

Əlyazması hüququnda

AKIF ƏLİ OĞLU CAHANGİROV

**SƏTHLƏRİ QORUYUCU TƏBƏQƏLƏRLƏ ÖRTÜLMÜŞ
LİFLİ KOMPOZİT ÖRTÜK VƏ LÖVHƏLƏRİN
YÜKGÖTÜRMƏ QABİLİYYƏTİNİN TƏYİNİ**

İxtisas: 3305.02 – İnşaat mexanikası

**Texnika üzrə elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın**

A V T O R E F E R A T I

BAKİ – 2018

Dissertasiya işi Azərbaycan Texniki Universitetində
«Avtomobil daşımaları və yol hərəkətinin təşkili» kafedrasında yerinə
yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçilər: f.-r.e.d., prof. M.X.İlyasov
t.e.d. prof. Ə.H.Tağızadə

Rəsmi opponentlər:

AMEA-nın həqiqi üzvü, f.-r.e.d., prof.H.H.Quliyev
AMEA-nın müxbir üzvü, t.e.d., prof. R.S.Qurbanov,
f.-r.e.d., prof. O.H.Rzayev

Aparıcı təşkilat: AMEA-nın Riyaziyyat və Mexanika İnstitutunun
«Elastiklik və plastiklik nəzəriyyəsi» şöbəsi

Dissertasiya işinin müdafiəsi **16 mart 2018-ci** il tarixində saat 12⁰⁰-da
AzMİU-da fəaliyyət göstərən D02.042 Dissertasiya Şurasının iclasında
keçiriləcəkdir.

Ünvan: Az-1073, Bakı A.Sultanova küç. 11, Azərbaycan Memarlıq və
İnşaat Universiteti, II tədris korpusu, otaq 104

Dissertasiya ilə Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universitetinin
kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat 13 fevral 2018-ci il tarixdə göndərilmişdir.

D 02.042. Dissertasiya Şurasının
elmi katibi, f.-r. ü.f.d, dosent

A.M.İsayev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Kompozit materiallardan hazırlanmış konstruksiyalar xalq təsərrüfatının bir çox sahələrində - aviakosmik texnikada, gəmi və maşınqayırmada, körpülərin tikintisi, böyük idman arenalarının örtülməsi, böyük həcmli çənlərin hazırlanması zamanı, dəniz-neft sənayesində, stasionar neft platformalarında, boru-kəmərlərində, bataqlıq və buzlu qrunt şəraitində səyyar və stasionar yolların, təyyarə uçuş-eniş zolaqlarının və helikopter meydançalarının tikintisində və bir çox başqa sahələrdə geniş istifadə olunur. Konstruksiya elementlərinə onların dağılmaya dayanıqlılığını, uzunömürlülüynü və başqa mühüm xarakteristikalarını əhəmiyyətli dərəcədə artıran nanostrukturulu örtüklərin çəkilməsi maşınqayırmada geniş tətbiq olunan məsələlərdən olmuşdur. Aqressiv mühitlərdə, həmçinin çirklənmiş atmosferdə və suda istismarı zamanı bu konstruksiyaların səthləri kompozitin ümumilikdə mexaniki xassələrinə təsir göstərən, fiziki və mexaniki cəhətdən daha dayanıqlı olan laylarla örtülür. Yüngül bağlayıcı layı olan üçlaylı konstruksiyalar digərləri ilə müqayisədə daha geniş tətbiq olunur. Nisbətən kiçik xüsusi çəkisi və yüksək möhkəmliyi olmaqla, bu konstruksiyalar əyilmədə yüksək sərtliyə və bir sıra başqa əhəmiyyətli xassələrə malik olurlar. Kompoziti təşkil edən layların və armirləyici liflərin fiziki-mexaniki və həndəsi xarakteristikalarına əsaslanan möhkəmlik analizi ilə bağlı yaranan problemlərin həll edilməsi xüsusi aktuallıq kəsb edir.

Kompozit materiallardan hazırlanmış konstruksiyalar stasionar qazma platformalarının tikintisində tətbiq edilməkdədir. Bu platformalar üzərində tikilmiş ambarlar, yaşayış binaları, qazma qurğuları, çənlər, maqistral borular, dəniz dalğaları və güclü küləklərin yaratdığı dinamik qüvvələr, təzyiqliq və rəqslər işçiləri daşıyan helikopterlər platformalarda kifayət qədər böyük yüklənmələr yaradır. Bu vəziyyətdə platformaların tələb olunan təhlükəsiz yüklənmə qabiliyyətinin öyrənilməsini, onların lazımı istiqamətlərdə daha möhkəm armaturlarla (liflərlə) möhkəmləndirilməsini və yeyilməyə davamlılığını artıran təbəqələrlə örtülməsi məsələlərinin tədqiqini zəruri edir. Örtük və lövhələr ağırlığı birinci qəbul edir, çarpaz və əsas istiqamətdəki tirlərə paylayırlar. Bu konstruksiyaların möhkəmliyinin araşdırılması aktuallıq kəsb edir.

Kompozit materialda armirləyici lifləri, adətən, maksimal davamlılıq və sərtlik xarakteristikalarına görə seçirlər. Matrisin (bağlayıcının) əsas təyinatı – lifləri vahid bərk cisim şəklində birləşdirmək

və bu zaman məmulata tələb olunan fəza konfigurasiyasını almağa imkan vermək, qəbul etdiyi yükü bir lifdən digərinə ötürməkdən ibarətdir.

Lifli kompozit materialın axma meyarını təyin edərkən fərz olunur ki, matris və liflər möhkəmlənməyən ideal plastiktir, onların dartılma və sıxılma zamanı xassələri fərqlidir. Matris və lif arasında kontakt idealdır, liflərin axma hədləri isə matrislə müqayisədə çox yüksəkdir. Təbii ki, bu halda plastik axma matris və lifin təmas səthindən başlayır. Hazırda istehsal olunan kompozit materialların böyük hissəsini lifli kompozitlər təşkil edir. Müəyyən edilmişdir ki, matrisin (adətən polimerin) köməyiylə monolit material şəklində birləşdirilən lifləri tətbiq etmək çox səmərəlidir. Belə kompozit məhz liflərin xüsusiyyətləri ilə əlaqədar bir çox xassələri özündə saxlaya bilir.

Kompozit materialların mexanikasının inkişafında dünya şöhrətli alimlər V.N.Alpert, N.F.Verbux, A.A.Qvozdev, A.S.Qriqoryev, A.N.Quz, V.V.Drukalenko, A.A.Ilyuşin, I.A.Kiyko, Y.R.Lepik, A.V.Nalimov, Y.V.Nemirovski, A.R.Rjanitsın, V.I.Rozenblyum, T.P.Romanova, V.V.Sokolovski, Y.R.Lepik, Q.S.Şapiro, V.Praçer, H.Hopknis, Z.Mruz, A.Savçuk, M.Aryanpour, P.Hoc, M.B.Axundov, S.C.Əkbərov, K.Ə.Əliyev, Q.Q.Əliyev, A.N.Əlizadə, R.Y.Əmənzadə, V.C.Hacıyev, M.X.Ilyasov, Ə.M.İsayev, F.Q.İsayev, H.H.Quliev, F.S.Lətifov, M.F.Mehdiyev, V.M.Mirsəlimov, B.R.Nuriyev, L.X.Talıblı, İ.H.Tağıyev, Ə.H.Tağızadə, F.Q.Şəmiyev, A.D.Zamanov və onların bir çox davamçılarının tədqiqatları böyük yer tutur.

Kompozit materialların geniş tətbiq olunması yeni kompozit konstruksiyaların yaradılmasına, onların möhkəmlik və yükləyici qabiliyyətlərinin nəzəri və təcrübi analizlərinin aparılmasına zərurət yaradır. Lövhələr, örtüklər və digər konstruksiyalar nəzəriyyəsinin tənliyi ümumiləşmiş gərginliklər və deformasiya sürətləri ilə ifadə olunduğundan plastiklik şərtini də ümumiləşmiş gərginliklərlə ifadə edirlər. Burada axma şərtlərinin təyini vacib məsələlərdən biridir. Axma hiperüstəvilərinin ümumiləşmiş gərginliklərlə ifadə olunan tənliyinin çıxarılışı çətin məsələ olmaqla bərabər, bu məsələnin həlli konstruksiyalar üçün qoyulmuş problemlərin həllinə təsir göstərə bilər. Örtük və lövhələrin həddi vəziyyətlərinin tədqiqinə çoxsaylı işlər həsr edilmişdir. Buna baxmayaraq, liflərlə armirlənmiş çoxlaylı örtük və lövhələrin yükləyici qabiliyyətinin təyininə aid məsələlər mexanikanın aktual məsələləri olaraq qalır. Xüsusilə, bu məsələlərin həll üsullarının inkişafı ilə bağlı problemlər böyük maraq kəsb edir. Müdafiəyə təqdim olunan dissertasiya işi armirlənmiş çoxlaylı

lövhə və örtüklər üçün daha praktik plastik axma şərtlərinin tapılmasına və bunun əsasında konkret tətbiqi məsələlərin həllinə həsr olunmuşdur.

Dissertasiya işinin məqsədi lazım olan möhkəmlik, sərtlik, uzunömürlülük, davamlılıq, yüngül çəki və başqa xassələri ödəyəcək şəkildə hazırlanmış mürəkkəb strukturlu çoxlaylı və lifli kompozit materialların mürəkkəb gərginlikli vəziyyətdə ideal plastik axma şərtlərinin qurulması, bu materialdan hazırlanmış dairəvi və halqavari lövhələrin yükötürmə qabiliyyətinin təyini məsələlərinin analitik həllərinin tapılması və tədqiqindən ibarətdir.

Göstərilən məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı vacib məsələlər həll edilmişdir:

- liflərlə armirlənmiş üçlaylı kompozit örtük və lövhələr üçün axma hipersəthləri qurulmuşdur;
- müxtəlif yüklənmələrə məruz qalan dairəvi və halqavari kompozit lövhələrin konturlarında sərbəst dayaqlı və bağlanmış sərhəd şərtləri verildikdə həddi yük və kinematik mümkün əyinti sürətləri sahələri tapılmışdır;
- müxtəlif yüklənmələrə məruz qalan və mərkəzi deformasiya olunmayan dairəvi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş liflərlə armirlənmiş üçlaylı dairəvi lövhələrin konturlarında sərbəst dayaqlı və bağlanmış sərhəd şərtləri verildikdə, həmçinin lövhə sıxılmayan mühit üzərində yerləşdikdə həddi yük və kinematik mümkün əyinti sürətləri sahələri tapılmışdır.

Tədqiqat üsulları. Tədqiqat üsulları inşaat mexanikasının, deformasiya olunan bərk cisim mexanikasının, ideal plastiklik nəzəriyyəsinin, adi diferensial tənliklər nəzəriyyəsinin fundamental qanunlarına və təqribi hesablama metodlarına əsaslanır.

Dissertasiya işinin elmi yeniliyi aşağıdakıdan ibarətdir:

- bağlayıcı orta təbəqəsi baş əyrilik momentləri istiqamətində dörd qrup liflərlə armirlənmiş və kənar örtük təbəqələrlə möhkəmləndirilmiş üçlaylı lifli kompozit materialın plastik axma şərtləri tapılmışdır;

- kompoziti təşkil edən bütün materialların möhkəmlənməyən ideal plastiklik xassəsinə malik olduğu qəbul edilərək, kompozit elementin en kəşiklərinə təsir edən qüvvə və momentlərin müvazinət tənlikləri yazılmış, bu tənliklər həll edilərək, baş əyici momentlər müstəvisində axma altıbucaqlısının tərəflərinin kompoziti təşkil edən materialların fiziki-mexaniki xassələrindən və kompozitin quruluşunun həndəsi parametrlərindən asılılığı tənlikləri tapılmışdır ;

- müxtəlif yüklərin təsirinə məruz qalan kompozit örtük və

lövhələrin yükləyici qabiliyyətinin təyini məsələlərinin orijinal həll üsulları işlənilib hazırlanmış, çoxsaylı nəzəri və praktiki əhəmiyyət kəsb edən məsələlərin həllində tətbiq edilmişdir;

- lövhənin müvazinətinin differensial tənliyi altıbucaqlının tərəflərinin tənlikləri ilə bircə həll edilərək, əyici momentlərin müvafiq axma rejimlərinə uyğun olan həlləri tapılmışdır;

- konturları üzrə sərbəst söykənmiş və ya bərkidilmiş, üst səthində hər hansı intensivlikli, xüsusi halda müntəzəm paylanmış oxasimmetrik yüklərin təsirinə məruz qalan dairəvi və halqavari lövhələrin yükləyici qabiliyyəti və kinematik mümkün əyinti sürətlərinin sahələri təyin edilmişdir;

- axma altıbucaqlısının şaquli tərəflərinə uyğun olan oblastların sərhədləri (oynaq çevrələri) üzərində əyinti sürətinin birinci tərtib törəməsinin kəsilən olması və radial əyici momentin maksimal qiymət alması şərtlərindən lövhənin həddi yükü və naməlum kəsici qüvvə təyin edilmişdir;

- dairəvi mərkəzi hissəsində deformasiya olunmayan dairəvi lövhə və onun ətrafında onunla təmasda olan halqavari kompozit lövhədən ibarət və sıxılmayan mühit üzərində yerləşən lövhənin yükləyici qabiliyyətinin təyininə aid məsələlər həll edilmişdir. Lövhələrin yükləyici qabiliyyəti və kinematik mümkün əyinti sürətləri sahələri təyin edilmişdir;

- baxılan məsələlərin hamısının dəqiq analitik həlləri ədəbiyyatda ilk dəfə burada tapılmışdır. Alınmış nəticələr bilavasitə praktikaya tətbiq oluna biləcək şəkllə gətirilmişdir. Dissertasiyada axma altıbucaqlısının qurulmuş şəkli ümumiyyətlə qeyri-xətti olan, baxılan strukturlu kompozitlər üçün daha da çətinləşən lövhə və örtüklərin yükləyici qabiliyyətinin təyini məsələlərinin həllini əhəmiyyətli dərəcədə asanlaşdırmağa və analitik həllər qurmağa imkan vermişdir.

Müdafiyə çıxarılan əsas müddəalar aşağıdakılardır:

- orta bağlayıcı layı (matrisi) orta səthindən müxtəlif məsafələrdə yerləşən nazik təbəqələr üzrə baş momentlər istiqamətində döşənmiş dörd müxtəlif qrup liflərlə armirlənmiş və üz tərəfləri yeyilməyə dayanıqlı, möhkəmləndirici və uzunömürlü təbəqələrlə örtülmüş üçqatlı kompozit örtük və lövhələrin yükləyici qabiliyyətlərinin təyini haqda plastiklik nəzəriyyəsinin mürəkkəb məsələlərinin tədqiqi metodikasının işlənməsi;

- verilmiş struktura malik kompozit örtük və lövhələr üçün axma hipersəthi qurulması;

- ilk dəfə olaraq liflərlə armirlənmiş üçqatlı kompozit örtük və

lövhələrin yüklətmə qabiliyyətlərinin təyini məsələlərinin dəqiq analitik həllərinin alınması;

- mümkün sərhad şərtləri daxilində və müxtəlif xarici təsirlər zamanı dairəvi və həlqəvi lövhələr üçün qoyulmuş əyilmə məsələlərində həddi yüklənmə kəmiyyətinə layların və liflərin xassələrinin, həmçinin kompozitin həndəsi struktur parametrlərinin təsirini öyrənməyə imkan verən aşkar düsturların alınması;

- yüklətmə qabiliyyətinin tələb olunan xassələrə malik liflərlə armirlənmiş üçqatlı kompozit lövhə və örtüklərin yaradılması strukturunun işlənməsi.

İşin praktiki əhəmiyyəti aşağıdakılardan ibarətdir:

- təklif olunan üsullar çoxqatlı liflərlə armirlənmiş kompozit materiallardan hazırlanan məmulatların layihələndirilməsində istifadə oluna bilər;
- konstruksiyanın axma şərtinin qurulması üçün işlənməmiş metodika ilə bağlı alınmış nəticələr konstruksiya elementlərinin yüklətmə qabiliyyətinin təyini üçün oxşar tədqiqatların aparılmasında, daha mürəkkəb fəza plastik axma vəziyyətlərində axma şərtlərinin işlənməsində və s. tətbiq oluna bilər;
- üçqatlı liflərlə armirlənmiş lövhələrin yüklətmə qabiliyyətinin təyini ilə bağlı alınmış nəticələr sənaye və tikintinin bir çox sahələrində öz tətbiqini tapa bilər.

İşin aprobasiyası. Elmi-tədqiqat işlərinin hesabatları, metodiki sənədlər, metodik göstərişlər, tövsiyələr şəklində təqdim edilmiş və müxtəlif səviyyəli elmi-texniki, təcrübi-metodiki seminar və konfranslarda məruzə edilmişdir. O cümlədən:

- Azərbaycan Texniki Universitetinin “Avtomobildəşimləri və YHT” kafedrasının seminarlarında (2010 – 2017 illər);
- Milli Aviasiya Akademiyası “Hava gəmilərinin uçuş istismarı” kafedrasının seminarlarında (2010 – 2017 illər);
- Ümummilli lider Heydər Əliyevin 90 illik yubileyinə həsr edilmiş “Metallurgiya və metalşünaslığın problemləri” adlı I Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 29 – 30 aprel 2013 il;
- akademik A.X.Mirzəcanzadənin 85 illik yubileyinə həsr edilmiş “Neftqaz sahəsində qeyriyuton sistemləri” adlı Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 21 – 22 noyabr 2013 il;
- professor Y.Ə.Əmənzadənin 100 illik yubileyinə həsr edilmiş

“Mexanikanın klassik və müasir problemləri” adlı Respublika elmi konfransı, Bakı, 22 may 2014 il;

- Riyaziyyat və Mexanika İnstitutunun 55 illiyinə həsr edilmiş Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 16 may 2014 il;
- THERMAN 2015 “Texniki vacib materialların istilik-fiziki və mexaniki xassələri” mövzusunda həsr edilmiş IV Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 17-18 sentyabr 2015.
- Silahlı Qüvvələr Hərbi Akademiyasının I Respublika elmi-praktiki konfransı, Bakı, 2015 il.
- Proc/ of the Intern/ Sympos/ of Mech. and Machine Sc. 2017. AzCIFTtoMM-Azerbaijan Technical University 11-14 September 2017, Baku, Azerbaijan, pp. 261-266.
- I.International Turkish World Engineering and Science Congress/7-10 december 2017 Antalya, Turkey.

İşlə bağlı elmi əsərlərin dərci. Tədqiqatların əsas müddəaları 2012-2017-ci illərdə ölkədə və xaricdə nəşr olunan nüfuzlu elmi-texniki jurnallarda məqalələr şəklində dərc olunmuşdur. Dissertasiyanın mövzusu üzrə 23 məqalə və 8 tezis çap edilmişdir; onların siyahısı avtoreferatın sonunda verilmişdir.

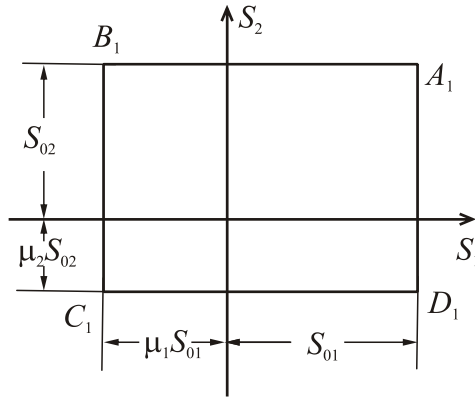
İşin həcmi və strukturu. Dissertasiya işi girişdən, beş fəsildən, əsas nəticələrdən və istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İşin ümumi həcmi 20 şəkil və 200 adda ədəbiyyat siyahısı daxil olmaqla 239 səhifədən ibarətdir.

İŞİN MƏZMUNU

Dissertasiya işi girişdən və beş fəsildən ibarətdir. Girişdə dissertasiya, mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin elmi yeniliyi, praktiki əhəmiyyəti və müdafiəyə çıxarılan əsas müddəaları şərh edilmiş, dissertasiya mövzusu ilə bağlı ədəbiyyatda mövcud işlərin qısa xülasəsi verilmişdir.

Birinci fəslin birinci paraqrafında üzləri nazik səthlərlə örtülmüş lifli kompozit örtük və lövhələrin axma meyarları təyin edilir. Fərz edilir ki, matrisin materialı Tresk-Sen-Venanın axma şərtlərinə tabedir və dartılma və sıxılmada axma hədləri müxtəlifdir. Liflərin və qoruyucu təbəqələrin materialları da dartılma və sıxılmada müxtəlif axma hədlərinə malikdirlər. Liflərin axma hədləri matrisin uyğun axma hədlərindən kifayət

qədər yüksək, xarici təbəqələrin axma hədləri isə ixtiyari hesab olunur. Kompozitin xassələrini matrisin, armirləyici liflərin və təbəqələrin həndəsi



Şəkil 1. Liflər üçün axma hədləri

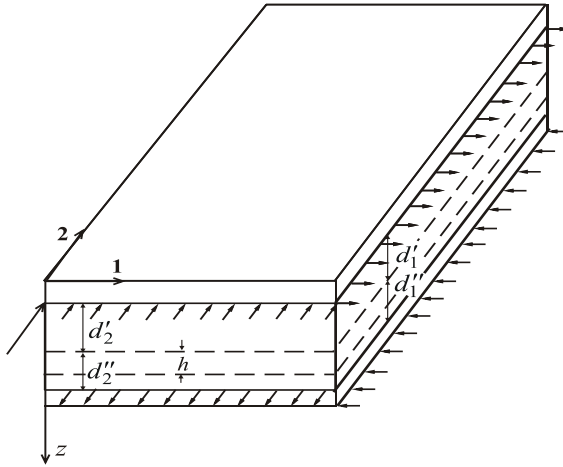
və fiziki xarakteristikaları vasitəsilə analitik şəkildə qiymətləndirməyə imkan verən modellərdən istifadə olunur.

Məqsəd axma altıbucaqlısının bütün tərəflərinin uyğun axma hədlərini analitik şəkildə liflərin, matrisin və təbəqələrin axma hədləri və həndəsi xarakteristikaları vasitəsilə ifadə etməkdən ibarətdir.

Hesab edirik ki, matris bircins izotrop olub sıxılmada σ_0 və dartılmada $k\sigma_0$ ($0 \leq k \leq 1$) axma həddinə malikdir və Tresk-Sen-Venanın ümumiləşmiş axma şərtini və assosiasiya olunmuş (bağlanmış) axma qanununu ödəyir.

Matris dartılmada və sıxılmada vahid uzunluğa düşən həddi qüvvələri S_{0i}^+ və $S_{0i}^- = \mu_i S_{0i}^+$ ($0 \leq \mu_i \leq 1$) olan nazik ideal plastik liflərlə armirlənir (şək. 1); $i=1, 2$ – baş əyici moment oxları ilə üst-üstə düşən ortoqonal istiqamətlərdir.

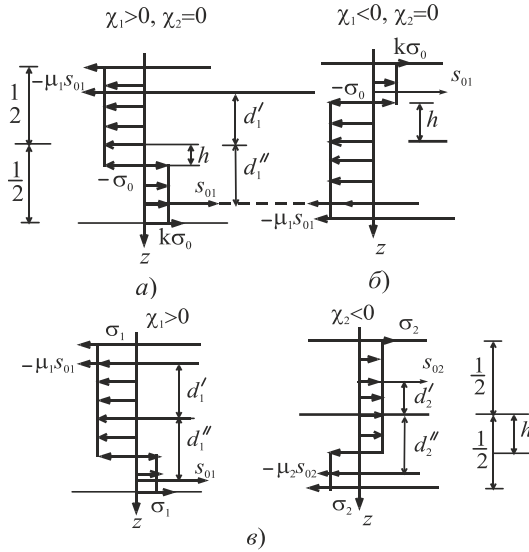
Burada $S_{0i}^+ = F_i^+ \sigma_{0i}^+$, $S_{0i}^- = F_i^- \sigma_{0i}^-$, σ_{0i}^+ və σ_{0i}^- isə liflərin dartılmada və sıxılmada axma hədləridir. Liflər hər istiqamətdə iki lay olmaqla, orta səthə nəzərən qeyri-simmetrik şəkildə dörd layda yerləşdirilir. Hər lay baş gərginlik xətləri üzrə yerləşən və hər istiqamətdə sayları müxtəlif olan müəyyən liflər ailəsindən ibarətdir.



Şəkil 2. Dörd müxtəlif müstəvidə iki ortoqonal istiqamət üzrə liflərlə armirlənmiş örtük elementi.

Bu layların orta müstəvidən olan məsafələrini \bar{d}'_1 , \bar{d}'_2 və \bar{d}''_1 , \bar{d}''_2 -lə işarə edək (şək. 2), belə ki, yuxarı layların məsafələri \bar{d}'_1 və \bar{d}'_2 , aşağı laylarınkı isə \bar{d}''_1 və \bar{d}''_2 olsun. Orta və neytral səthlər arasındakı məsafəni \bar{h} ilə işarə edib, onun sabit və müstəvi kəsiklər qanununa tabe olduğunu hesab edək. \bar{d}'_1 , \bar{d}'_2 , \bar{d}''_1 , \bar{d}''_2 və \bar{h} kəmiyyətlərini müsbət qəbul edək. Örtük təbəqələrin dartılmada və sıxılmada axma hədləri uyğun olaraq Q_0^+ və $Q_0^- = \nu Q_0^+$ ($0 \leq \nu \leq 1$) olan bircins izotrop ideal plastik materialdan hazırlanırlar. Liflərlə matrisin sərhəddində, həmçinin matrislə örtük təbəqələrin sərhəddində boşluqlar yoxdur, liflərlə matrisin təmas səthində lokal effektlərin təsirini nəzərə almırıq. Hər layda liflərin sayı kifayət qədər çox olduğundan örtüyün və ya lövhənin materialını bircins hesab etmək olar. Örtüyün və ya lövhənin qalınlığını H ilə işarə edək və koordinat başlanğıcını orta səthdə yerləşdirməklə z oxunu aşağıya doğru yönəldək. Əyici yüklənmənin təsirinə məruz qalmış lövhənin həddi vəziyyətində daxildə neytral səth yaranır ki, bu da gərginliklərin kəsilmə səthi olur. Bu səthdən hər iki tərəfdə gəginliklər vəziyyəti meydana gəlir, belə ki, $z = 0$ koordinat başlanğıcı olmaqla, neytral səth üzərində yerləşən (r, φ, z) polyar koordinat sistemində $z > 0$ olduqda $\sigma_{\alpha\beta}(z) = const$

və $\sigma_{\alpha\beta}(-z) = -\sigma_{\alpha\beta}(z) = const$ olur.



Şəkil 3. Nazik təbəqələrlə örtülmüş armirlənmiş örtüyün qalınlığı boyunca gərginliklərin paylanması

Baş əyici M_1 , M_2 momentlərinin və N_1 , N_2 membran qüvvələrinin təsirinə məruz qalmış örtük elementinə baxaq (şək. 2):

$$N_i = \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_i dz, \quad M_i = \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_i z dz,$$

$$N_{12} = \int_{-H/2}^{H/2} \tau_{12} dz, \quad M_{12} = \int_{-H/2}^{H/2} \tau_{12} z dz, \quad i=1, 2,$$

burada H – örtüyün qalınlığıdır. Deformasiya sürətləri örtüyün qalınlığı boyunca

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\kappa}_1 (z - \bar{h}), \quad \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\kappa}_2 (z - \bar{h}),$$

şəklində dəyişir, burada z – orta səthdən olan məsafə (şək. 3, a, b, c), $\dot{\kappa}_1$ və $\dot{\kappa}_2$ baş əyrilik sürətləridir. Deformasiya sürətlərinin $\dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon}_2$ nisbətinin orta

səthin normalı boyunca sabit qaldığı görünür. Ona görə də neytral səthin hər iki tərəfi üzrə gərginliklərin paylanması asanlıqla təyin edilir.

$$h = \frac{\bar{h}}{H}, \quad n_i = \frac{N_i}{\sigma_0 H}, \quad m_i = \frac{4M_i}{\sigma_0 H^2},$$

$$d_i = \frac{\bar{d}_i}{H}, \quad s_{0i} = \frac{S_{0i}^+}{\sigma_0 H}, \quad h = \frac{\bar{h}}{H}, \quad q_0 = \frac{Q_0^+}{\sigma_0 H}, \quad i = 1, 2$$

ölçüsüz parametrləri daxil edək və şəkil 4-dən istifadə etməklə AB , DE , AF , CD , BC və EF rejimlərinə uyğun əyici momentləri və membran qüvvələrini hesablayaq. Assosia olunmuş axma qanununa görə deformasiya sürəti vektoru axma əyrisinin normalı istiqamətindədir. Ölçüsüz m_1 , m_2 baş momentlərin işarəsindən asılı olaraq plastik axma müxtəlif istiqamətlərdə baş verə bilər.

Əyici momentlərin müsbət və mənfi həddi qiymətləri altıbucaqlının uyğun olaraq AF ($i=1$) və AB ($i=2$) tərəfləri üçün

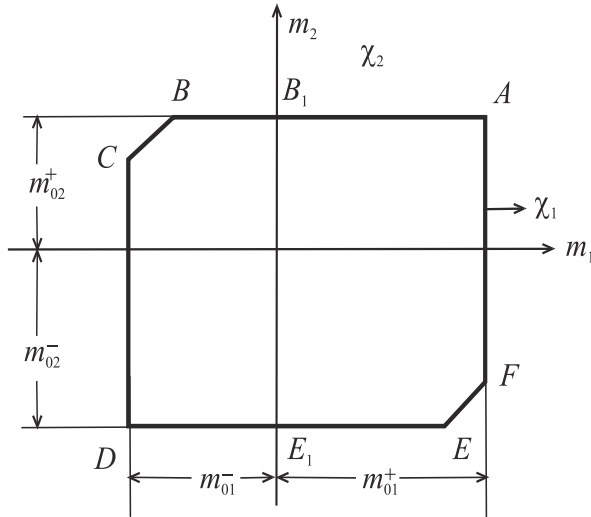
$$m_i = m_{0i}^+ = c_0 + c_{1i}^+ s_{0i} - c_{2i} s_{0i}^2 + c_3 q_0 - c_4 q_0^2 - c_{5i} s_{0i} q_0,$$

CD ($i=1$) və DE ($i=2$) tərəfləri üçün

$$m_i = -m_{0i}^- = -[c_0 + c_{1i}^- s_{0i} - c_{2i} s_{0i}^2 + c_3 q_0 - c_4 q_0^2 - c_{5i} s_{0i} q_0], \quad (1)$$

EF və CB tərəfləri üçün isə

$$m_2 = \alpha m_1 + \beta_1, \quad m_2 = \alpha m_1 + \beta_2, \quad \text{şəklindədir.}$$



Şəkil 4. Axma altıbucaqlısı

Burada əmsallar üçün aşağıdakı işarələmələr qəbul edilmişdir:

$$\begin{aligned}
 c_i &= \frac{2k}{1+k}, \quad c_{1i}^+ = 4 \left(d_i'' + \mu_i d_i' + \frac{1-\mu_i}{2} \frac{1-k}{1+k} \right), \quad c_{2i} = \frac{2(1-\mu_i)^2}{1+k}, \\
 c_3 &= 4 \frac{1+\nu k}{1+k}, \quad c_4 = \frac{2(1-\nu)^2}{1+k}, \quad c_{5i} = \frac{4(1-\mu_i)(1-\nu)}{1+k}, \quad i=1, 2. \\
 c_{1i}^- &= 4 \left(d_i' + \mu_i d_i'' + \frac{1-\mu_i}{2} \frac{1-k}{1+k} \right), \\
 \alpha &= \frac{(1-k)[(1-\mu_2)s_{02} + (1-\nu)q_0] + k}{(1-k)[(1-\mu_1)s_{01} + (1-\nu)q_0] + k}, \quad i=1, 2; \quad q_0 = \frac{Q_0}{\sigma_0 H^2}, \\
 \beta_1 &= a_2 - \alpha a_1, \quad \beta_2 = a_4 - \alpha a_3, \quad s_{0i} = \frac{S_{0i}}{\sigma_0 H^2}, \\
 a_1 &= \frac{1}{1-k^2} \left\{ k(1-k) + (1+k^2)[(1-\mu_1)s_{01} + (1-\nu)q_0] - 2k[(1-\mu_2)s_{02} + (1-\nu)q_0] + \right. \\
 &\quad \left. + 4(d_1'' + \mu_1 d_1')s_{01}^+ + 2(1+\nu)q_0 \right\}, \\
 a_2 &= -\frac{1}{1-k^2} \left\{ k(1-k) - (1+k^2)[(1-\mu_2)s_{02} + (1-\nu)q_0] + 2k[(1-\mu_1)s_{01} + (1-\nu)q_0] + \right. \\
 &\quad \left. - 4(d_2' + \mu_2 d_2'')s_{02} - 2(1+\nu)q_0 \right\}, \\
 a_3 &= -a_1 - 4(1-\mu_1)(d_1' - d_1'')s_{01}, \quad a_4 = -a_2 - 4(1-\mu_2)(d_2' - d_2'')s_{02}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

d_i' və d_i'' – orta müstəvidən yuxarı və aşağı lif laylarına qədər ölçüsüz məsafələrdir. c_{1i}^+ və c_{1i}^- kəmiyyətlərinin ifadələrini müqayisə edərək asanlıqla görmək olar ki, $d_i' = d_i''$ şərti ödənildikdə bu kəmiyyətlər də bərabərləşir $c_{1i}^+ = c_{1i}^-$ və hətta $m_{0i}^+ = m_{0i}^-$ olur.

Beləliklə, əyici momentlər və membran qüvvələri fəzasında armirlənmiş örtük üçün axma hipersəthləri altı qeyri-xətti tənliklə təyin edilir. Alınmış düsturlar kompozitin bütövlükdə mexaniki vəziyyətinə ayrı-ayrı komponentlərin həndəsi və fiziki xarakteristikalarının müxtəlif kombinasiyalarının təsirini öyrənməyə imkan verir.

Alınmış düsturlar armirləyici liflərin və örtük layların həddi qüvvələrinə nəzərən kvadratikdir. Liflər və laylar üçün ümumiləşmiş həddi qüvvələr dartılma və sıxılma zamanı bərabər olduqda ($\mu_i = 1$, $\nu=1$), bu

düsturlar xətti olur.

Sonuncu halda liflər və xarici laylar üçün axma həddlərinin artması, həmçinin armirləyici liflərin yerləşdiyi səthlər lövhənin orta müstəvisindən uzaqlaşdıqca, kompozit lövhənin axma həddləri böyüyür.

$$d'_1 = d''_1 = d_1, \quad d'_2 = d''_2 = d_2, \quad s_{01} = s_{02} = s_0, \quad \mu_1 = \mu_2 = \mu, \\ d_1 = d_2 = d, \quad \mu = 1, \quad \nu = 1 \text{ halında (1) düsturları kifayət qədər sadələşir:}$$

$$m_1 = m_2 = \pm m_0 = \pm \left(\frac{2k}{1+k} + 8s_0 d + 4q_0 \right),$$

$$m_1 - m_2 = \pm \left(\frac{2k}{1+k} + 16s_0 d + 8q_0 \right)$$

w əyinti sürətinin təyini üçün assosioə olunmuş axma qanunundan

$$\dot{\chi}_i = \lambda_p \frac{\partial f_p}{\partial m_i} \quad (i = 1, 2; \quad p = 1, 2, \dots, 6)$$

istifadə etməklə xətti differensial tənliklər alırıq, burada f_p funksiyaları (1) tənlikləri ilə (şəx. 4-dəki altıbucaqlının tərəfləri) ifadə olunan hissə-hissə hamar axma funksiyaları, λ_p – mənfi olmayan kəmiyyətlər,

$$\dot{\chi}_1 = -\frac{d^2 w}{dr^2}, \quad \dot{\chi}_2 = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr}, \quad (3)$$

isə lövhənin orta səthinin əyrilik sürətləridir.

Birinci fəslin ikinci paraqrafında dairəvi lövhənin yükləyici qabiliyyətinin təyini haqqında məsələnin qoyuluşu verilir: z oxu aşağıya yönəlməklə R, φ, z silindrik koordinat sisteminin

$$A \leq R \leq B, \quad -\frac{H}{2} \leq z \leq \frac{H}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

oblastında verilmiş halqavarı kompozit lövhənin P intensivlikli aşağıya yönəlmiş oxasimmetrik yükün təsiri altında plastik əyilməsi (dartılmasız) məsələsinə baxaq. Lövhənin H qalınlığını sabit hesab edirik. Yükləmə artırılaraq həddi yükə çatana qədər lövhə mütləq bərk cisim kimi deformasiyaya uğramır, həddi yükə çatdıqda isə lövhənin müqaviməti anidən itir və o plastik maye kimi axmağa başlayır. Məqsəd lövhənin yükləyici qabiliyyəti adlanan bu həddi yükü tapmaqdan ibarətdir. Bunun üçün lövhənin ölçüsüz əyici momentlərlə ifadə edilən müvazinətinin differensial tənliyi yazılır

$$(rm_1)' - m_2 = -T^{ar} + Ta \quad \left(T^{ar} = \int_a^r p(\eta) \eta d\eta, p = P/\sigma_0 \right) \quad (4)$$

burada ştrix $r - a$ görə törəməni göstərir, T – isə lövhənin daxili konturu üzərində vahid uzunluğa düşən naməlum dayaq reaksiyasıdır. Dairəvi lövhələr üçün T sıfırdır.

Müvazinət tənliyi aşağıdakı sərhəd şərtləri daxilində həll edilir:

- 1) sərbəst sərhəddə: $m_1 = 0$; (5)
- 2) şarnirli dayaqlanmış sərhəddə: $m_1 = 0$, $w = 0$;
- 3) bağlanmış sərhəddə: $w = 0$ və, ya $\frac{dw}{dr} = 0$, ya da $m_1 = m_{01}$.

(4) tənliyi iki m_1 və m_2 naməlum funksiyalarının təyini üçün bir tənlikdir. Bu kəmiyyətlər arasında ikinci tənlik axma şərtləri ilə verilir. Məlum olduğu kimi, axma altıbucaqlısının daxilində deformasiya yoxdur (elastikdir, ancaq ideal sərt plastiklik nəzəriyyəsinə görə bu halda deformasiya sıfır hesab edilir), üzərində (1) tənlikləri ödəyir, kənarına isə çıxıla bilməz, çünki material möhkəmlənməyəndir.

Lövhənin yükötürmə qabiliyyətini (həddi yükü) təyin etmək üçün əvvəlcə axma altıbucaqlısının tərəflərinin elə ardıcılığı seçilir ki, bu ardıcılığın başlanğıc və son nöqtələrində lövhənin konturları üzərindəki momentlərlə yazılan şərtlər ödənsin. Ardıcılıq üzrə istiqamət isə məsələnin qoyuluşuna uyğun şəkildə momentlərin işarələrinin analizi ilə müəyyən edilir. Qeyd edək ki, lövhənin alt təbəqələri dartılıanda, üst təbəqələri isə sıxılıanda $m_r > 0$ olur. Lövhənin səthi altıbucaqlının götürülən tərəflərinin sayı qədər konsentrik halqavari oblastlara (plastik axma rejimlərinə) bölünür. Bu oblastların radiusları kəsilməzlik şərtlərindən tapılır.

Beləliklə, verilən kompozit lövhənin yükötürmə qabiliyyətin təyin etmək üçün aşağıdakı riyazi məsələni həll etmək lazımdır: $p = p(r)$ yükünün elə ən böyük qiymətini tapmaq lazımdır ki, buunun üçün tapıla bilən $m_r(r)$ radial, $m_\theta(r)$ tangensial momentləri və $w(r)$ əyinti sürəti funksiyaları $a \leq r \leq b$ intervalında aşağıdakı şərtləri ödəsin:

- 1) m_r , m_θ və w funksiyaları C^1 , C^0 və ya C^2 – dən olan hissə-hissə kəsilməz funksiyalardır;

2) m_r və m_θ funksiyaları müvazinətin (4) diferensial tənliyini ödəyirlər; dairəvi lövhənin mərkəzində isə $m_r = m_\theta$ şərti ödənilir;

3) koordinatları m_r, m_θ olan ümumiləşmiş gərginliklər vektorunun uc nöqtəsi axma altıbucaqlısının içərisində və ya üzərində ola bilər. Birinci halda (3) əyrilik sürətləri sıfır olur ($w=0$ olduğu üçün), ikinci halda isə əyinti sürətləri ilə ümumiləşmiş gərginliklər arasında assosiasiya olunmuş axma qanunu ödənilir, yəni $(\dot{\chi}_1, \dot{\chi}_2)$ əyinti sürətləri vektoru m_r, m_θ müstəvisində axma altıbucaqlısının hər bir nöqtəsində ona perpendikulyar olur;

4) əyinti sürətinin dw/dr törəməsi yalnız şarnir çevrələri üzərində, yəni $|m_r| = m_{01}$ olduqda kəsilən olur;

5) sərbəst sərhəddə: $m_1 = 0$; şarnirli dayaqlanmış sərhəddə $m_1 = 0, w=0$; bağlanmış sərhəddə isə $w=0$ və, ya $\frac{dw}{dr} = 0$, ya da $m_1 = m_{01}$ şərtləri ödənilir.

Birinci fəslin üçüncü paragrafında yuxarıda baxılan kompozit materialdan hazırlanmış dairəvi lövhənin yüklənmə qabiliyyətinin təyininə dair oxasimmetrik məsələ həll edilir. Lövhə konturu üzrə sərbəst söykənmiş və bərkidilmiş götürülür, mərkəzində isə radial və tangensial əyici momentlərin bir-birinə bərabərlik şərti ödənilir. Lövhə üst səthində aşağı istiqamətdə yönəlmiş və müntəzəm paylanmış oxasimmetrik yüklərin təsirinə məruz qalır. Məsələnin həlli üçün axma altıbucaqlısı üzərində $A_1 B_1$ parçası götürülür. Bu tərəfin tənliyi ilə (4) tənliyi birlikdə həll edilir və əyici momentlərin müvafiq axma rejimlərinə uyğun ümumi həlləri tapılır. Kəsilməzlik və sərhəd şərtlərinin köməyi ilə lövhədə yaranan momentlər sahəsi birqiymətli şəkildə təyin edilir və həddi yük tapılır. Assosiasiya olunmuş axma qanunundan istifadə edərək, kinematik mümkün əyinti sürətləri sahələri təyin edilir.

İkinci fəslin birinci paragrafında mərkəzi layı liflərlə armirlənmiş dairəvi üçqatlı kompozit lövhənin yüklənmə qabiliyyəti təyin edilmişdir. Lövhə ya sərbəst dayanmış, ya da konturu üzrə bağlanmış və yuxarı səthdə müntəzəm paylanmış p yükünün təsiri altında olduğu hesab edilir. Ümumiləşmiş gərginliklərin statik mümkün sahələri və əyinti sürətlərinin

kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir.

Müntəzəm paylanmış p yükünün təsirinə məruz qalan, sərbəst dayanmış ρ radiuslu dairəvi kompozit lövhənin həddi yük üçün aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$p = \frac{3}{2} \frac{m_0}{\rho^2},$$

burada

$$m_0 = \frac{2k}{1+k} + 4s_0 \left[(1+\mu)d + \frac{1-\mu}{2(1+k)} \right] \frac{2(1-\mu)^2}{1+k} s_0^2 + 4q_0 \frac{1+\nu k}{1+k} \frac{2(1-\nu)^2}{1+k} q_0^2 - \frac{4(1-\mu)(1-\nu)}{1+k} s_0 q_0$$

Göründüyü kimi yüklənmə həddi lövhənin radiusunun kvadratı ilə tərs mütənasib, m_0 axma həddi ilə düz mütənasibdir. Öz növbəsində m_0 axma həddi s_0 və q_0 kəmiyyətləri ilə düz mütənasibdir. s_0 və q_0 kəmiyyətlərinin kvadratları, həmçinin onların hasili (bu hasil liflərin və örtük təbəqələrin materiallarının dartılma və sıxılmada fərqli müqavimətləri hesabına yararır) m_0 axma həddini azaldır. Əgər $\mu = 1$ və $\nu = 1$ olarsa, onda

$$m_0 = \frac{2k}{1+k} + 8s_0 d + 4q_0.$$

Buradan görünür ki, armirləyici liflər və örtük təbəqələr m_0 axma həddini artırır, $d=0,5$ və $k=1$ olduqda m_0 özünün

$$m_0 = 1 + 4(s_0 + q_0)$$

ən böyük qiymətini alır.

$s_0=q_0=0$ olduqda $m_0=1$ olur və alınmış nəticə Treskin nəticəsi ilə üst-üstə düşür.

Assosiasiya olunmuş axma qanunundan və əyinti sürətlərinin

$$\dot{\chi}_1 = -\frac{d^2 w}{dr^2}, \quad \dot{\chi}_2 = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr},$$

ifadəsindən istifadə edərək w əyinti sürəti üçün

$$\frac{d^2 w}{d\xi^2} = 0,$$

differensial tənliyini alırıq ki, bu tənlik $w(0) \leq \infty$, $w(\rho) = 0$ sərhəd şərtləri daxilində həll olunur. Bu məsələnin həlli

$$w = w_0 \left(1 - \frac{\xi}{\rho} \right), \quad 0 \leq \xi \leq \rho,$$

şəklində olur, burada w_0 – əyinti sürəti olub $r=0$ olduqda qeyri-müəyyən qalır. Göründüyü kimi ideal plastik deformasiya halında lövhə konus şəklini alır.

İndi isə konturu üzrə bağlanmış dairəvi kompozit lövhəyə baxaq. Həddi p yüklənməsi üçün

$$p = \frac{3A_0}{2\rho_1^2}$$

ifadəsi alınır, burada

$$A_0 = 2 \left\{ \frac{1-k}{1+k} [s_0(1-\mu) + q_0(1-\nu)] + \frac{k}{1+k} + 4s_0(1+\mu)d + 2q_0(1+\nu) \right\}$$

və ya ən sadələşmiş halda

$$A_0 = \frac{2k}{1+k} + 16s_0d + 8q_0$$

Göründüyü kimi $A_0 = m_0 + 8s_0d + 4q_0$, yəni bu halda lövhənin yükötürmə həddi sərbəst dayanmış lövhə halındakından çoxdur.

Əyilmə sürətlərinin kinematik mümkün sahələri də təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, lövhə mərkəzi dairəvi və halqavari hissələrə bölünür. Mərkəzi hissədə lövhə deformasiyadan sonra xətti doğuranı olan dairəvi konus şəklini alır, halqavari hissədə isə konusun doğuranları loqarifmik əyrilər şəklində olur.

İkinci fəslin ikinci paragrafında daxili sərhədi sərbəst dayanmış və xarici sərhədi bağlanmış liflərlə armirlənmiş halqavari üçlaylı kompozit lövhənin yükötürmə qabiliyyəti tədqiq olunmuşdur.

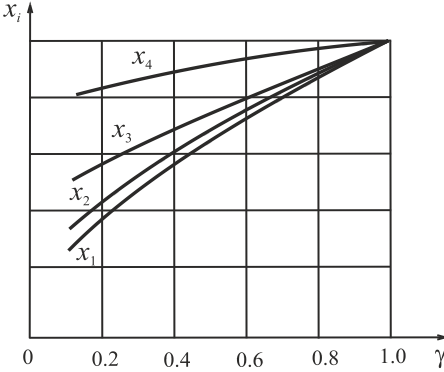
Müvazinətin (4) differensial tənliyi aşağıdakı sərhəd şərtləri nəzərə alınmaqla həll edilmişdir: sərbəst dayanmış sərhəddə $m_1 = 0$, $w = 0$; bağlanmış sərhəd boyunca isə $w = 0$, $dw/dr = 0$ və ya $m_1 = -m_{10}^-$.

Yüklənmə həddini təyin etmək üçün aşağıdakı düstur alınmışdır:

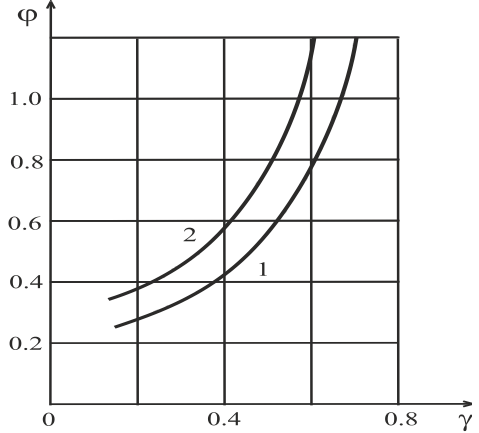
$$\varphi = \frac{pb^2}{m_{02}^+} = \frac{2}{x_3^2 - x_2^2} \left(1 - \frac{\alpha m_{01}^+ + \beta_1}{m_{02}^+} \right)$$

burada $x_i = \rho_i / b$, $i = 2, 3$, ρ_i – axma altıbucaqlısının tərəflərinə uyğun müxtəlif plastiklik rejim oblastlarının radiuslarıdır (şək. 4).

k , μ , ν və γ kəmiyyətlərinin konkret qiymətlərində pb^2 yüklənmə həddinin $(s_0 + q_0 / 2)$ kəmiyyətindən asılılığı qrafikləri şəkil 5 və 6-da göstərilib.



Şəkil 5. $x_i = \frac{\rho_i}{b}$, $i = \overline{1, 4}$
radiuslarının $\gamma = a/b$
nisbətindən asılılıqları



Şəkil 6. Kompozit (2) və adi (1)
lövhələr üçün yüklənmə həddinin
 $\gamma = a/b$ nisbətindən asılılılığı

Şəkil 5-də $x_i = \rho_i / b$, $i = \overline{1, 4}$ ölçsüz radiusların $\gamma = a/b$ nisbətindən asılılığının qrafiki verilib. Şəkil 6-da isə yüklənmə həddinin $\gamma = a/b$ nisbətindən asılılığı kompozit lövhə üçün (əyri 2) və analogi həndəsi ölçülərə malik və uyğun sərhəd şərtləri daxilində kompozit olmayan – ideal-plastik lövhə üçün (əyri 1) göstərilmişdir.

Assosiasiya olunmuş axma qanunundan və əyinti sürətlərinin ifadələrindən istifadə etməklə əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir.

Plastik axma rejimlərinin $E_1E - EF - FA - AB - BC$ ardıcılığına uyğun olaraq lövhə beş halqavari zonaya bölünür və bu zonaların hər birində müxtəlif plastik vəziyyət (hal) mövcud olur. Əyici momentlərin statik sahələri təyin edilmiş, lövhəni zonalara ayıran naməlum radiuslar üçün tənliklər, həmçinin dayaq reaksiyasının və yüklənmə həddinin təyini

üçün tənliklər alınmışdır.

İkinci fəslin üçüncü paraqrafında daxili sərhədi sərbəst dayanmış, xarici sərhədi isə bağlanmış, $p(r) = p\delta(r - c)$ ($a < c < b$) şəklində topa yükün təsirinə məruz qalmış halqavarı üçlaylı kompozit lövhənin yükləyici qabiliyyəti tədqiq edilmişdir, burada $\delta(x)$ – Dirakin delta-funksiyasıdır. (4) diferensial tənliyi birinci paraqrafda göstərilən şərtlər daxilində həll edilir, lakin xarici yüklənmə topa yüklə əvəz olunur. Yüklənmə həddinin təyini üçün aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$\frac{pc}{m_{20}^+} = 1 - \frac{\alpha m_{10}^+ + \beta_1}{m_{20}^+}$$

$\alpha m_{10}^+ + \beta_1$ ifadəsi mənfi olduğundan armirləyən liflərin və qoruyucu təbəqələrin hesabına lövhənin həddi yükü artır.

Əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri də təyin edilmişdir.

İkinci fəslin dördüncü paraqrafında hər iki sərhədi sərbəst dayanmış və topa yükün təsirinə məruz qalmış halqavarı üçlaylı armirlənmiş kompozit lövhənin yüklənmə həddi təyin edilir. Plastik axma rejimlərinin $E_1E - EF - FA - AB_1$ (şək. 4) ardıcılığına uyğun olaraq lövhə hər birində müxtəlif plastik vəziyyət yaranan dörd halqavarı zonalara bölünür.

(4) tənliyi hər iki sərbəst dayanmış sərhədlərdə $m_1 = 0$, $w = 0$ şərtləri və plastik rejimlərin ayrıldığı sərhədlərdə kəsilməzlik şərtləri daxilində həll olunur. Baş əyici momentlərin statik mümkün sahələri təyin edilmiş, plastik zonaları ayıran naməlum radiuslar üçün tənliklər, həmçinin dayaq reaksiyasının və yüklənmə həddinin təyini üçün tənliklər alınmışdır. Əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri tapılmışdır.

İkinci fəslin beşinci paraqrafında kompozit lövhənin oxasimmetrik yükün təsiri altında həddi yükünün təyini məsələsi birinci paraqrafda verilmiş sərhəd şərtləri daxilində həll edilmişdir.

Göstərilmişdir ki, lövhə hər birində müxtəlif plastik vəziyyət gerçəkləşən dörd halqavarı zonaya bölünür. Momentlərin statik sahələri təyin edilmiş, plastiklik zonaları ayıran naməlum radiuslar üçün tənliklər, həmçinin dayaq reaksiyasının və həddi yükün təyini üçün tənliklər alınmışdır.

Üçüncü fəslin birinci paraqrafında daxili sərhədi bağlanmış, xarici

sərhədi isə sərbəst dayanmış halqavarı üçqaylı lifli kompozit lövhənin yüklətmə qabiliyyətinin təyini məsələsi tədqiq olunmuşdur.

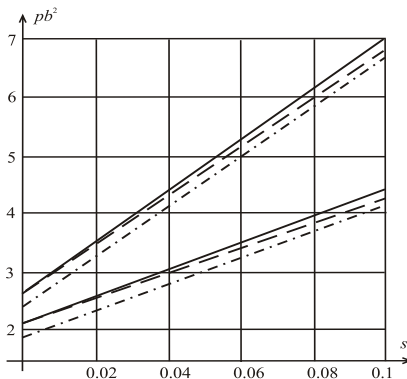
Fərz olunur ki, lövhə yuxarı səthi üzrə verilmiş ixtiyari p yükünün təsiri altındadır. Yüklənmə həddi əmsalının lövhəni təşkil edən materialların xassələrindən asılığının xarakteri müəyyən edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, deformasiya olunan lövhə dibi hamar olan, biri lövhənin daxili sərhəddindən, digəri xarici sərhəddindən çıxan və düz doğuralara malik iki konik səthdən ibarət fırlanma səthi şəklindədir, həmçinin burada doğuranı əyrilən üçüncü konik səth də vardır ki, bu səth daxili sərhəddən çıxan düz konusu hamar diple birləşdirir.

Üçüncü fəslin ikinci paraqrafında hər iki kənarı bağlanmış halqavarı üçqaylı lifli kompozit lövhənin yüklətmə qabiliyyəti tədqiq olunur. Fərz olunur ki, lövhə yuxarı səthində ixtiyari P yükünün təsirinə məruz qalır.

Məsələnin həlli axma rejimlərinin $DE - EF - FA - AB - BC$ ardıcılığı üzrə axtarılır.

(4) tənliyi hər iki sərhəddə $w = 0$, $dw/dr = 0$ və ya $m_1 = -m_{10}$ şərtləri və plastiklik rejimlərini ayıran sərhədlərdə kəsilməzlik şərtləri daxilində həll edilir. Əyici momentlərin statik mümkün sahələri və əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir. Müntəzəm paylanmış yük üçün yüklənmə həddi əmsalının lövhəni təşkil edən materialın xassələrindən asılığının xarakteri müəyyən edilmişdir.



Şəkil 7. k , μ və γ -nın konkret qiymətlərində pb^2 -nin $(s_0 + q_0/2)$ -dan asılılığı

k, μ və γ -nın konkret qiymətlərində pb^2 yüklənmə həddinin $s_0 + q_0/2$ kəmiyyətindən asılığının qrafikləri şəkil 7-də göstərilmişdir. Burada yuxarıdakı üç xətt $\gamma = 0,5$, aşağıdakı üç xətt isə $\gamma = 0,25$ halına aiddir.

Dördüncü fəslin birinci paraqrafında üzləri nazik laylarla örtülmüş, mütləq bərk mərkəzi dairəvi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş və xarici sərhədi sərbəst dayanmış liflərlə armirlənmiş dairəvi lövhənin yükötürmə qabiliyyəti tədqiq olunmuşdur.

Lövhə sıxılmayan əsas üzərində, mütləq bərk dairəvi lövhə və həlqəvi deformasiya olunan hissə üzrə müntəzəm paylanmış müxtəlif intensivli yüklərin təsiri altında yerləşir. Mühit tərəfindən mənfəi istiqamətdə (aşağıdan yuxarı) lövhənin bütün səthi üzrə müntəzəm paylanmış U itələyici qüvvə təsir edir, həmçinin mühitin sıxılmazlıq şərti ödənilir,

$$\int_0^b w(r)rdr = 0,$$

burada w – lövhənin müsbət istiqamətdə əyinti sürətidir. Lövhə xarici sərhədi üzrə bərkidildiyindən, lövhənin kontur ətrafı hissəsi mənfəi istiqamətdə hərəkət edir.

$$(rm_1)' - m_2 = -2(p-q)a^2 + 2(u-q)r^2; \quad \left(u = \frac{U}{\sigma_0}\right) \quad a < r < b$$

Lövhənin diferensial müvazinət tənliyi kəsilməzlik şərti və aşağıdakı sərhəd şərtləri nəzərə alınmaqla inteqrallanır, burada ştrix – r üzrə törəməni göstərir, $0 \leq r \leq a$ oblastı isə deformasiya olunmur: mütləq bərk dairəvi lövhə ilə bağlanmış $r = a$ sərhədi üzrə $w = 0$, $dw/dr = 0$ və ya $m_1 = m_{01}^+$ və sərbəst dayanmış $r = b$ sərhədi üzrə $m_1 = 0$. $m_{02}^+ \leq m_{01}^+$ halına baxılır. Bu halda mərkəzi sərt oblastdan xarici sərhədə qədər ardıcıl olaraq $AB - BC - CD - DE_1$ rejimləri baş verəcək (şək. 4). Bu halda uyğun kəsilməzlik şərtlərini və sərhəd şərtlərini ödəyən statik sahələrin təyini mümkün olur. Bu zaman lövhənin deformasiya olunmayan hissəsi ilə xarici sərhədi arasındakı $a \leq r \leq b$ oblastı, məsələnin həllinin gedişatında təyin olunan ρ_1, ρ_2, ρ_3 radiusları ilə dörd halqavarı oblastlara bölünür.

Əgər ortoqonal armirləyici liflər eynitipli olub matrisin daxilində bir

layda yerləşirsə, yəni $s_{01} = s_{02} = s_0$, $\mu_1 = \mu_2$, $d'_i = d''_i$ olarsa, onda $m_{01}^- = m_{02}^-$ alarıq. Bu zaman həddi yükün və mühitin müqavimətinin təyini üçün alınmış həllər daha sadə şəkildə yazıla bilər:

$$\frac{(p-q)b^2}{m_0} = \frac{x_3(2-x_3)}{2k^2(1-x_3)^2} \left(1 + \frac{c_{11}}{c_0} s_0 + \frac{c_3}{c_0} q_0 - \frac{c_{21}}{c_0} s_0^2 - \frac{c_4}{c_0} q_0^2 - \frac{c_5}{c_0} s_0 q_0 \right)$$

$$\frac{(u-q)b^2}{m_0} = \frac{3}{2(1-x_3)^2(1+2x_3)} \left(1 + \frac{c_{11}}{c_0} s_0 + \frac{c_3}{c_0} q_0 - \frac{c_{21}}{c_0} s_0^2 - \frac{c_4}{c_0} q_0^2 - \frac{c_5}{c_0} s_0 q_0 \right)$$

burada C_{ij} əmsalları birinci fəslin (2) düsturlarından təyin edilir.

Bu düsturlardan armirləyən liflərin və qoruyucu təbəqələrin hesabına həddi yüklərin artması yaxşı görünür. Göründüyü kimi həddi yük maksimal qiymətini $d'_1 = 1/2$ halında, yəni liflər matrisin kənar səthlərində, matrislə qoruyucu təbəqələr arasında armirləndə alır.

Əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri də təyin edilmişdir ki, onlara əsasən deformasiya olunan lövhə fırlanma cismi olub dairəvi müstəvi dibi dairəvi müstəvi təpəsi ilə ardıcıl olaraq iki düz və əyri doğuranlı konik səthlərlə birləşirlər. Burada doğuranların və toxunanların bucaq əmsalları mənfidir.

Halqavari təpənin xarici sərhədi də lövhənin daxili sərhədi ilə düz konik səthlə birləşir, lakin burada doğuranların bucaq əmsalı müsbət işarəli olur.

Dördüncü fəslin ikinci paraqrafında bu fəslin əvvəlki paraqrafına analogi olaraq mərkəzindən möhkəmləndirilmiş və sərhədi sərbəst dayanmış üçlaylı liflərlə armirlənmiş dairəvi lövhənin $m_{02}^+ \geq m_{01}^+$ şərtində yükötürmə qabiliyyəti tədqiq edilmişdir. Alınmış düsturların zahirən birinci paraqrafda alınan düsturlara oxşarlığına baxmayaraq $m_{02}^+ \geq m_{01}^+$ şərti həddi yükün ədədi qiymətinə əhəmiyyətli təsir göstərir.

Dördüncü fəslin üçüncü paraqrafında eyni üsulla sərt dairəvi mərkəzi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş və sərhədi sərbəst dayanmış halqavari lövhənin yükötürmə qabiliyyəti tədqiq edilir. Lövhə sıxılmayan əsas üzərində mərkəzi dairəvi lövhə üzrə müntəzəm paylanmış yükün təsiri altında yerləşir. (4) tənliyi $m_1 = m_{01}^+$, sərbəst dayanmış $r = b$ sərhədi boyunda $m_1 = 0$ şərtləri və kəsilməzlik şərtləri daxilində həll edilir. Həddi yükün və mühitin müqavimətinin təyini üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$\frac{pb^2}{m_{01}^-} = -\frac{m_{02}^-}{2\varepsilon^2 m_{01}^-} + \frac{1+2x_3^3}{2\varepsilon^2(1-x_3)^2(1+2x_3)}, \quad \frac{ub^2}{m_{01}^-} = \frac{3}{2(1-x_3)^2(1+2x_3)},$$

$$x_2^2 = \frac{1+2x_3^3}{3} - \frac{m_{02}^-}{3m_{01}^-}(1-x_3)^2(1+2x_3),$$

burada $\varepsilon = a/b$, $x_i = \rho_i/b$, $i = 2, 3$.

Həddi yük əmsalının və mühitin müqavimətinin lövhəni təşkil edən materialların mexaniki və həndəsi xarakteristikalarından asılılıqları müəyyən edilmişdir.

Bəşinci fəslin birinci paraqrafında sərt dairəvi mərkəzi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş və xarici konturu üzrə bağlanmış halqavari kompozit lövhənin yükötürmə qabiliyyəti araşdırılmışdır. Lövhə sıxılmayan əsas üzərindədir və dairəvi mərkəzi lövhə üzrə müntəzəm paylanmış yükün təsiri altında yerləşir.

Burada mərkəzi sərt oblastdan xarici sərhədə qədər $AB-BC-CD-DE-EF$ rejimlər zənciri ödənilir (şək. 4). Lövhənin plastik təbiəti baş əyici momentlərin həddi qiymətlərinin münasibətindən asılıdır, burada $m_{01}^+ \geq m_{02}^+$ halına baxılır. Bu zaman lövhənin deformasiya olunmayan mərkəzi hissəsi və sərhədi arasındakı $a \leq r \leq b$ oblastı beş halqavari oblastlara bölünür ki, onların da ρ_i ($i = 1, 4$) radiusları məsələ həllinin gedişatında təyin edilir.

Həddi yükün və mühitin müqavimətinin təyini üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$\frac{pb^2}{m_{01}^-} = \frac{x_3^2 \left(1 - \alpha + \frac{\beta_2}{m_{01}^-} \right) - x_2^2 \left(1 - \frac{m_{02}^-}{m_{01}^-} \right)}{2\varepsilon^2(x_3^2 - x_2^2)}, \quad \frac{ub^2}{m_{01}^-} = \frac{\frac{m_{02}^- + \beta_2}{m_{01}^-} - \alpha}{2(x_3^2 - x_2^2)}.$$

Əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri də təyin edilmişdir.

Bəşinci fəslin ikinci paraqrafında daxili sərhədi bağlanmış, sərt deformasiya olunmayan mərkəzi dairəvi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş və sıxılmayan mühit üzərində yerləşən halqavari kompozit lövhənin yükötürmə qabiliyyəti tədqiq edilmişdir.

Müvazinətin differensial tənliyi axma altıbucaqlının $AB-BC-CD-DE-EF$ tərəfləri üzərində mühitin sıxılmazlıq şərti ilə birgə həll edilmişdir (şək. 4). Həddi yükün və mühitin müqavimətinin

təyini üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$\frac{(p-q)b^2}{m_{01}^-} = \frac{1}{2\bar{k}^2(x_3^2 - x_2^2)} \left[\left(1 - \alpha + \frac{\beta_2}{m_{01}^-} \right) x_3^2 + \left(\frac{m_{02}^-}{m_{01}^-} - 1 \right) x_2^2 \right],$$

$$\frac{(u-q)b^2}{m_{01}^-} = \frac{1}{2(x_3^2 - x_2^2)} \left(\frac{m_{02}^- + \beta_2}{m_{01}^-} - \alpha \right),$$

$$x_2^2 = \frac{1 + 2x_3^3}{3} - \frac{m_{02}^-}{3m_{01}^-} (1 - x_3)^2 (1 + 2x_3).$$

Əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri də təyin edilmişdir.

Beşinci fəslin üçüncü paragrafında əvvəlki paraqraflara analoji tədqiqatlar sərhədi bağlanmış və möhkəmləndirilmiş üçqaylı dairəvi kompozit lövhələrin baş əyici momentlərin qiymətləri $m_{01}^+ \leq m_{02}^+$ şərtini ödədikdə yükötürmə qabiliyyətinin təyini məsələsinin həlli üçün aparılmışdır.

Lövhə sıxılmayan əsas üzərindədir və dairəvi mərkəzi lövhə üzrə müntəzəm paylanmış yükün təsiri altında yerləşir. Həddi yükün və mühitin müqavimətinin təyini üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$\frac{pb^2}{m_{01}^-} = \frac{x_3^2 \left(1 - \alpha + \frac{\beta_2}{m_{01}^-} \right) - x_2^2 \left(1 - \frac{m_{02}^-}{m_{01}^-} \right)}{2\varepsilon^2(x_3^2 - x_2^2)}, \quad \frac{ub^2}{m_{01}^-} = \frac{m_{02}^- + \beta_2 - \alpha}{2(x_3^2 - x_2^2)}.$$

Beşinci fəslin dördüncü paragrafında xarici konturu bağlanmış, sıxılmayan mühit üzərində yerləşən, möhkəmləndirilmiş, üçqaylı lifli halqavari lövhənin yükötürmə qabiliyyəti tədqiq edilmişdir. Lövhə mərkəzi dairəvi lövhə üzrə müntəzəm paylanmış yükün təsiri altında yerləşir.

Xarici sərhədi üzrə bağlı olduğundan lövhənin sərhəd ətrafı hissəsi mənfi istiqamətdə hərəkət edir. Lövhənin differensial müvazinət tənliyi mühitin sıxılmazlıq şərti ilə birgə $AB - BC - CD - DE - EF$ rejimlər ardıcılığı ödənilməklə həll edilir (şək. 4). Lövhədə baş verən plastik dəyişkənliklər baş əyici momentlərin limit qiymətlərinin münasibətindən asılıdır, burada $m_{01}^+ \geq m_{02}^+$ hesab olunur. Bu zaman deformasiya olunmayan mərkəzi dairəvi lövhənin $r=a$ sərhədinə altıbucaqlının AB tərəfi üzərində A və ya A_1 nöqtəsi uyğun gəlir. Lövhənin deformasiya olunmayan mərkəzi

hissə ilə daxili sərhəd arasındakı $a \leq r \leq b$ oblastının bölündüyü halqavari oblastların ρ_i ($i=1,2,3,4$) radiusları məsələnin həlli zamanı təyin olunur.

Xarici qüvvələrin həddi qiymətlərinin təyini üçün

$$\frac{pb^2}{m_{01}^-} + \frac{1}{2\varepsilon^2 m_{01}^-} \left(T^{\alpha\rho_2} - \frac{x_2^2}{x_3^2 - x_2^2} T^{\rho_2\rho_3} \right) = \frac{x_3^2 \left(1 - \alpha + \frac{\beta_2}{m_{01}^-} \right) - x_2^2 \left(1 - \frac{m_{02}^-}{m_{01}^-} \right)}{2\bar{k}^2 (x_3^2 - x_2^2)},$$

$$\frac{ub^2}{m_{01}^-} - \frac{1}{2m_{01}^- (x_3^2 - x_2^2)} T^{\rho_2\rho_3} = \frac{\frac{m_{02}^- + \beta_2}{m_{01}^-} - \alpha}{2(x_3^2 - x_2^2)}$$

tənlikləri alınmışdır, burada $\bar{k}=a/b$, $x_i=\rho_i/b$, $i=2,3$. Bu tənliklərin sol tərəfləri lövhəyə təsir göstərən qüvvələr vasitəsilə, sağ tərəfləri isə kompozit materialın xassələri və lövhənin həndəsi parametrləri vasitəsilə ifadə olunur. Qüvvələrin həddi qiymətləri bu tənliklərdən təyin olunur. Xarici təsirlərin p ölçüsüz həddi yükünün, $X(r)$ qüvvəsinin, u kəmiyyətinin qiymətləri analiz edilmişdir. Əgər $X(r)$ qüvvəsi halqavari lövhənin bütün $a \leq r \leq b$ səthi üzrə müntəzəm paylanarsa, aşağıdakı ifadələr əldə edilir:

$$\frac{(p-X)a^2}{m_{01}^-} = \frac{x_3^2 \left(1 - \alpha + \frac{\beta_2}{m_{01}^-} \right) - x_2^2 \left(1 - \frac{m_{02}^-}{m_{01}^-} \right)}{2(x_3^2 - x_2^2)}, \quad \frac{(u-q)b^2}{m_{01}^-} = \frac{\frac{m_{02}^- + \beta_2}{m_{01}^-} - \alpha}{2(x_3^2 - x_2^2)}.$$

Bu düsturlardan alınır ki, deformasiya olunan həlqəvi hissədə verilmiş müsbət $X(r)$ xarici təsir qüvvəsi həm sərt mərkəzi dairəvi lövhə üzrə lövhənin yüklənmə qüvvələrinin, həm də lövhə altında sıxılmayan mühitin reaksiya qüvvəsinin limit qiymətlərinin eyni qədər artmasına gətirib çıxarır.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Üçlaylı lifli örtük və lövhələrin ideal plastik axma şərtlərinin qurulması üçün orijinal metod işlənmişdir. Fərz edilir ki, matrisin, liflərin və örtük təbəqələrinin materialları möhkəmlənməyən ideal plastikdir, dartılma və sıxılmada xassələri fərqlidir. Kompozit elementinin müvazinət tənlikləri yazılır və alınmış tənliklər sistemindən bəzi parametrlər çıxarılarq , plastik axma şərtləri tapılarq axma altıbucaqlısı qurulur. Ölçüsüz baş əyici momentlərin axma həddləri kompoziti təşkil edən materialların dartılma və sıxılmada nisbi həddi qüvvələrinin ikidərəcəli çoxhədliləri şəklində tapılmışdır. Çox hədlilərin əmsalları isə həddi yüklərin nisbətini göstərən parametrlərdən və həndəsi kəmiyyətlərdən asılı şəkildə əldə edilmişdir.
2. Həddi yükün tapılması məsələsinin yeni riyazi modeli yazılmışdır. Riyazi model lövhənin əyintisinin iki məchullu bir diferensial tənliyi, bu məchullar arasında ikinci tənlik olan axma altıbucaqlısının uyğun tərəfinin tənliyi, lövhənin sərhəd şərtləri və altıbucaqlının təpə nöqtələrində mövcud olan kəsilməzlik şərtlərindən ibarətdir. Modelin əsasında konturu sərbəst dayanmış və bağlanmış dairəvi kompozit lövhələrin həddi yükləri tapılmış və kinematik mümkün əyinti sürətləri sahəsi təyin edilmişdir. Halqavari lövhələrdə altıbucaqlının tərəflərinin elə arıdıçılığı seçilir ki, onun uclarında lövhənin konturlarında verilən şərtlər ödənsin. Tərəflərin birləşdiyi təpə nöqtələrində kəsilməzlik şərtləri ödənilir. Sərbəst dayaqlanmış daxili kontur halında radial əyici moment sərhəd şərtinə görə sıfır olduğu üçün lövhədə plastik axma halqavari momentlərin bu kontur üzərində axma həddinə çatdıqları halda başlayır. Bağlanmış daxili konturla birləşən nazik həlqədən kənarında radial moment müsbət qiymətlər, halqa daxilində isə mənfi qiymətlər alır. Altıbucaqlının tərəflərinin arıdıçılığı bu şərtlərə əsasən seçilir.
3. Eyni üsulla konturları üzrə sərbəst dayanmış və ya bağlanmış halqavari kompozit lövhənin həddi yükünün təyini məsələləri həll edilmişdir. Sərt dairəvi mərkəzi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş, sıxılmayan mühit üzərində yerləşən və konturları üzrə sərbəst dayanmış və ya bağlanmış kompozit lövhələrin həddi yükünün təyini məsələləri həllin tapmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, lövhə üzərində altıbucaqlının şaquli tərəflərinə uyğun halqavari oblastlar deformasiyaya uğramır və mütləq bərk qalır. Bu oblastların konturları şarnir çevrələri olur. Bu çevrələr üzərindəki

şərtlərdən həddi yükü və kəsici qüvvəni tapmaq üçün analitik tənliklər alınmışdır. Həmin tənliklər bilavasitə praktikada tətbiq oluna biləcək şəkildə incəlməmişdir.

4. Daxili sərhədi sərbəst dayanmış və xarici sərhədi bağlanmış halqavari lövhənin yüklənmə qabiliyyəti təyin edilmişdir. Lövhə üst səthində toplanmış halqavari p yükünün təsiri altındadır. Əyici momentlərin statik mümkün sahələri təyin edilmiş, həddi yükün, dayaq reaksiyasının və müxtəlif plastiklik rejimlərinə uyğun oblastların radiuslarını təyin etmək üçün tənliklər alınmışdır.
5. Daxili sərhəddə bağlanmış, xarici sərhədində sərbəst dayanmış və üst səthdə ixtiyari p yükünün təsiri altında olan kompozit lövhənin yüklənmə qabiliyyəti təyin edilmişdir. Əyici momentlərin statik mümkün sahələri və əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir. Müxtəlif plastiklik zonalarını ayıran məchul radiuslar, habelə müntəzəm paylanmış yüklənmə halında dayaq reaksiyası və həddi yükün tapılması üçün tənliklər alınmışdır. Həddi yük əmsalının lövhəni təşkil edən materialın xassələrindən asılılığının xarakteri müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, lövhənin səthi hər birində müxtəlif plastik vəziyyətlər gerçəklənən dörd konsentrik halqavari oblastlara bölünür.
6. Hər iki sərhədi üzrə bağlanmış və ixtiyari p yükünün təsiri altında olan halqavari kompozit lövhənin yüklənmə qabiliyyəti təyin edilmişdir. Əyici momentlərin statik mümkün sahələri və əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir. Müntəzəm paylanmış yüklənmə üçün həddi yük əmsalının lövhəni təşkil edən materialın xassələrindən asılılığının xarakteri müəyyən edilmişdir.
7. Mərkəzi halqavari deformasiya olunmayan dairəvi lövhə ilə möhkəmləndirilmiş üçqatlı dairəvi lövhənin yüklənmə qabiliyyəti təyin edilmişdir. Lövhə sərhədi üzrə bağlanmış, ya da sərbəst dayanmışdır və sıxılmayan mühit üzərindədir və mərkəzi dairəvi lövhənin üst səthi üzrə paylanmış ixtiyari p yükünün təsiri altındadır. Əyici momentlərin statik mümkün sahələri və əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir. Həddi yük əmsalının lövhəni təşkil edən materialın xassələrindən asılılığının xarakteri müəyyən edilmişdir.
8. Araşdırılan məsələdə həddi yükün və mühitin müqavimətinin təyini üçün yeni analitik düsturlar alınmışdır.

Bu düsturlar armaturlaşdırılan liflərin (s_0) və qoruyucu təbəqələrin

(q_0) hesabına həddi yüklərin artmasını əyani təsdiqləyir. Bu yüklər dartılma zamanı həddi qüvvələrin liflər və qoruyucu təbəqələr üçün uyğun olaraq s_0 və q_0 ölçüsüz qiymətlərinə düz mütənəsibdir. s_0 və q_0 kəmiyyətlərinin kvadratları, həmçinin bu kəmiyyətlərin hasilləri həddi yükün qiymətlərini azaldır. Əgər liflər və qoyurucu təbəqələr dartılmaya və sıxılmaya eyni müqavimət göstərərsə, onda ikinci qüvvətli toplananlar sıfıra bərabər olur, yükün həddi qiymətləri isə artır. Həddi yüklərin maksimal qiyməti $d'_1 = 1/2$ olduqda, yəni liflər matrisin səth təbəqəsində, matris və qoruyucu təbəqələr arasında armaturlaşdırılarda alınır.

9. Müəyyən olunmuşdur ki, həddi yük dartılma və sıxılmada yaranan momentlərin həddi qiymətlərinin nisbətindən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır və armaturlaşdırmanın ən sadə halında liflərin və qoruyucu təbəqələrin s_0 və q_0 parametrlərindən asılı olaraq demək olar ki, xətti artır; bu artım s_0 və q_0 qiymətlərində armaturlaşdıran liflərin düzülmə müstəviləri arasındakı məsafəyə nəzərən də xəttidir.
10. Assosiasiya olunmuş axma qanunundan istifadə etməklə araşdırılan bütün məsələlərdə əyinti sürətlərinin kinematik mümkün sahələri təyin edilmişdir. Axma altıbucaqlısının götürülən tərəflərinin sayından asılı olaraq lövhənin səthi həmin sayda halqavari plastiklik rejimlərə bölünür. Bu zonaların radiuslarının təyini üçün cəbri tənliklər sistemi çıxarılmışdır. Göstərilmişdir ki, mərkəzi deformasiya olunmayan şaybanın və sıxılmayan özülün mövcudluğu lövhənin əyinti sürətlərinin həndəsi vəziyyətinə əhəmiyyətli təsir göstərir.

Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı elmi işlərdə öz əksini tapmışdır:

1. Джагангиров А.А. Несущая способность армированной волокнами круглой трехслойной композитной пластинки защемленной по контуру //Технический журнал “Экоэнергетика”, №4, Баку, 2012, с.74-80.
2. Джагангиров А.А. Гиперповерхности текучести оболочки с покрытыми поверхностями //Машиноведение, № 2, 2013, с. 59-62.
3. Джагангиров А.А., Ильясов М.Х. Гиперповерхности текучести трехслойной композитной оболочки, средний слой которой армирован волокнами //Доклады НАН Азербайджана, том LXIX, №1, 2013, с. 28–36.
4. Джагангиров А.А. Несущая способность армированной волокнами свободно опертой круглой трехслойной композитной пластинки //Научные Труды–Фундаментальные Науки, том XII (45), №1, Баку, 2013, с. 50- 54.
5. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка для трехслойной композитной кольцевой пластинки свободно опертой по внутренней и защемленной по внешней контурам //«Теоретическая и прикладная механика», №2, Баку, 2013, с.78-87.
6. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка кольцевой трехслойной композитной пластинки свободно опертой по внутренней и защемленной по внешней кромкам. Сосредоточенная кольцевая нагрузка / I Международная научная конференция «Проблемы металлургии и металловедения», посвященная к 90 летнему юбилею Общенационального лидера Гейдара Алиева, Баку, 29-30 апрель 2013г. Баку, 2013, с. 165-168.
7. Джагангиров А.А., Ильясов М.Х.Критерии текучести трехслойной композитной оболочки, средний слой которой армирован волокнами //“Научные труды” Национальной Академии Авиации, посвященной 80-летию акад. М.Дж.Пашаева, том 15, №4, Баку, 2013, с. 34-43.
8. Джагангиров А.А., Ильясов М.Х. Несущая способность кольцевой трехслойной армированной волокнами композитной пластинки /Международная научная конференция «Ньютоновские системы в нефтегазовой области», посвященная 85 летнему юбилею академика А.Х.Мирзаджанзаде, Баку, 21–22 ноябрь, 2013, с. 121.
9. Piyasov M.H., Jahangirov A.A. Yield Hypersurfaces of a Three-Layer

Composite Shell With a Fiber-Reinforced Middle Layer //“Mechanics of Composite Materials”, July 2014, Vol. 50, Issue 3, pp. 343-352 (Traslated from *Mechanika Kompozitnykh Materialov*, Vol. 50, No3, pp. 487-500, May-June, 2014) <http://www.spirngerlink.com>.

10. Джагангиров А.А. Определение скоростей прогибов в задаче несущей способности усиленной трехслойной армированной волокнами круглой пластинки, защемленной по контуру //Научные труды Азербайджанской Архитектурно-Строительного Университета, №2, 2014, s. 58-64.
11. Джагангиров А.А., Ильясов М.Х. Предельная нагрузка усиленной трехслойной армированной круглой пластинки свободно опертой по контуру /Республиканская научная конференция «Классические и современные проблемы механики» посвященная к 100-летию юбилею профессора Ю.А.Амензаде, Баку, 22 мая 2014 г., с. 113–118.
12. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка усиленной трехслойной армированной круглой пластинки защемленной по контуру /«Актуальные проблемы математики и механики». Международная научная конференция посвященная 55-летию Института Математики и Механики, Баку, 16 мая 2014г. Баку, 2014, с. 151-153.
13. Джагангиров А.А. Несущая способность кольцевой трехслойной волокнистой композитной пластинки, свободно опертой по внутренней и защемленной по внешней кромкам //«Механика композитных материалов и конструкций», том 21, №1, 2015, с. 35-46. <http://elibrary.ru>
14. Джагангиров А.А. Несущая способность трехслойной волокнистой композитной кольцевой пластинки, защемленной по внутренней и свободно опертой по внешней кромкам //«Вестник Азербайджанской Инженерной Академии», том 7, №1, Баку, 2015, с. 61-70.
15. Джагангиров А.А. Поле скоростей прогиба усиленной трехслойной волокнистой пластинки, защемленной по контуру и находящейся на несжимаемой среде //«Теоретическая и Прикладная Механика», №2, Баку, 2015, с. 118-123.
16. Джагангиров А.А. Поле скоростей прогибов трехслойной армированной композитной кольцевой пластинки, свободно опертой по контурам и подверженной действию

- сосредоточенного изгибающего нагружения //“Austrian Journal of Technical and Natural Sciences” (Scientific journal), №5-6, 2015 (May-June), Austria, Vienna, 2015, p. 92-94.
17. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка кольцевой трехслойной армированной композитной пластинки, свободно опертой по контурам //«Ученые записки» АЗТУ, том 1, №3, Баку, АЗТУ, 2015, с. 17-23.
 18. Cahangirov A.Ə. Liflərlə möhkəmləndirilmiş üçqatlı kompozit örtüyün axma hipersəthləri /Silahlı Qüvvələrin Hərbi Akademiyasının I Respublika elmi-praktik konfransı, Bakı, 2015, s. 47.
 19. Jahangirov A.A. Carrying capacity of reinforced circular tree layer fibered composite plate clamped on external contours and lying on non-compressible foundation /International Conference “Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials” and 4th Rostocker International Symposium “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 17-18 September, 2015, Bakı, p. 82.
 20. Dzhagangirov A.A. Ultimate Load of Three-Layered Annular Fibrous Composite Plate Fastened on Internal and Simply Supported External Contours //“Strength of Materials”, May 2015, Volume 47, Issue 3, pp. 481-487. (Translated from Problemy Prochnosti, No3, pp. 132-139, May-June, 2015). <http://www.springerlink.com>
 21. Джагангиров А.А. Несущая способность усиленной трехслойной волокнистой круглой пластинки, заземленной по контуру //Journal of Qafqaz University, Mechanical and Industrial Engineering. 2015, vol. 3, №1, с.18-25.
 22. Джагангиров А.А. Поле скоростей деформации центрально усиленной трехслойной волокнистой круглой пластинки, свободно опертой по контуру //”Научные Труды АЗТУ”, том 1, №4, 2015, с. 68-73.
 23. Джагангиров А.А. Несущая способность усиленной трехслойной армированной волокнами круглой пластинки, свободно опертой по контуру //Ученые записки Азербайджанской Государственной Морской Академии, №1, 2016, с.
 24. Джагангиров А.А. Несущая способность усиленной трехслойной волокнистой круглой пластинки, заземленной по контуру и находящейся на несжимаемой среде //“Механика Машин, Механизмов и Материалов”, №4(33), Минск, 2015, с.50-54.
 25. Cahangirov A.Ə., Tağızadə Ə.H. Çox laylı və lifli kompozit lövhənin

- həddi yükünün hesablanması metodu //Nəzəri və Tətbiqi Mexanika, Bakı, №1, 2016 , səh 42-46.
26. Jahangirov A.A. Load-Carrying Capacity of a Fiber-Reinforced Annular Tree-Layer Composite Plate Clamped on its External and Internal Contours //Mechanics of Composite Materials/ May 2016, Volume 52, Issue 2, pp 271–280. <http://www.spirngerlink.com>
 27. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка кольцевой трехслойной армированной композитной пластинки, свободно опертой по контурам. Сосредоточенное нагружение. Вестник машиностроен, 11, 2016, стр.14-17.
 28. Cahangirov A.Ə. Halqavari lövhənin yükçötürmə qabiliyyəti haqqında. Proc/ of the Intern/ Sympos/ of Mech. and Machine Sc. 2017. AzCIFTtoMM-Azerbaijan Technical University 11-14 September 2017, Baku, Azerbaijan, pp. 261-266.
 29. Jahangirov A.A. Ultimate load of three- layered annular plate reinforced with systems of fibres. International Journ. On Tech. and Phys. Probl. Of Engin. Pp.7-10. December 2017.
 30. Jahangirov A.A. Предельная нагрузка защемленной по контурам кольцевой трехслойной пластинки, срений слой которой армирован четырьмя слоями волокон. I.International Turkish World Engineering and Science Congress/7-10 december 2017 Antalya, Turkey.Pp.318-325.
 31. Джагангиров А.А. Предельная нагрузка кольцевой трехслойной пластинки, внутренний слой которой армирован четырьмя слоями волокон. Механика Машин Механизмов и Материалов. 2017, №4 (41), стр. 96 – 100.

РЕЗЮМЕ

АКИФ АЛИ ОГЛЫ ДЖАГАНГИРОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК И ПЛАСТИН, ПОКРЫТЫХ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СЛОЯМИ

Целью диссертационной работы является решение вопросов определения предельной нагрузки и кинематически допустимых полей скоростей прогибов для трехслойных армированных четырьмя слоями волокон, расположенных на различных расстояниях от срединной поверхности среднего слоя, композитных оболочек и пластин при всевозможных граничных условиях на контурах и находящихся под воздействием осесимметричных сосредоточенных нагрузок и нагрузок, распределенных произвольным образом на верхней поверхности конструкции.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые здесь построен шестиугольник текучести для рассматриваемых композитных оболочек и пластин. На этой основе поставлена математическая модель исследуемых задач, которая состоит из интегрирования дифференциального уравнения изгиба пластинок совместно с уравнениями сторон шестиугольника текучести удовлетворяющих соответствующие граничные условия и условия непрерывности между кольцевыми областями пластического течения, соответствующими сторонам многоугольника текучести. Рассмотрены всевозможные условия на контурах пластинки, в некоторых задачах пластинка усиливается абсолютно жесткой центральной круговой частью, и вся пластинка находится на несжимаемой среде. Точными аналитическими решениями получены конечные уравнения для определения радиусов различных зон пластического течения и для перерезывающих сил на внутренней границе кольцевых пластин, найдены и исследованы формулы для предельных нагрузок. Во всех задачах, с точностью до постоянного неопределенного множителя, вычислены кинематически допустимые поля скоростей прогибов.

Практическая ценность работы заключается в том, что предлагаемый метод решения может оказаться полезным при проектировании изделий из подобного рода материалов, эксплуатируемых в более сложных ситуациях пространственного пластического течения. Полученные результаты, могут найти

применения в авиакосмической технике, в машиностроении, в строительстве, в морской нефтяной промышленности, в стационарных нефтяных платформах и вертолетных площадках, в трубопроводной транспортировке, при строительстве временных и стационарных дорог, мостов и взлетно-посадочных полос в болотистых и ледяных грунтах и др.

Abstract

Jahangirov Akif Ali oglu

Determining the load-bearing capacity of reinforced composite shells and plates covered with surface layers

The goal of the dissertation work is to determine the tensile load and kinematically admissible fields of bending rate for three-layer fibers reinforced with four layers located at different distances from the median surface of the middle layer for composite shells and plates under all possible boundary conditions on the contours and being under the influence of axisymmetric concentrated loads and arbitrary distributed loads on the upper surface of the construction.

Scientific novelty of the work is that here for the first time a yield hexagon is constructed for the composite shells and plates under consideration. The mathematical model of the considered problem that consists of integration of differential equation of bending of plates together with the equations of sides of yield hexagon satisfying corresponding boundary conditions and discontinuity conditions between the annular domain of plastic yield that correspond to the sides of the yield polygon. All possible conditions on the plate's contours are considered. In some problems the plate is reinforced by the rigid central annular part and the whole plate is in the incompressible medium.

Finite equations for determining the radii of different plastic yield zones and for the shear forces on the inner boundary of annular plates are obtained by exact analytic solutions. Formulas for tensile loads are found and studied. In all the problems, kinematic admissible fields of bending rates are calculated to within constant undefined multiplier.

Practical value of the work is that the suggested method of solution may be useful in designing the products of this kind of materials exploited in more complex situations of spatial plastic yield. The obtained results may find application in aerospace engineering, in mechanical engineering, in construction, in marine oil industry in stationary oils platform and helipads, in pipeline transportation, in construction of temporary and stationary roads, bridges and runway strips in swampy and icy ground, etc.

На правах рукописи

АКИФ АЛИ ОГЛЫ ДЖАГАНГИРОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ ТРЕХСЛОЙНЫХ
КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК**

Специальность: 3305.02-Строительная механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**Диссертации на соискании ученой степени
доктора технических наук**

БАКУ-2018