiagos kompozitams formuoti: Putplasčiai. Šiuolaikinės technologijos leidžia daugelį medžiagų (taip pat stiklą ir metalus) pagaminti putų būsenos, tačiau plačiau taikomos tik putos iš polimerinių medžiagų – putplasčiai: polistireno (PS), polivinilchlorido (PVC), poliamidų (PA), poliuretano (PU), fenolio (PF), melamino formaldehidinių (MF) dervų ir kt. Putplasčiai kompozitinių konstrukcijų užpildams parenkami atsižvelgiant į eksploataavimo sąlygas: PVC putplasčiai naudojami konstrukcijoms, eksploatuojamoms vandenyje, poliuretano - darbui normaliomis sąlygomis, poliamidiniai – aviacijoje.

Putplasčių įterpimo būdai konstrukcijose: įklijuojant išpjautus ruošinius; suspaudžiant putplasčio blokus tarp montuojamų konstrukciją; įpurškiant putplasčio masę į konstrukcijos ertmes ir kt. įterpimo darbai dažniausiai atliekami rankomis.

Koriai. Tai erdvinės konstrukcijos, sudarytos iš vienujų stačiakampio, rombo arba trikampio formos elementų. Jie panašūs į bičių korių akutes. Pagrindinės medžiagos yra aliuminis, reaktoplastiniai polimerai.

Išorinės plonos plokštelės tolygiai išsklaido apkrovą, o užpildas konstrukcijai pridoda tvirtumą, pastovumą, lengvumą, termo, garso ir elektros izoliacija.



1.6 pav. Kompozitai su korėta konstrukcija

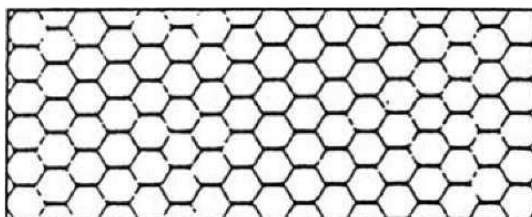
Korėta konstrukcija sudaryta iš dviejų išorinių plokštelių, kurios gali būti metalinės arba nemetalinės. Tarp dviejų išorinių plokštelių įklijuojamas korėtas elementas.

Šiuolaikinėje gamyboje korėtasis elementas gaminamas iš:

- plieno;
- titano;
- aliuminio lydinių;
- stiklo pluošto;
- organinių plastikų.

Priklausomai nuo elementų medžiagos juos yra suvirinamos, sulydomos, suklijuojamos.

Konstrukcijos tvirtumas priklauso ne tik nuo konstrukcijos medžiagų, bet ir nuo korėto elemento formos. Paplitusi forma yra šešiakampio formos, jos suteikia stabilią būseną, didelį suklijavimo plotą ir jie yra pakankamai lengvai gaminami. Priklausomai nuo nustatyto tikslo korėtas elementas gaminamas ir kitokios formos.



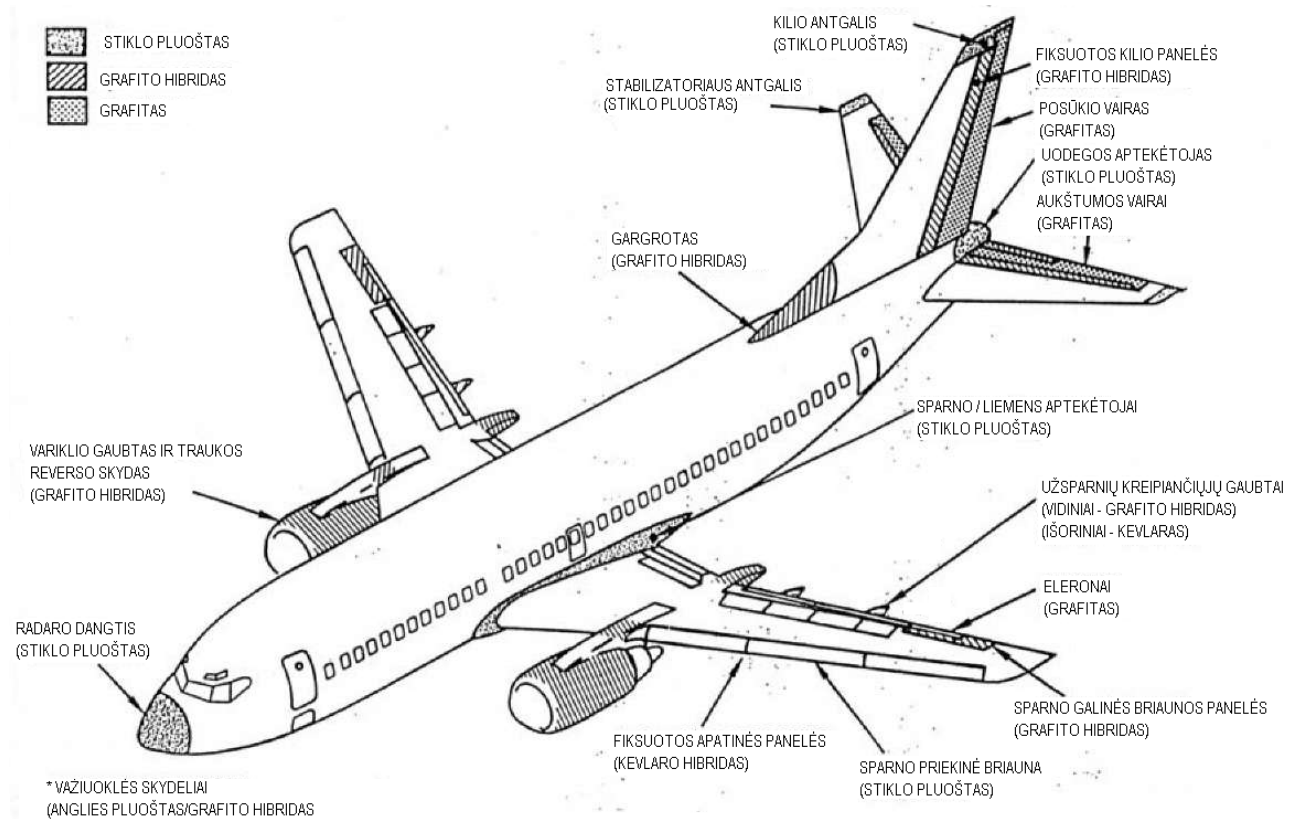
1.7 pav. Šešiakampės formos korėtasis elementas

Korėtos konstrukcijos gali būti:

- plokščios formos;
- išgaubtos formos;
- apvalios formos;
- nestandartinės formos.

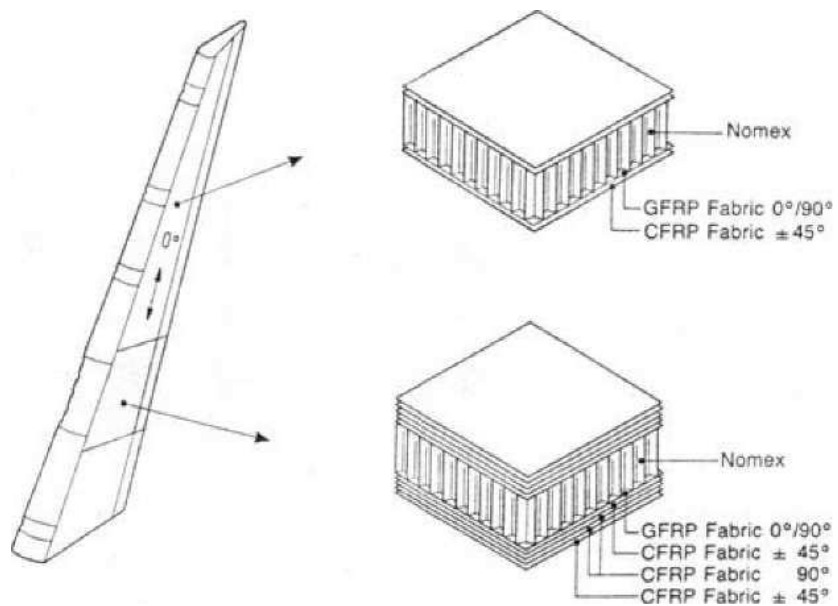
1.5. Kompozitinių medžiagų taikymas aviacijoje

Per šimtametę aviacijos erą orlaiviai konstruktyviai keitėsi. Visų laikų orlaivių konstruktoriai bandė sumažinti orlaivio svorį. Nuo orlaivio svorio priklauso ekonominiai eksploataavimo rodikliai. Kompozitinių konstrukcijų panaudojimas pagerino daugybę orlaivio savybių. 1.8 pav. matome *Boeing* lėktuvą, kuriame matome, kokia įvairovė konstrukcijų iš kompozitinių medžiagų naudojama keleiviniuose orlaiviuose [14]. Tai yra orlaivių konstruktorių darbo rezultatai šioje srityje.

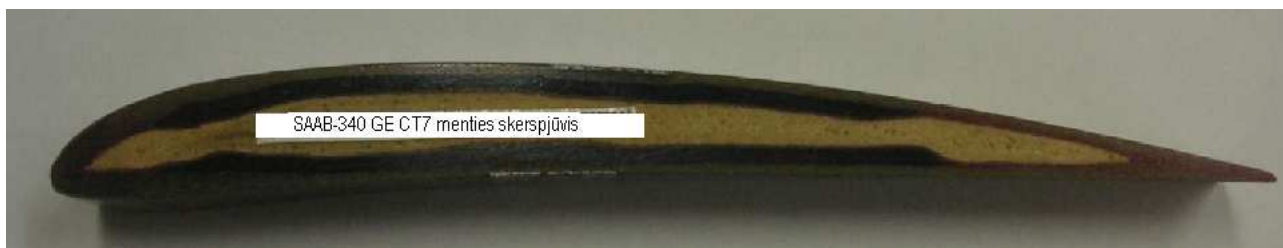


1.8 pav. Kompozitinių medžiagų panaudojimas Boeing 737-300 orlaivyje

Daug orlaivio mazgų bei elementų yra gaminama iš korinių konstrukcijų. Tokios konstrukcijos yra tvirtos, lengvos, pakankamai paprastai gaminamos, patogi jų eksploatacija, yra pigios [3].



1.9 pav. Orlaivio elementai iš korinės konstrukcijos [3]



1.10 pav. SAAB-340 oro sraigto pjūvis [3]

Iš 1.10 pav. matomos SAAB sraigto išpjovos galima spręsti apie šių elementų gamybos sudėtingumą ir būtiną svarbiausių elementų kontrolę eksploataavimo ir gamybos metu.

2. Nuovargio tyrimų vystymasis

2.1. Apkrovų spektro realizavimas ir paruošimas bandymams

Transportinių ir vietinių skrydžių lėktuvų taip pat kaip ir karinių orlaivių skrydžiai ar skrydžio fazės yra gerai ištirtos. Pasaulyje yra pakankamai skrydžio duomenų matavimų, kas leidžia patikimai apskaičiuoti apkrovų spektrą.

Kiekvieno orlaivio išskridimų (skrydžių, pakilimų) dažnis labai skiriasi, todėl kiekvieno lėktuvo pakrovos yra pastoviai registruojamos, kaupiama informacija apie jas ir duomenys apie kiekvieno orlaivio apkrovas galima gauti bet kuriuo metu. Lygiai tas pats daroma ir su sklandytuvais.

Atliekant apkrovų bandymus yra sužinoma kuriuose vietose yra įtrūkimai ir koku greičiu jie plinta, žinoma kokie būdai taikomi pažeidimams išvengti, tai įgalina nustatyti įtrūkimų metalinėse konstrukcijose atsiradimo tikimybę daug anksčiau, nei įtrūkimai pradeda rasti bei šią informaciją užfiksuoti sertifikavimo dokumentuose.

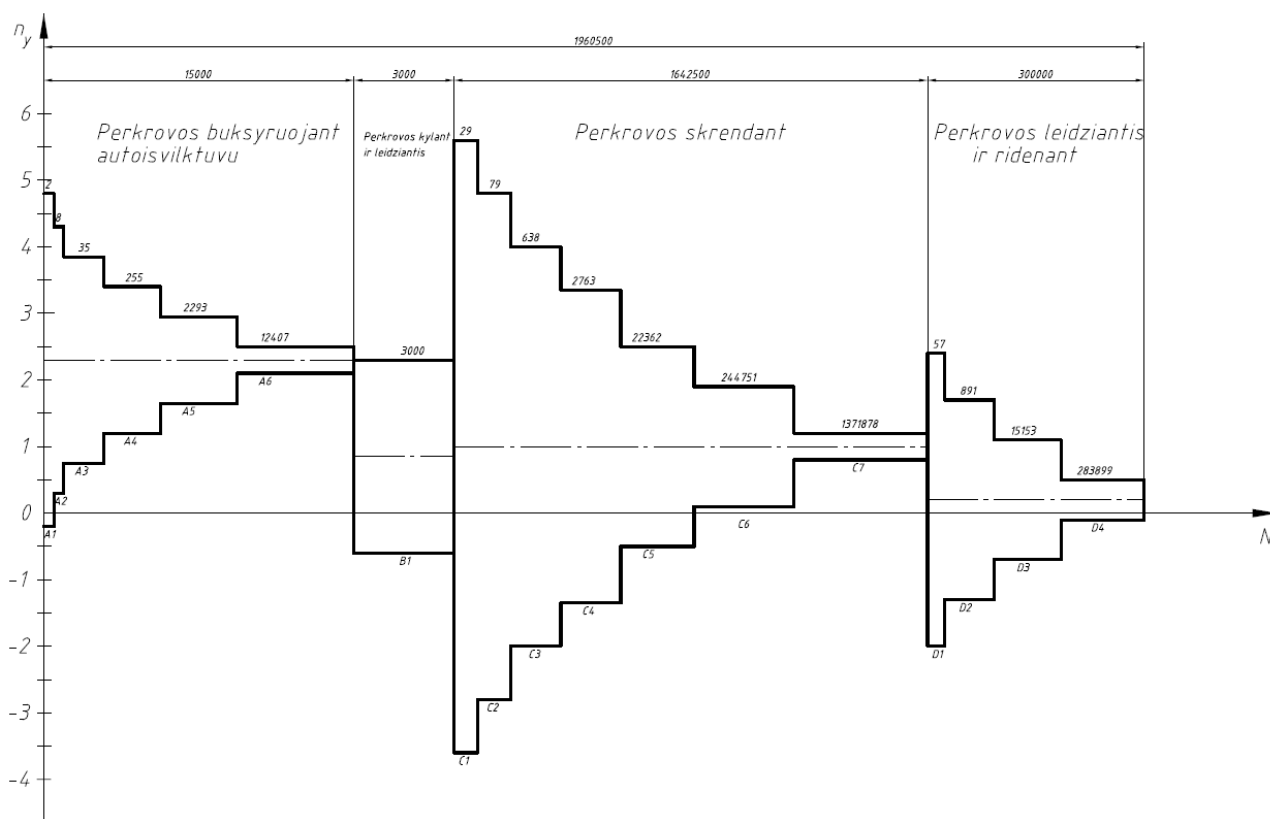
Tačiau visiškai skirtingos sąlygos yra šiuolaikiniams sportiniams lėktuvams ir sklandytuvams. Jie naudojami įvairiems tikslams (treniruotės, mokomieji skrydžiai, turizmas, akrobatiniai skrydžiai) ir jų skraidymo dažnis yra skirtingas, nefiksuojamos atsirandančios apkrovos.

Be to šiuolaikiniai sklandytuvai (su nedidelėmis išimtimis) ir šiuolaikiniai sportiniai lėktuvai vis dažniau gaminami iš pluoštinio sustiprinto plastiko. Iki šiol nebuvo žinomi metodai, kurie leistų nustatyti įtrūkimus aukščiau minėtiems lėktuvams jų patikrinimo metu.

Apkrovų dydžių nežinojimas ir negalėjimas nustatyti pažeidimo priežasčių buvo paskatinimas fundamentinių ieškojimų atsiradimui atsakant į klausimą kaip ieškoti apkrovų spektrą ir nustatyti orlaivio resursą.

Iki šiol Vokietijoje sklandytuvų nuovargio bandymai buvo atlikti 1938 m. H. W. Kaul'o. Remiantis vėjo gūsių tankio ir dažnio žemuose skrydžio lygiuose matavimu, skaičiuojant pagreitį. Tačiau buvo matuojami tik ekstremalūs dydžiai, nesigilinant į orlaivio elastingumo pokyčius, kai sparnas yra papildomai lenkiamas, pradeda vibruoti.

Remdamiesi šiais matavimais W. Thielemann ir F. K. Franzmeyer 60-ųjų viduryje suformavo teorinį apkrovų spektrą naujai sukurtiems sustiprinto pluoštinio stiklo plastiko (GFRP) sklandytuvams 2.1 pav.



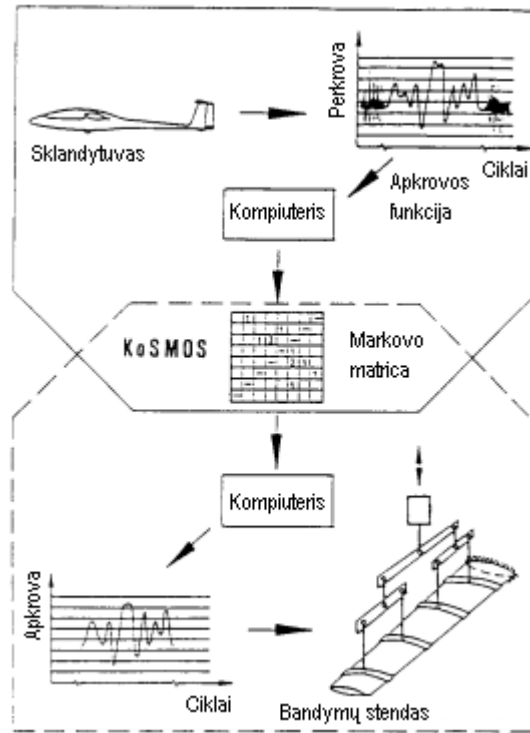
2.1 pav. Sklandytuvo apkrovos spektras pagal W. Thielemann ir F. K. Franzmeyer

Apskaičiuotas resursas yra 3000 skridimo valandų, t.y. 15 metų po 200 skridimo valandų. Keletas nuovargio bandymų kartu su statiniais bandymais buvo padaryti remiantis bendromis apkrovomis ir priimant, kad gyvavimo laikotarpiu neatsiranda pažeidimų dėl nuovargio. Šios prielaidos buvo įrodytos kasdieniniais skraidymais. Iki šiol GFRP sklandytuvams nebuvo aptikti pažeidimai dėl nuovargio.

Naudojant kompozitines GFRP medžiagas, aerodinaminis efektyvumas (kokybė) (keliamosios jėgos ir pasipriešinimo santykis) gali būti padidintas 50%. Tuo pačiu galima padidinti sparno apkrovą prie didesnių kreiserinių greičių. Papildomai eksploatacinės savybės gerėja tobulinant profilių formas ir avioniką. 1500 km atstumas nuskrendamas vidutiniu 110 km/val. greičiu. Šiuo metu keičiasi sklendimo būdas ir smarkiai išaugo treniruočių skaičius ir sąlygos. Stengiamasi sklandyti tokiomis sąlygomis ir taip manevruoti, kaip anksčiau nebuvo įmanoma.

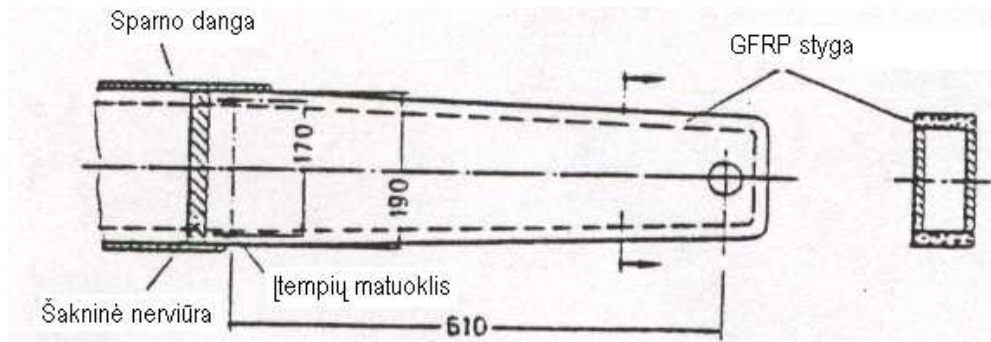
Taigi siekiant padidinti sklandytuvų, pagamintų iš GFRP medžiagų, gyvavimo laiką reikia nustatyti apkrovų dydžius ir veikimo dažnį.

2.2 pav. pateikiama kaip šiuo metu yra atliekami skrydžių ir apkrovų ciklinio nuovargio bandymai. Charakteringi signalai išmatuojami skrydžio metu, duomenys perduodami į kompiuterį, kur kaupiami Markovo perdavimo matricioje. Bendrų apkrovų dydžiai saugomi matricioje ir patenka į kompiuterį, kuris kontroliuoja hidraulinius įrenginius.



2.2 pav. Nuovargio ciklai: nuo skridimo bandymų iki nuovargio bandymų

Pats svarbiausias sklandytuvo konstrukcijos elementas yra sparnas, tad nuovargio bandymais turi būti įrodytas jo patvarumas. Būtina žinoti charakteringuosius dydžius laiko skalėje, šiuo atveju statistinį lenkimo momento MBR pasiskirstymą. Kad tai būtų išmatuota 4 jutikliai yra taisomi sparno tvirtinimo srityje prie šakninės nerviūros. Prietaisų kalibravimas atliktas (nusistovėjusio sklendimo ramiame ore (1g skrydis)) ant žemės apkrovus sparną vienetine apkrova.



2.3 pav. Jutiklių išdėstymas ant bandomojo sparno struktūrinė schema

Signalai iš sklandytuve esančių siūstuvų yra sustiprinami pakeičiami į skaitines formas, sujungiami į sekas, sinchronizuojami ir užrašomi juostelėje. Kiekvieno skrydžio fazės (pvz.: pakilimas, tūpimas, treniruočių skrydis ir pan.) yra užkoduojamas tam, kad įgalintų atskirti skirtingų skridimo fazių duomenis. Šie išmatuoti dydžiai toliau keliais etapais yra apdorojami kompiuterine programa. Po signalų sinchronizacijos duomenys yra analizuojami ir skaitmenizuojami, kad per adapterį būtų galima juos įrašyti į juostelę. Tada duomenų seka paduodama į lygiagreto matavimo

įrenginius (lenkimo momentas, stūmoklių slėgis, masių centro pasislinkimą ir kt.) ir eliminuojamos atsitiktinės klaidos (pvz.: triukšmai). Skaitmenizavimui sritis padalinama į $2^{10} = 1024$ lygius, kurie vėliau sutraukiami iki 32 lygių.

Jei norima išvest visą apkrovų diapazoną naudojami du būdai:

1. Randamas ar apskaičiuojamas atskiros skrydžio fazės ir orlaivio viso gyvavimo laiko santykis ir iš atskirų skrydžio fazių duomenų sumos sudaroma Markovo perdavimo matrica reikalinga visam resursui. Skrydžio fazių duomenys gali būti išvesti kiekvienam pasirinktam dydžiui ekstrapoliuojant išmatuotus dydžius.

2. Ekstrapoliuojama kiekviena skrydžio fazė iki pageidautino resurso lygio ir perdengiamos visos skrydžio fazės. Šiuo atveju perdengiamas resursas sklandytuvams. Todėl šis metodas yra universalesnis ir labiau naudotinas išvedant apkrovų diapazoną. Matavimai atliekami tokioms skrydžio fazėms: sklendimas trikampių maršrutu, mokomieji – treniruočių skrydžiai, sklendimas trikampių maršrutu kalnuotose vietovėse, pavėjinis sklendimas, skrydžiai ratu buksyruojant paskui lėktuvą, skrydžiai ratu išvelkant autoišvilktuvu.

Ciklas sudaromas iš vieno starto, vieno tūpimo ir vieno treniruočių skrydžio fazių. Jo trukmė – 10 min. Šiuo pagrindu 6000 skrydžio valandų resursas susidarys iš 36000 ciklų.

Kadangi apkrovų pasiskirstymas yra atsitiktinis, galima neiškirti kiekvieno retai pasitaikančio apkrovos ekstremumo, todėl matavimai padauginėti iki 18000 skrydžio valandų, o tai reiškia, kad taikomas sklaidos daugiklis 3 kaip ir nuovargio bandymams, vėliau standartizuojant 6000 skridimo valandų resursą. Dalijant skaičius iš 3 liekana suvidurkinama iki artimiausio sveiko skaičiaus. Tada yra išsaugomi duomenys apie stipriausius apkrovų ciklus pasireiškusius per 18000 skridimo valandų.

Yra atvaizduojami kumuliatyviniai dažniai, kurie viršija arba yra žemiau vidutinės dažnių vertės skirtingoms skrydžio fazėms: trikampių maršruto skrydis, trikampių maršruto skrydis kalnuotoje vietovėje, mokomasis – treniruočių skrydis, pavėjinis skridimas. Priešingai nei tikėtasi pavėjinio skrydžio kreivė yra perdengta skrydžio kalnuotoje vietovėje kreivės, nors skrendant pavėjui veikia rotorius apkrovos faktorius.

Trikampių maršruto sklendimo teigiamos apkrovos yra didesnės ir aukštesnio dažnio už neigiamas apkrovas. Taip tikriausiai yra dėl sparno perkrovimo ir jo vibracijų. Mokomųjų ir treniruočių skrydžių kreivė beveik perdengia visas tris anksčiau minėtas skrydžio fazes (trikampių maršruto, kalnuotoje vietovėje ir pavėjinio sklendimo). Pastebėtina, kad mokomųjų ir treniruočių sklendimo metu veikiančios neigiamos apkrovos yra didesnės.

Nagrinėjant buksyravimo paskui lėktuvą ir išvilktuvu autoišvilktuvu atveju nustatyta, kad startuojant autoišvilktuvu vyrauja didesnės teigiamos apkrovos, o buksyravimo paskui lėktuvą metu – daugiau mažų amplitudžių apkrovų. Tūpimo metu atsirandančios neigiamos apkrovos yra

identiškos abiem atvejais. Tai nestebina, nes neigiamų apkrovų atsiradimas yra įtakojamas nuo tūpimo būdo.

Galima pastebėti, kad ši pusiau teorinė gaubtinė yra gana apytikslė lyginant su išmatuotais ir eksperimentiniais dydžiais. Thielemannas – Franzmeyeris padarė prielaidą, kad didesnės teigiamos apkrovos atsiranda skrendant didesniu greičiu esant vėjo šuorams, o didesnių neigiamų apkrovų atsiradimo priežastis – sparno masės įtaka riedant ar palietus žemę tūpimo fazėje.

Aukščiau aptartu būdu bendra gaubiamoji yra išvedama sutapdinus atskirų skrydžio fazių kumuliacinius dažnius atskiruose lygiuose. Tokiu pat būdu Markovo matrica gali būti išvesta kompiuteriu iš atskirų skrydžio fazių matricų.

2.2. Sklandytuvų sertifikavimo reikalavimų apžvalga

Po kelių metų, kai buvo standartizuota Thielemann-Franzmeyer resurso programa kuri buvo sukurta GFRP sklandytuvams, buvo atrastas anglies pluoštas – perspektyvi medžiaga ateičiai. Po to sekė naujų dervų sistemų, geriau tinkamų anglies pluošto kompozitams, įvedimas. Dėka sparčiai augančio pramonės susidomėjimo šiomis kompozitinėmis medžiagomis ir dėl jų kainos sumažėjimo iki ekonomiškai patrauklaus lygio, skubiai prireikė naujų sertifikavimo standartų. 1977 m. ANF (Arbeitskreis Neue Fasertechniken) buvo įkurta Vokietijoje. Tai yra specialistų grupė iš sklandytuvų gamintojų, medžiagų tiekėjų, akademinų skraidymo klubų, tyrimų institutų ir sertifikavimo vadovybės – LBA. Vienas jų darbo rezultatas buvo pataisymai sklandytuvų tinkamumo skraidymams reikalavimuose – „išankstiniai nurodymai GFRP ir CFRP sklandytuvų įtempimų analizei”.

Šiame dokumente seni patvirtinti reikalavimai buvo padidinti, įvertinus naujus atliktų tyrimų rezultatus. Jie apima komponentų iš kompozitinių medžiagų konstrukcinius išbandymus, šablono ir konstruktyvinius bandymus, taip pat ir poveikio resursui tyrimus. Vienas svarbus pareiškimas šiame dokumente yra toks, kad pagal JAR 22.627 ir JAR 22.619 kombinaciją turi būti įrodyta, skaičiavimais ar bandymu, kad reikia išvengti tokių įtempimų koncentracijos zonų, kur yra viršijamas sertifikuotas įtempimo lygis, naudojamas resurso bandymuose. Šio reikalavimo patenkinimas gali būti įrodytas statinio bandymo pagalba, jei pasiekiamas atsargos koeficientas $j = 1,5 \cdot 1,15 = 1,725$.

Lygiagrečiai su diskusijomis apie šį dokumentą ANF'e, buvo atlikti resurso bandymai su CFRP sklandytuvais aukštesnių teorinių leistinų charakteristikų sertifikavimui.

Tuo laiku, kai GFRP leistinas įtempimo lygis padidėjo nuo 160 iki 250 N/mm², CFRP sertifikuotas leistinas įtempimas tebuvo tik 200 N/mm². Dabar CFRP pasiektas teorinis įtempimo

lygis 400 N/mm^2 ir 6000 sertifikuotų skrydžio valandų, priimant 300 val. metinį resursą ir 20 metų tarnavimo laiką.

Naudojami medžiagų komponentai (dervos, stiklo pluoštas, anglies pluoštas ir t. t.) turi būti pakankamai specifikuotos ir sertifikuotos. Jos turi būti atrinktos ir išbandytos pagal atitinkamus aeronautikos standartus. Jų savybės turi būti pademonstruojamos temperatūrų intervale nuo -55°C iki $+75^\circ\text{C}$.

Fizinės ir cheminės kompozitinių medžiagų savybės turi būti nustatytos bandyminiams pavyzdžiams (sluoksninėms struktūroms, buterbrodams ir t. t.). reikia atkreipti ypatingą dėmesį į poveikius, laukiamus eksploatuojant (pvz. staigus ar trumpalaikis klimatinių sąlygų pasikeitimas, vandens įtaka ir t. t.). aplamai, tai bus įmanoma nustatyti tikrai bandymais, laikantis atitinkamų normų ir specifikacijų.

Konstruktivinis pagrindimas vidutinio klimato zonoms turi būti pagrįstas taip vadinamos "karščiausios vasaros dienos" aplinkos temperatūra, kuri pagal FAR § 23.1043(b) yra $t = +38^\circ\text{C}$. Saulės radiacija iššaukia papildomą sklandytuvo paviršiaus temperatūros padidėjimą. Baltiems poliruotiems paviršiams šis padidėjimas turi būti įvertintas, pridėdamas mažiausiai $\Delta t = +16^\circ\text{C}$. Todėl stiprumo išbandymas baltiems paviršiams turi būti nustatinėjamas, esant temperatūrai mažiausiai $+54^\circ\text{C}$ (temperatūros riba baltiems paviršiams).

Kai naudojamos kitos spalvos, temperatūros padidėjimas turi būti nustatomas palyginamojo bandymo su baltu paviršiumi pagalba, taip nustatant suminės temperatūros ribą. Bandymo rezultatų išsibarstymas turi būti įvertinamas atsargos patvirtintu koeficientu.

Eksportuojant į šalis, kuriose vyraujančios temperatūrinės sąlygos skiriasi nuo minėtų aukščiau, laukiamos sąlygos turi būti įvertintos individualiai sklandytuvo konstruktoriaus.

Kompozitinėms medžiagoms (sluoksninėms konstrukcijoms, buterbrodams ir t. t.) turi būti nustatytas temperatūros poveikis.

Statiniai bandymai turi būti atliekami, atsižvelgiant į ribinę temperatūrą (pvz., $+54^\circ\text{C}$ baltiems paviršiams), užtikrinant, kad ši temperatūra yra tolygiai pasiskirsčiusi visoje komponento struktūroje.

Pirmiausia, komponentas turi būti apkraunamas iki ribinės apkrovos ($j=1.0$). Apkrovos didinimo tempas turi būti parinktas taip, kad išvengti inercijos apkrovų įtakos. Rekomenduojama atkreipti dėmesį į tai, kad ribinė apkrova nebūtų pasiekama anksčiau nei 60 sekundžių periodo pabaigoje. Pasiekus šią ribinę apkrovą, apkrova atleidžiama ir nustatomos galimos deformacijos. Po to vėl apkraunama ribine apkrova ir ji išlaikoma 3 sekundes bei nustatomos deformacijos, esant šiai apkrovai.

Nuo $j=1,0$ apkrova turi būti didinama iki ribinės teorinės apkrovos ($j=1,5$); apkrovos didinimo tempas turi būti parinktas taip, kad ribinė teorinė apkrova būtų pasiekama prieš 30 sekundžių

periodo pabaigą. Ši ribinė teorinė apkrova turi būti išlaikoma mažiausiai 3 sekundes. Tiksliai tada pridėta apkrova turi būti didinama maksimaliais apkrovos prieaugliais $\Delta j=0,15$, kol pasiekiamas lūžimas; kiekvienas apkrovos prieauglis turi būti išlaikomas mažiausiai 3 sekundes. Jei komponentas atlaiko pridėtą apkrovą bent 3 sekundes ir nelūžta, ši apkrova – kitaip apkrova pridėta anksčiau – bus laikoma apkrovą atlaikančiu stiprumu, pagrįstu bandymu.

Nuovargio bandymo metu pirmiausia komponentas turi būti apkraunamas tolygiai, esant aplinkos temperatūrai, iki ribinės apkrovos ($j=1,0$). Pasiekus ribinę apkrovą, apkrova turi būti nuimama ir nustatomos galimos pastovios deformacijos. Nuo to momento uždedama ribinė teorinė apkrova ir po to vėl nuimama.

Toks nuovargio bandymas turi būti pagrįstas sklandytuvo ar motosklandytuvo 6000 valandų resurso laiku. Galimas rezultatų išsibarstymas turi būti įvertintas sklaidos koeficientu, mažiausiai lygiu 3. Bandymui kuo tiksliau turi būti modeliuojamos faktinės eksploatacijos sąlygos (pvz., skriejimas – perskridimas, pilnai akrobatinis skrydis, pradinis apmokymas, skrydis su vandens balastu ir t.t.). Nuovargio bandymas, kurio apkrovos spektras naudojamas aukštos klasės sklandytuvų ir motosklandytuvų, naudojamų kitiems tikslams, resursui ir / arba eksploatacijos laikui nustatyti, jei pasiektas įtempimų lygis, lyginant su aukštos klasės sklandytuvu.

Užbaigus nuovargio bandymą, komponentas vėl turi būti apkraunamas statiškai, esant temperatūrai iki $+54^{\circ}\text{C}$ (minimali temperatūros riba baltiems paviršiams).

Apkrova nuosekliai keliama iki ribinės apkrovos ($j=1,0$). Ši ribinė apkrova turi būti išlaikoma 3 sekundes ir nustatomos deformacijos, esant šiai apkrovai. Po to turi būti pridedama ribinė teorinė apkrova, tačiau apkrovos padidėjimas turi būti ne toks didelis, kad neiškreiptų bandymo rezultatų dėl inercijos jėgų. Ribinė teorinė apkrova turi būti išlaikoma bent 3 sekundes.

3. Nuovargio prognozavimo teorija

3.1. Nuovargio skaičiavimas nesimetriniuose cikluose

Anksčiau buvo nurodyta, kad nesimetrinį ciklą galima laikyti, kad susideda iš pastovaus įtempimo (ciklo σ_0 vidutinio įtempimo) ir simetriškai pulsuojančio kintamo įtempimo (ciklo σ_a įtempimo amplitudės).

Vietoje ribinio nuovargio $\pm\sigma_w$ nesimetrinio ciklo atveju tenka nustatinėti dvi nuovargio įtempimo ribas, charakterizuojančias ciklo ribinį režimą, dar nesukeliant bandinio sulūžimo (suirimo). Tokiais ribiniais įtempimais gali būti bet kuri pora iš keturių anksčiau paminėtų įtempimų, kadangi, žinant dviejų iš jų reikšmę, lengva nustatyti likusias reikšmes. Iš to seka, kad ciklas bus žinomas, jei bus nustatyti du ribiniai įtempimai, pavyzdžiui σ_0 ir σ_a arba σ_0 ir σ_{\max} arba σ_0 ir σ_{\min} ir t. t.

Tačiau praktikoje sutinkami patys įvairiausi ciklai. Asimetrijos rodiklis $s = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ gali kisti labai plačiose ribose priklausomai nuo ciklo maksimalaus ir minimalaus įtempimų dydžio ir ženklo. Ribinių įtempimų nustatymas, esant skirtingiems galimiems asimetrijos koeficientams būtų labai daug darbo reikalaujantis uždavinys. Todėl, natūraliai kyla klausimas, ar nėra ryšio tarp nuovargio ribos simetriniame cikle ir ribinių įtempimų asimetriniuose cikluose.

Šį uždavinį galima išskaidyti į du. Pirmas – nesimetrinis ciklas su vidutiniu tempimo įtempimu, o antras – nesimetrinis ciklas su vidutiniu gniuždymo įtempimu.

Spręsdamas pirmąjį uždavinį autorius vadovaujasi dviem hipotezėmis:

I. Ribinis darbinis kiekis, sugeriamas metalo be suirimo dėl histerezės reiškinių, yra pastovus dydis, nepriklausantis nuo ciklo asimetrijos rodiklio.

II. Esant ribiniams įtempimams, histerezės kilpos plotis proporcingas maksimaliam ciklo įtempimui.

Pagal pirmąją hipotezę, jei kuriam nors metalui histerezės kilpos plotas, esant simetrinio ciklo nuovargio ribai, yra lygus S_w , tai tam pačiam metalui jis taip pat bus lygus S_w ir esant nesimetrinio ciklo ribiniam įtempimams σ_a ir σ_0 . Pažymėjus histerezės kilpos plotą S_S , esant nesimetrinio ciklo ribiniams įtempimams, kai ciklą charakterizuoja nesimetriškumas s , galima parašyti:

$$S_w = S_S = const \quad (3.1.1)$$

Tik būtina žinoti, kad čia įvertinamas pradinio ciklinio klampumo (histerezės kilpos) dydis, todėl, kad, kaip minėta, ši charakteristika keičia dydį, augant ciklą skaičiui.

Histerezės kilpos plotas nuovargio riboje proporcingas įtempimui σ_w ir kilpos pločiui Δ_w , t.y. $S_w = A\sigma_w\Delta_w$, čia A – proporcingumo koeficientas.

Iš antros hipotezės turime: $\Delta_w = B\sigma_w$, čia B – taip pat proporcingumo koeficientas.

$$\text{Iš to seka: } S_w = AB\sigma_w^2 \quad (3.1.2)$$

Simetriniam ciklui užduotam ribiniais įtempimais σ_0 ir σ_a , turime: $S_a = A\sigma_a\Delta_a$ ir pagal antrąją hipotezę: $\Delta_a = B\sigma_{\max} = B(\sigma_0 + \sigma_a)$.

$$\text{Tuomet } S_s = AB\sigma_a(\sigma_0 + \sigma_a) \quad (3.1.3)$$

Sulyginę (3.1.2) ir (3.1.3) lygtis, pagal (3.1.1) lygtį, galutinai gauname:

$$\sigma_w^2 = \sigma_a^2 + \sigma_a \cdot \sigma_0 \quad (3.1.4)$$

Tai ir yra ieškoma priklausomybė tarp nuovargio ribos simetriniame cikle ir ribinių įtempimų asimetriniame cikle, kurio vidutinis įtempimas teigiamas, t.y. tempiantis. Šią lygtį galime pavaizduoti ir kitaip, per max ir min ciklo įtempimus.

Iš tikrųjų turime:

$$\left[\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right] \cdot \left[\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right] = \sigma_w^2,$$

$$\text{iš čia } \sigma_{\max}^2 - \sigma_{\max} \cdot \sigma_{\min} = 2\sigma_w^2 \quad (3.1.5)$$

$$\text{Ir toliau } \sigma_{\max}^2 - \sigma_{\max}(2\sigma_0 - \sigma_{\max}) = 2\sigma_w^2,$$

$$\text{Iš čia } \sigma_{\max}^2 - \sigma_0 \cdot \sigma_{\max} = \sigma_w^2 \quad (3.1.6)$$

$$\text{Galutinai, } (2\sigma_0 - \sigma_{\min})^2 - \sigma_0(2\sigma_0 - \sigma_{\min}) = \sigma_w^2$$

$$\text{Arba supaprastinus: } \sigma_{\min}^2 + 2\sigma_0^2 - 3\sigma_0\sigma_{\min} = \sigma_w^2 \quad (3.1.7)$$

Nesunku matyti, kad visos lygtys (3.1.4) – (3.1.7) yra hiperbolės lygtys. Čia reikia pabrėžti, kad tos lygtys laikytinos apytikslėmis, nes jos neatspindi viso metalų nuovargio reiškinio sudėtingumo ir atskiru atveju sustiprinimo ir susilpninimo, o šie reiškiniai gali labai žymiai paveikti asimetrinių ciklų dėsningumus. Taigi, pagal (3.1.4) – (3.1.7) lygtis, vidutinio ciklo įtempimo σ_0 padidėjimas turi būtinai iššaukti ciklo amplitudės σ_a sumažėjimą, jei abu šie įtempimai yra ribiniai. Tačiau sutinkami tokie metalai, kuriuose didėjant σ_0 pradeda apčiuopiamai vystytis, kaupiantis ciklų skaičiui, senėjimo procesai, kurie stiprina metalo atsparumą ir tuo pat metu didina σ_a reikšmę. Tokių reiškinų lygtys (3.1.4) – (3.1.7) neįvertina. Nežiūrint to, šios lygtys gali būti naudingos, visų pirma todėl, nes jos pagal vieną kriterijų – nuovargio ribą, esant asimetriniam ciklui σ_w leidžia nustatyti ribinius įtempimus bet kuriuose asimetriniuose cikluose, o antra, nurodyti nukrypimai, susieti su atsparumo padidėjimu, nepavojingi, nes eina į atsparumo atsargą ir galų gale, trečia, kad didelis eksperimentinių duomenų skaičius gerai derinasi su šiomis lygtimis.

Išvestų lygčių patikrinimui imkime nuovargio ribą simetriniame cikle, lygią 1, t.y. $\sigma_w=1$. Tada ribiniai įtempimai asimetriniuose cikluose bus išreikšti santykiniais vienetais, o lygtys (3.1.4) – (3.1.7) bus perrašomos tokiu pavidalu:

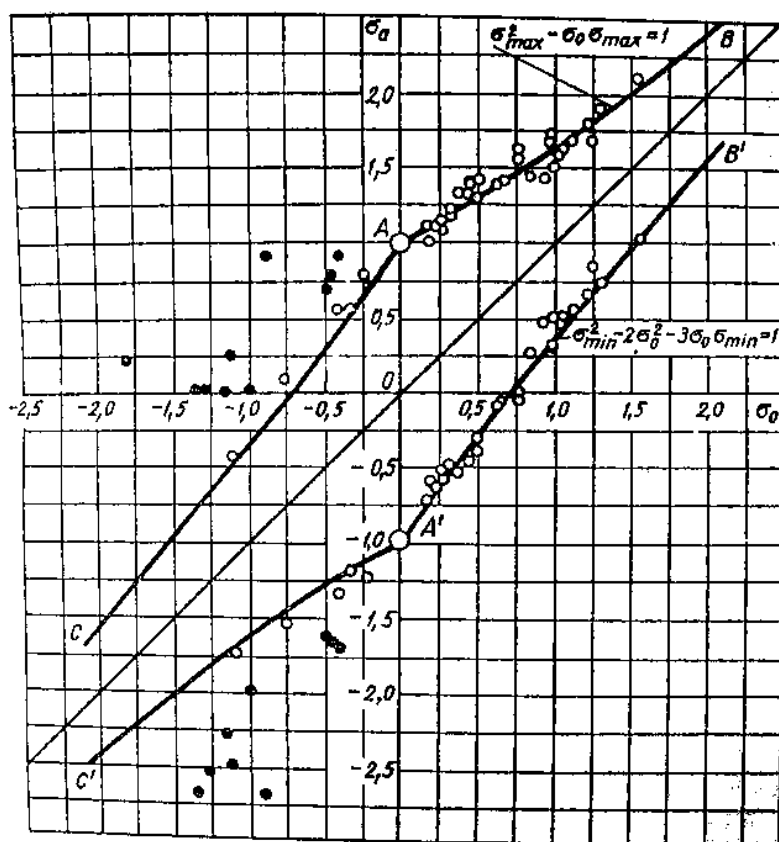
$$\sigma_a^2 + \sigma_a \cdot \sigma_0 = 1 \quad (3.1.4')$$

$$\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\max} \cdot \sigma_{\min} = 2 \quad (3.1.5')$$

$$\sigma_{\max}^2 - \sigma_0 \cdot \sigma_{\max} = 1 \quad (3.1.6')$$

$$\sigma_{\min}^2 + 2\sigma_0^2 - 3\sigma_0 \sigma_{\min} = 1 \quad (3.1.7')$$

Pavaizduotos lygtys (3.1.6') ir (3.1.7') grafiškai (pav. 3.1.1) ir panagrinėkim Hego, Muro ir Džaspero, Violerio, Baušingerio ir Odingo tyrinėjimus, kurių rezultatų taškai parodyti grafike 3.1 pav.



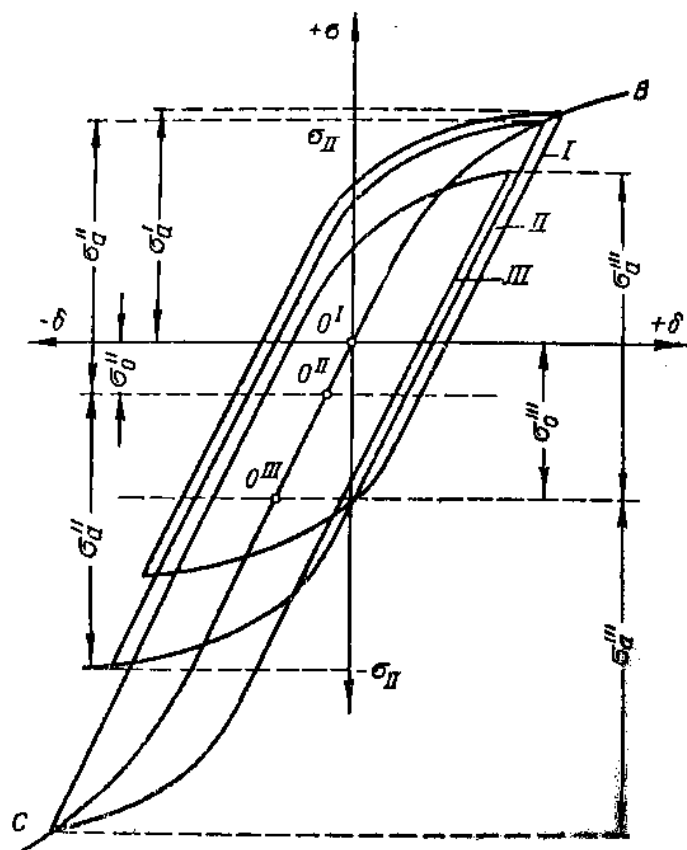
3.1 pav. Nesimetrinio ciklo tyrimo rezultatai

Lengva matyti, kad šie duomenys gerai derinasi su teorinėmis kreivėmis AB ir A'B', nubraižytomis pagal anksčiau pateiktas lygtis. Taškų sklaidą reikia pripažinti maža, nes metalų nuovargio bandymai nepasižymi paprastai dideliu tikslumu, o jų rezultatus dažnai iškreipia nenumatyti faktoriai. Sulyginus anksčiau pateiktą analizę ir eksperimentinius duomenis, galime priėti išvados, kad didėjant vidutiniam tempimo įtempimui σ_0 , ciklo įtempimo amplitudė σ_a nenutrūkstamai mažėja.

Panagrinėki atvejį, kai ciklo vidutinis įtempimas yra gniuždymo. Palyginus su ką tik nagrinėtu atveju, šis atvejis yra palyginti mažai iširtas. Vidutinio gniuždymo įtempimo poveikį į ciklo amplitudės dydį tyrinėjo Hegas, Muras, Lionas ir Inglis, Mattaos ir Zegeris. Šių tyrimų suvestinę galima rasti L. A. Glinkmano išsamiaame straipsnyje.

Pav. 3.1 visi anksčiau minėtų tyrimų rezultatai pavaizduoti taškais. Analizuojant juos galime padaryti tokias išvadas. Vidutinis gniuždymo įtempimas visiems metalams mažina įtempimo amplitudę (taškai pažymėti apskritimais) ir, be to, šis sumažėjimas vyksta pagal teorines kreives AC ir A'C', kurios nubrėžtos pagal lygtis (3.1.6') ir (3.1.7'), tačiau laikant, kad teigiamas šiuo atveju yra gniuždymo įtempimas. Kitaip sakant, šiems metalams kairioji nagrinėjamos diagramos pusė yra dešinėsios pusės veidrodinis atspindys. Tai reiškia, kad pasipriešinimas deformacijai ir tempime, ir gniuždyme šiems metalams yra vienodas. Ekvivalentiškumo koeficientas, įvertinantis tangentinių įtempimų gniuždymo ir tempimo metu vienetų skirtingą efektą, šiuo atveju lygus vienetui.

Kitaip yra metalams, kurių pasipriešinimas gniuždymui didesnis už pasipriešinimą tempimui. Tiems metalams, didėjant gniuždymo įtempimui, įtempimų amplitudė didėja, kaip matyti iš pav. 3.1 (juodi taškai). Panagrinėkim 3.2 pav. Linija O'B charakterizuoja metalo pasipriešinimą tempimui, o linija O'C – gniuždymui.



3.2 pav. Histerezės kilpa nesimetrinio ciklo atveju

Simetrinio ciklo atveju ties nuovargio riba elastingą deformaciją sukels tempimo įtempimai, to pasekmėje susidarys histerezės kilpa I, kurios plotas, kaip minėta anksčiau, lygus:

$$S_I = A \sigma_a^I \Delta_I$$

Jei metalas vienodai priešinasi tampriai deformacijai ir tempime, ir gniuždyme, tai apatinio įtempimo padidėjimas iššaukia tokio pat laipsnio histerezės kilpos padidėjimą, kaip ir viršutinio tempimo padidėjimas, kas sukeltų pavyzdžio sulūžimą (suirimą). Taigi, seka, kad šiuo atveju histerezės kilpos plotui išsaugoti reikėtų, padidinus apatinį įtempimą, sumažinti viršutinį. Rezultate pagal lygtį įtempimo amplitudė turėtų sumažėti.

Tuo atveju, kai metalo pasipriešinimas gniuždymui didesnis, histerezės kilpos dydžio išlaikymui, žymus apatinio įtempimo padidėjimas pareikalaus apatinio įtempimo sumažėjimo (kilpa II). Ši aplinkybė ir sukels įtempimo amplitudės padidėjimą σ_a^{II} . Bet šis atvejis ir yra nesimetrinis ciklas su vidutiniu gniuždymo įtempimu σ_0^{II} . Padidinę toliau vidutinį gniuždymo įtempimą iki σ_0^{III} ir išlaikydami lygybę: $S_I = S_{II} = S_{III}$, galime įtempimo amplitudę padidinti iki σ_a^{III} .

Tačiau toks įtempimo amplitudės didinimas galimas tik iki tam tikros ribos, sąlygojamos to režimo, kuriame plastinę deformaciją pradės sukelti ne tempimo, o suspaudimo įtempimai. Pradedant nuo šio režimo, tolimesnis apatinio įtempimo didėjimas sukels gana žymų histerezės kilpos išplatėjimą. Siekiant išlaikyti kilpos plotą lygų S_I , būtina žymiai sumažinti viršutinio įtempimo dydį, kas po to sukels žymų įtempimo amplitudės sumažėjimą.

Taigi seka, kad metaluose, kurių pasipriešinimas gniuždymui didesnis už pasipriešinimą tempimui, ribiniame režime didėjant gniuždymo įtempimui, įtempimo amplitudė iš pradžių didės o po to mažės.

Tyrimų skaičiaus nepakankamumas, sprendžiant klausimą apie vidutinio gniuždymo įtempimo įtaką ribiniams įtempimams, neleidžia nustatyti šio reiškinio kokio nors bendro dėsningumo. Todėl skaičiuojant mašinų detalių atsparumą, rekomenduojama ir tuo atveju kol kas naudotis tais pačiais santykiais, kaip ir tempiančių vidutinių įtempimų atveju, jei žinoma, neišbandytas nuovargiui nesimetriniame cikle su gniuždymo vidutiniu įtempimu.

Lygtis (3.1.4) – (3.1.7) galima naudoti tokių detalių skaičiavimui, kurios patiria ciklinę apkrovą, kintančią visumoje nuo kokio nors minimalaus dydžio P_{\min} iki maksimalaus P_{\max} . Šias lygtis galima panaudoti dvejopai.

Pirma, jų pagalba galima braižyti taip vadinamas ribinių įtempimų diagramas ir manipuluojant jomis, nustatyti duotai medžiagai teorinius įtempimus arba bendrą atsparumo atsargos koeficientą. Antra, šios lygtys gali būti išvestos į skaičiavimo formules.

Panagrinėkim ribinių įtempimų diagramų sudarymą. Paprasčiausia diagrama gaunama koordinatėse $\sigma_0 - \sigma_a$. Jų sudarymui reikia žinoti reikiamus ribinį nuovargį ir takumo ribą. Naudojant lygtį (3.1.4), galima (pav. 3.3) nubraižyti kreives $a_1 b_1$ įlinkiui:

$$\left(\sigma'_w\right)^2 = \left(\sigma'_a\right)^2 + \sigma'_a \sigma'_0; \quad a_2 b_2 - \text{tempimui} - \text{gniuždymui: } \sigma_w^2 = \sigma_a^2 + \sigma_a \cdot \sigma_0 \quad \text{ir } a_3 b_3 - \text{susukimui:}$$

$$\left(\tau'_w\right)^2 = \left(\tau'_a\right)^2 + \tau'_a \tau'_0.$$

Šių kreivių panaudojimas turi būti ribojamas tos sąlygos, kad maksimalus ciklo įtempimas neturi būti didesnis už takumo ribą (esant tam pačiam įtempimo tipui). Ši sąlyga apibrėžiama:

Įlinkiui – kreivė $b_1 c_1$	$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma'_0 = \sigma'_s;$
Tempimui – gniuždymui – linija $b_2 c_2$	$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_0 = \sigma'_s; \quad (3.1.8)$
Sukimui linija $b_3 c_3$	$\tau_{\max} = \tau'_a + \tau'_0 = \tau'_s$

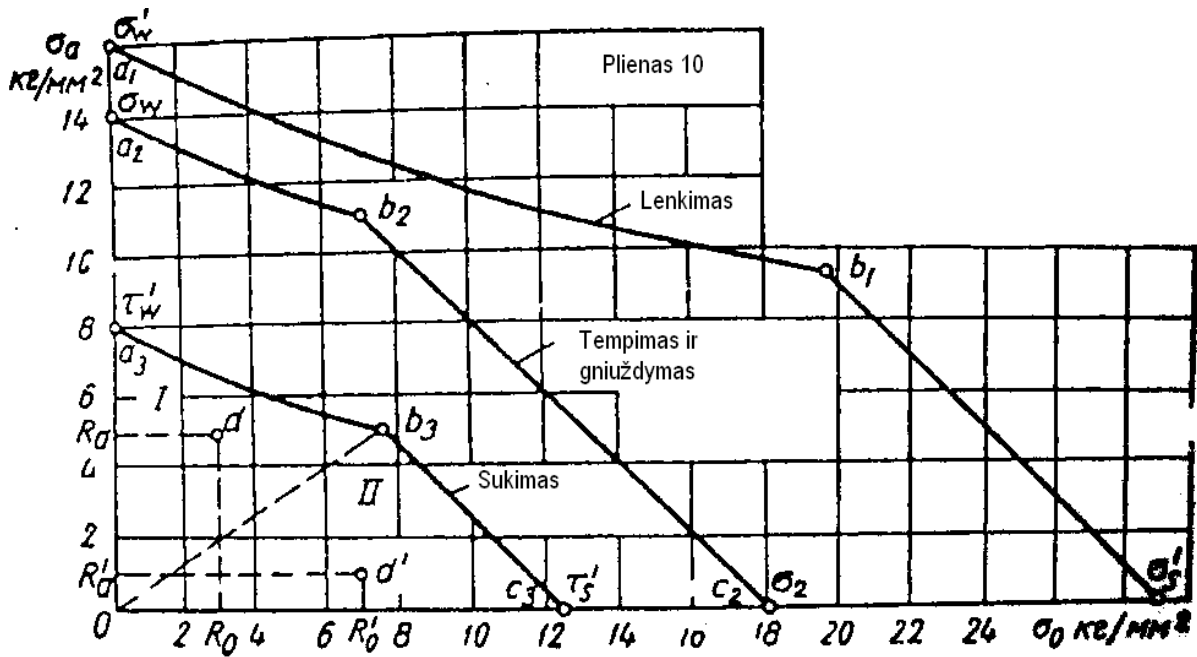
Diagramoje, nubraižytoje kiekvienam įtempimo tipui, reikia išskirti du laukus: I ir II (3.3 pav.). Teoriniai įtempimai, atitinkantys lauką I, sąlygoja bendrą atsparumo atsargos koeficientą, juos sulyginus su ribiniu nuovargiu. O teoriniai įtempimai, atitinkantys lauką II, sąlygoja bendrą atsparumo atsargos koeficientą, palyginus juos su takumo riba.

Tarkim, kad teorinius įtempimus susukimo atveju nusako pastovi dedamoji R_0 ir simetriškai pulsuojanti dedamoji R_a (taškas d diagramoje). Toks asimetrinis ciklas bus toks pat efektyvus kaip simetrinis ciklas su įtempimu: $R_w = \sqrt{R_a + R_a R_0}$, o ieškomas bendras atsparumo atsargos koeficientas bus lygus: $k_0 = \frac{\tau'_w}{R_w}$.

Jei teorinius įtempimus nusako dydžiai R'_0 ir R'_a ir atitinkamas taškas d' yra diagramos lauke II, tai bendras atsparumo atsargos koeficientas turi būti nustatomas iš takumo ribos apribojančios sąlygos: $R'_s = R'_a + R'_0$ ir $k_0 = \frac{\tau'_s}{R'_s}$.

Jei ir šiuo atveju nustatysime bendrą atsparumo atsargos koeficientą ribinio nuovargio atžvilgiu, tai jo reikšmė gautųsi aiškesnė, kas būtų neteisinga. Taigi, seka, kad pirmu atveju atsparumo atsarga atitolina detalės galimybes sulūžti (suirti) nuo nuovargio, o antru atveju – nuo galimybės deformuotis plastiškai neleistinu dydžiu.

Dar sudėtingesnė, o kai kuriais atvejais akivaizdesnė, gaunama ribinių įtempimų diagrama, jei ant koordinatinių ašių atidėta vidutinis įtempimas σ_0 ir maksimalūs ir minimalūs ciklo įtempimai. Tokios diagramos sudarymui reikia naudotis lygtimis (3.1.6) ir (3.1.7).



3.3 pav. Ribinių įtempimų diagrama plienui 10

Panagrinėkim, kaip galima įvesti į skaičiavimo formules lygtis, surašančias ribinį nuovargį simetriniame cikle su ribiniais įtempimais asimetriniuose cikluose. Tam vėl pažymėkime:

R_a – simetriškai pulsuojančią teorinio įtempimo dedamąją (teorinio ciklo amplitudę);

R_0 – pastovią teorinio įtempimo dedamąją (vidutinį teorinio ciklo įtempimą);

R_{\max} – maksimalus teorinis įtempimas;

R_{\min} – minimalus teorinis įtempimas;

K_0 – atsparumo bendros atsargos koeficientas.

Atsparumo sąlyga asimetriniame cikle gali būti išreiškiama taip (visiems įtempimų tipams), naudojant lygtis (3.1.4), (3.1.5) ir (3.1.8):

$$\frac{\sigma_w}{K_0} \geq \sqrt{R_a^2 + R_0 R_0} \quad (3.1.9)$$

$$\frac{\sigma_w}{K_0} \geq \sqrt{\frac{R_{\max}^2 - R_{\max} R_{\min}}{2}} \quad (3.1.10)$$

$$\frac{\sigma_s}{K_0} \geq R_{\max} = R_a + R_0 \quad (3.1.11)$$

Skaičiavimuose patogiau yra naudotis tokiomis lygtimis, kurios suriša veikiančias jėgas su detalės pjūvio matmenimis. Tempimo ar gniuždymo atveju dažniausiai būna žinomos maksimalios ir minimalios jėgos P_{\max} ir P_{\min} ir pagal jas reikia nustatyti pjūvio f matmenis. Priimant:

$$R_{\max} = \frac{P_{\max}}{f} \quad \text{ir} \quad R_{\min} = \frac{P_{\min}}{f},$$

šias reikšmes įstatom į (3.1.10) lygtį, ir gauname:

$$f \geq \frac{k_0}{\sigma_w} \sqrt{\frac{P_{\max}^2 - P_{\max} P_{\min}}{2}} \quad (3.1.12)$$

naudojant santykį $s = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$,

paskutinę lygtį galime perrašyti taip:

$$f \geq \frac{k_0 P_{\max}}{\sigma_w} \sqrt{\frac{s-1}{2s}} \quad (3.1.13)$$

Analogiškai tempimo skaičiavimo formulėms, sudaromos formulės įlinkiui ir sukimui.

Primant:

$$R_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \quad \text{ir} \quad R_{\min} = \frac{M_{\min}}{W},$$

čia M_{\max} ir M_{\min} – atitinkamai maksimalus ir minimalus lenkimo momentai, lengva gauti tokias lygtis įlinkimo atvejui:

$$W \geq \frac{k_0}{\sigma'_w} \sqrt{\frac{M_{\max}^2 - M_{\max} M_{\min}}{2}} \quad (3.1.14)$$

$$W \geq \frac{k_0 M_{\max}}{\sigma'_w} \sqrt{\frac{s' - 1}{2s'}} \quad (3.1.15)$$

čia W – pasipriešinimo momentas;

σ'_w – ribinis nuovargis, esant simetriniam išlinkimui;

s' – maksimalaus ir minimalaus momentų santykis.

Sukimui atitinkamai randame:

$$W_s \geq \frac{k_0}{\tau'_w} \sqrt{\frac{M_{\max}^2 - M_{\max} M_{\min}}{2}} \quad (3.1.16)$$

$$W_s \geq \frac{k_0 M_{\max}}{\tau'_w} \sqrt{\frac{s' - 1}{2s'}} \quad (3.1.17)$$

čia W_s – pasipriešinimo sukimui momentas;

τ'_w – ribinis nuovargis, esant simetriniam sukimui.

3.2. Apkrovų sekos ir blokinio apkrovimo poveikiai nuovargio reakcijai kompozituose

Didžioji dauguma nuovargio apkrovimo eksperimentų yra pastovios amplitudės bandymai, nors šis nuovargio apkrovimo tipas beveik nepasitaiko realiomis eksploataavimo nuovargio apkrovimo sąlygomis. Tačiau dėl brangių ir ilgai trunkančių kintamos amplitudės eksperimentų jų įtaka dažnai įvertinama, atliekant blokinio apkrovimo eksperimentus su įvairiomis žemomis-aukštomis ir aukštomis-žemomis sekomis. Šiame straipsnyje bus tyrinėjami apkrovų sekos ir blokinio apkrovimo poveikiai nuovargio pažeidimų vystymuisi pluoštu armuotose polimerų kompozitinėse medžiagose. Pirmiausia bus parodyta, kad literatūroje nuomonės apie pažeidžiantį žemos-aukštos ir aukštos-žemos apkrovų sekos poveikį yra pasidaliję. Toliau bus eksperimentiškai išbandytas blokinio apkrovimo poveikis kompozitų lenkimo nuovargio elgsenai ir kiekybiškai sumodeliuotas naujai sukurtu nuovargio pažeidimo modeliu. Galų gale kiekybiniai modeliavimai parodys, kad perėjimai nuo žemo prie aukšto įtempimo lygių yra labiausiai pažeidžiantys ir kad perėjimų skaičius ir ypačiai jų santykinė reikšmė nustato, kuri blokinio apkrovimo seka (žema-aukšta ar aukšta-žema) yra labiausiai pažeidžianti.

Studijuojant nuovargio elgseną pluoštu armuotose kompozitinėse medžiagose, žinoma, geriausia yra kuo tiksliau atkurti eksploataavimo nuovargio apkrovimo sąlygas. Mechaninėje apkrovos trukmės, veikiančios komponentą eksploatuojant, istorijoje, apkrovimas yra praktiškai visada kintamos amplitudės ir tik retkarčiais pastovios. Nepaisant to, nuovargio bandymai vis dar vykdomi esant pastoviai amplitudei, ir šį pasirinkimą daugumoje nulėmė brangūs ir daug laiko trunkantys kintamos amplitudės eksperimentai, standartinių nuovargio bandymo įrenginių trūkumai ir eksploataavimo apkrovos spektro neapibrėžtumai [1].

Kai pastovios amplitudės nuovargio bandymų rezultatai turi būti ekstrapoliuojami į kintamos amplitudės nuovargio apkrovimą, turės būti naudojamos „pažeidimų sanaupos taisyklės“ arba „kaupiamo pažeidimo dėsniai“. Paprasčiausia iš jų yra gerai žinoma Palmgren-Mainerio taisyklė [2]:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (3.2.1)$$

Čia D reiškia nuovargio pažeidimą, o n_i ir N_{fi} yra faktiškai taikytų ciklų skaičius ir bendras ciklų skaičius iki lūžimo i -tajam pastovios amplitudės apkrovimo lygiui, atitinkamai. Lūžimo atveju: $D = 1$, o $n_i = N_{fi}$. Ši taisyklė yra tiesinė pažeidimų sanaupos taisyklė, kuri pirmiausia buvo pasiūlyta metalinių komponentų, patiriančių nuovargį, tarnavimo trukmei nusakyti ir į kurią, nepaisant jos plataus panaudojimo, konstruktoriai visada žiūrėjo įartinai, kadangi dažnai pasirodydavo, kad ji duoda nekonservatyvius rezultatus: tai yra, nusako tarnavimo trukmes,

didesnes negu stebimos eksperimentinės [3]. Jos pagrindiniai trūkumai yra: (a) apkrovų lygio nepriklausomybė, (b) apkrovų sekos nepriklausomybė ir (c) apkrovų sąveikos atskaitomybės stoka [4].

Paprasčiausias žingsnis pirmyn iš tiesinės pažeidimų taisyklės yra ieškoti netiesinių funkcijų, kurios vis dar taiko pažeidimo parametą D , kaip apibrėžia lygtis (3.2.1). Pavyzdžiui, Marko-Starkio modelyje paprastas netiesinis pateikimas siūlo tokios formos lygtį:

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right)^\alpha \quad (3.2.2)$$

Čia laipsnis α yra nuo apkrovos priklausantis kintamasis. Tarnavimo trukmės skaičiavimai, pagrįsti Marko-Starkio teorija, duoda Mainerio sumą $\sum \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right) > 1$ žemų-aukštų apkrovų sekoms ir

Mainerio sumą $\sum \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right) < 1$ aukštų-žemų apkrovų sekoms [4].

Skirtingos tarnavimo trukmės prognozės žemų-aukštų ir aukštų-žemų apkrovų sekoms atitinka eksperimente stebėtą „apkrovos sekos efektą“: skirtinga nuovargio trukmė metaliniams arba kompozitų komponentams, veikiant žemų-aukštų ir aukštų-žemų apkrovų sekoms.

Apkrovos sekos efektas dažnai tyrinėjamas, atliekant blokinio apkrovimo nuovargio eksperimentus. Šį efektą dabar aptarsime detaliau pluoštu armuotoms kompozitinėms medžiagoms. Pirma, literatūros apžvalga parodys, kad literatūroje iš viso nėra sutartinės nuomonės, kuri seka (žema-aukšta ar aukšta-žema) yra labiausiai pažeidžianti kompozitams. Toliau, blokinio apkrovimo poveikis į kompozitų nuovargio reakciją bus tyrinėjamas pagal eksperimentinius rezultatus ir skaitmeninius modeliavimus, naudojant naujai sukurtą nuovargio pažeidimo modelį. Galų gale, skaitmeninis modeliavimas parodys, kad autoriaus nuomone, labiausiai pažeidžiantis poveikis yra (dažnuose) perėjimuose nuo žemų prie aukštų įtempimų lygių. Siūlomas nuovargio pažeidimo modelis atves į naują pažeidimo sankaupos traktavimo supratimą.

Apkrovos sekos poveikiui tirti plačiausiai yra naudojami blokinio apkrovimo eksperimentai. Cikliniai blokai su pastovia apkrovos amplitude yra įvedami ir tiriama jų sekos įtaka kompozito komponento nuovargio trukmei.

Paprastai įvertinama pažeidimų sankaupa, apkraunant nuosekliais blokinais apkrovimais, naudojant liekamosios trukmės teoriją arba liekamojo stiprumo teoriją [5]. Liekamosios trukmės teorijoje pažeidimas D yra praeitų ciklų skaičiaus n_i ir ciklų skaičiaus iki lūžimo N_{fi} funkcija duotai pastoviai max amplitudei σ_i : $D(n_i, N_{fi})$. Paprasčiausias tokio pažeidimo funkcijos pavyzdys yra Palmgren-Mainer'io taisyklė (žiūr. lygtį (3.2.1)). Tada „pažeidimo ekvivalencijos“ principas

naudojamas nustatyti ciklą skaičiui n_2 , kuris esant įtempimo amplitudei σ_2 , iššaukia tokį pat pažeidimą kaip ciklai n_1 , esant įtempimo amplitudei σ_1 [5]:

$$D(n_1, N_{f1}) = D(n_2, N_{f2}) \quad (3.2.3)$$

Iš kitos pusės, liekamojo stiprumo teorijoje pažeidimo funkciją D galima išreikšti kaip $D(\sigma_i, \sigma_r)$, kur σ_i yra taikytas pastovios amplitudės įtempimo lygis, o σ_r – liekamasis stiprumas. Kintamieji σ_i ir σ_r yra susieti su praeitų ciklų skaičiumi n_i ir ciklų skaičiumi iki lūžimo N_{fi} S-N kreive ir liekamasis stiprumo modeliu. Vėlgi, pažeidimo ekvivalencijos principas taikomas dviejų laipsnių apkrovimui:

$$D(\sigma_1, \sigma_{r2}) = D(\sigma_1, \sigma_{r1}) \quad (3.2.4)$$

Hašinas [5] parodė, kad liekamosios trukmės ir liekamojo stiprumo pažeidimo sankaupos teorijos yra visiškai ekvivalenčios, kadangi priimta liekamojo stiprumo kreivių funkcinė forma apibrėžia pažeidimo funkciją ir tuo būdu liekamąją trukmę.

Tokios pažeidimų sankaupos teorijos tuomet taikomos įvertinti nuovargio resursą, esant blokiniam apkrovimui ir spektriniam apkrovimui. Studijuojant literatūrą šia tema, galima padaryti vienintelę bendrą išvadą: nėra vieningos nuomonės iš viso, kurios apkrovų sekos turi blogiausią poveikį nuovargio resursui. Pavyzdžiui, 1998 m. Bartli-Čo ir kt. [6] rašė: „*Kompozitams šie testai atskleidė apkrovų sekos poveikį, kur žemų-aukštų apkrovų seka iššaukia trumpesnę nuovargio resursą negu aukštų-žemų apkrovų seka*“. 2000 m. Gamstedas ir Sjogrenas [7] konstatavo: „*Eksperimentiškai tyrinėjant, šių mechanizmų tarpusavio sąveika parodė, kodėl aukštų-žemų amplitudžių lygis iššaukia trumpesnius resursus negu žemų-aukštų apkrovų eilė.*“ Žinoma, abi nuomonės visada buvo grindžiamos eksperimentiniais stebėjimais, bet, nelaimė, su skirtingomis medžiagomis, skirtingomis apkrovimo sąlygomis ir skirtingais taikytais įtempimo lygiais, taigi, sunku atiduoti pirmenybę kuriai nors iš dviejų nuomonių. Čia kiekvieną nuomonę pristatančių publikacijų klasifikacija buvo grindžiama eksperimento rezultatų pasekmėmis, o ne kuris pažeidimų sankaupos modelis buvo galiojantis.

Nuovargio resursas \check{Z} -A < Nuovargio resursą A- \check{Z}

Beveik visi pažeidimų sankaupos modelių įvertinimai šioje kategorijoje naudoja Brautmano ir Sahu [8] blokinio apkrovimo nuovargio bandymų su skersinio sluoksnio E-stiklo/epoksidinės dervos bandiniais, duomenis. Visi šie nuovargio bandymai buvo atlikti 10 Hz dažniu, kai įtempimu santykis R 0,05. Vidutinė kraštutinio statinio stiprumo reikšmė buvo duota 448 MPa. Jie pastebėjo, kad visumoje žema-aukšta seka buvo labiau pažeidžianti negu aukšta-žema seka. Jangas ir Džounsas [9] sukūrė liekamojo stiprumo modelį, kuriame daroma prielaida, kad statinis maksimalus stiprumas išsidėstęs pagal dviejų parametrų Weibulio pasiskirstymą. To rezultate prognozuojamas nuovargio resursas yra taip pat statistinis kintamasis, pristatomas trijų parametrų Weibulio pasiskirstymu. Šių statistinių pasiskirstymų pagrindu buvo išvesta, kad Mainerio suma D visuomet

yra didesnė negu vienetas aukšto-žemo apkrovimo sekoje ir visuomet mažesnis negu vienetas žemo-aukšto apkrovimo sekoje [9]. Žinoma, šio tvirtinimo pagrįstumas priklauso nuo siūlomo liekamojo stiprumo modelio teisingumo.

Toliau, Jangas ir Džounsas [9] pasiūlė pakeisti Mainerio sumą liekamojo stiprumo sąvoka, kur priimama, kad liekamasis stiprumas $R(n_1)$ po n_1 ciklų (įtempimas σ_1) gali būti laikomas pradiniu stiprumu tolesniems ciklams, kai įtempimo amplitudė σ_2 . Ši teorija buvo taikoma blokinio pakrovimo eksperimentams su skersinio sluoksnio E-stiklo/epoksidinės dervos bandiniais, kuriuos Brautmanas ir Sahu atliko anksčiau [8]. Hašinas [5] palygino, tarpe kitų, Jango ir Džounso liekamosios trukmės traktavimą su Palmgren-Mainer'io taisykle ir priėjo išvados, kad nė vienas iš liekamojo stiprumo modelių neduoda geresnės nuovargio resurso prognozės kaip paprasta Palmgren-Mainer'io taisyklė.

Šafas ir Davidsonas [10, 11] pritaikė tą patį liekamojo stiprumo ekvivalencijos principą jų liekamojo stiprumo modelio išplėtimui iki daug įtempimų lygių apkrovimų. Tačiau jie papildomai įvedė taip vadinamąjį „ciklų maišymo faktorių“. Šis faktorius turėtų paaiškinti dažnų perėjimų nuo žemo prie aukšto vidutinio įtempimo pažeidžiantį poveikį. Šį „ciklų maišymo faktorių“ detaliai aprašė Farrow [12], ir jis reiškė, kad pastebėta, jog kompozitų laminatų liekamasis stiprumas ir nuovargio resursas mažėja žymiai greičiau, kai apkrovimo seka pakartotinai keičiama tiksliai po kelių apkrovimo ciklų. Vėlgi duomenys, kuriuos pateikė Brautmanas ir Sahu [8], buvo naudojami pagrįsti jų pažeidimų sankaupos modelį.

Vitvortas [13] išvedė netiesinį pažeidimų sankaupos dėsnį, kuris iš tikrųjų yra modifikuota Palmgren-Mainer'io sumos forma, kai į išraišką įvedamas nuo įtempimo priklausantis koeficientas. Jis pritaikė šią taisyklę grafito/epoksidinės dervos laminatų įtempimo nuovargio bandymų ($R=0,1$) eksperimentiniams duomenims. Vėlgi, žemų-aukštų apkrovų seka iššaukė trumpesnius nuovargio resursus negu aukštų-žemų apkrovų seka atitinkamai pagal eksperimentinius rezultatus.

Bartli-Čo ir kt. [6] atliko dviejų blokų apkrovimo nuovargio bandymus su kvazi-izotropiniais grafito/epoksidinės dervos laminatais. Jie pastebėjo, kad žemų-aukštų apkrovų seka iššaukdavo didesnius įtrūkimų tankius negu aukštų-žemų apkrovų seka. Tačiau jų pažeidimų sankaupos modelis nepriklausė nuo apkrovimų istorijos ir jam nepavyko sumodeliuoti šių eksperimente pastebėtų rezultatų.

Ly ir Džen [14, 15] neseniai pasiūlė netiesinės pažeidimų sankaupos taisyklę, kurios pagrindas yra Marko-Starkio pažeidimų sankaupos dėsnis (žiūr. lygtį (3.2.2)) ir įteisino savo modelį prieš Brautmano ir Sahu [8] paskelbtus rezultatus.

$$\text{Nuovargio resursas } \check{Z}-A > \text{Nuovargio resursas } A-\check{Z}$$

Chvang ir Hanas [16] savo apžvalgoje pastebėjo apie pažeidimų sankaupos modelius „...yra bendrai žinomas faktas, kad Palmgren-Mainer'io pažeidimų suma iki lūžimo yra didesnė negu

vienetas žemų-aukštų apkrovų bandymų metu ir mažesnė negu vienetas aukštų-žemų bandymų atveju“. Jų tvirtinimas buvo grindžiamas Hano ir Hamdi [17] tempimo bandymų su stiklo pluošto audinio epoksidinės dervos kompozitais eksperimentiniais rezultatais. Šie rezultatai iš tikrųjų parodė, kad žemų-aukštų apkrovų bandymai yra palankesni negu aukštų-žemų apkrovų bandymai.

Adamas ir kt. [13, 18] pasiūlė liekamojo resurso pažeidimo sankaupos teoriją, kur laipsnis α Marko-Starkio modelyje (žiūr. lygtį (3.2.2)) yra nuo įtempimo priklausanti funkcija, bet ši funkcija dabar yra skirtinga tempimo ir gniuždymo apkrovimams. Šis modelis buvo taikomas keturių vienetai blokinio apkrovimo sekoms anglies/epoksidinės dervos sluoksniams. Buvo prieita išvados, kad žemesnis pradinis įtempimas yra palankesnis negu aukštesnis pradinis įtempimas.

Gamstedas ir Sjogrenas [7] pastebėjo, kad skersinio sluoksnio anglies/epoksidinės dervos laminatų atžvilgiu aukštų-žemų amplitudžių lygiai iššaukdavo trumpesnius resursus negu žemų-aukštų apkrovų eilė. Jie konstatavo, kad pradiniai mechanizmai yra aktyvūs aukštų įtempimų lygiuose ir kad progresuojantys mechanizmai dominuoja žemesnių amplitudžių lygiuose. Kadangi aukštų-žemų apkrovų seka sukelia pažeidimą, nuo kurio progresuojantys mechanizmai gali startuoti, tai labiau pažeidžia negu žemų-aukštų apkrovų eilė.

Iš literatūros apžvalgos galima daryti išvadą, kad nuomonės griežtai skiriasi. Dar daugiau, labai sunku įvertinti šių eksperimentinių stebėjimų bendrumą, kadangi kiekvienoje eksperimentinėje darbo vietoje buvo naudojamos skirtingos medžiagos, sluoksniai ir blokinio apkrovimo sąlygos.

Šis fenomenologinis liekamojo standumo modelis siekia modeliuoti pagrindinius nuovargio pažeidimo mechanizmus ir prognozuoti pažeidimo augimą nuovargio resurso metu. Šis modelis bus naudojamas modeliuoti blokinio apkrovimo eksperimentus ir tirti apkrovos sekos efektą.

3.3. Nuovargio pažeidimo modelio schema

Neseniai autoriai pasiūlė naują nuovargio pažeidimo modelį, kuris gali modeliuoti tris standumo degradavimo etapus (aštrus pradinis blogėjimas – laipsniškas nusidėvėjimas – galutinis lūžimas) [19]. Šis fenomenologinis modelis galioja bandinių be išsisluoksniavimo vienašiam

apkrovimui su nuliniu įtempimo santykiu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

Šis modelis pagrįstas liekamojo standumo idėja. Iš čia įtempimas ir deformacija yra susieti įprastai ištisinio pažeidimo mechanikoje naudojama lygtimi:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} = E_0 \cdot \varepsilon \quad (3.3.1)$$

$\tilde{\sigma}$ yra efektyvus įtempimas, σ yra taikomas nominalus įtempimas, ε yra nominali įraža, E_0 yra nepažeistas Jango modulis, o $D = 1 - \frac{E}{E_0}$ yra nuovargio pažeidimo matas. Jo reikšmė yra tarp nulio (nepažeistos medžiagos būseną) ir vieneto (galutinis lūžimas).

Pagrindinis liekamojo standumo modelių trūkumas yra tai, kad jie nepateikia priemonių apskaičiuoti galutinio lūžimo momentą. Ši problema išsprendžiama nustatant ryšį tarp pažeidimo kintamojo D (liekamojo standumo matas) ir „nuovargio pažeidimo indekso“. Be to, Cai-Vu statinio lūžimo kriterijus interpretuojamas kitaip. efektyvus (faktinis) įtempimas $\tilde{\sigma}$ yra įterptas į Cai-Vu kriterijų ir rezervinis koeficientas R iki lūžimo yra apskaičiuojami iš Cai-Vu lygties:

$$\left[\left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^2 \frac{1}{X_T \cdot |X_C|} \right] R^2 + \left[\frac{\sigma}{1-D} \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{|X_C|} \right) \right] R - 1 = 0 \quad (3.3.2)$$

Čia X_T ir X_C yra statinis įtempimas ir gniuždymo stiprumas, atitinkamai. Nuovargio lūžimo indeksas $\Sigma(\sigma, D)$ tuomet yra apibrėžiamas kaip atvirkštinis dydis rezerviniam koeficientui R . Vadinasi, nuovargio lūžimo indeksas yra taikomo efektyvaus įtempimo σ santykis su statiniu stiprumu; jo reikšmė yra tarp nulio (taikomas įtempimas lygus nuliui) ir vieneto (efektyvus įtempimas lygus statiniam stiprumui). Šis efektyvaus įtempimo σ santykio su statiniu stiprumu matas dabar yra naudojamas pažeidimo augimo tempo lygtyje dD/dN , kuri duodama [19]:

$$\frac{dD}{dN} = \begin{cases} c_1 \cdot \Sigma \cdot \exp\left(-c_2 \frac{D}{\sqrt{\Sigma}}\right) + c_3 \cdot D \cdot \Sigma^2 \cdot [1 + \exp(c_5(\Sigma - c_4))], & \text{jei } \sigma \geq 0 \\ c_1 \cdot \Sigma \cdot \exp\left(-c_2 \frac{D}{\sqrt{\Sigma}}\right) + c_3 \cdot D \cdot \Sigma^2 \cdot \left[1 + \exp\left(\frac{c_5}{3}(\Sigma - c_4)\right)\right], & \text{jei } \sigma < 0 \end{cases} \quad (3.3.3)$$

Augimo tempas yra skirtingas tempime ir gniuždyme, kadangi eksperimentiniuose nuovargio bandymuose buvo pastebėta, kad gniuždymo pažeidimo augimo tempas yra daug mažesnis tokiomis apribojančiomis sąlygomis: (a) įtempimo santykis R yra teigiamas arba nulinis visiems apimties medžiagos taškams ir (b) čia nėra išsisluoksniavimų.

Pažeidimo augimo tempo lygtyse visos penkios konstantos c_i ($i = 1, \dots, 5$) turi charakteringas reikšmes:

- c_1 reguliuoja pažeidimo pradinio režimo augimo tempą (ir, tuo būdu, staigų pradinį modulio degradavimo kreivės smukimą);
- c_2 yra pakankamai didelis, tai pirmasis narys išnyksta, didėjant pažeidimui. Tuomet pasiekiamas stabili matricos (rišiklio) būseną, taip vadinama „Charakteringa Pažeidimo būseną“ [20];

- c_3 reiškia augimo tempą antrame degradavimo modulio etape. Papildomi pažeidimo mechanizmai (pluošto/rišiklio atsiklijavimas, ištraukimas iš (matricos) rišiklio pluošto, pradinis pluošto lūžinėjimas, ...) vystosi palaipsniui šiame nuovargio resurso etape;

- c_4 ir c_5 išreiškia staigų pažeidimo augimą, kai lūžimo indeksas $\sum(\sigma, D)$ artėja prie savo lūžimo reikšmės 1.0, o faktinis įtempimas $\sigma \sim$ artėja prie statinio stiprumo tempime arba gniuždyme. Kai c_4 slenkstis yra įveiktas, pluošto trūkimas pradeda plėstis ir galų gale sukelia lūžimą tame medžiagos taške.

4. Resurso apibūdinimo metodika remiantis tyrimais ir eksploatacija

4.1. Apkrovų pasikartojimo nustatymas

Sklandytuvo resurso nustatymo pagrindu – projektinių arba prototipo tyrimo darbų etape yra sklandytuvo eksploatacijos modelio priėmimas. Eksploatacijos modelį sudaro apkrovų, veikiančių sklandytuvą, pasikartojimo pobūdis. Atskirais skridimo ir eksploatacijos etapais, jis gali būti skirtingas. Sklandytuvą veikiančių apkrovų pasikartojimo pobūdžio sudarymui sklandytuvu atlikti skraidymai, kurių metu buvo fiksuojamos visų skridimo etapų metu sklandytuvą veikiančios perkrovos:

$$n_y = \frac{Y}{G} \quad (4.2.1)$$

Čia Y – skridimo etape veikianti keliamoji jėga;

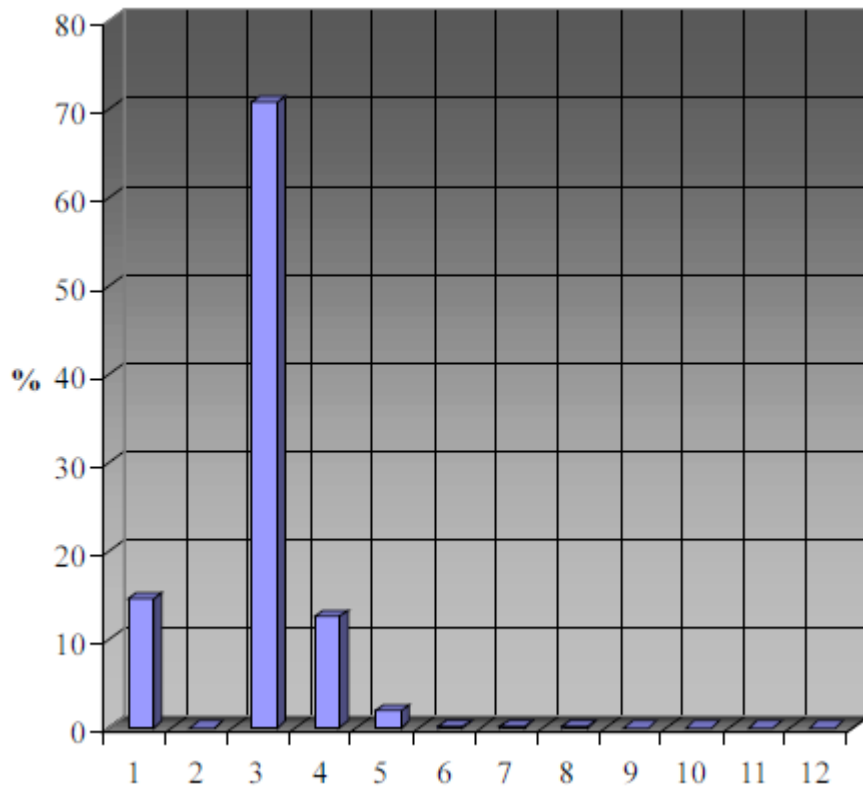
G – sklandytuvo svoris.

1000 skridimo valandų apkrovų spektras pateiktas 4.1 pav. pagal W. Thielemann ir F. K. Franzmeyer 1000 skridimo valandų histogramą.

4.1 lentelė

Perkrovų spektras 1000 skridimo valandų

Ruožai	Perkrova n_y	Ciklai	Ciklai %
1	0,0 – 0,5	283899	14,4809
2	0,51 – 1,0	0	0
3	1,01 – 1,5	1387031	70,7488
4	1,51 – 2,0	245642	12,5296
5	2,01 – 2,5	37826	1,9294
6	2,51 – 3,0	2293	0,1170
7	3,01 – 3,5	3018	0,1539
8	3,51 – 4,0	673	0,0343
9	4,01 – 4,5	8	0,0004
10	4,51 – 5,0	81	0,0041
11	5,01 – 5,5	0	0
12	5,51 – 6,0	29	0,0015
Suma:		1960500	100



4.1 pav. Etaloninė Thielemann – Franzmeyera, 1000 skridimo valandų histograma

4.3. Sklandytuvo nuovargio tyrimai

Nuovargio bandymuose atliekamuose bandymų laboratorijose, sklandytuvo konstrukcija yra apkraunama jėgų imitatoriais, galimai tiksliai atvaizduojančiais skridimo metu veikiančias jėgas.

Apkrovimus jėgomis, kurios atsiranda skridimo metu galime laikyti kaip kvazistatinius. Apkrovos dydis bandymų metu kinta nuo maksimalios iki minimalios leistinos reikšmės pasikartodama pagal apkrovimo spektre nurodytą ciklų skaičių. Tokiu būdu atliekamas bandymas su pulsuojančia apkrova. Vienos apkrovos trukmę riboja hidraulinio jėgos sukėlėjo techninės charakteristikos (siurblio našumas, stūmoklio eiga ir t. t.). 1000 skridimo valandų bandymo programą sudaro $1,96 \cdot 10^6$ ciklų.

Geriausias būdas, kuris realizuotų sklandytuvo nuovargio bandymus būtų visų, buksyravimo kylant, sklendimo, tūpimo, ridenimo etapuose, sukauptų ciklų realizavimas. Kiekviena apkrovimo rūšis reikalauja tiriamosios įrangos pertvarkymo arba sklandytuvo perkėlimo ant kito tyrimo įrenginio. Bandymas atliekamas blokais atitinkančiais kiekvieną skridimo etapą: A – perkrovos buksyruojant autoišvilktuvu, B – kylant ir leidžiantis, C – skrendant, D – leidžiantis ir riedant žeme.

4.3. Pradinio resurso nustatymas ir išplėtimas

Priimta, kad nustatome resursą su pilnutiniu atsargos koeficientu lygiu 4. Tai reiškia, kad apkrovimo spektro ciklų skaičių, kurį reikia realizuoti bandymuose, reikės padidinti 4 kartus. Buksyravimo, sklendimo, tūpimo ir ridenimo atvejais yra nustatyti: $15000 + 3000 + 1642500 + 300000 = 1,96 \cdot 10^6$ vertikalių apkrovimo ciklų su perkrova $n_z = +5,8 \div -3,6$. Priėmus vieno ciklo atlikimo laiką $t = 15$ s. per vieną darbo dieną galima atlikti 1920 ciklų. Visas bandymas truktų 1021 darbo dienų arba apie 4 metus. Be to šis laikas išaugtų dėl būtinybės tam tikrą laiką stabdyti bandymą, kad būtų galima atlikti matavimus, perderinti bandymų stendą. Šis bandymas truktų labai ilgą laiką vienam sklandytuvui. Kadangi ši problema susijusi su visų apkrovimo rūšių realizavimu, priimtas žemiau aprašytas būdas, kurio pagalba galima sumažinti ciklų skaičių bandymuose.

Priimkime tiesinę gedimų kaupimo Palmgreno – Minero hipotezę:

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (4.1)$$

Čia n_i – ciklų skaičius; N_i – ciklų skaičius iki suirimo; D_i – defektų kaupimas.

Iš Wöhlerio kreivės pulsuojančioms ciklams:

$$\sigma_i^m \cdot N_i = C \quad (4.2)$$

$$\text{tai } D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i \cdot \sigma_i^m}{C} \quad (4.3)$$

čia σ_i – irimo įtempimai;

rodiklis m – įvertina medžiagą.

Įveskime nuovargio susidėvėjimo sąvoką, apibūdinamą taip:

$$C \cdot D = \sum C \cdot D_i(\sigma_i) = \sum n_i \cdot \sigma_i^m \quad (4.4)$$

Galime tarti, kad įtempimai kiekviename konstrukcijos taške yra proporcingi jėgai:

$$\sigma_i = \psi_i \cdot P_i \quad \psi_i \text{--koeficientas} \quad P_i \text{--jėga} \quad (4.5)$$

$$\text{kadangi bandomas tokių pačių matmenų bandinys, tai } \psi_i \text{ bandymo} = \psi_i \text{ realus} \quad (4.6)$$

$$\text{ir galutinai galime priimti: } C \cdot D(P) = C \cdot D_i(P_i) = \sum n_i \cdot P_i^m \quad (4.7)$$

Jeigu pasirinktame konstrukcijos taške išmatuosime įtempimus, tai galime suvesti į nuo nulio pulsuojančių įtempimų arba apkrovų kreivę pagal Odingą [3]:

$$\sigma_0 = \sqrt{(2 \cdot \sigma_a \cdot (\sigma_a + \sigma_m))} \quad (4.8)$$

$$\text{čia } \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\text{arba pagal (5) ir (6) } P_0 = \sqrt{(2 \cdot P_a \cdot (P_a + P_m))} \quad (4.9)$$

Panagrinėkime apkrovimų realizavimą apkraunant sparną atveju „A” (kilimas buksyruojant autoišvilktuvu).

Skridimo etape išskirti 5 besikartojančių perkrovų grupės A1 ÷ A6. Šis etapas atitinka sklandytuvo su redukuota mase atitinkančia maksimalią sklandytuvo masę buksyrovimo metu. Sparnas apkraunamas koncentruotomis jėgomis, kurios yra geometrijos sklandytuvo aerodinaminių apkrovų funkcija.

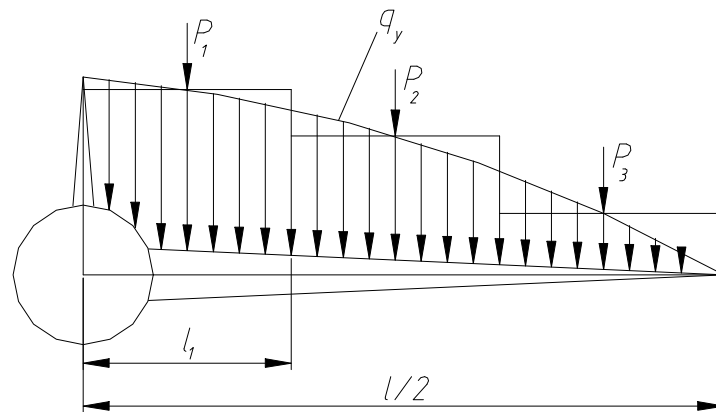
Aerodinaminė išskirstyta apkrova:

$$q_y = \frac{n \cdot G}{l} \cdot \Gamma$$

Čia: n – perkrova, G – sklandytuvo svoris, l – sparno mostas; Γ – aerodinaminė cirkuliacija.

$$P_i = q_{\text{vid}} \cdot S_i; S_i = l_i \cdot b_{\text{vid}}$$

Čia: b_{vid} – vidurinė sparno styga.



4.2 pav. Aerodinaminės apkrovos redukovimas į koncentruotas jėgas [21]

Taigi nustatomos perkrovų n_m , n_a , n_0 reikšmės kiekvienam pavyzdiniam sparno bandymui (skridimo atvejais „A”), kurias pateikiame lentelėje:

4.3 lentelė

Charakteringi atvejo „A” perkrovos dydžiai

„A” atvejis	n_{\max}	n_{\min}	n_m	n_a	n_0
A1	+4,8	-0,2	2,3	2,5	4,9
A2	+4,3	+0,3	2,3	2,0	4,15
A3	+3,8	+0,8	2,3	1,5	3,38
A4	+3,4	+1,2	2,3	1,1	2,73
A5	+3,0	+1,6	2,3	0,7	2,05
A6	+2,5	+2,1	2,3	0,2	1

Čia: $n_m = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2}$ $n_a = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2}$ $n_0 = \sqrt{(2 \cdot n_a \cdot (n_a + n_m))}$

Atvejui „A” buvo nustatytas nuovarginis susidėvėjimas esant vienam ciklui pagal priklausomybę (4.7). Vietoj jėgos P įstatant reikšmę $P = n \cdot G_{sk}$

$$C \cdot D_1^{(A)} = (4,9^4 \cdot 1 + 4,15^4 \cdot 1 + 3,38^4 \cdot 1 + 2,73^4 \cdot 1 + 2,05^4 \cdot 1 + 1^4 \cdot 1) \cdot G_{sk} = 1077,8 \cdot G_{sk} \quad (4.10)$$

Rodiklis $m=4$ priimtas kompozitui, kuris yra pagrindinė sklandytuvo ir sparno medžiaga.

Nuovargio susidėvėjimas (4.10) gautas vieno ciklo metu, o visas nuovargio susidėvėjimas yra lygus $C \cdot D = \sum C \cdot D_i^m \cdot N$.

Bandymų metu atliekant sparno bandymus, sparnas turi būti bandomas nurodytą ciklų skaičių, kuris paimamas iš 1000 valandų skridimo histogramos. Reikšmės pateikiamos lentelėje:

4.4 lentelė

Charakteringi perkrovos dydžiai, kai atsargos koeficientas lygus 4

“A” atvejis	Perkrovos $n_{\max}; n_{\min}$	Ciklų skaičius N	n_0	Vieno ciklo pažeidimai $(n_0)^4$	Suminis pažeidimas $N \cdot (n_0)^4$
A1	+4,8 -0,2	2	4,9	576,5	1153
A2	+4,3 +0,3	8	4,15	296,6	2373
A3	+3,8 +0,8	35	3,38	130,5	4568
A4	+3,4 +1,2	255	2,73	55,5	14164
A5	+3,0 +1,7	2293	2,05	17,7	40496,7
A6	+2,6 +2,1	12407	1	1	12407
				$\Sigma=1077,8$	$\Sigma=75161,7$

Šiuo atveju $CD = 75161,7 \cdot G_{sk}$.

Ciklų skaičius “A” atveju $n = (75161,5 \cdot G_{sk} \cdot 4) / 1077,8 \cdot G_{sk} = 279$ ciklai. Gautas ciklų skaičius pasiekiamas su maksimaliomis perkrovomis (+4,8; -0,2) atveju “A” ir įvertinus atsargos koeficientą, kuris lygus 4.

Norint atvaizduoti 1000 skridimo valandų nuovargio susidėvėjimą su atsargos koeficientu 4, reikia analogiškai atlikti atvejų „B”, „C” ir „D” perskaičiavimus.

Nagrinėjant „B” atvejį, šis atvejis nepertvarkomas, kadangi jame viena perkrovų reikšmė +2,3 ir -0,7. Šiame atvejuje ciklų skaičius $N=3000$ ciklai.

Analogiškai skaičiavimai atliekami atvejui „C”, nustatomos perkrovų n_m , n_a , n_0 reikšmės kiekvienam pavyzdiniam sparno bandymui (skridimo atvejis „C”), kurias pateikiame lentelėje:

4.7 lentelė

Charakteringi atvejo „C” perkrovos dydžiai

“C” atvejis	n_{\max}	n_{\min}	n_m	n_a	n_0
C1	5,8	-3,6	1,1	4,7	7,38
C2	4,8	-2,5	1,15	3,65	5,92
C3	4,0	-2,0	1,0	3,0	4,9
C4	3,4	-1,3	1,05	2,35	4,0
C5	2,5	-0,5	1,0	1,5	2,74
C6	1,8	0,1	0,65	0,95	1,74
C7	1,2	0,8	0,4	1	1,67

$$CD^{(C)} = (7,38^4 \cdot 1 + 5,92^4 \cdot 1 + 4,9^4 \cdot 1 + 4,0^4 \cdot 1 + 2,74^4 \cdot 1 + 1,74^4 \cdot 1 + 1,67^4 \cdot 1) \cdot G_{sk} = 5103,43 \cdot G_{sk}$$

Charakteringi perkrovos dydžiai (atvejis „C“), kai atsargos koeficientas lygus 4

“C” atvejis	Perkrovos n_{\max} ; n_{\min}	Ciklų skaičius N	n_0	Vieno ciklo pažeidimai $(n_0)^4$	Suminis pažeidimas $N \cdot (n_0)^4$
C1	5,8 –3,6	29	7,38	2966,4	86024,8
C2	4,8 –2,5	79	5,92	1228,25	97031,8
C3	4,0 –2,0	638	4,9	579,48	367794,3
C4	3,4 –1,3	2763	4,0	256	707328
C5	2,5 –0,5	22362	2,74	56,36	1260413
C6	1,8 0,1	244751	1,74	9,17	2243476,2
C7	1,2 0,8	1371878	1,67	7,77	10670416,6

$$\Sigma = 5103,43 \quad \Sigma = 15432484,7$$

Šiuo atveju $CD(C) = 15432484,7 \cdot G_{sk}$.

Ciklų skaičius “C” atveju $n = (15432484,7 \cdot 4) \cdot G_{sk} / 5103,43 \cdot G_{sk} = \underline{12096}$ ciklai. Gautas ciklų skaičius pasiekiamas su maksimaliomis perkrovomis (+5,8; –3,6) atvejiyje „C“.

Analogiški skaičiavimai atliekami ir atvejui „D“, nustatomos perkrovų n_m , n_a , n_0 reikšmės kiekvienam pavyzdiniam sparno bandymui (skridimo atvejis „D“), kurias pateikiame lentelėje:

4.9 lentelė

Charakteringi atvejo „D“ perkrovos dydžiai

“D” atvejis	n_{\max}	n_{\min}	n_m	n_a	n_0
D1	2,5	–2,0	0,25	2,25	3,35
D2	1,8	–1,3	0,25	1,55	2,36
D3	1,2	–0,7	0,25	0,95	1,51
D4	0,5	–0,1	0,20	0,30	0,54

$$CD^{(D)} = (3.35^4 \cdot 1 + 2.36^4 \cdot 1 + 1.51^4 \cdot 1 + 0.54^4 \cdot 1) \cdot G_{gl} = 162.25 \cdot G_{gl}$$

4.10 lentelė

Charakteringi perkrovos dydžiai (atvejis „D“), kai atsargos koeficientas lygus 4

“D” atvejis	Perkrovos n_{\max} ; n_{\min}	Ciklų skaičius N	n_0	Vieno ciklo pažeidimai $(n_0)^4$	Suminis pažeidimas $N \cdot (n_0)^4$
D1	2,5 –2,0	57	3,35	125,94	7178,58
D2	1,8 –1,3	891	2,36	31,02	2102,76
D3	1,2 –0,7	15153	1,51	5,2	78795,6
D4	0,5 –0,1	283899	0,54	0,09	25550,91

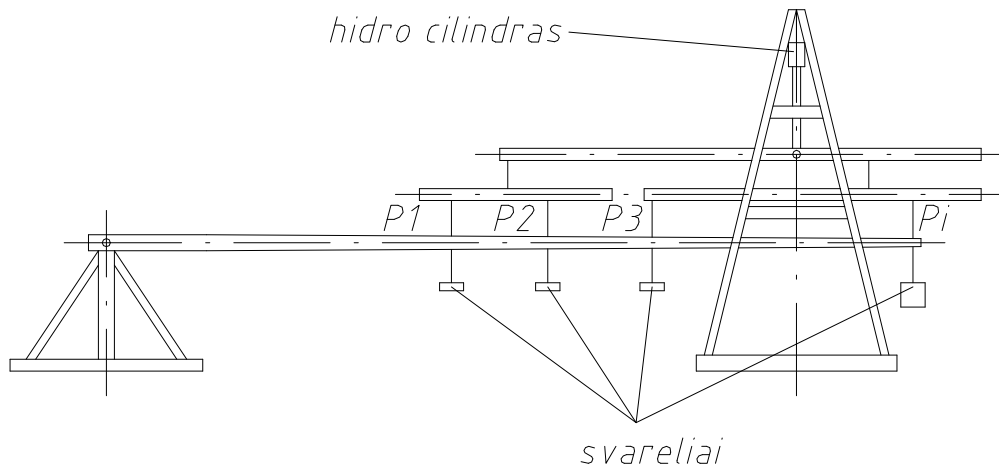
$$\Sigma = 162,25 \quad \Sigma = 113627,85$$

Šiuo atveju $CD(D) = 113627,85$.

Ciklų skaičius „D“ atveju $n = (113627,85 \cdot 4) / 167,83 = \underline{2801}$ ciklai. Gautas ciklų skaičius pasiekiamas su maksimaliomis perkrovomis (+2,5; –2,1) atvejiyje „D“.

Viso numatyta ciklų 1000 skridimo valandų bandyme:

$$CD(A) + CD(B) + CD(C) + CD(D) = 279 + 3000 + 12096 + 2801 = \underline{18176}$$
 ciklai.



4.3 pav. Sparno bandymo stendas

Tokiu būdu apskaičiuojamas visas bandymų ciklas įrodantis 1000 skridimo valandų resursą su atsargos koeficientu 4, neįvykstant jokiems detalių gedimams.

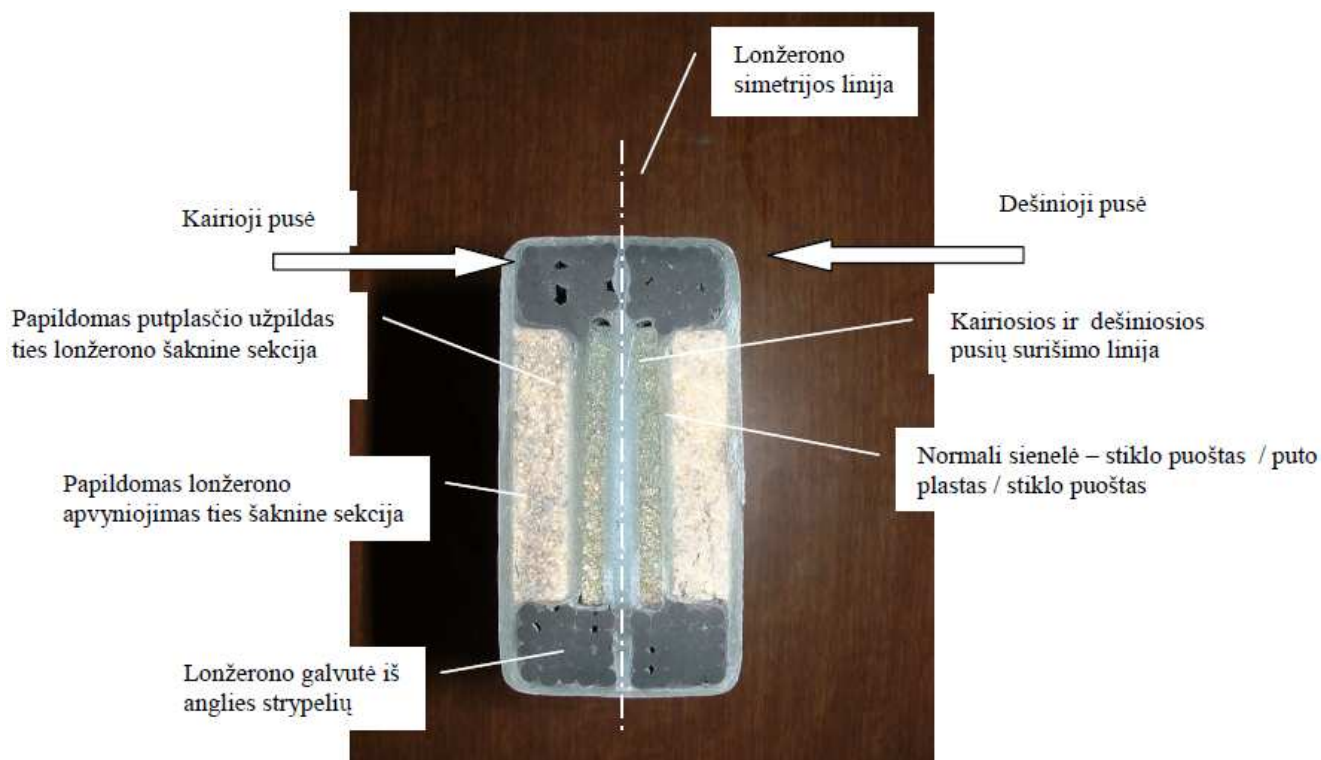
Sumažinus ciklų skaičių nesunku atlikt bandymus 6000 skridimo valandų resurso pagrindimui. 4.3 pav. pateiktas sparno bandymo stendas.

5. Sklandytuvo sparno lonžerono stiprumo ir ilgaamžiškumo tyrimai

5.1. Bandomojo lonžerono skaitinio modelio sudarymas BEM

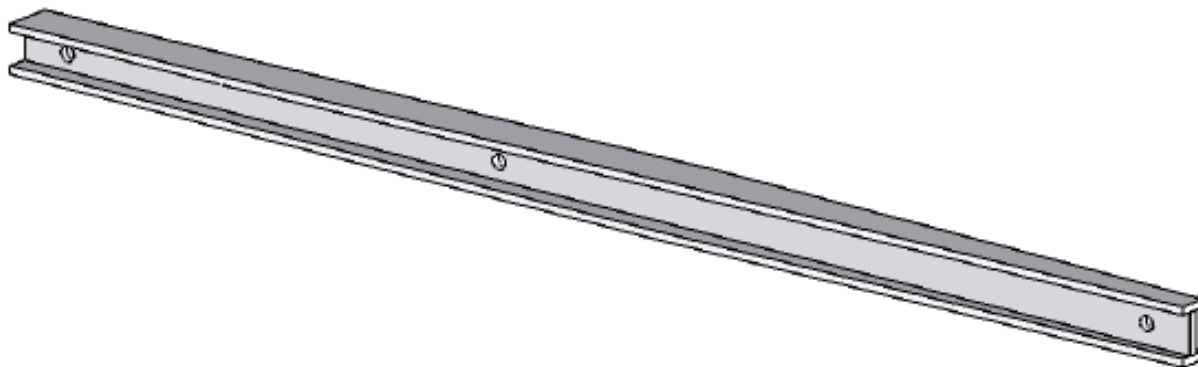
Šiame skyriuje pateikiami sklandytuvo lonžerono statinės analizės rezultatų duomenys.

Tiesiškai tampriai statiškai apkrauto lonžerono pagaminto iš anglies pluošto strypelių ir putplasčio skaičiavimai atlikti baigtinių elementų metodu, konstrukcijos sijos geometrinius bei skaičiuojamuosius modelius sudarant bei skaičiavimus atliekant integruotąją CAD projektavimo sistema Solidworks ir jos priedu Cosmosmotion.



5.1.1. pav. tipinis sklandytuvo sparno lonžerono skerspjūvis

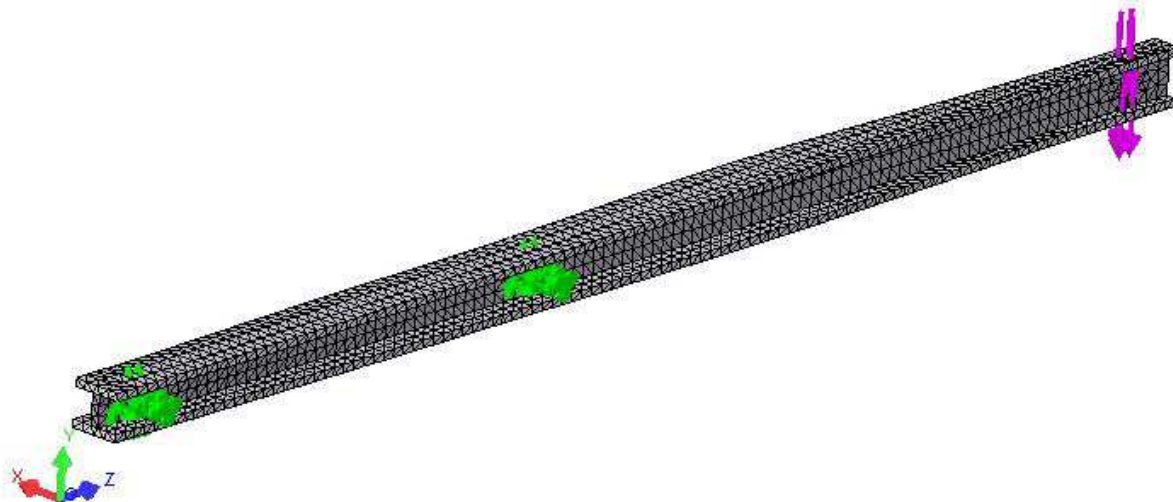
Lonžerono geometrinis modelis (5.1.1 pav.) sudarytas pasitelkiant sklandytuvų gamyklos AB „Sportinė aviacija“ pateiktą brėžinį Nr. 2100100 SB.



5.1.2 pav. Sklandytuvo lonžerono geometrinis modelis

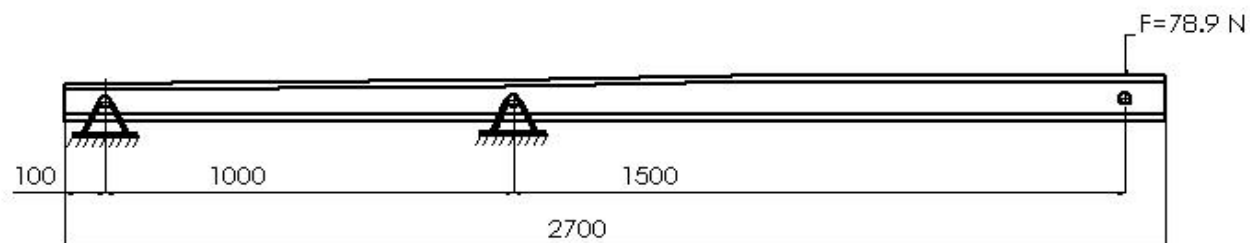
Geometrinio modelio pagrindu sudarytas skaičiuojamasis baigtinių elementų modelis.

Lonžerono modelis sudarytas naudojant aukštesnės eilės (6 mazgų) elementų modelį nurodant elemento dydį lygų 3 mm. (5.1.3 pav.) ir parenkant skirtingas medžiagų charakteristikas putplasčio ir anglies pluošto medžiagoms. Kontaktas tarp skirtingų medžiagų yra nurodytas atsiremt elemento „mazgui į mazgą“.



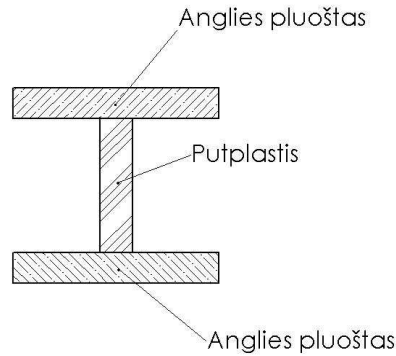
5.1.3 pav. Lonžerono skaičiuojamasis baigtinių elementų modelis

Modelis įtvirtintas nejudamai lonžerono tvirtinimo kiaurymėse ir yra apkraunamas 78,9 kN gniuždoma jėga (5.1.4 pav.).



5.1.4 pav. Lonžerono tvirtinimo ir apkrovimo sąlygos

Bandomasis lonžeronas yra sudarytas iš skirtingų medžiagų, kurios parodytos 5.1.5 pav.



5.1.5 pav. Bandomojo lonžerono struktūra

5.1.1 lentelė

Lonžerono kompozitinės medžiagos

Eil. Nr.	Elemento pavadinimas	Medžiaga	Masė	Tūris
1.	Lonžerono apatinė lentynėlė	Anglies pluoštas	6,16819 kg	0,00403677 m ³
2.	Lonžerono viršutinė lentynėlė	Anglies pluoštas	6,16831 kg	0,00403685 m ³
3.	Sienelė	Putplastis	3,7569 kg	0,00335438 m ³

Skaičiavimams atlikti buvo panaudotos 5.1.2 lentelėje surašytos baigtinių elementų tinkliuko charakteristikos.

5.1.2 lentelė

Baigtinio elemento tinkliuko informacija

BEM tinkliuko informacija	
Tinkliuko tipas:	Kietas kūnas
Naudotas tinkliukas:	Standartinis
Tolydus paviršiai:	Įjungta
Jakobino kriterijus:	4 taškų
Elemento dydis:	25 mm
Tolerancija tarp elementu:	1,25 mm
Kokybe:	Aukštas
Elementų skaičius:	7895
Mazgų skaičius:	15864

Medžiagos naudojamos lonžerono gamyboje charakteristikos:

5.1.3 lentelė

Anglies pluošto strypeliai SM315

Pavadinimas	Skaitinė reikšmė	Matavimo vienetai
Elastingumo modulis	1,31e+011	N/m ²
Puasono koeficientas	0,3	
Tankis	1528	kg/m ³
Leistini įtempimai	2,42e+009	N/m ²

5.1.4 lentelė

Putplastis H60		
Pavadinimas	Skaitinė reikšmė	Matavimo vienetai
Elastingumo modulis	2,62e+009	N/m ²
Puasono koeficientas	0,34	
Tankis	1120	kg/m ³
Leistini įtempimai	1,0365e+008	N/m ²

5.1.5 lentelė

Klijai		
Pavadinimas	Skaitinė reikšmė	Matavimo vienetai
Elastingumo modulis	1,2e+009	N/m ²
Puasono koeficientas	0,16	
Tankis	1200	kg/m ³
Leistini įtempimai	1,26e+008	N/m ²

5.2. Bandomojo lonžerono statinio bandymo rezultatai

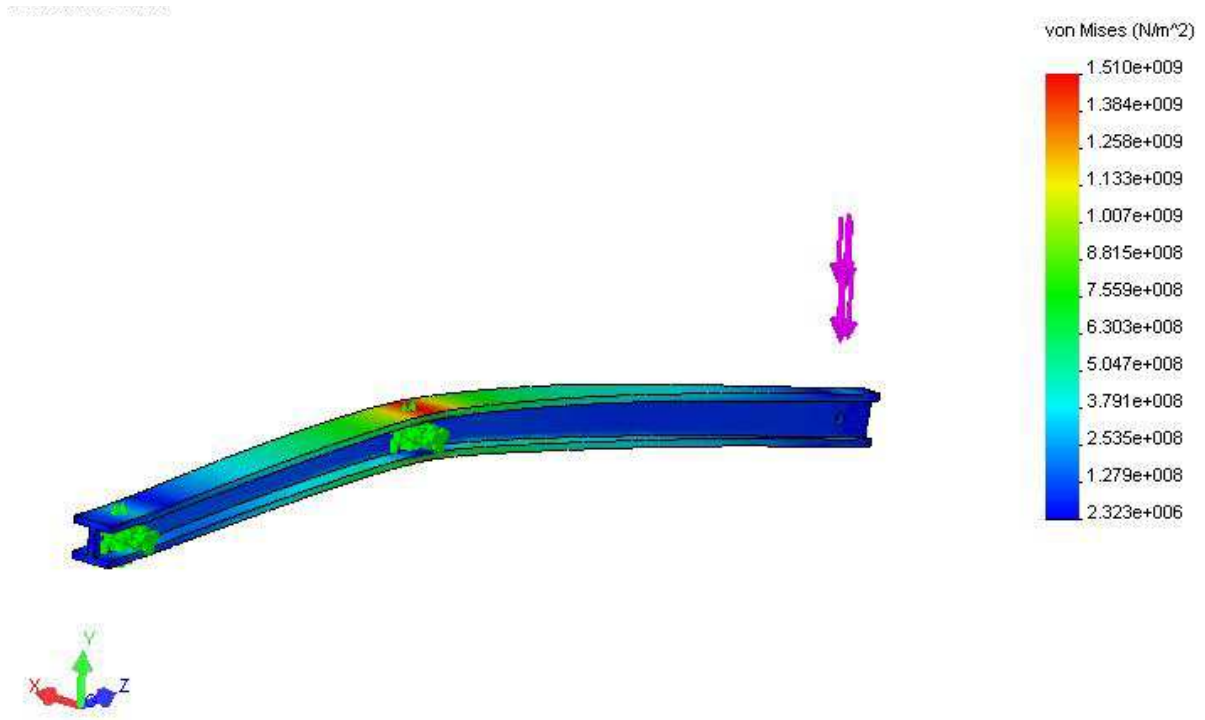
Atlikus skaičiavimus gauti lonžerono mazginių taškų įtempimų (pagal Von Mizes'ą) laukai, kurie pateikti 5.2.1 – 5.2.5 pav.

Gautos bandomojo lonžerono maksimalios ir minimalios įtempimų reikšmės yra pateikiamos 5.2.1 lentelėje, žemiau yra pateikiami lentelėje minėtų įtempimų laukai.

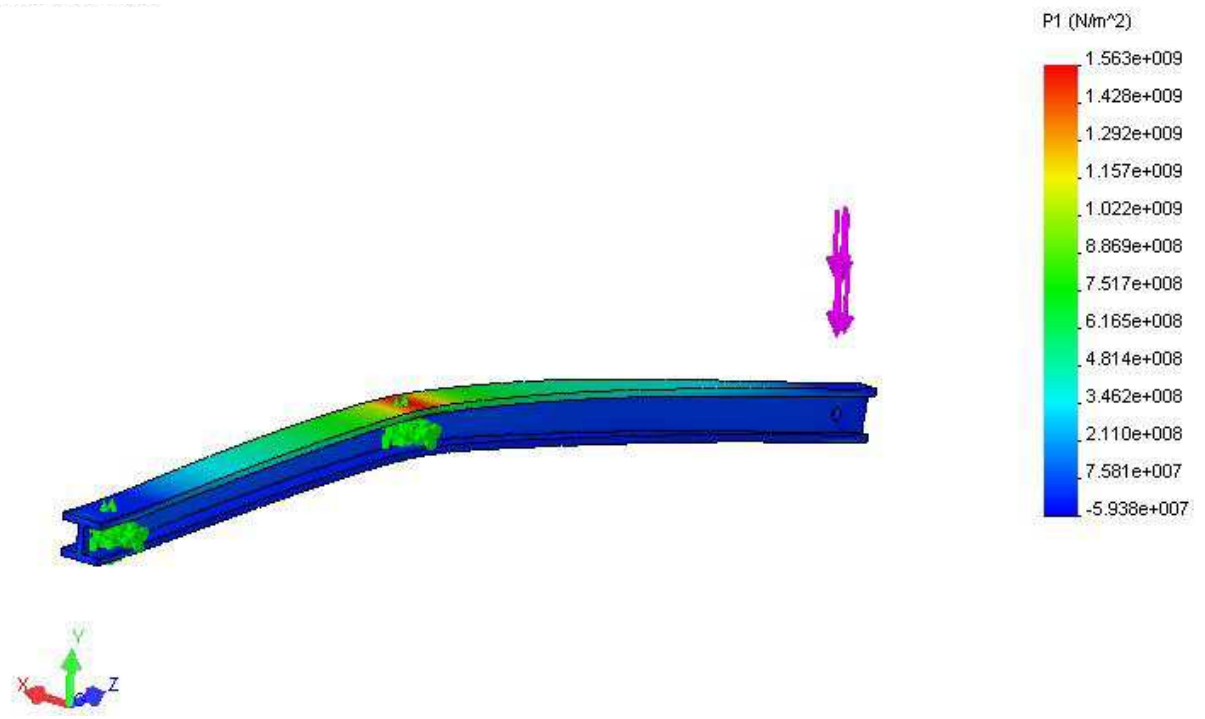
5.2.1 lentelė

Bandomojo lonžerono maksimalios ir minimalios įtempimų reikšmės

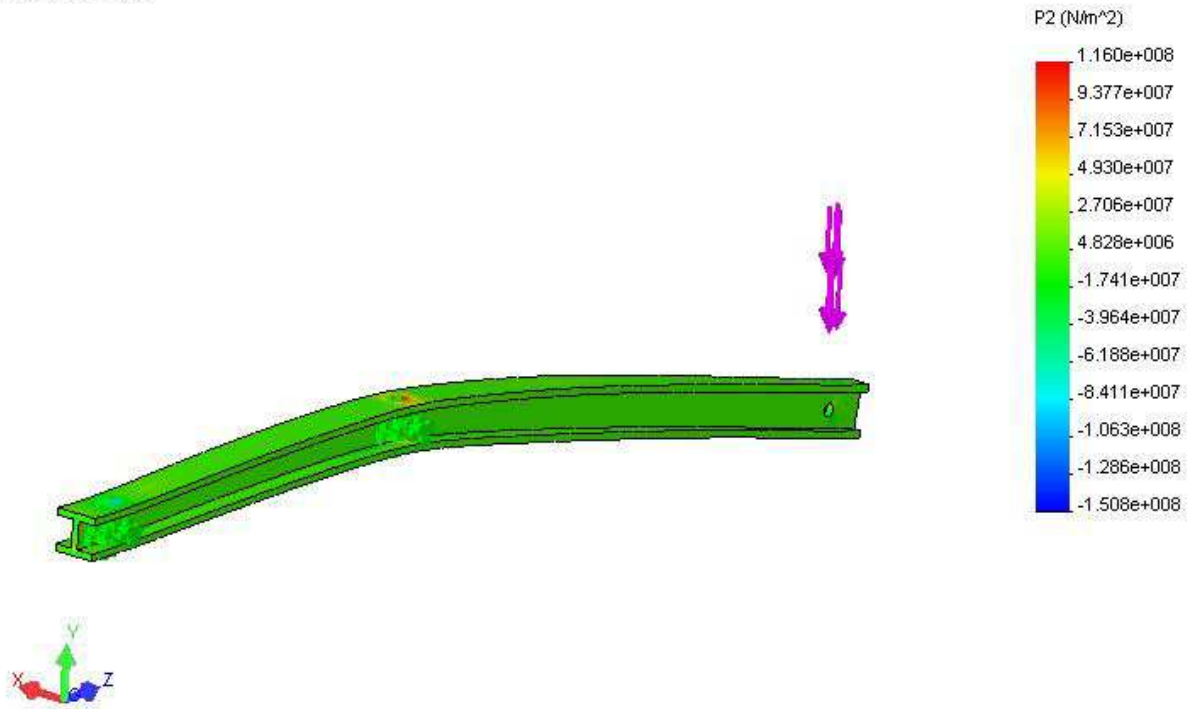
Paveikslo Nr.	Pavadinimas	Minimali reikšmė	Vieta	Maksimali reikšmė	Vieta
5.2.1	Įtempiai pagal Mizesą	2,32e+006 N/m ² 15161 taškai	(0; 57,28; 0) mm	1,51e+009 N/m ² 1597 taškai	(0; 0; -1587,5) mm
5.2.2	Pirmasis įtempių laukas	-5,94e+007 N/m ² 11352 taškai	(-8,3; 37,44; -2589,39) mm	1,56e+009 N/m ² 7671 taškai	(0; 104; -1585,2) mm
5.2.3	Antrasis įtempių laukas	-1,51e+008 N/m ² 1597 taškai	(0; 0; -1587,5) mm	1,16e+008 N/m ² 7669 taškai	(0; 103,8; -1597,6) mm
5.2.4	Trečiasis įtempių laukas	-1,58e+009 N/m ² 1597 taškai	(0; 0; -1587,5) mm	5,92e+007 N/m ² 12687 taškai	(5,4; 56,6; -2587,6) mm
5.2.5	Įtempių intensyvumas	2,65e+006 N/m ² 11348 taškai	(-8,3; 57,29; 0) mm	1,58e+009 N/m ² 1597 taškai	(0; 0; -1587,5) mm



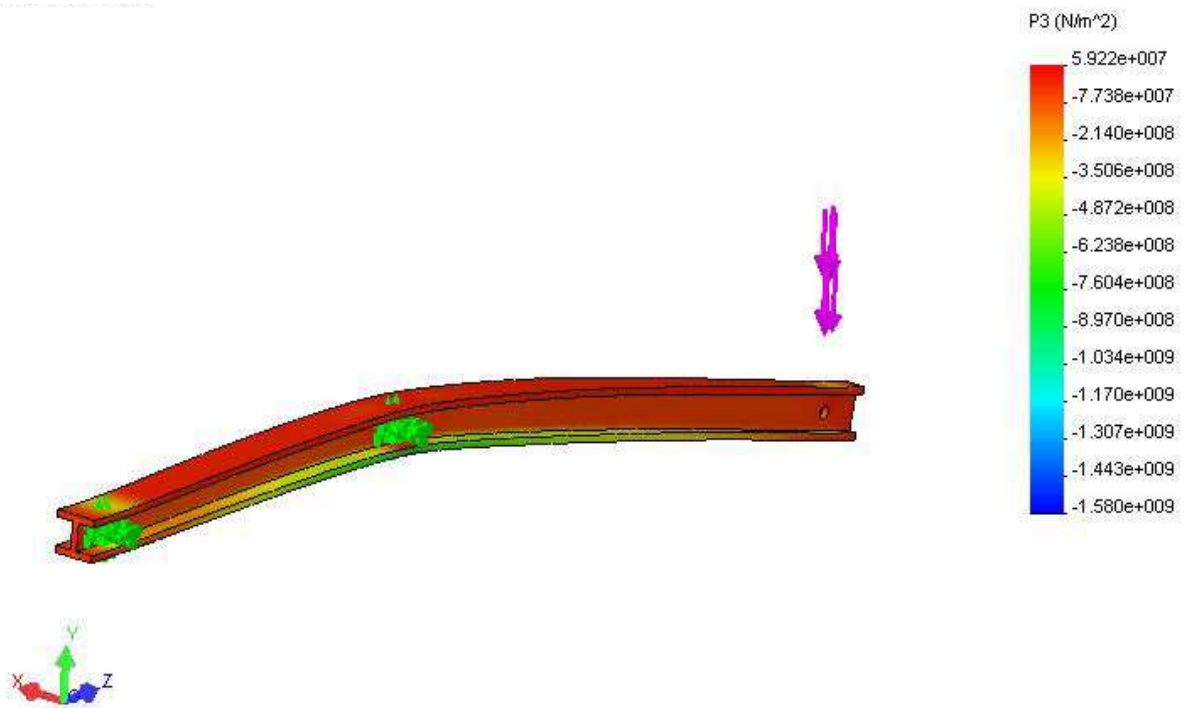
5.2.1 pav. Įtempiai pagal Mizesą



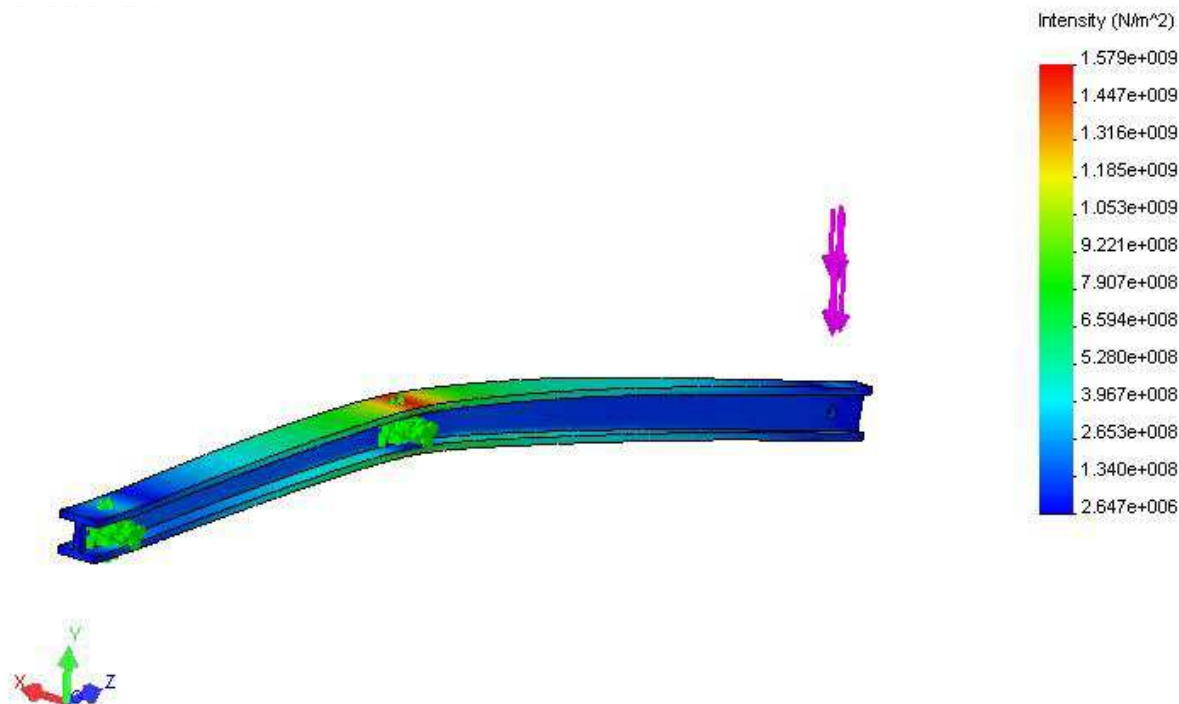
5.2.2 pav. Pirmasis įtempių laukas



5.2.3 pav. Antrasis įtempių laukas



5.2.4 pav. Trečiasis įtempių laukas



5.2.5 pav. Įtempių intensyvumas

Taip pat gauti bandomojo lonžerono mazginių taškų deformacijų laukai, kurie pateikti 5.2.6 – 5.2.9 pav.

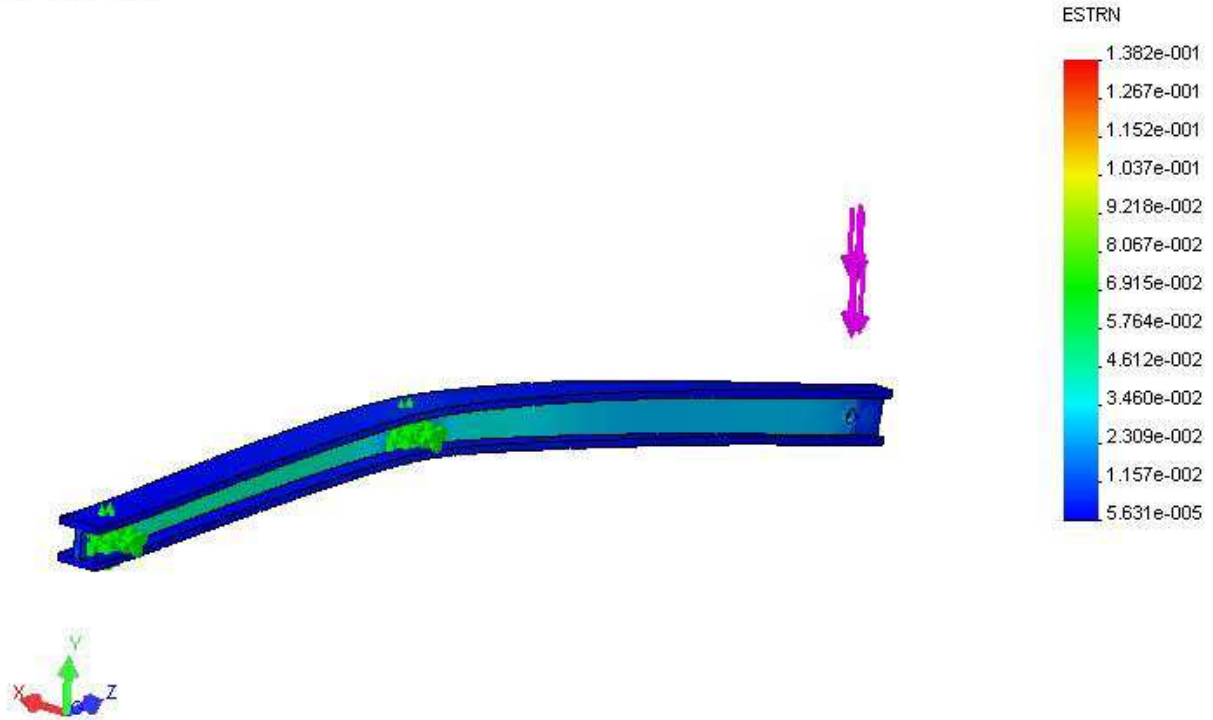
Gautos bandomojo lonžerono maksimalios ir minimalios deformacijų reikšmės yra pateikiamos 5.2.2 lentelėje, žemiau yra pateikiami lentelėje minėtų deformacijų laukai.

5.2.2 lentelė

Bandomojo lonžerono maksimalios ir minimalios deformacijų reikšmės

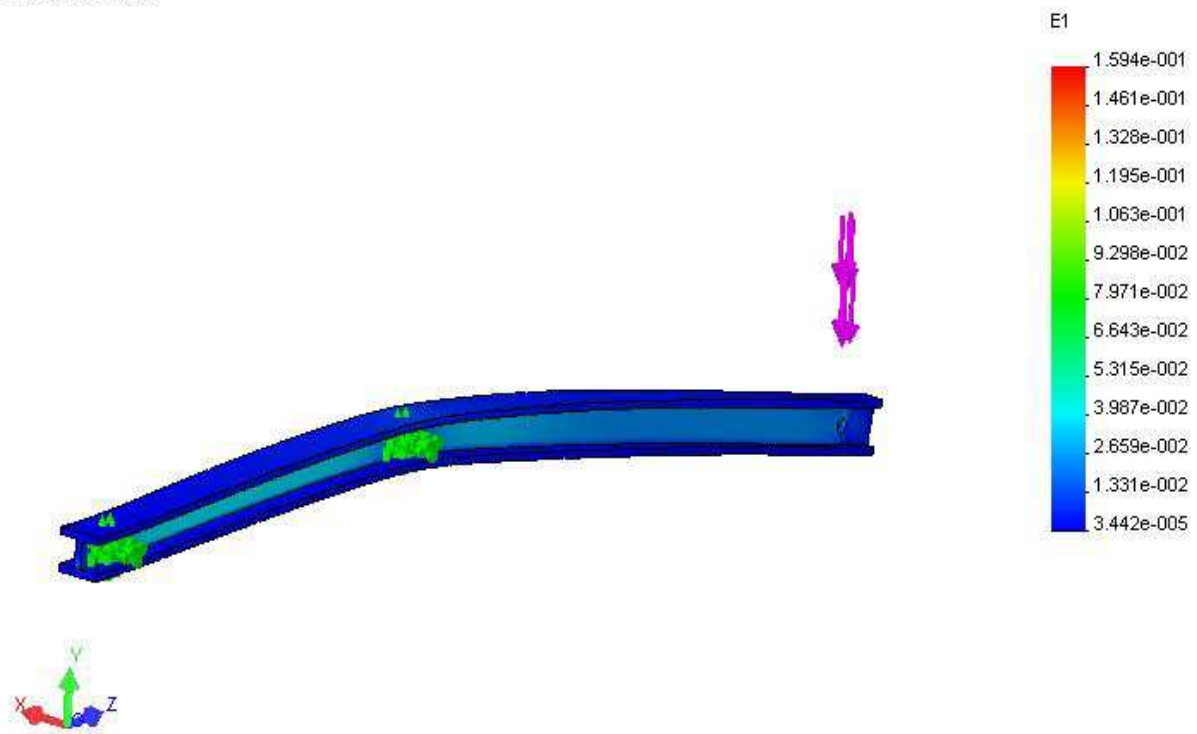
Paveikslo Nr.	Pavadinimas	Minimali reikšmė	Vieta	Maksimali reikšmė	Vieta
5.2.6	Ekvivalentinės deformacijos	5,63e-005 m 2394 element.	(0; 7,9; -2637,5) mm	0,14 m 6405 element.	(6,8; 58,2; -1584,2) mm
5.2.7	Pirmasis deformacijų laukas	3,44e-005 m 6907 taškai	(49,9; 79,5; -2700) mm	0,16 m taškai	(-8,3; 41,0; -1589,4) mm
5.2.8	Antrasis deformacijų laukas	-0,02 m 15353 taškai	(8,3; 32,4; -1595,2) mm	0,02 m 11641 taškai	(8,3; 75,0; - 1590,3) mm
5.2.9	Trečiasis deformacijų laukas	-0,17 m 14236 taškai	0; 62,2; -1589,39) mm	-3,02e-005 m 5352 taškai	-53,1;15,9; -1612,4) mm

1/20/2022 10:00:00 AM

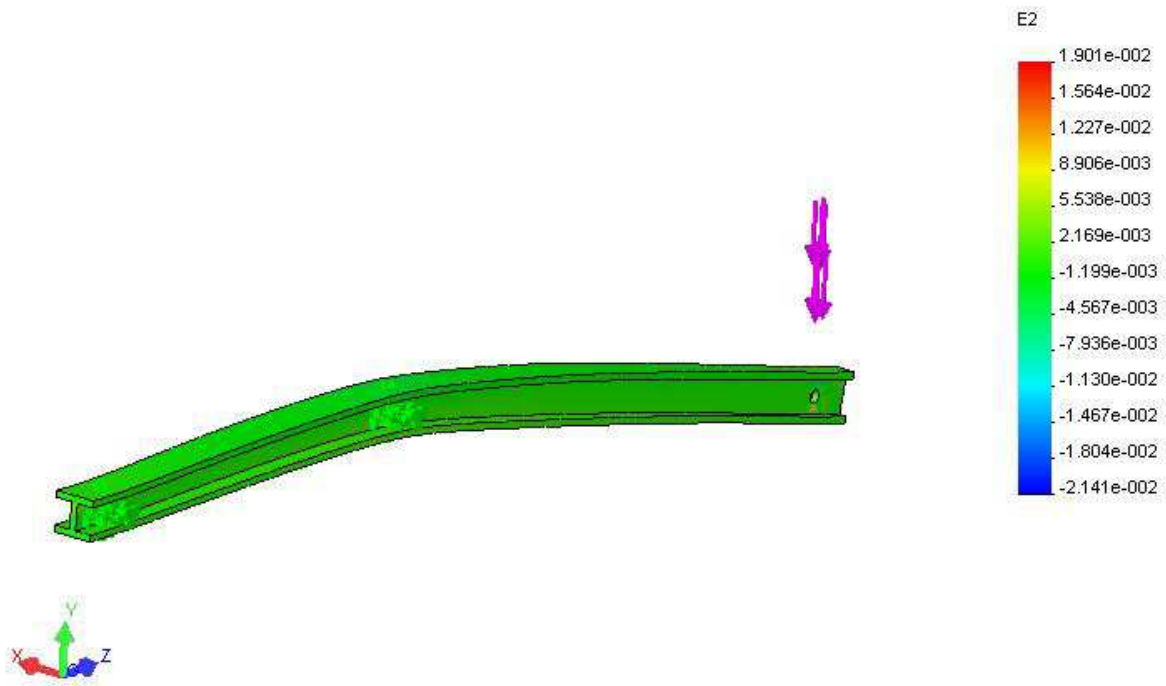


5.2.6 pav. Ekvivalentinės deformacijos

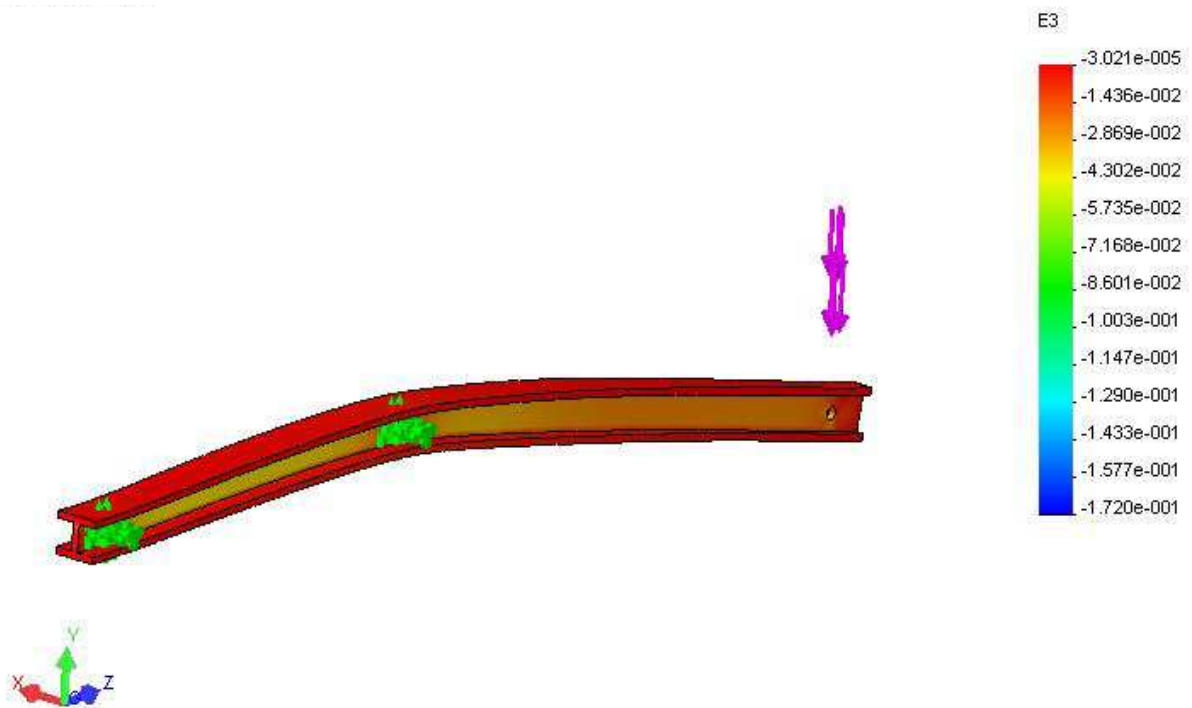
1/20/2022 10:00:00 AM



5.2.7 pav. Pirmasis deformacijų laukas



5.2.8 pav. Antrasis deformacijų laukas



5.2.9 pav. Trečiasis deformacijų laukas

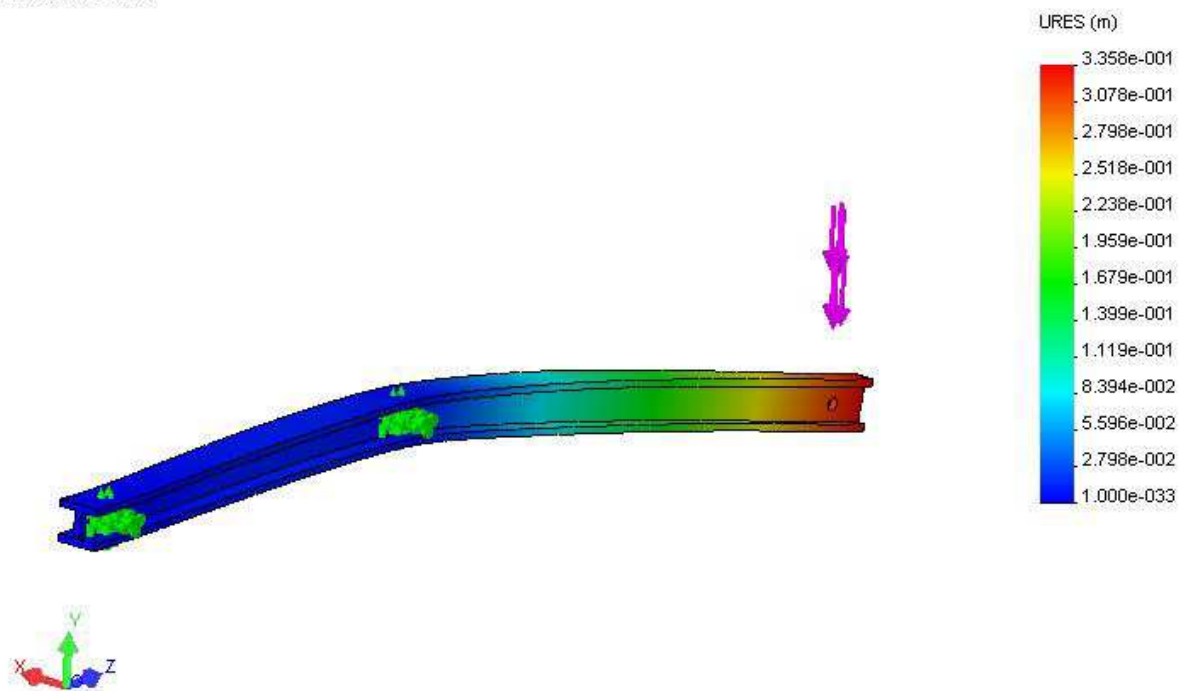
Taip pat nustatyti bandomojo lonžerono mazginių taškų poslinkiai, kurie pateikti 5.2.10 – 5.2.11 pav.

Gautos bandomojo lonžerono poslinkių reikšmės yra pateikiamos 5.2.3 lentelėje, žemiau yra pateikiami lentelėje paminėti poslinkių diagramos.

Bandomojo lonžerono poslinkis

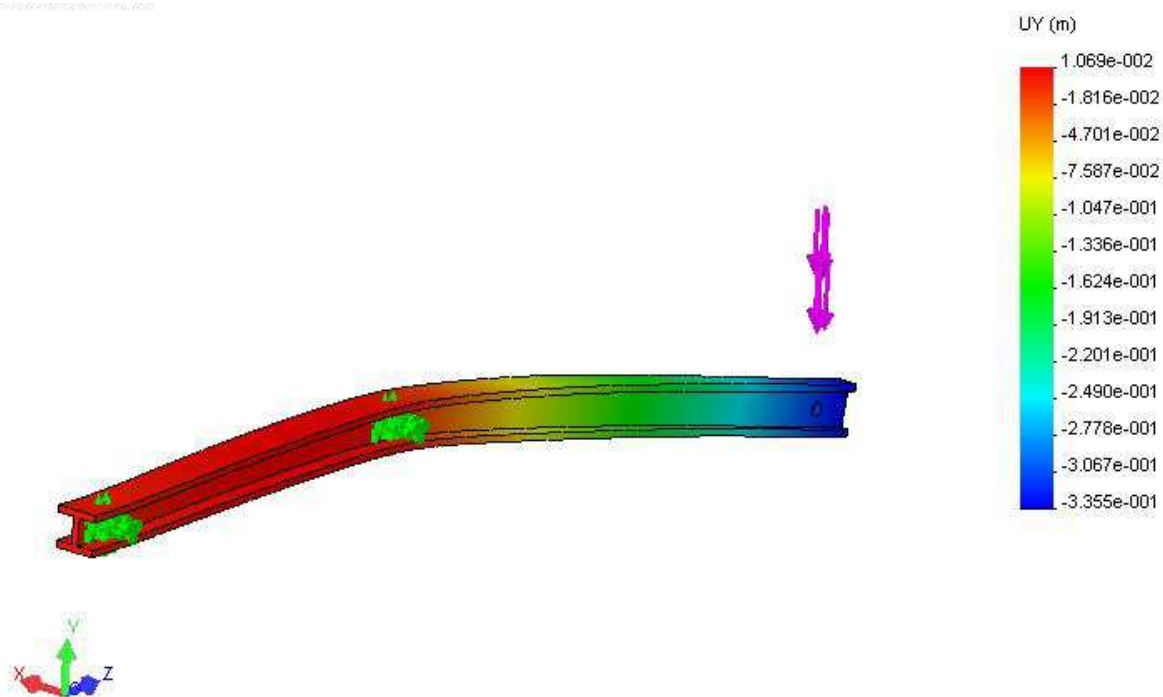
Paveikslo Nr.	Pavadinimas	Minimali reikšmė	Vieta	Maksimali reikšmė	Vieta
5.2.10	Atstojamasis poslinkis	0 m 11304 taškai	(8,3; 33,0; -2600) mm	0,34 m 7022 taškai	(27,9; 114,6; 0) mm
5.2.11	Poslinkis Y ašies kryptimi	-0,34 m 408 taškai	(27,9; 15,9; 0) mm	0,01 m 10487 taškai	(-53,3; 84,9; -1962,4) mm

1479-12222-817236-11792763



5.2.10 pav. Atstojamasis poslinkis

1479-12222-817236-11792763



5.2.11 pav. Poslinkis Y ašies kryptimi



5.2.12 pav. Bandomojo lonžerono apkrauto statinė jėga bendras vaizdas

Gautas poslinkis Y ašies kryptimi yra 0,34 m atitinka realaus bandomojo lonžerono apkrauto statinė jėga poslinkio dydį.



5.2.13 pav. KTU suprojektuotas ir pagamintas sklandytuvo sparno resurso bandymo stendas

5.2.13 pav. pateiktas KTU suprojektuotas ir pagamintas sklandytuvo sparno resurso bandymų stendas leidžia išbandyti realų sparną sukuriant realias eksploatacijos sąlygas. Taip pat šiuo stendu galima išbandyti ir sparno lonžeroną.

6. Išvados

1. Darbe aprašytas vienas iš galimų metodų naujiems leistiniams parametrams gauti, kuris suteiks bendros informacijos apie kompozitinių medžiagų elgesį vienetačiuose ir atsitiktiniuose nuovargio bandymuose ir kurį galėtų naudoti kaip sertifikavimo procedūrą.

2. Parinkus tinkamą ribinį įtempimų lygį ($j = 1,0$), bandymai turi būti atliekami resurso spektro pagalba, palyginant rezultatus su skaičiavimais, kas duos suminį pažeidimų koeficientą sąlyginės Miner'io taisyklės taikymui.

3. Reikalingos statistiškai gerai apibrėžtos S–N kreivės, kuriomis remiantis prognozuojamas apytikslis nuovargio resursas pagal tiesinę suminio pažeidimo teoriją.

4. Pagal nuovargio pažeidimų skaičiavimus galima resurso programą sutrumpinti nuo $1,96 \cdot 10^6$ ciklų iki 181760 ciklų atliekant bandymus su maksimaliomis perkrovomis, tai leistų sutrumpinti bandymų atlikimo laiką nuo 4 metų iki 3 mėnesių. Taip pat bandymus patogiau atlikti skaidant bandymų programą blokais po 1000 skridimų valandų.

5. Vykdamas tolesnius tyrimus, įtempimų lygis gali būti keičiamas, norint pakoreguoti apskaičiuotą resursą. Po šių bandymų su bandiniais, rezultatai turi būti patvirtinti, naudojant didesnes konstrukcijas, tokias kaip lonžerono sijos ar sparnai, kurios bus pagrįstos sertifikavimui. Tuo būdu, turėtų būti įmanoma priartėti prie medžiagos charakteristikų ribų ir efektyviausiai išnaudoti medžiagos įgimtas savybes.

7. Literatūros sąrašas

1. R. Šniulis. Inžinierinės medžiagos. Šiauliai: Liuticipus. 2004. 240 p.
2. A. Valiulis. Naujos medžiagos. Vilnius: Technika. 2005. 315 p.
3. Introduction of equipment sonic bondmasher in the SAAB 340 NDT manual. CSM marerialtechnik, 2000 edition 1.
4. В. Ф. Зинченко. Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1983. 267 p.
5. Д. М. Крпинос, В. И. Олейник. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. Киев, Наука Думка, 1981, с. 310.
6. Д. М. Крпинос, Л. И. Тучинский, Л. Р. Вишняков. Новые композиционные материалы. Киев, Наука Думка, 1977, с. 117.
7. Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990, с. 512.
8. Барейшис Й. П., Олдырев П. П., Марчюленис Д. А. Машина для испытания пластмасс на усталость при осевом нагружений. Механика полимеров, 1976, 3, с. 556-558.
9. Барейшис Й. П., Синицкас Г. С., Стирбис А.П. Прогнозирование усталостной долговечности полимерных и композитных материалов. Механика композитных материалов, 1983, 6, с. 1010-1015.
10. Стинскас А. В., Баушис Я. П., Барейшис Й. П. Влияние термическую и усталостную прочность поликапроамида. Механика полимеров, 1972, 1, с. 59-62.
11. Барейшис Й. П., Марчюленис Д. А. Исследование деформативности поликапроамида при циклическом растяжений-сжатии. Механика полимеров, 1977, 4, с. 656-661.
12. Барейшис Й. П., Стинскас А. В. Исследование явления упрочнения поликапроамида при циклическом нагружении. Механика полимеров, 1976, 3, с. 556-558.
13. Ушаков А. Е., Барейшис Й. П., Паулаускас В. В. Характеристики эксплуатационной живучести планера ЛАК-12 «Летува» выполненного из композитных материалов, на этапе сертификации. Механика композитных материалов, 1989, 5, с. 878-883.
14. J. Vareišis Konstrukcinių kompozitų statinis ir ciklinis stiprumas. Habilitacinis darbas. Kaunas, 1995, 110 p.
15. M. Rodzewicz, A. Przekop Experimental investigation of the load spectrum ant fatigue tests of the PW-5 world class glider. Technical soaring. 15-19. Jan. 2000.
16. Отчет о научно-исследовательской работе. Обоснование продления назначенного (технического) ресурса планера ЛАК-12 “Летува”. Пренай 1988, с. 75.
17. Joint Aviation Requirements JAR – 22.

18. H. J. Kossira Determination of load spectra and their application for keeping the operational life prof of sporting airplanes. Technical University of Braunschweig. Braunschweig, FRG 1982.

19. Soni S. R., Pagano N. J. Elastic response of composite laminates. – 1982 IUTAM Symposium. Mechanic of Composite Materials. Recent Advances, 1983, 227 p.

20. Foye R. L. Baker D. J. Design analysis methods for advanced composite struktures. – AFML, vol. 1, 1971.

21. N. Baublys L. Paknys “Service life determination method of the glider LAK – 17A based on tests and service duty” / “Mechanika” ISSN 1392-1207.- Kaunas: Technologija 2003, Nr. 6(44), p.37 – 41.