

ფენოვანი კონსტრუქციების რღვევის ფორმები

ბეჟან ჯიქია

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომი შეეხება მრავალფენიანი კომპოზიტური კონსტრუქციების მექანიკურ ქცევას, მათი გამოთვლითი მოდელების თავისებურებებსა და რღვევის მექანიზმებს. ფენოვანი სტრუქტურები ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ინჟინერიაში მცირე წონისა და მაღალი სიმტკიცე-სიხისტის კომბინაციის ოპტიმალურობის გამო. აქ განხილულია სამშრიანი (სენდვიჩის ტიპის) კონსტრუქციები, რომელთა შემავსებლის როლს ხშირად ასრულებს ფიჭური სტრუქტურა. მოცემულია ფენოვანი კონსტრუქციების გამოთვლითი მოდელების ორი ძირითადი მიდგომა: პირველი ეფუძნება მთელ პაკეტს, როგორც ერთიან სისტემას, ხოლო მეორე თითოეული ფენისთვის ინდივიდუალური ჰიპოთეზის გამოყენებას და ფენებს შორის კონტაქტური პირობების გათვალისწინებას.

სტატიაში აღწერილია რღვევის ძირითადი ფორმები: შემონაკერის გაგლეჯვა, მზიდი ფენების ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვა, ფიჭური შემავსებლის კუმშვითი ან ძვრითი რღვევები, აგლეჯვადი დაზიანებები და დეფორმაციის რთული კომბინაციები, რომლებიც განსაკუთრებით ხშირად ვლინდება ფიჭურ სტრუქტურებში. ნაჩვენებია, რომ რღვევის უმრავლესობა განისაზღვრება არა მხოლოდ გარე ფენების თვისებებით, არამედ ფიჭური შემავსებლის გეომეტრიული პარამეტრებით (უჯრედის სიგანე, კედლის სისქე), ელასტიური და მექანიკური მოდულებით და ფენებს შორის შეერთების ხარისხით.

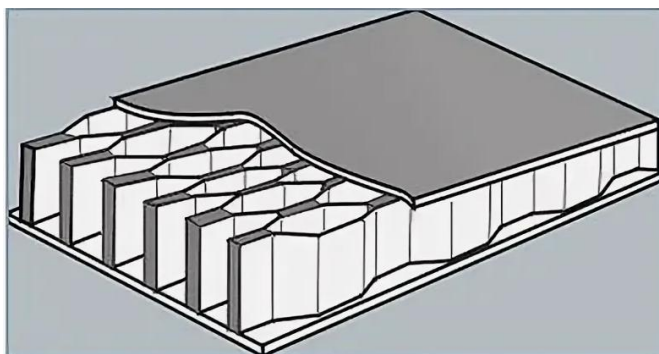
ასევე განხილულია კრიტიკული დატვირთვების შეფასების მეთოდები და ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვის პირობები, რაც აუცილებელ საფუძველს ქმნის ფიჭური პანელების ოპტიმალური დიზაინისთვის. მიღებული შედეგები მნიშვნელოვან პრაქტიკულ მნიშვნელობას იძენს საავიაციო, კოსმოსურ, სამშენებლო და მექანიკურ ინჟინერიაში.

საკვანძო სიტყვები: ფენა, შემავსებელი, რღვევის ფორმები, გაგლეჯვა, ძვრა.

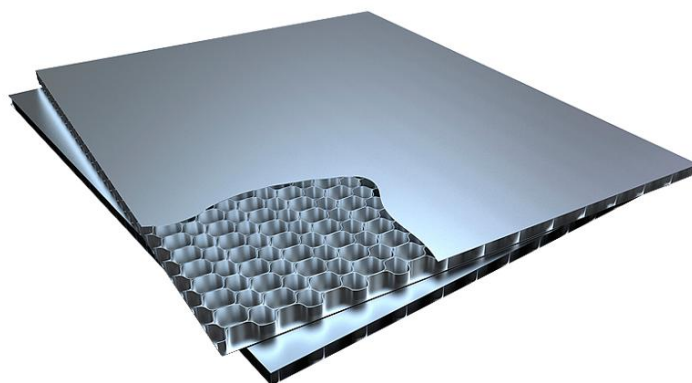
შესავალი

თანამედროვე სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში, მექანიკურ ინჟინერიაში, აეროკოსმოსურ ინჟინერიაში, გემთმშენებლობაში და სხვა დარგებში ფართოდ გამოიყენება გარსისებრი და ფირფიტისებრი კონსტრუქციები. ეს კონსტრუქციები უნდა აკმაყოფილებდეს მაღალი სიმტკიცის, სიხისტის და საიმედოობის მოთხოვნებს, ამავდროულად უნდა ინარჩუნებდეს მცირე წონას. ამიტომ, ბოლო დროს მნიშვნელოვნად გაიზარდა ინტერესი ფენოვანი სისტემების მიმართ. ეს სისტემები შედგება მასალებისგან, რომლებიც მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ფიზიკურ - მექანიკური თვისებებით. დატვირთვის მიმდებ (მზიდ) ფენებში იყენებენ მასალებს მაღალი სიმტკიცის და სიხისტის მქონე მახასიათებლებით; ეს ფენები განკუთვნილია მექანიკური დატვირთვებისათვის, ხოლო დამაკავშირებელი ფენა (შემავსებელი) ემსახურება სტრუქტურული

მთლიანობის უზრუნველყოფას (მონოლითურობას), რაც გულისხმობს დატვირთვის გადანაწილებას მზიდ ფენებს შორის. ფენების ეს განლაგება, დაბალი წონის შენარჩუნებით, უზრუნველყოფს მაღალ სიმტკიცესა და სიხისტეს. ფენოვანი სტრუქტურების ქცევა მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთგვაროვანი სისტემებისგან, განსაკუთრებით ძვრის დეფორმაცია, არაერთგვაროვანი დეფორმაცია და ცალკეული ფენების მოძრაობით გამოწვეული ინერციული ეფექტი. ეს მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სისტემის დაძაბულობა-დეფორმაციის მდგომარეობაზე (დ.დ.მ). არსებობს ვრცელი ლიტერატურა მრავალფენიანი სისტემების გამოთვლით მოდელურ სხვადასხვა დაშვებების შესახებ და სხვადასხვა ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებისთვის მქონე ფენებისათვის [1, 2, 3, 4]. სურ. 1-ზე წარმოდგენილია ფიქური კონსტრუქციების მაგალითები:



ა)



ბ)



გ)

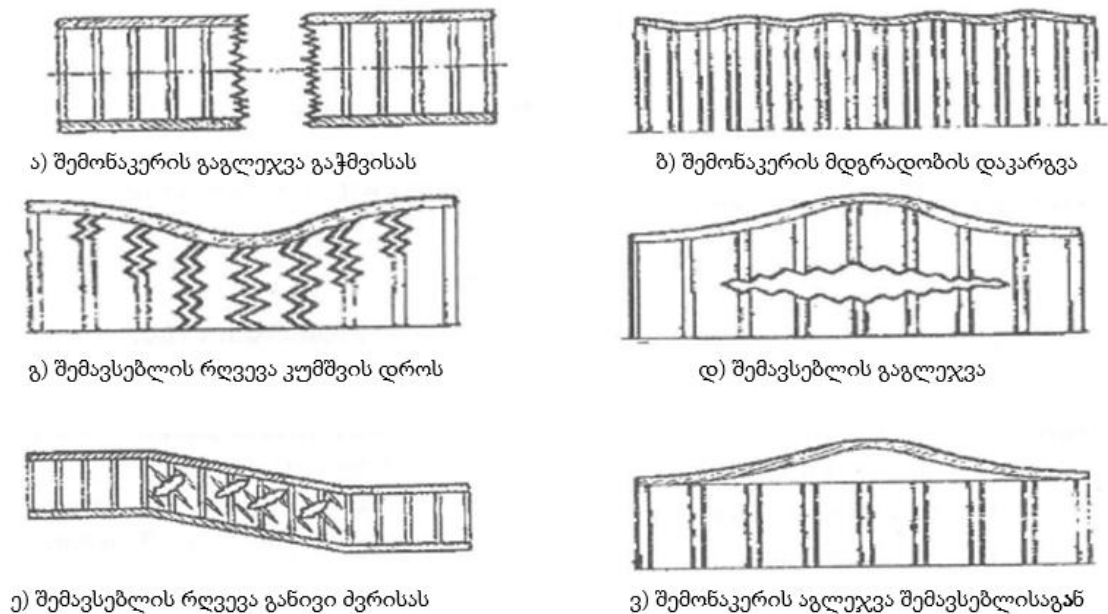
სურ. 1 ფიქური კონსტრუქციის მაგალითები

ძირითადი ნაწილი

ფენოვანი სისტემების გამოთვლითი მოდელების შესაქმნელად, როგორც წესი, გამოიყენება შემდეგი მიდგომა: თითოეული ფენისთვის მიიღება დრეკადობის განტოლებები, ფენების საზღვრებზე სასაზღვრო პირობებისა და „კონტაქტის“ პირობების გათვალისწინებით. ეს მიდგომა შესაძლებელია ფენების შეზღუდული რაოდენობისთვის. ფენოვანი კონსტრუქციების რეალური მოდელები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად. პირველი ჯგუფი მოიცავს მოდელებს, რომლებიც, ჰიპოთეზის მიხედვით, ეფუძნება მთელ პაკეტს, როგორც ერთ მთლიანს. ამ შემთხვევაში, ამოსახსნელი განტოლებების სისტემა არ არის დაკავშირებული ფენების რაოდენობასთან. ასეთი მოდელების მასშტაბები შეზღუდულია და ისინი გამოიყენება მაშინ, როდესაც ფენებს აქვთ მსგავსი თვისებები ან მრავალშრიან პაკეტს აქვს რეგულარული სტრუქტურა. მეორე ჯგუფის მოდელები მოიცავს თეორიებს, რომლებშიც თითოეული ფენისთვის შემოღებულია ჰიპოთეზა; ეს არის გაწყვეტილი ხაზის ჰიპოთეზა [2].

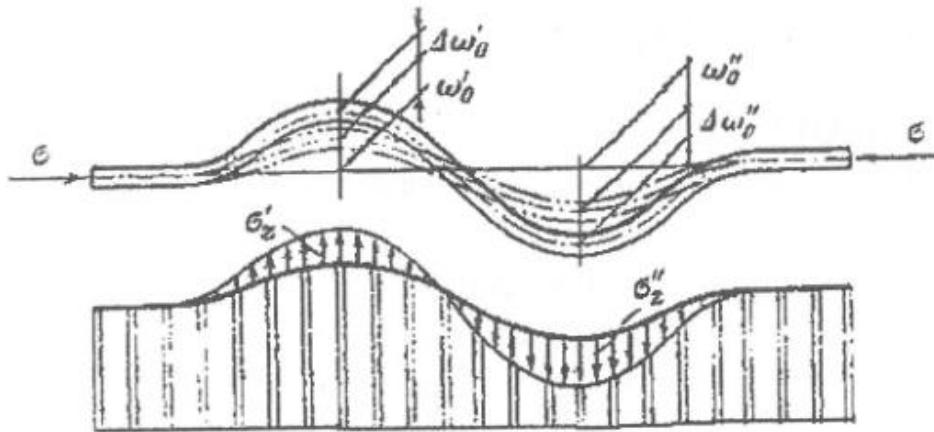
როგორც წესი, გამოიყენება სამშრიანი სტრუქტურები (ორი არამყარი ფენა და შემავსებელი). ამ ტიპის კონსტრუქციები ოპტიმალურია ღუნვაზე მუშაობის დროს. უნდა აღინიშნოს, რომ თანამედროვე საავიაციო და სარაკეტო-კოსმოსურ ინჟინერიაში შემავსებელის სახით ძალიან ხშირად გამოიყენება ფიჭური შემავსებელი.

როგორც ცნობილია, ფიჭურ კონსტრუქციებში გვხვდება ელემენტების გარკვეული რღვევის ფორმები, რომელთა ტიპებიც ცნობილია. ზოგადად, ძალიან ხშირ შემთხვევაში ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის შემდეგ ძნელია დეფორმაციის ძირითადი ფორმების დადგენა, ასევე რთულია პირველადი დეფორმაციის რეჟიმების დადგენაც. სურ. 2-ზე წარმოდგენილია ზოგიერთი ფორმის ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის მაგალითები:



სურ. 2 ზოგიერთი ფორმის ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის მაგალითები

სურ. 2 გ), დ) და ვ)-ზე ნაჩვენები ფორმები წარმოიქმნება შემონაკერის გრძივი კუმშვისას, რომელსაც აქვს ტალღოვანი ან ჩაზნექილი ზედაპირი. სურათზე ნაჩვენები ფორმები ურთიერთდაკავშირებულია და გავლენას ახდენენ ერთმანეთზე, ძალიან ხშირად ფიჭურ კონსტრუქციებში ერთი შეხედვით რთულია დეფორმაციის ძირითადი ფორმის დადგენა. შეკუმშვის შემთხვევაში ძაბვები (σ), ჯერ გადანაწილდება მოხრილი მზიდის ფენის წერტილებზე და შემდეგ მოქმედებენ შემავსებელზე. შემონაკერის არათანაბარ ზონაში ω'' დეფორმაცია, რომელიც შიგნით არის მიმართული, იწვევს შემავსებლის σ_z'' შეკუმშვას, ხოლო ზონაში ω' დეფორმაცია, რომელიც გარეთ არის მიმართული, იწვევს გაჭიმვას ω' სიდიდეზე (იხ. სურ. 3).



სურ. 3 ფიჭური შემავსებლის დამაბული მდგომარეობა

მზიდი ფენის შეერთება შემავსებელთან მუშაობს აგლეჯვაზე. ფიჭურ კონსტრუქციებში ტალღოვნების წარმოქმნა შესაძლებელია მრავალი მიზეზის გამო. უნდა აღინიშნოს, რომ უფრო სავარაუდოა, მოხდეს ჩაღუნვა, რომელიც მიმართულია შემავსებლისკენ, ვიდრე საპირისპირო მიმართულებით, რადგან $\omega'' > \omega'$ და მზიდ ფენაზე მოქმედებს გარე ძალები (მაგ., წნევა, დარტყმა და ა.შ.), ეს ფაქტორები უნდა იქნას გათვალისწინებული ფიჭური შემავსებლის სიმტკიცისა და სიხისტის მახასიათებლების არჩევისას. ფიჭურ კონსტრუქციის მზიდი ფენა წარმოადგენს ფირფიტას, დრეკად საყრდენზე კი შემავსებელს.

როდესაც კონსტრუქცია ლოკალურად მოქმედი ძალის ზემოქმედების ქვეშ მოექცევა, ძალის მოდების ადგილას შესაძლოა განვითარდეს მზიდი ფენის ადგილობრივი ღუნვა. ამის საფუძველზე, წერტილში მოქმედი ძალის შემთხვევაში, ფიჭური კონსტრუქციის შემონაკერზე უნდა იყოს უზრუნველყოფილი მზიდი ფენის სავალდებულო მინიმალური სისქე, ხოლო შემავსებელი თავად უნდა იყოს საკმარისად ხისტი და დრეკადი, რათა კონსტრუქციამ წინააღმდეგობა გაუწიოს გარე ადგილობრივი ძალების მოქმედებას, რაც უზრუნველყოფილია საკმარისად მაღალი ნორმალური დრეკადობის E მოდულით.

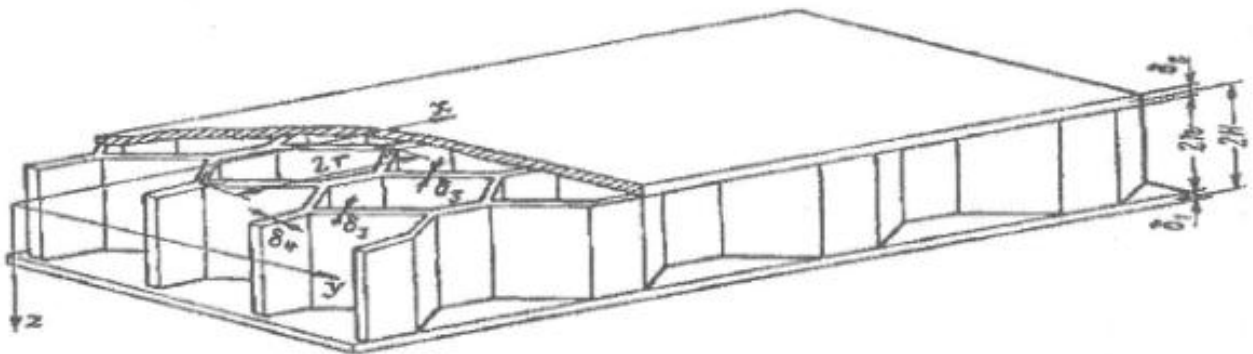
სურ.2 ე-ზე ნაჩვენები რღვევის ფორმა განისაზღვრება შემავსებლის სიმტკიცით ძვრაზე, ხოლო ბ)-ზე ნაჩვენები ფორმა დამოკიდებულია ნორმალურ მოდულზე შეკუმშვის დროს. სურ.2 ა)-ზე

ნაჩვენები ფორმა კი, გავლენას ახდენს შემონაკერის გაჭიმვის სიმტკიცეზე. შეიძლება ითქვას, რომ ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის ფორმის აბსოლუტური უმრავლესობა დამოკიდებულია ფიჭურ შემავსებლებზე და მათთან შემონაკერის შეერთების გეომეტრიულ, სიმტკიცისა და სიხისტის მახასიათებლებზე. ამიტომ, ფიჭური კონსტრუქციებისათვის ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრების შერჩევა აუცილებელია.

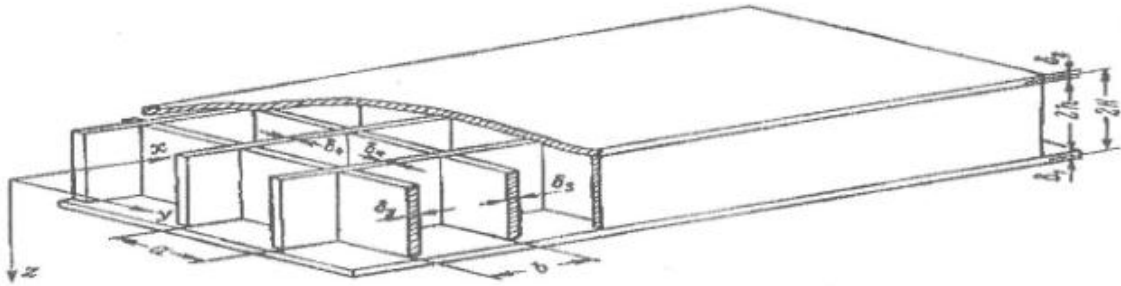
შემავსებლის $\sigma_{კუმ.}$, $\sigma_{გაგ.}$, $\sigma_{აგლ.}$, სიმტკიცის მახასიათებლების ცოდნით, შესაძლებელია იმის მითითება, თუ რომელ ფორმებში (იხ. სურ. 2 გ), დ), ვ)) მოხდება შემონაკერის ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგა გრძივი შეკუმშვის დროს. კრიტიკული ძაბვა ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვის ბ)-ზე მოცემული ფორმების მიხედვით განისაზღვრება საცნობარო ლიტერატურიდან [5, 6, 7].

ექვსკუთხა სტრუქტურის მქონე ფიჭური შემავსებლის სიმტკიცე განისაზღვრება კრიტიკული შეკუმშვის ძაბვებით $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$, კედლების სისქით δ_3 და $2\delta_3 = \delta_4$ სიგანით r (იხ. სურ. 4, 5). კედლების კრიტიკული შეკუმშვის ძაბვები განისაზღვრება δ_3/r თანაფარდობით. მაქსიმალური თანაფარდობა δ_3/r უნდა შეირჩეს ისე, რომ $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$ ახლოს იყოს ფოლგის მასალის დენადობის ზღვართან $\sigma_{0.2}$, რადგან δ_3/r -ის შემდგომი ზრდით $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$ -ის მნიშვნელობები პრაქტიკულად არ იზრდება და იწვევს შემავსებლის მოცულობითი მასის გაზრდას.

შემავსებლის უჯრედის ზომა r მინიმალური უნდა იყოს, რადგან შემონაკერის შექმნა შემავსებლიანი კედლით მოცემული სიმტკიცისთვის, უჯრედის მხარეების შემცირებისას გაზრდის შემავსებლიანი შემონაკერის საერთო სიმტკიცეს აგლეჯვაზე, თუ გაიზრდება შეწყებების ან შედუღების პერიმეტრი. გარდა ამისა, r -ის შემცირება ზრდის კრიტიკულ ძაბვებს $\sigma_{კრ}$.



სურ. 4 სამფენიანი ფირფიტა ექვსკუთხა ფორმის შემავსებლით



სურ. 5 სამფენიანი ფირფიტა ოთხკუთხა ფორმის შემავსებლით

მთლიანი კრიტიკული დატვირთვა სამშრიანი ფირფიტის, $T_{xk.3\phi}$ -ისა და $T_{yk.3\phi}$ -ის სიგანის ერთეულზე, რომელიც შეესაბამება როგორც ორივე გარე ფენების, ასევე ფიჭური ელემენტების ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვას, განისაზღვრება როგორც ორივე გარე ფენაზე ასევე ფიჭური ელემენტზე კრიტიკული დატვირთვების შეჯამებით. თუმცა, სხვადასხვა სისქის გარე ფენების შემთხვევაში, ფირფიტა პრაქტიკულად კარგავს მზიდუნარიანობას, ნაკლებად ხისტი გარე ფენის მდგრადობის დაკარგვით. იმის გათვალისწინებით, რომ ფენებს შორის დატვირთვები ნაწილდება მათი სიხისტის პროპორციულად, ვიღებთ [7].

$$\begin{cases} T_{xk.3\phi} = T_{xk.1} \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + T_{xk.c}; \\ T_{yk.3\phi} = T_{yk.1} \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + T_{yk.c}; \end{cases} \quad (1)$$

სადაც:

- $B_i = \frac{E_i \delta_i}{1 - \mu_i^2}$ არის გარეთა ფენების სიხისტე გაჭიმვის სიგანის ერთეულზე ($i = 1, 2$);
- δ_i არის ფირფიტის სისქე ($i = 1, 2, 3, 4$);
- E_i, μ_i - შესაბამისად, დრეკადობის მოდული და პუანსონის კოეფიციენტი, გარე ფენების მასალების ($i = 1, 2$) და ფიჭური ელემენტების ($i = 3, 4$);
- T_{xk}, T_{yk} - არის შეკუმშვის კრიტიკული დატვირთვები.

აქ, ინდექსი "1" აღნიშნავს ნაკლებად ხისტ გარე ფენას. თხელი ფოლგისგან დამზადებული ფიჭური პანელებისთვის, დატვირთვა, რომელსაც იღებს შემავსებელი, შეადგენს მთლიან ფირფიტაზე მოქმედი ძალის მცირე ნაწილს [8].

დასკვნა

მოცემულ კვლევაში განხილულია მრავალფენიანი კომპოზიტური კონსტრუქციების მექანიკური ქცევა, მათი სტრუქტურული თავისებურებები და რღვევის ძირითად მექანიზმებზე მოქმედი ფაქტორები. შესრულებული ანალიზი ადასტურებს, რომ ფენოვანი სისტემების სიმტკიცე

და საიმედოობა მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება როგორც გარე მზიდი ფენების, ისე ფიჭური ტიპის შემავსებლის გეომეტრიული, ელასტიური და მექანიკური მახასიათებლებით.

დადგინდა, რომ რღვევის კრიტიკული ფორმები, მათ შორის მასობრივი მდგრადობის დაკარგვა, გაგლეჯვა, აგლეჯვა და ძვრის დაზიანებები, უმეტესწილად უკავშირდება ფენებს შორის დატვირთვის გადანაწილების არასაკმარის ეფექტურობას და შემავსებლისა და შემონაკერის შეერთების თვისებებს. კვლევამ აჩვენა, რომ ფიჭური სტრუქტურის უჯრედის ზომა, კედლის სისქე და ელასტიური მოდულები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მთლიან სისტემაზე მოქმედ კრიტიკულ ძაბვებზე და დეფორმაციის რეჟიმებზე.

ასევე დასტურდება, რომ გამოთვლითი მოდელების შერჩევა უნდა ეფუძნებოდეს ფენების განსხვავებულ მექანიკურ ბუნებასა და კონსტრუქციის რეალურ დატვირთვებს. პრაქტიკული შედეგები მიუთითებს, რომ სტრუქტურის ოპტიმალური პარამეტრების სწორად შერჩევა მნიშვნელოვნად ზრდის ფენოვანი პანელების მდგრადობას და გამძლეობას.

ამრიგად, მიღებული დასკვნები წარმოადგენს მნიშვნელოვან საფუძველს საავიაციო, კოსმოსური და სხვა მაღალი დატვირთვის საინჟინრო დარგებში ფენოვანი კომპოზიტური კონსტრუქციების სწორად დაგეგმვისა და უსაფრთხო ექსპლუატაციისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Pathak, Himanshu, and Sunny Zafar, eds. *Recent Advances in Composite Materials and Structures, Volume 1: Design, Processing, Manufacturing and Health Monitoring*. Singapore: Springer, 2025.
2. Lee, Sung W., ed. *Advances in Thick Section Composite and Sandwich Structures: An Anthology of ONR-sponsored Research*. Cham: Springer, 2020.
3. Mittelstedt, Christian, ed. *Mechanics of Composite Structures*. Berlin: Springer, 2025.
4. Carlsson, Leif A., and G. A. Kardomateas. *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*. Dordrecht: Springer, 2011.
5. Chawla, Krishan K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012 (or most recent edition).
6. *Commercial Aircraft Composite Technology*. Edited volume, Springer (state-of-the-art overview of composite use in airframe structures).
7. Ngo, Tri-Dung, ed. *Introduction to Composite Materials*. IntechOpen, 2020 (open-access overview of composite fundamentals and applications).
8. *Mechanics of Corrugated and Composite Materials*. Edited by Tomasz Garbowski et al. MDPI-Books, 2022 (focuses on advanced composite geometries and mechanics).

Failure Modes of Layered Structures

Bezhan Jikia

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This study examines the mechanical behavior of multilayer composite structures, the specific features of their computational modeling, and the predominant mechanisms of structural failure. Layered systems are widely used in modern engineering due to their favorable combination of low weight and high stiffness–strength characteristics. The paper focuses on three-layer (sandwich-type) constructions in which the core is frequently formed by a honeycomb structure.*

Two principal approaches to the computational modeling of layered structures are presented: the first treats the entire laminate as a single integrated system, whereas the second approach applies individual hypotheses to each layer, taking into account interlayer contact and boundary conditions. The paper describes the primary failure modes observed in such systems, including face-sheet debonding, local buckling of load-bearing layers, compressive or shear failure of the honeycomb core, peel-type debonding, and complex combined deformation modes that are especially characteristic of honeycomb structures. It is demonstrated that most failure modes are governed not only by the properties of the outer face sheets but also by the geometric characteristics of the honeycomb core (cell size, wall thickness), its elastic and mechanical parameters, and the quality of the face–core bonding.

Methods for evaluating critical loads and conditions for local instability are also discussed, providing an essential basis for the optimal design of honeycomb sandwich panels. The findings have significant practical relevance for aerospace, space technology, civil engineering, and mechanical engineering applications.

Keywords: *Layer, core, failure modes, debonding, shear.*