

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**  
**КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**за освітньо-професійною програмою «Динаміка і міцність машин»**  
**зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**  
**на тему: «Міцність балки літака з хвилястою стінкою з відновлюваними**  
**конструктивними елементами типового ремонту»**

Виконав :  
студент VI курсу, групи МП-02мп  
Радчук Євген Олександрович \_\_\_\_\_

Керівник:  
д.т.н., проф.  
Бабенко Андрій Єлісейович \_\_\_\_\_

Рецензент:  
д.т.н., проф.  
Данильченко Юрій Михайлович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_  
Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Динаміка і міцність машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Радчук Євген Олександрович**

1. Тема дисертації «Міцність балки літака з хвилястою стінкою з відновлюваними конструктивними елементами типового ремонту», науковий керівник дисертації Професор, д.т.н. Бабенко Андрій Єлісейович, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від 01.11.2021 р. № 3611-с
2. Термін подання студентом дисертації: 10.12.2021 р.
3. Об'єкт дослідження: тривимірні моделі є секція заднього лонжерона горизонтального стабілізатора після ремонту и така сама секція але з хвилястою стінкою.
4. Предмет дослідження: перевірка зміни міцності балки при зміні прямої стінки на хвилясту.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
  - 1) Огляд сучасного стану проблеми розрахунку балок з хвилястою стінкою.

- 2) Створення моделей в програмному середовищі Patran с аналізом деформування, втрати стійкості та навантаження на кріпильні елементи.
  - 3) Порівняння результатів
  - 4) Розробка стартап-проекту
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 6 і більше.
7. Орієнтовний перелік публікацій – 1 і більше.
8. Дата видачі завдання: 01.09.2021 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури	01.09.21 – 20.10.21	
2	Моделювання моделей	21.10.21 – 12.11.21	
4	Порівняння результатів моделювання	12.11.21 – 19.11.21	
5	Стартап-проект та висновки	20.11.21 – 10.12.21	

Студент

\_\_\_\_\_

Євген РАДЧУК

Науковий керівник

\_\_\_\_\_

Андрій БАБЕНКО

## Анотація

Дипломна робота містить 54 сторінки, 22 таблиця, 32 рисунків, список використаної літератури з 30 найменувань.

Актуальність роботи полягає в тому, що конструкція літальних апаратів включає в себе багато балок різних форм і розмірів. Для того щоб конструкція була легкою і міцною в балках які сприймають в основному момент зменшують товщину стінки, але в якийсь момент критичним фактором буде не розрив матеріалу, а втрата стійкості стінки. Для збільшення стійкості стінки використовують вертикальні ребра жорсткості. У будівництві для того щоб ще більше зменшити товщину стінки, почали використовувати двотаврові балки з гофрованою стінкою.

*Мета дослідження* є визначення можливості використання балки літака з хвилястою стінкою з точки зору ремонтно придатності.

*Об'єктом дослідження* в даній роботі вибрана секція заднього лонжерона горизонтального стабілізатора після ремонту и така сама секція але з хвилястою стінкою.

Під час виконання роботи були проведені розрахунки на міцність за допомогою аналітичного та чисельних методів та зроблені відповідні порівняння.

У системі САПІА змодельовані дві двотаврові балки після ремонту стандартної стінки та хвилястої, у системі Patran/Nastran побудована сітка скінченних елементів, задані умови закріплення та прикладенні навантаження.

Даний розрахунок дозволить знайти різницю деформованого стану балок, визначення навантаження на кріпильні елементи, та порівняти критичні навантаження втрати стійкості.

**Ключові слова:** сін-балка, балка з хвилястою стінкою, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

## Abstract

The thesis contains 54 pages, 22 tables, 32 drawings, a list of used literature of 30 titles.

The relevance of the work lies in the fact that the design of aircraft includes many beams of different shapes and sizes. In order for the structure to be light and strong in beams that perceive mainly the moment, the wall thickness is reduced, but at some point the critical factor will not be the rupture of the material, but the loss of Wall stability. Vertical stiffeners are used to increase the stability of the wall. In construction, in order to further reduce the wall thickness, they began to use I-beams with a corrugated wall.

*The purpose* of the study is to determine the possibility of using an aircraft beam with a wavy wall in terms of repair suitability.

*The object* of research in this paper is the section of the rear spar of the horizontal stabilizer after repair and the same section but with a wavy wall.

During the execution of the work, calculations were made for the strength of the using analytical and numerical methods, appropriate comparisons are made.

In the CATIA system, two I-beams are modeled after the repair of a standard wall and a wavy one, in the Patran/Nastran system, a grid of finite elements is constructed, the conditions for fixing and applying the load are set.

This calculation will allow you to find the difference in the deformed state of beams, determine the load on fasteners, and compare critical loads of stability loss.

**Keywords:** sin-beam, wavy wall beam, stress-strain state, finite element method.

## Зміст

1	Обґрунтованість використання хвилястої стінки .....	8
1.1	Порівняння аналітичного розрахунку, балки з гофрованою і плоскою стінкою .....	8
1.2	Що ремонтується .....	14
2	Етапи моделювання: .....	14
2.1	Створення геометрії .....	14
2.1.1	Креслення стандартної балки .....	16
2.1.2	Креслення балки з хвилястою стінкою .....	19
2.2	Створення сітки .....	23
2.2.1	Стандартної балки .....	23
2.2.2	Балки з хвилястою стінкою .....	24
2.3	Проводиться перевірка моделі. ....	24
2.4	Створення властивостей матеріалів. (ізотропні матеріали) .....	25
2.5	Крайові умови та зовнішнє навантаження .....	26
2.5.1	Стандартної балки .....	26
2.5.2	Балки з хвилястою стінкою .....	28
2.6	Моделювання заклепок .....	30
2.7	Результати .....	31
2.8	Порівняння результатів .....	34
3	Аналіз отриманих результатів .....	35
3.1	Аналіз деформації .....	35
3.2	Аналіз навантаження кріпильних елементів .....	36
3.3	Аналіз втрати стійкості .....	36
4	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	37
4.1	Опис ідеї проекту .....	37
4.2	Технологічний аудит .....	38
4.3	Розроблення ринкової стратегії проекту .....	47
4.4	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	49
	Висновки .....	51
	Література .....	52

## Вступ

Конструкція літальних апаратів включає в себе багато балок різних форм і розмірів. Для того щоб конструкція була легкою і міцною в балках які сприймають в основному момент, наприклад лонжерони крила збільшують товщину полиць та зменшують товщину стінки, але в якийсь момент критичним фактором буде не розрив матеріалу, а втрата стійкості стінки.

Для збільшення стійкості стінки, крім збільшення товщини, використовують вертикальні ребра жорсткості, які розділяють стінку уздовж крила на секції які краще чинять опір втрати стійкості.

В авіабудуванні, починаючи з 1950-х років, використовуються лонжерони крила з гофрованої стінкою. Яскравим прикладом вважається космічний орбітальний багаторазовий корабель "Буран", де застосовані лонжерони з хвилястим закритим профілем гофрування.

Але застосування на транспортних літаках не було. Конструкція гофрованих стінок застосовувалася на військових або космічних кораблях, які не будуть досить довго експлуатуватися що б виникла потреба в їх ремонті.

## **1 Обґрунтованість використання хвилястої стінки**

Найбільш поширеним і економічним типом поперечного перерізу стрижневих металевих будівельних конструкцій в практиці проектування залишається зварений або прокатний двотавр, стінки якого по вимогам забезпечення місцевої стійкості призначаються відносно товстими, що робить в результаті перетин економічно нераціональним. Маса двотаврового стрижня значно зменшується, якщо товщина його стінки призначена з умов міцності, а для забезпечення місцевої стійкості стінки надається просторова форма. Крім цього, двотавра з тонкою поперечно гофрованою стінкою володіє підвищеною жорсткістю на кручення, що позитивно позначається на загальній стійкості стрижня при експлуатації, транспортуванні і монтажі.

Синусоїдальне ребро має більше переваг, ніж пряме, так як усуває місцеву деформацію, властиву плоским пластин.

### **1.1 Порівняння аналітичного розрахунку, балки з гофрованою і плоскою стінкою**

Навантаження  $q_y$ , прикладені в серединній площині балки з гофрованою (або плоскою) стінкою, викликають зрушує силу  $q_y d$  напрямку осі  $Y$  і згинальний момент щодо осі  $X$  (рисунок 1). Сила  $Q_y$  і момент діють в серединній площині балки і можуть бути визначені звичайними засобами будівельної механіки.



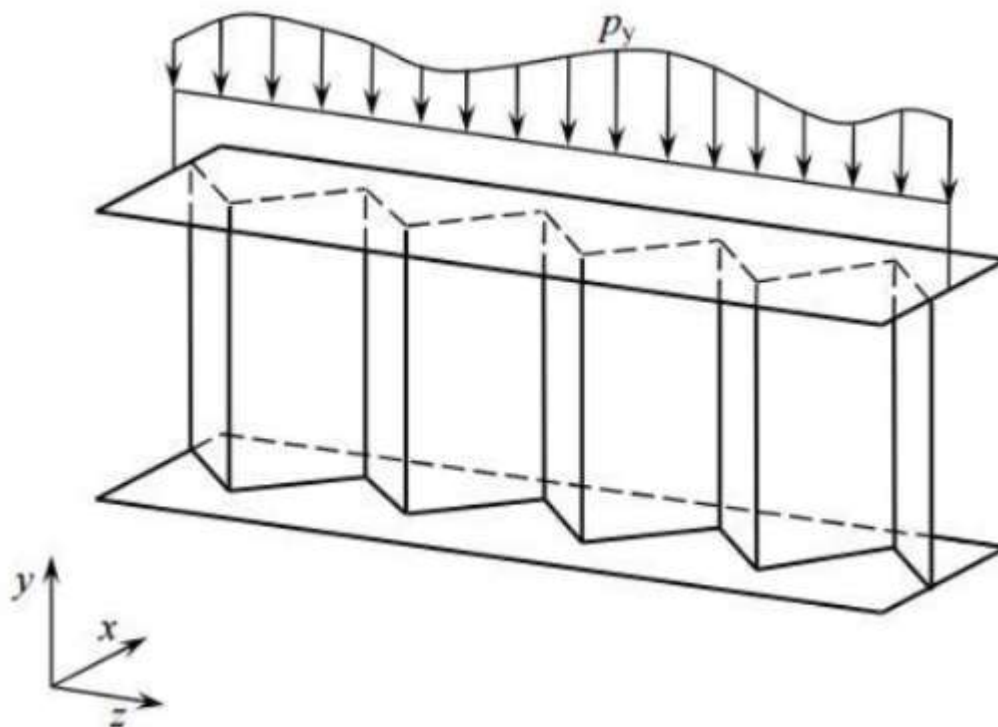


Рисунок 1 Балка з гофрованою стінкою під впливом навантажень в площині стінки

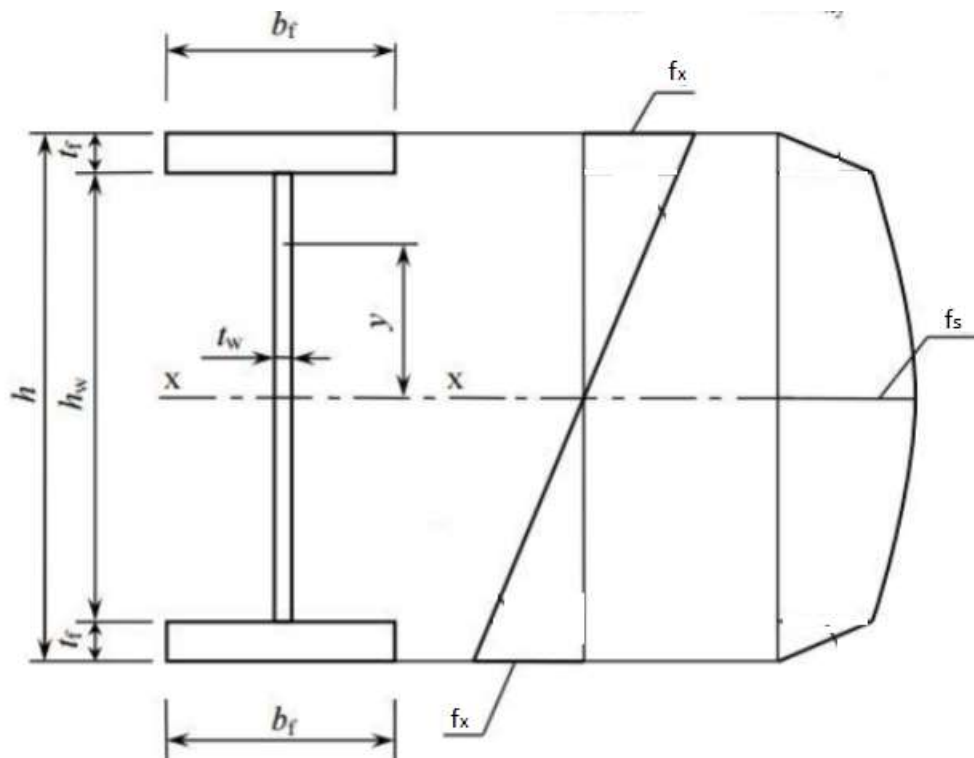
Для згинаються балок з плоскою стінкою, у яких проліт значно перевищує висоту поперечного перерізу (в 5 і більше разів), експериментально підтверджується гіпотеза плоских перетинів Бернуллі. Відповідно до цієї гіпотези зміна деформацій по висоті перетину відбувається за лінійним законом, напруги розподіляються аналогічно тільки до межі плинності (рисунок 2).

Напруги в точках, що знаходяться на відстані  $y$  від нейтральної осі, визначаються за формулою:

$$f_x = \frac{M_x * y}{I_x}$$

Де  $M_x$  - згинальний момент в розглянутому перетині балки;

$I_x$  - осьовий момент інерції поперечного перерізу балки.



*Рисунок 2 Розподіл нормальних і дотичних напруг перерізі балки з плоскою стінкою при вигині*

Однією з важливих характеристик балки з гофрованої стінкою є поздовжня жорсткість стінки. Під дією осьового стиснення гофрована стінка може нерівномірно по довжині розтягуватися в одному поясі і стискатися в іншому і тому не сприймає будь-яких значних осьових (в поздовжньому напрямку) зусиль в порівнянні з плоскою стінкою під дією такого ж навантаження.

У роботі [1] показано, що поздовжня жорсткість гофрованої стінки від декількох сот до декількох тисяч разів менше жорсткості плоскої стінки звичайної двотаврової балки. Через цю особливість внесок стінки в сприйняття згинального моменту зневажливо малий і можна вважати, що згинальний момент  $M_x$  воспринімається повністю поясами.

Грунтуючись на теорії тонкостінних балок [2], можна стверджувати, що стінка і пояси сприймають тільки ті зусилля, які діють в площині їх поперечного перерізу. Це означає, що зсувна сила  $Q_y$  сприймається повністю стінкою.

Вигин в площині балки викликає нормальні напруги в поясах  $f_x$ , дотичні напруги в стінці балки  $f_{s_f}$  змінюються за лінійним законом дотичні напруги в поясах  $f_s$  внаслідок зміни нормальних напруг  $f_x$  по довжині балки (рисунок 3).

Кількісно  $f_x$  так само як  $f_s$  та  $f_{s_f}$  можуть бути визначені за допомогою звичайної теорії балок за формулами:

$$f_x = \frac{M_x * y}{I_x}$$

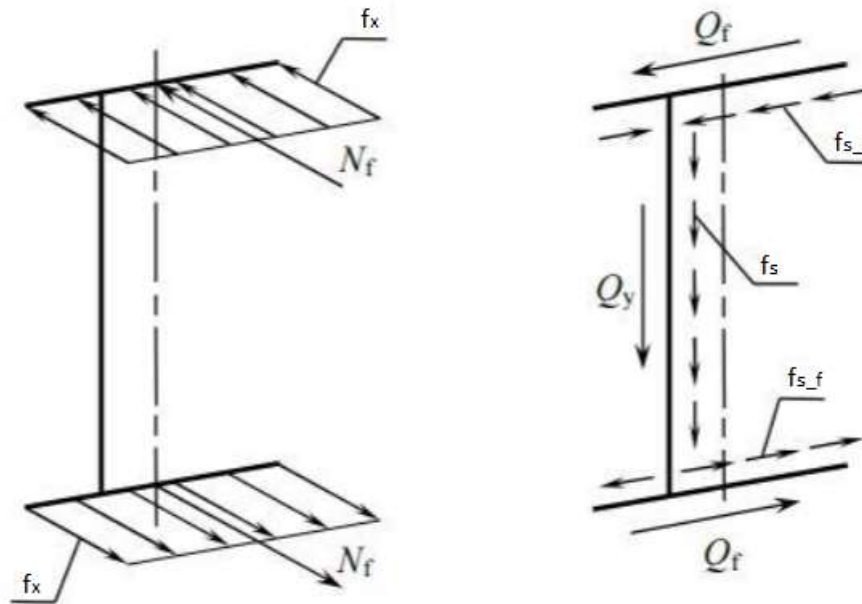
$$f_s = \frac{Q_y * S_x}{I_x}$$

$$f_{s_f} = \frac{Q_f * S_x}{I_x}$$

де  $S_x$  -статичний момент напівсічення;

$I_x$  –осьовий момент інерції перетину.

Значення  $S_x$  та  $I_x$  обчислюються без урахування впливу стінки при роботі балки на поперечний вигин.



*Рисунок 3 Нормальні, дотичні напруги і результуючі зусилля в двотавровій Балці з гофрованої стінкою*

Насправді приварка гофрованої стінки до поясу балки обмежує її поперечні

деформації, тому стінка в місці контакту з поясом працює аналогічно плоскою тією ж товщини  $t_w$ . У міру віддалення від пояса до осі балки затискаючий вплив пояса на роботу гофрованої стінки швидко зменшується і на деякій відстані  $ch_w$  ( $h_w$ -висота гофрованої стінки—зникає зовсім [3-8]).

Якщо допустити, що гіпотеза плоских перетинів справедлива для балки з вертикально гофрованої стінкою, тоді цю стінку можна замінити еквівалентної їй по роботі плоскою стінкою зі змінною по висоті товщиною.

Дослідження Острікова Г. М., Максимова Ю. С., Долинського В. В. [4] показали, що для практичних розрахунків можна прийняти, що на ділянках, що примикають до поясів балки висотою  $ch_w$ , товщина еквівалентної плоскої стінки  $t_y$  змінюється від  $t_{eq}$  до  $t_w$  за законом квадратної параболи (рисунок 4)

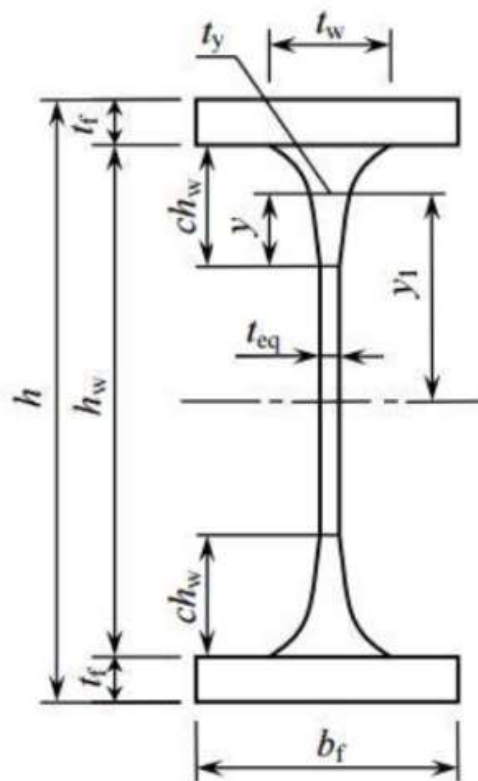


Рисунок 4 Поперечний переріз балки з плоскою стінкою змінної товщини.

Якщо згинальний момент виникає в перерізі балки з гофрованої стінкою

сприймається практично повністю поясами (рисунок 5), то перерізуюча сила  $Q_y$  увоспрімається перетином гофрованої стінки. Згідно з експериментальними дослідженнями [3,10-23], і розрахунками методу кінцевих елементів [24-30], розподіл дотичних напруг по висоті стінки носить рівномірний характер (рисунок 5), і практично не залежить від параметрів гофрів, тому дотичні напруги в стінці можна визначити за формулою:

$$f_s = f_{s\_max} = \frac{Q_y}{h_w t_w}$$

де  $f_{s\_max}$  -максимальні дотичні напруги в стінці балки від розрахункового навантаження;

$h_w$  –повна висота гофрованої стінки;

$t_w$ –товщина гофрованої стінки.

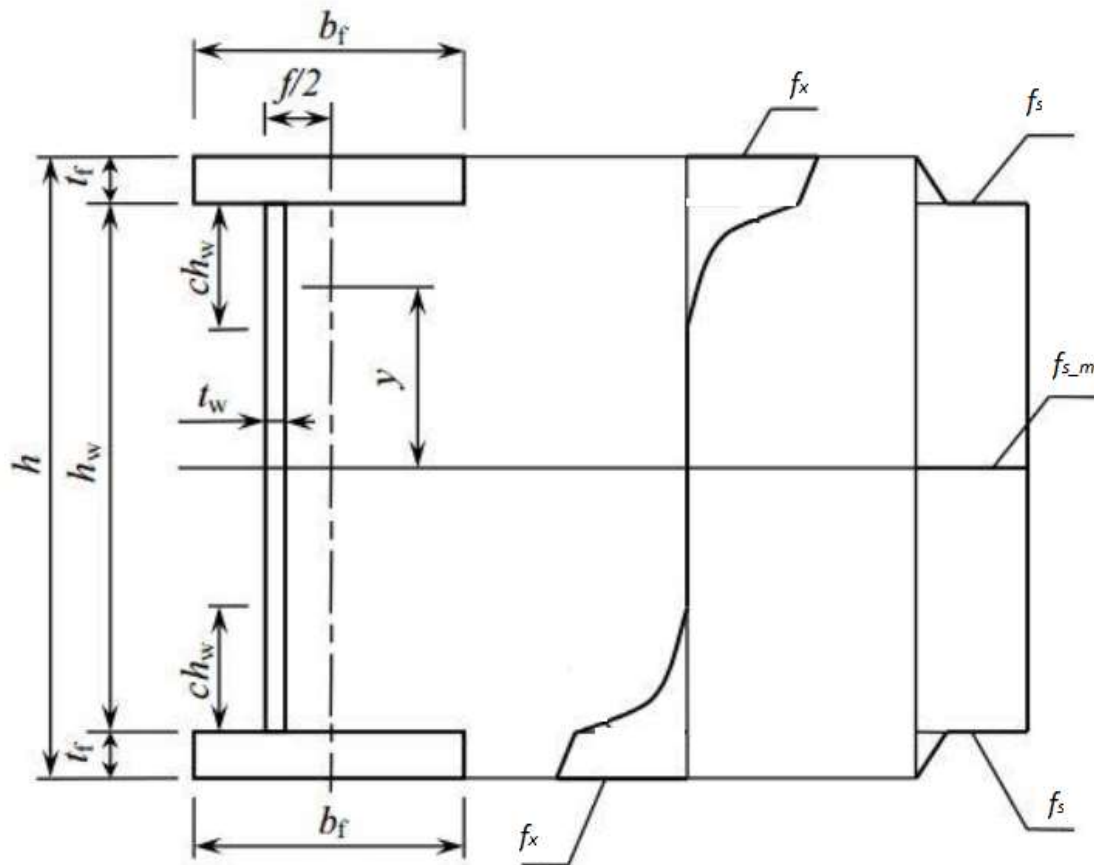


Рисунок 5 Розподіл нормальних і дотичних напруг в перерізі балки з гофрованої стінкою при вигині

## **1.2 Що ремонтується**

Буде розглянуто приклад ремонту заднього лонжерона горизонтального стабілізатора. Дана балка двотаврового перетину і складається з вифрезерованих хорд і стінки. Дана конструкція була обрана тому що виконати балку з хвилястою стінкою шляхом прокатки неможливо. Використовувати зварювання в літаках недоцільно через недостатню передбачуваності міцності зварного шва. А використовувати повністю фрезеровану балку буде значно дорожче ніж збірну.

Розглянутий ремонт полягав в тому що замінили частину стінки і змінне полотно зрощено подвоїтелем і потроювач, виготовленими з листа 7075-T6 товщиною 0,04 дюйма кожен.

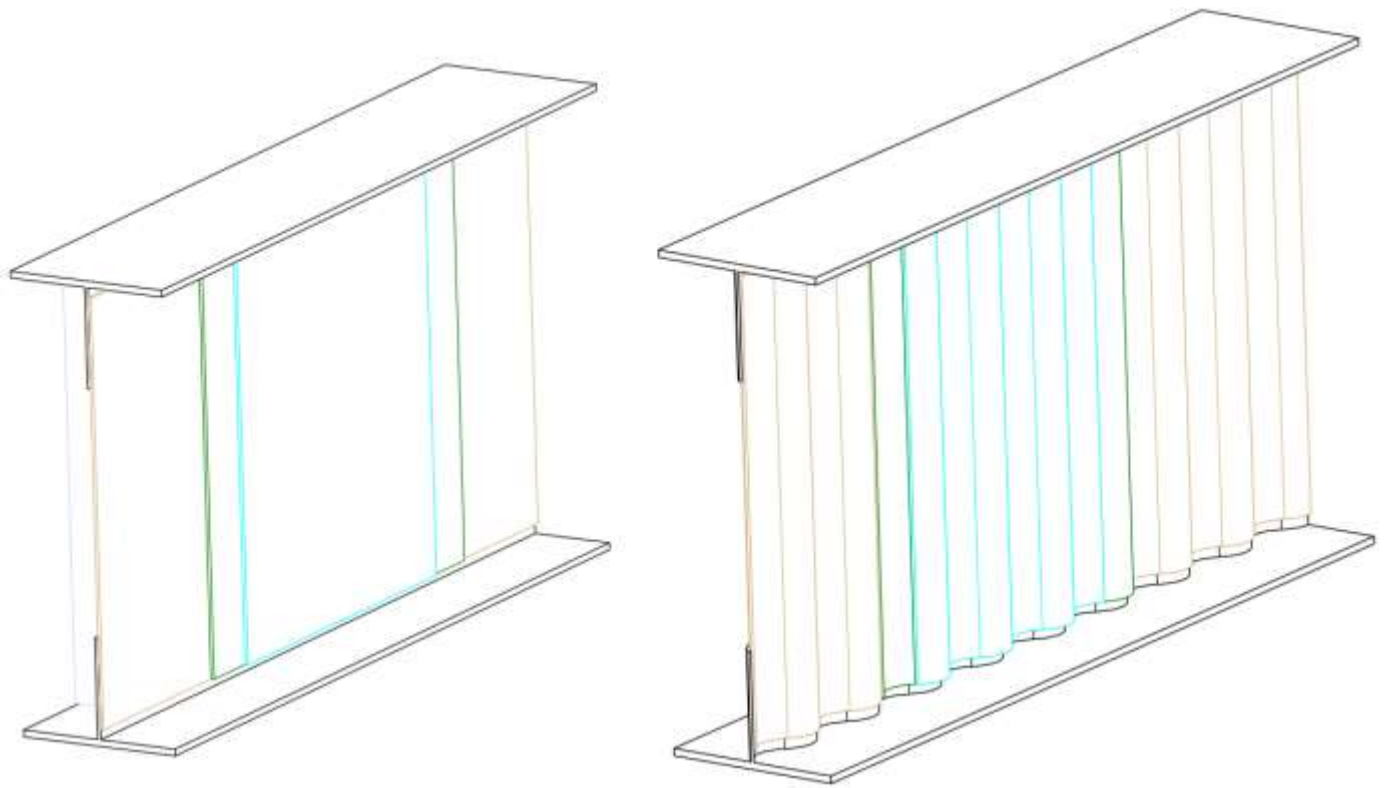
## **2 Етапи моделювання:**

### **2.1 Створення геометрії**

Геометрія була побудована в програмному комплексі САТІА. Після моделювання геометрія була імпортована в Patran.

Так як референсом ремонту є задній лонжерон горизонтального стабілізатора Боїнга 777-800, для спрощення моделювання та аналізу, геометрія була спрощена. Полки балки моделювалися паралельними і симетричними щодо вертикальної осі. Висота балки постійна, на відміну від реальної конструкції. Заокруглення ремонтних пластин по кутах також були опущені. Також в моделі не враховується вплив обшивки на балку.

На кресленнях нижче чорним кольором зображені хорди, помаранчевим кольором стінка і змінна стінка, зеленим і синім подвоювач і потроювач.



*Рисунок 6 Ізометричний вид балок*

Моделюється одна секція між ребрами жорсткості. Ребра жорсткості поділяють стінку на секції що в свою чергу збільшує допустиме навантаження на втрату стійкості стінки.

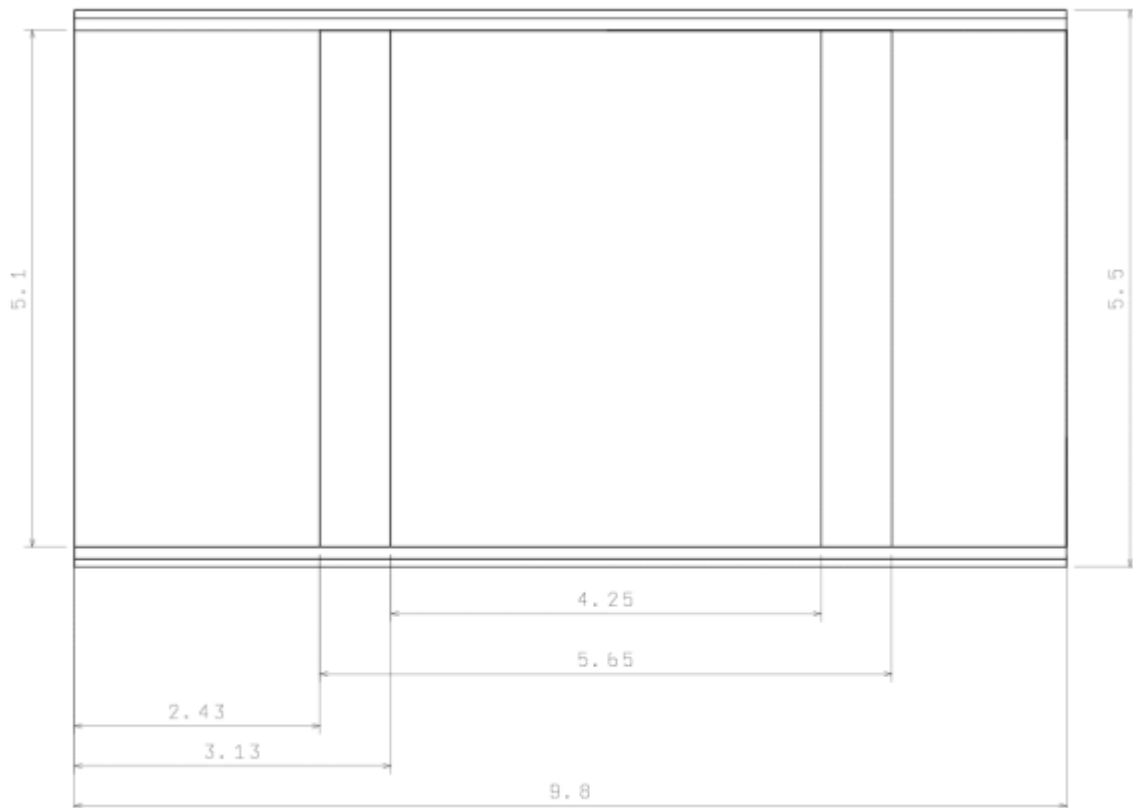
Суть хвилястої стінки що роль ребер жорсткості виконує геометрія самої стінки, тому потреба в них відсутня.

**Висота балки 5,5 дюйма.**

**Довжина сегмента 9.8 дюйма.**

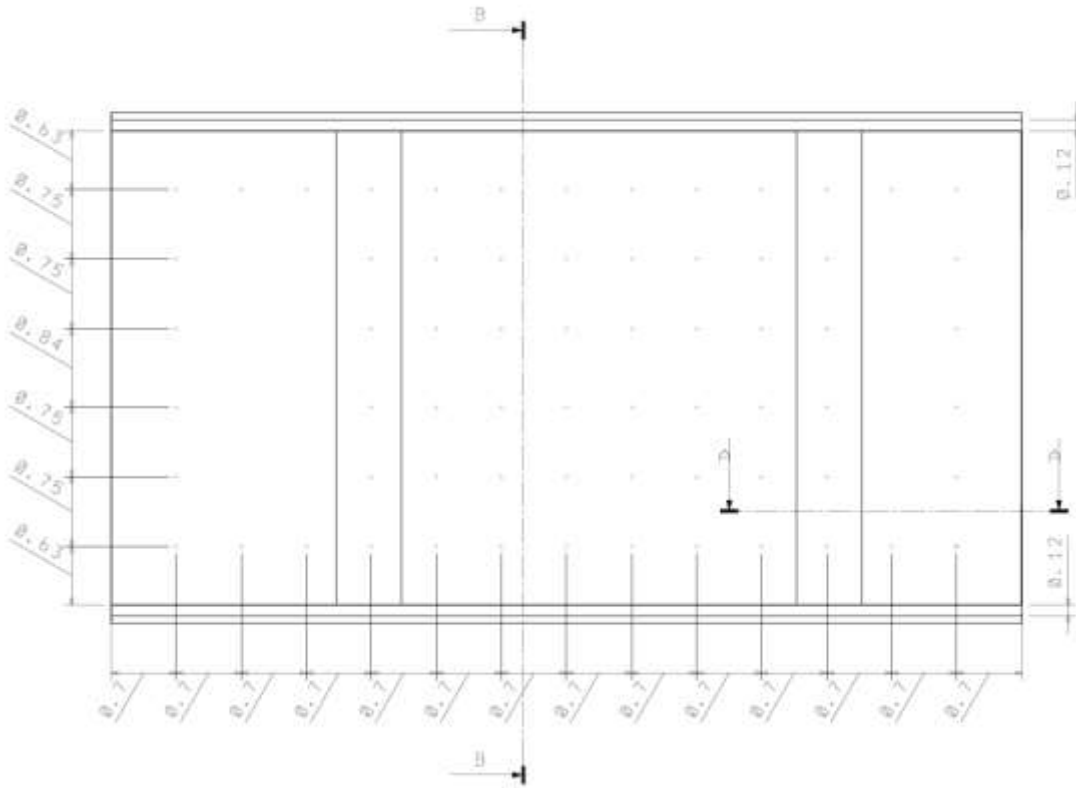
### 2.1.1 Креслення стандартної балки

Обидві ремонтні накладки мають товщину 0.04 дюйма і ширину 5,1 дюйма. Для плавної передачі навантаження одна пластина переклепується додатковим рядом заклепок. Довжина відповідно у подвоювача 5.65 дюйма, а у потроювача 4.25 дюйма. Крок заклепок 0,7 дюйма.



*Рисунок 7 Вид спереду. Розміри модельованої секції.*

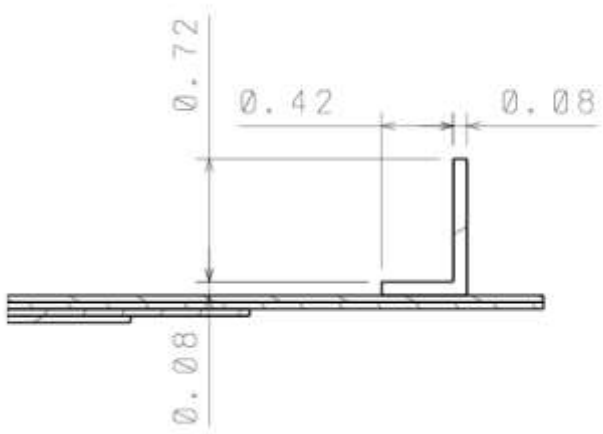




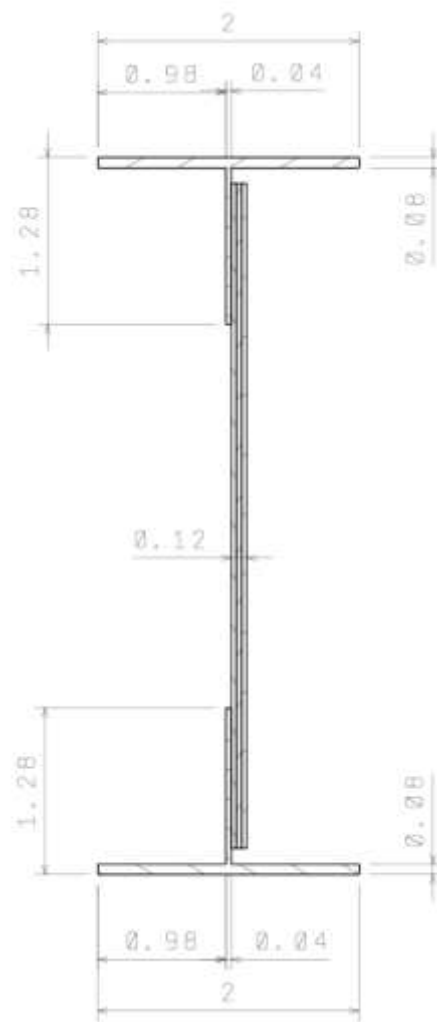
*Рисунок 8 Розташування кріплення*



*Рисунок 9 Вид ззаду. Розташування ребер жорсткості.*

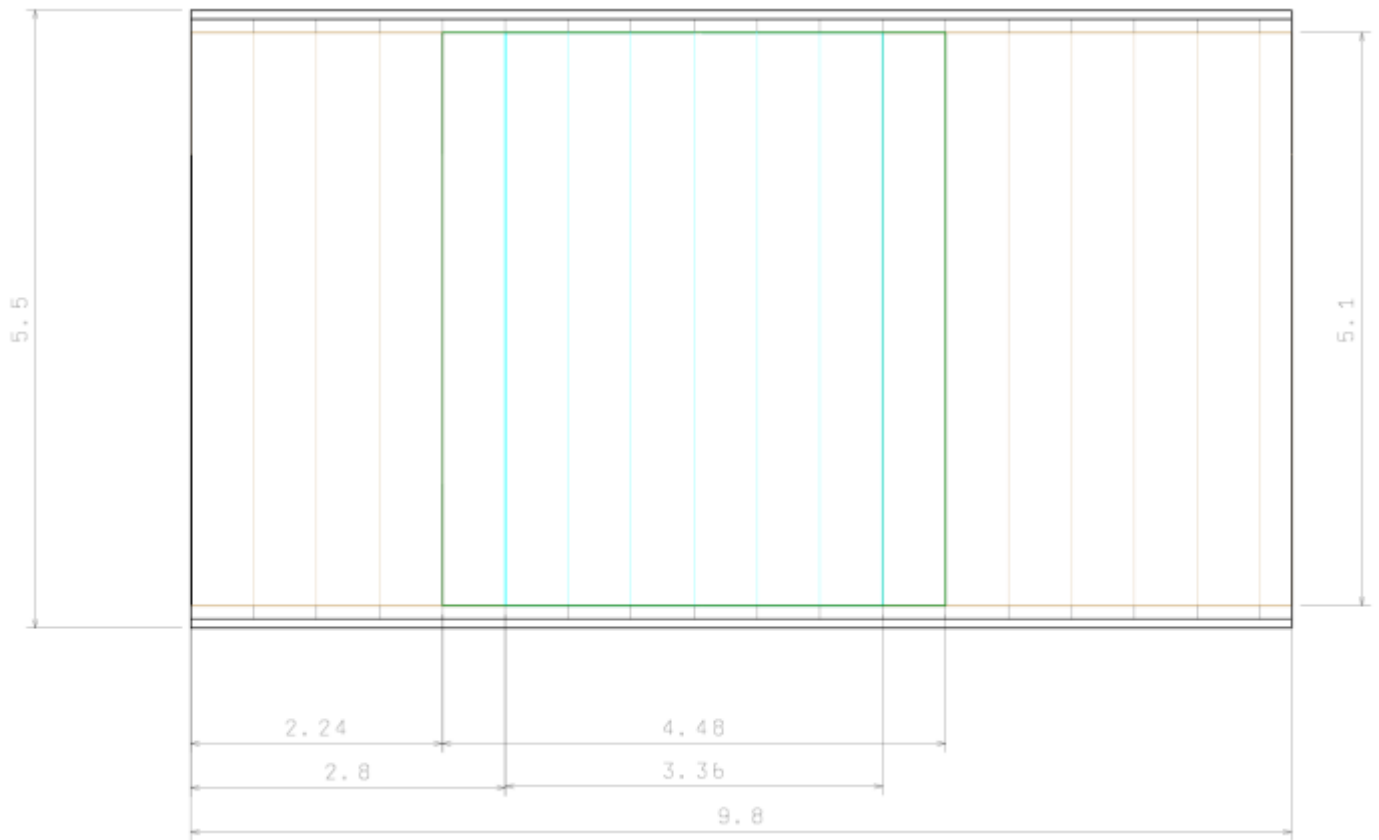


*Рисунок 10 Переріз А-А, Перетин ребра жорсткості*



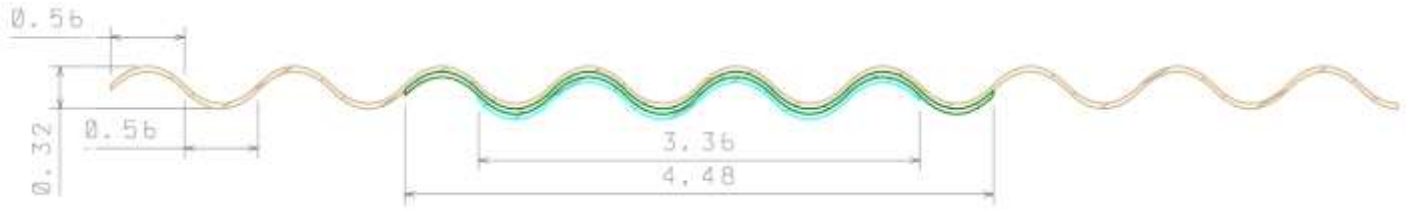
*Рисунок 11 Переріз В-В*

## 2.1.2 Креслення балки з хвилястою стінкою

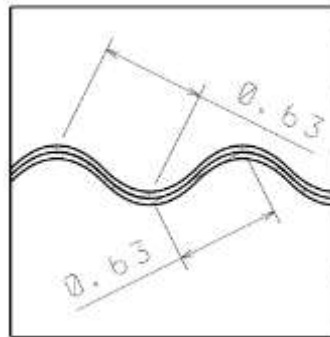


*Рисунок 12 Вид спереду. Розміри модельованої секції.*





*Рисунок 15 Переріз С-С, Геометрія хвилястої стінки.*

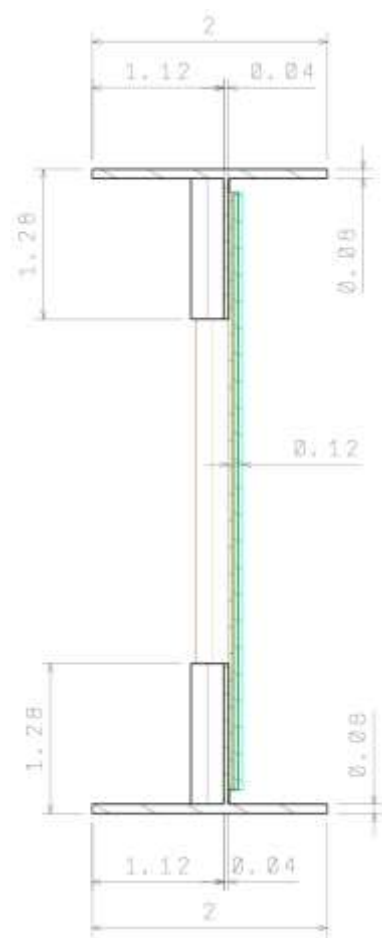


*Рисунок 16 Переріз D-D,  
Крок кріпильних деталей.*

*Крок заклепок повинен бути в діапазоні 4-6 діаметрів заклепок.*

Заклепки мають діаметр 5/32 дюйма.

$$4D = \frac{4 * 5}{32} = 0.625 < Pitch = 0.63 < 6D = \frac{6 * 5}{32} = 0.9375$$



*Рисунок 17 Переріз Е-Е*

## 2.2 Створення сітки

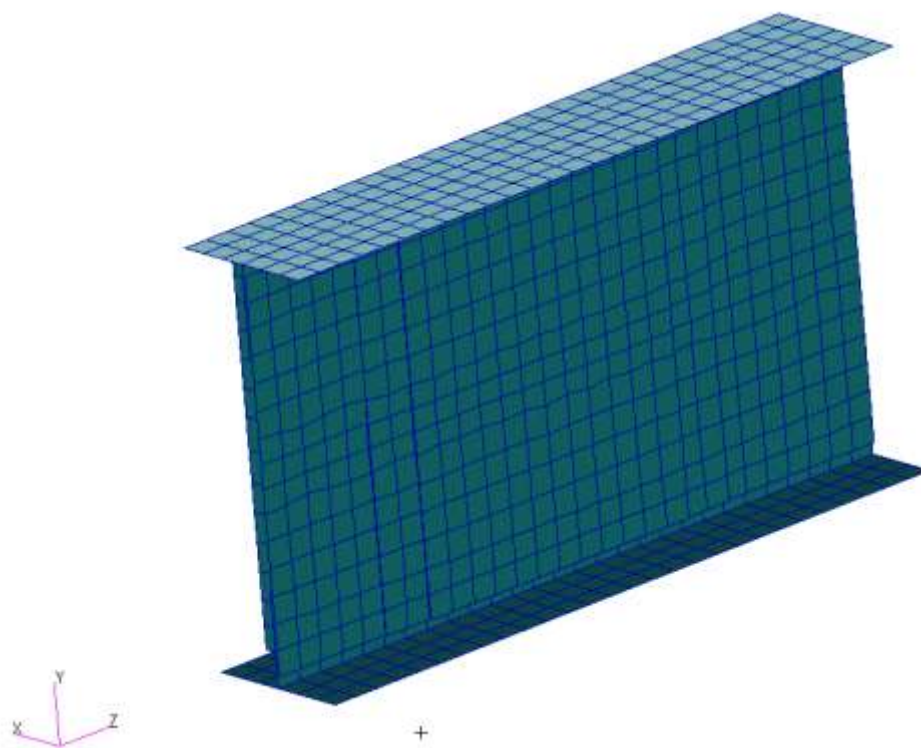
### 2.2.1 Стандартної балки

Сітка SE складається з прямокутних елементів. Ребра жорсткості були замодельовані 1-D елементом (bar).

Розмір прямокутних елементів прийнятий половині кроку заклепок.

$$mesh\ size = \frac{pitch}{2} = \frac{0.7}{2} = 0.35in$$

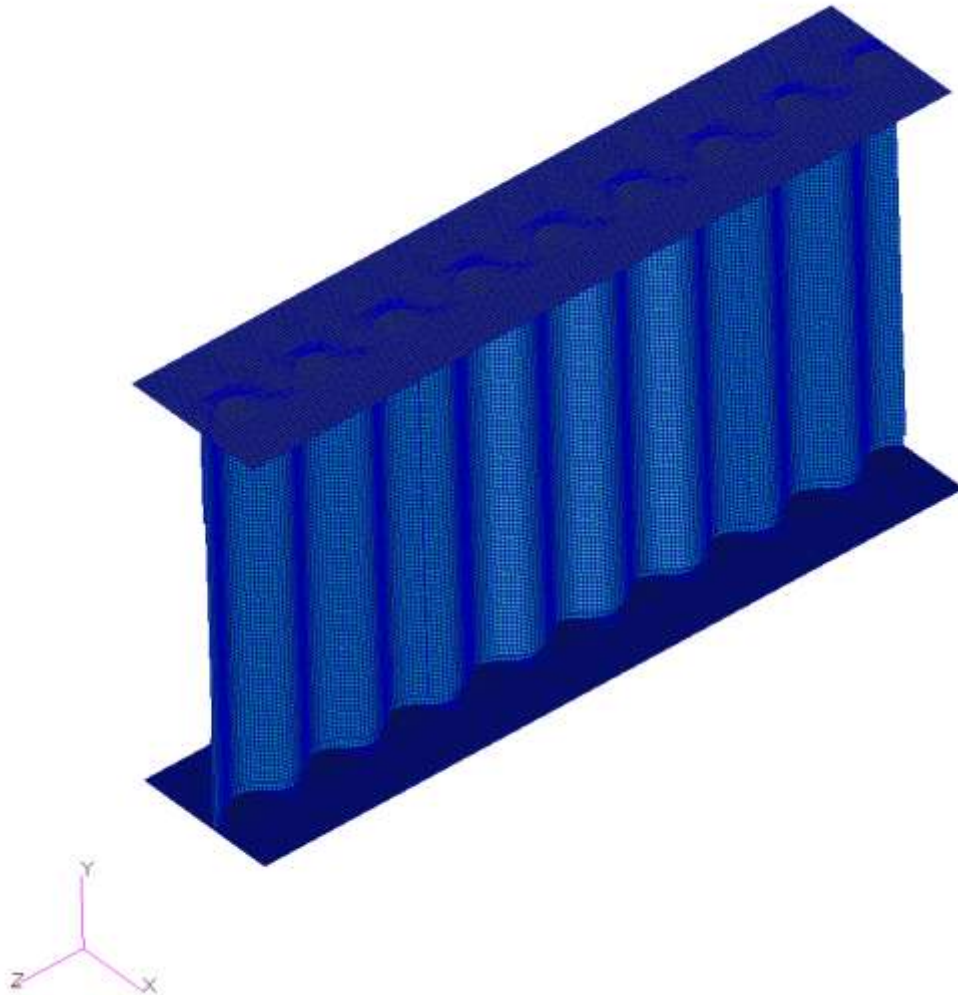
для того, щоб було зручно моделювати заклепки.



*Рисунок 18 Сітка балки з плоскою стінкою*

### 2.2.2 Балки з хвилястою стінкою

Розмір прямокутних елементів прийнятий 0,05 дюйма, для більш точного моделювання стінки.



*Рисунок 19 Сітка балки з хвилястою стінкою*

### 2.3 Проводиться перевірка моделі.

Забезпечена топологічна конгруентність, проведена перевірка дублікатів елементів, для плоских елементів забезпечене узгодження нормалей та визначино відношення Якобіана.



## 2.4 Створення властивостей матеріалів. (ізотропні матеріали)

Верхня хорда зроблена з алюмінію 2024-T3511 шляхом екструзії.  $E=10.8\text{ksi}$

Нижня хорда зроблена з алюмінію 7150-E77511 шляхом екструзії.  $E=10.4\text{ksi}$

Стінка і накладні пластини зроблені з алюмінію 7075-T6.  $E=10.8\text{ksi}$

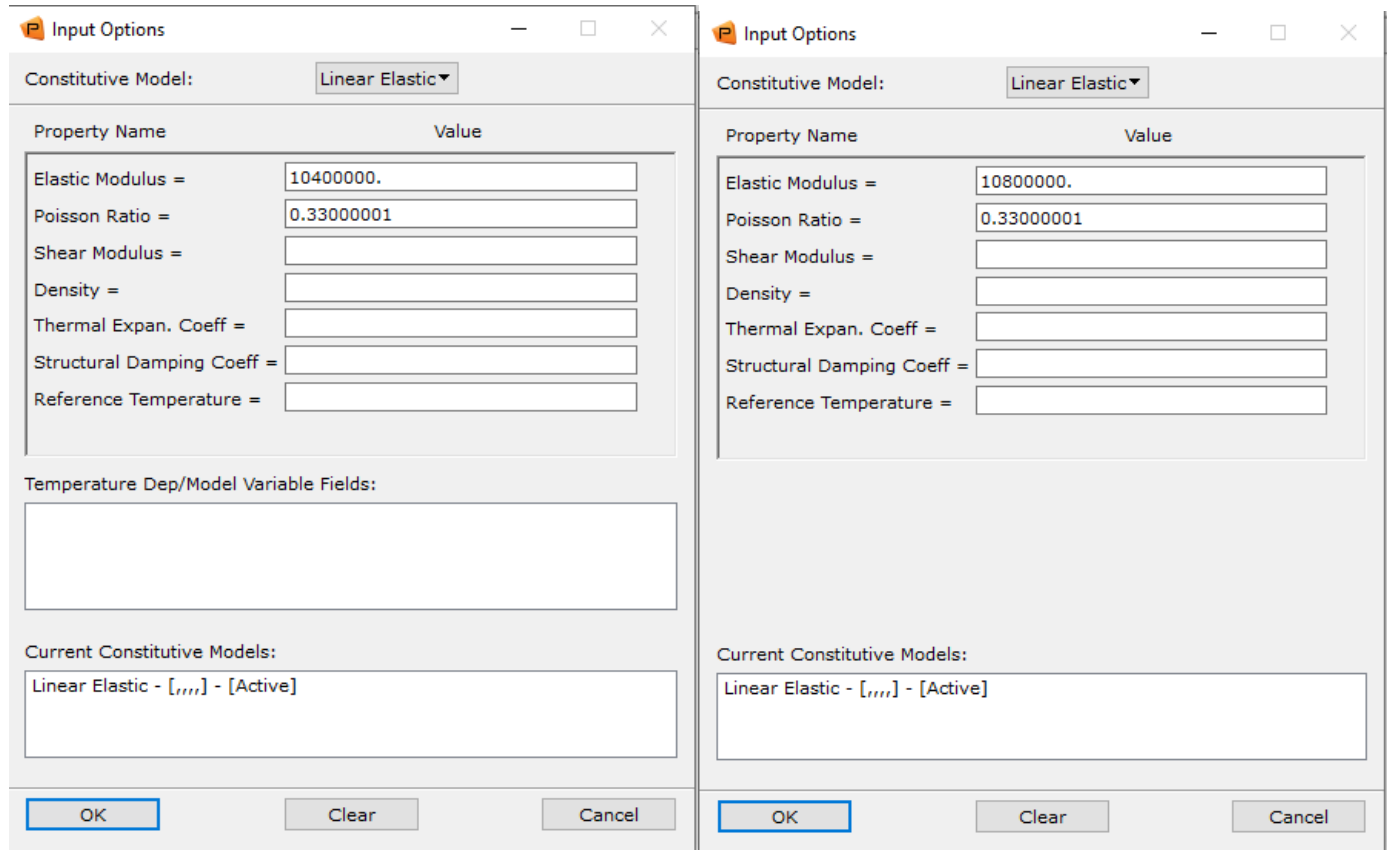


Рисунок 20 Властивості матеріалів.

## 2.5 Крайові умови та зовнішнє навантаження

### 2.5.1 Стандартної балки

Полиці закріплені від переміщення уздовж осей  $x$  і  $z$ .

Стінка закріплена від переміщення уздовж осей  $x$  і  $y$ .

В сумі балка консольно закріплена.

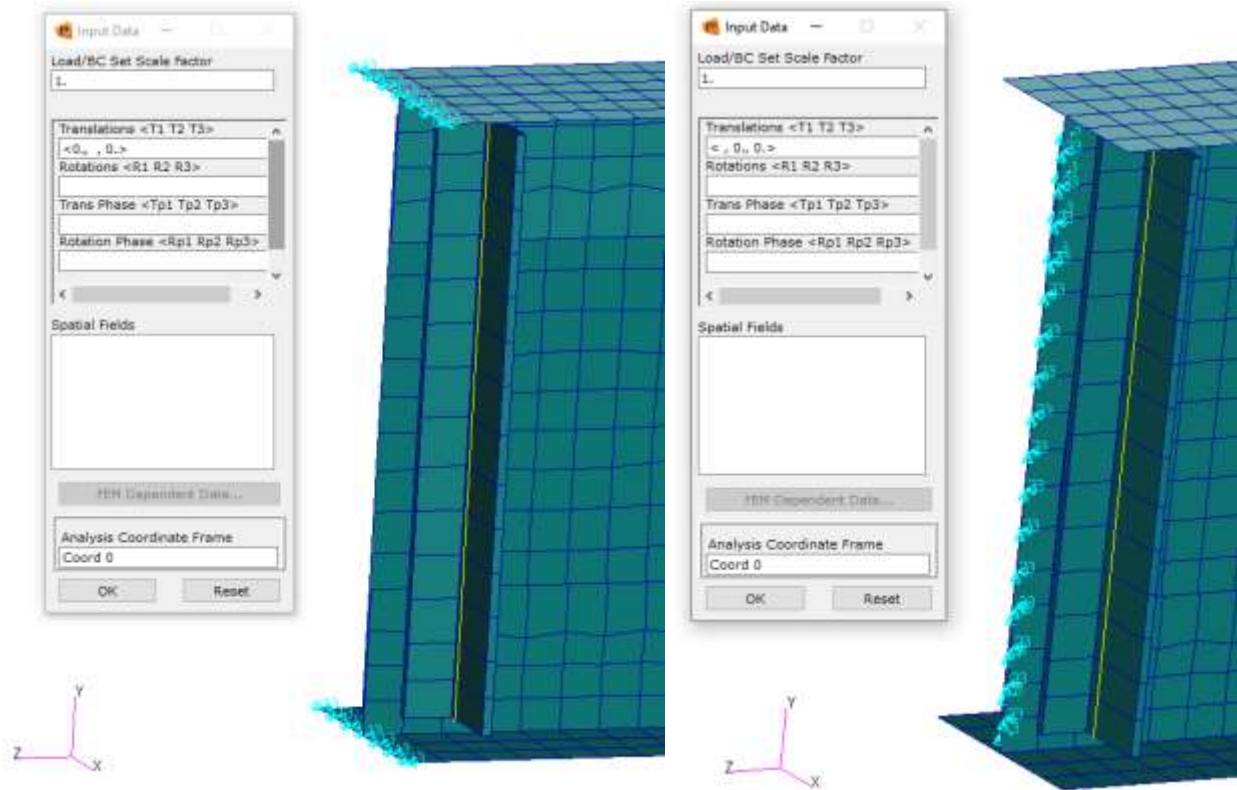


Рисунок 21 Крайові умови

Навантаження прикладається в один вузол і rbe3 елементом розподіляється по балці таким чином, що полки сприймають навантаження уздовж осей x і z, а стінка навантаження уздовж осі y.

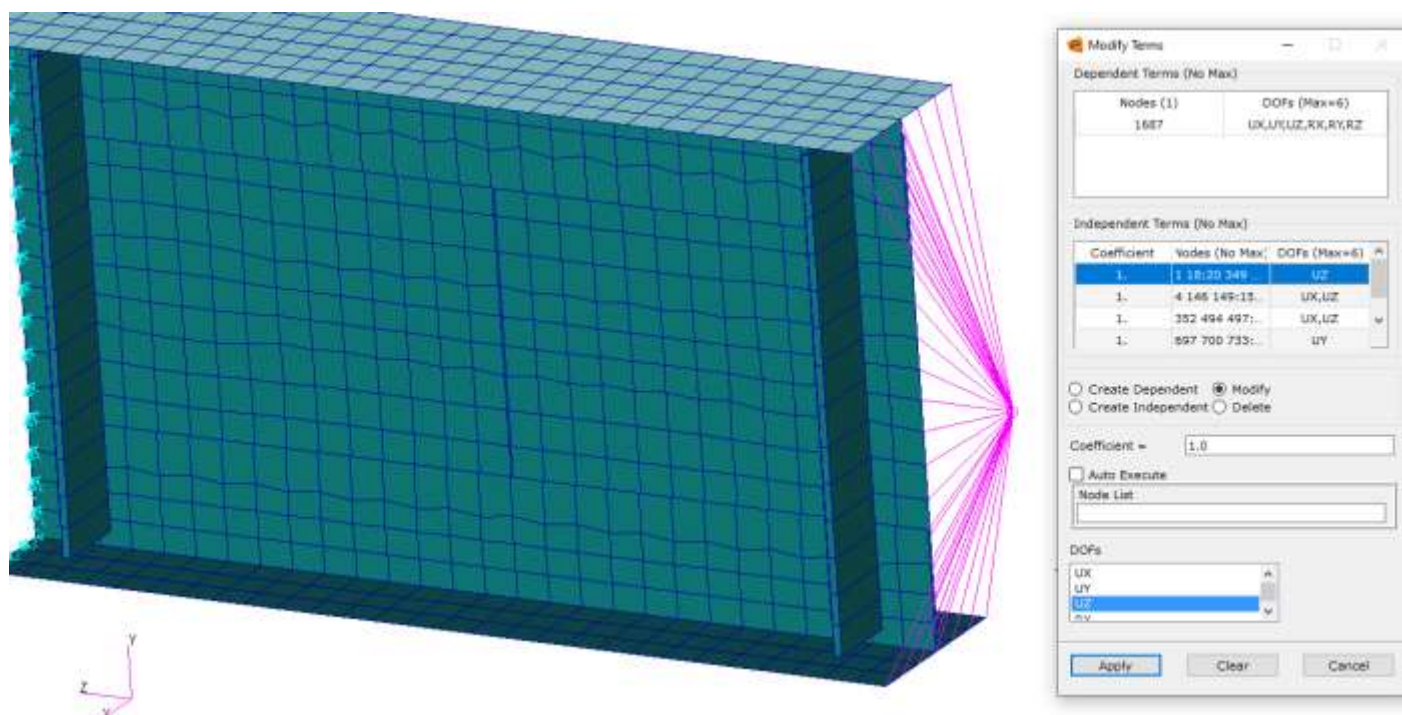


Рисунок 22 Місце прикладання навантаження.

## 2.5.2 Балки з хвилястою стінкою

Полиці закріплені від переміщення уздовж осей  $x$  і  $z$ .

Стінка закріплена від переміщення уздовж осі  $y$ .

В сумі балка консольно закріплена.

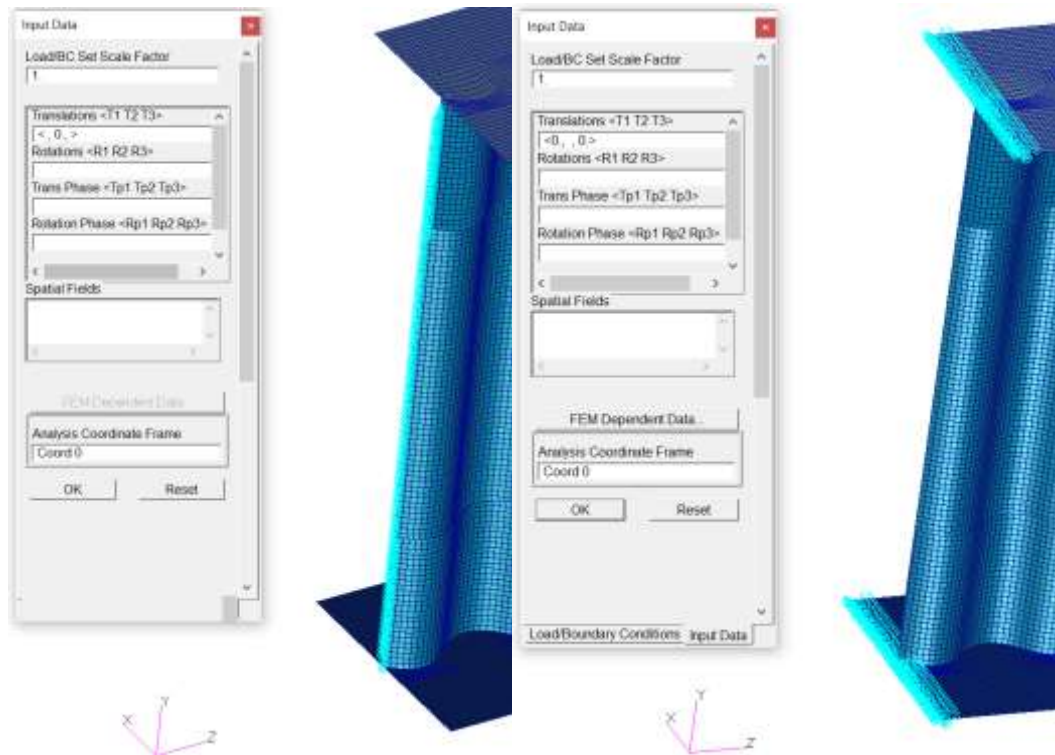
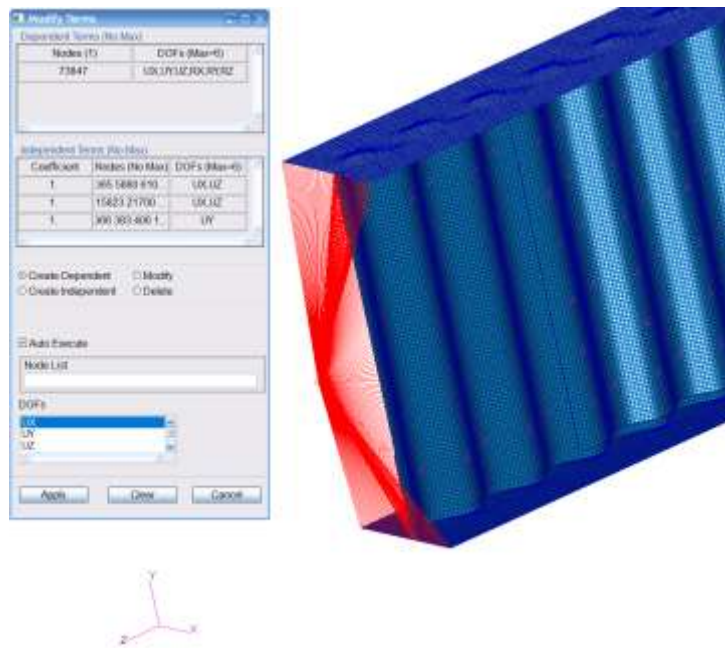


Рисунок 23 Крайові умови

Навантаження прикладається в один вузол і  $gbe3$  елементом розподіляється по балці таким чином, що полиці сприймають навантаження уздовж осей  $x$  і  $z$ , а стінка навантаження уздовж осі  $y$ .



*Рисунок 24 Місце прикладання навантаження.*

У вузол окремими навантаженнями прикладається поздовжнє навантаження яка стискає балку, згинальний момент і вертикальне навантаження.



*Рисунок 25 Величина навантаження.*

## 2.6 Моделювання заклепок

Заклепки моделюються rbe2 елементами. Вони передають тільки переміщення.

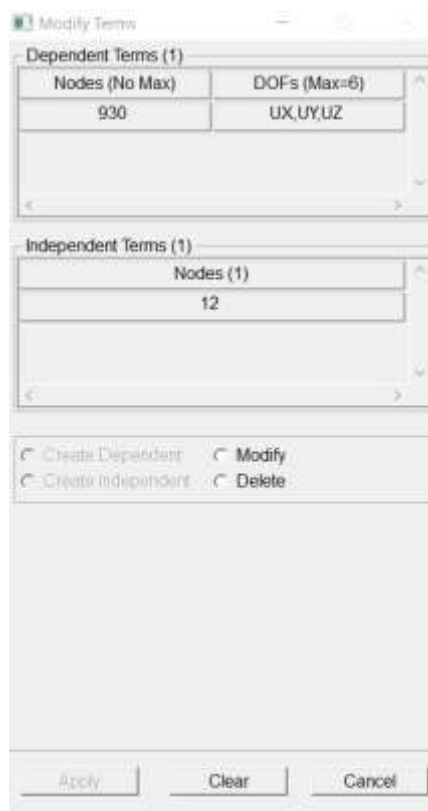


Рисунок 26 Приклад моделювання заклепок.



## 2.7 Результати

У місцях прикладання навантажень виникає місцеве підвищення збільшення деформації, і покладаючись на принцип Сен-Венана ми можемо прибрати відображення місця прикладання навантаження.

Згинаючий момент:

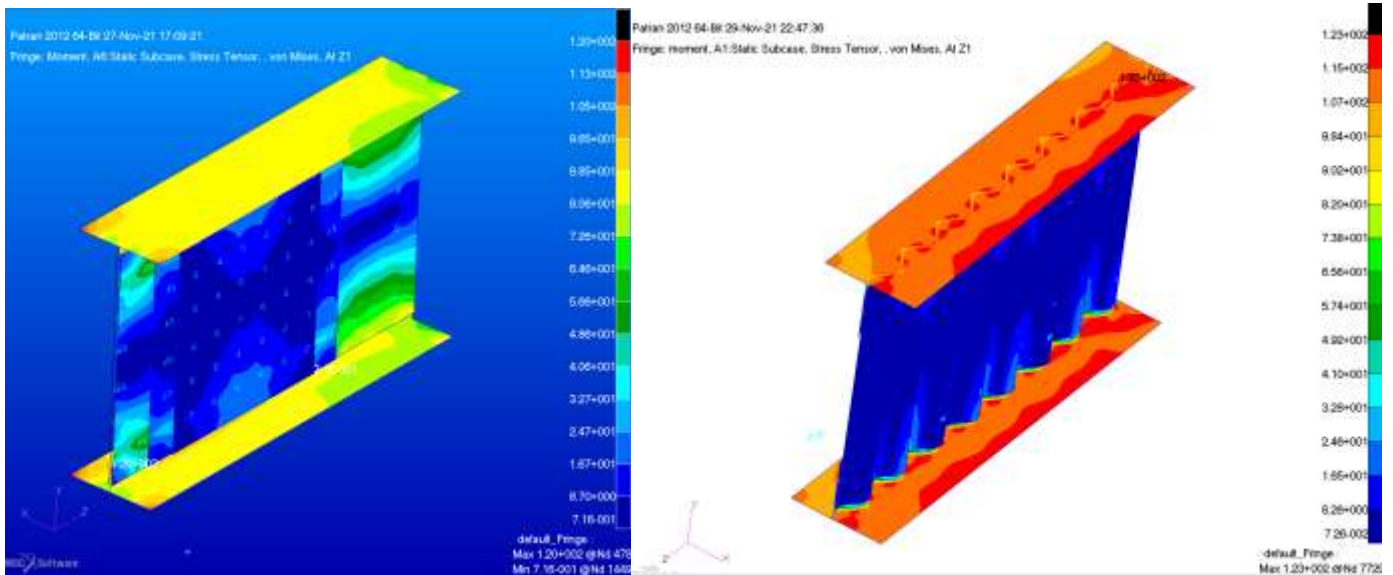


Рисунок 27 Напруження в балках від дії згинального моменту.

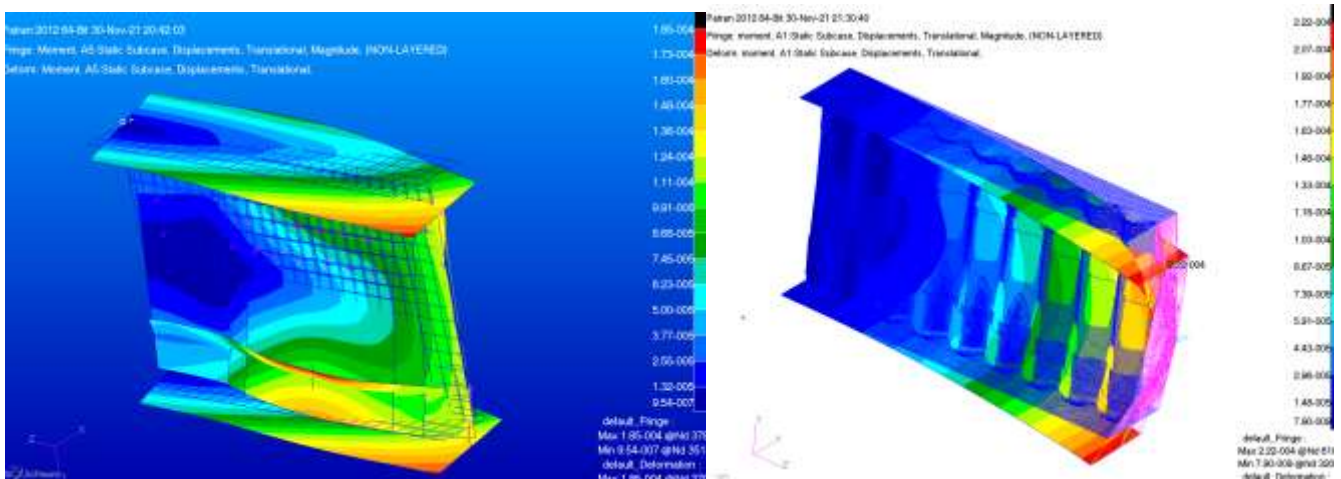
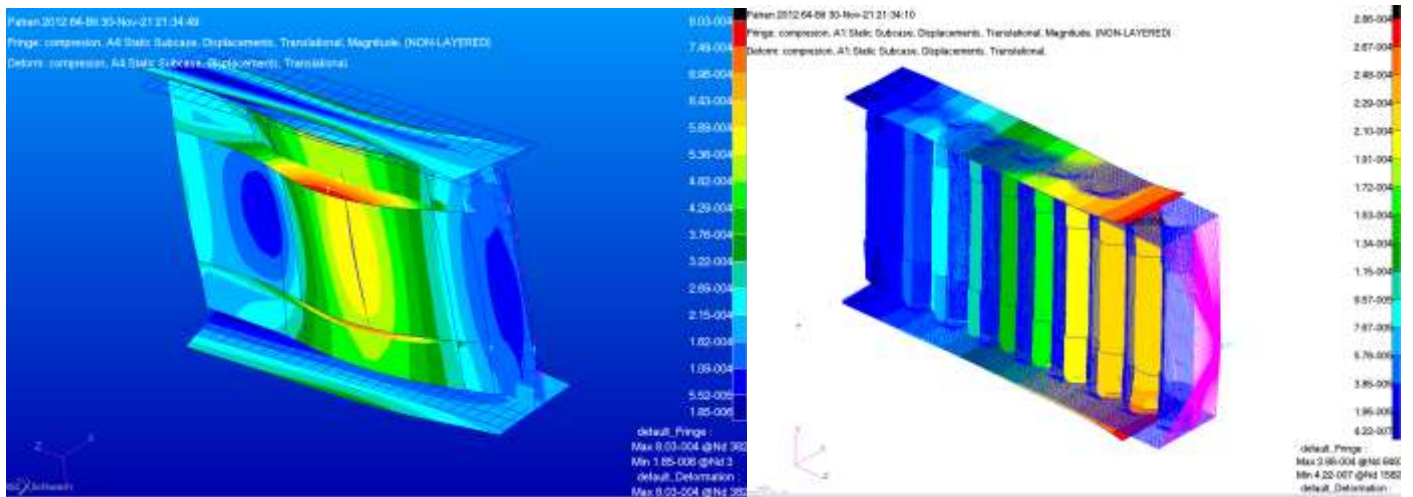
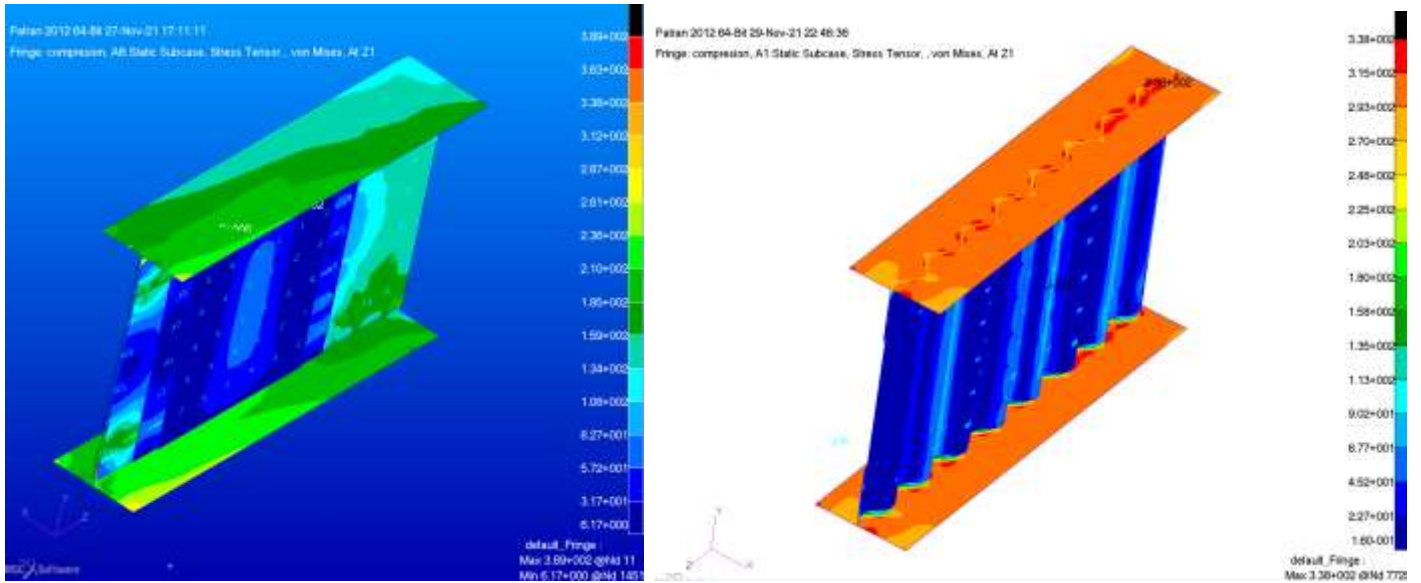


Рисунок 28 Деформація балок при прикладенні згинального моменту.

# Стиск





## Поперечна сила

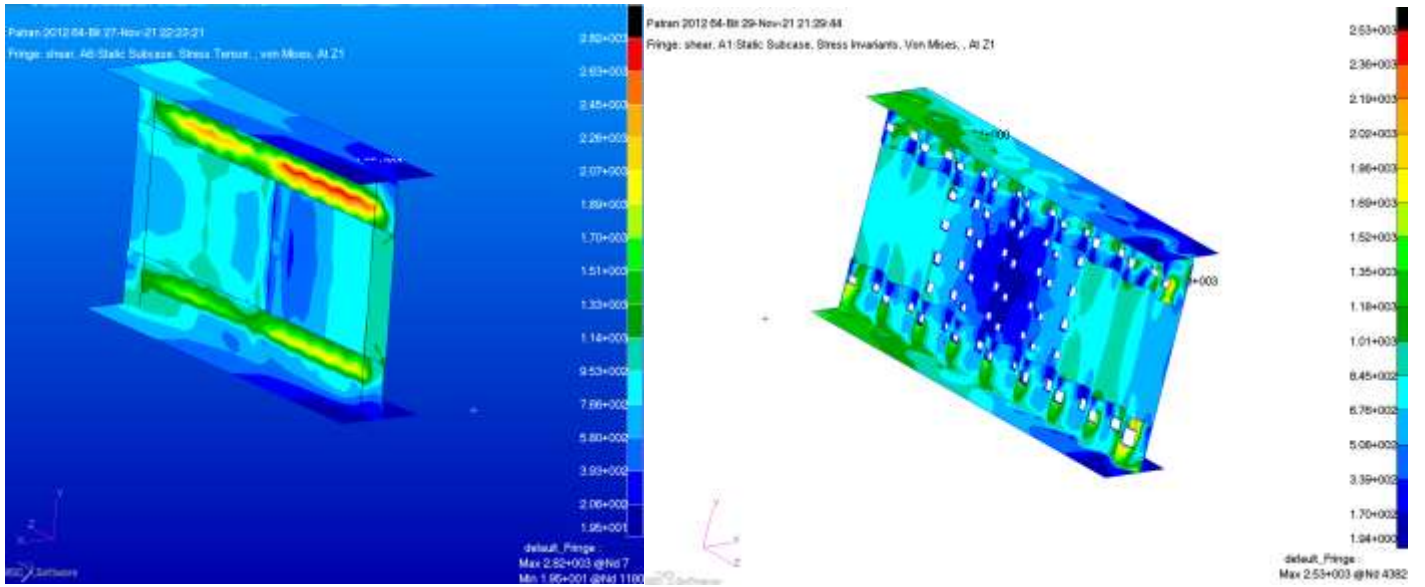


Рисунок 31 Напруження в балках від дії поперечної сили.

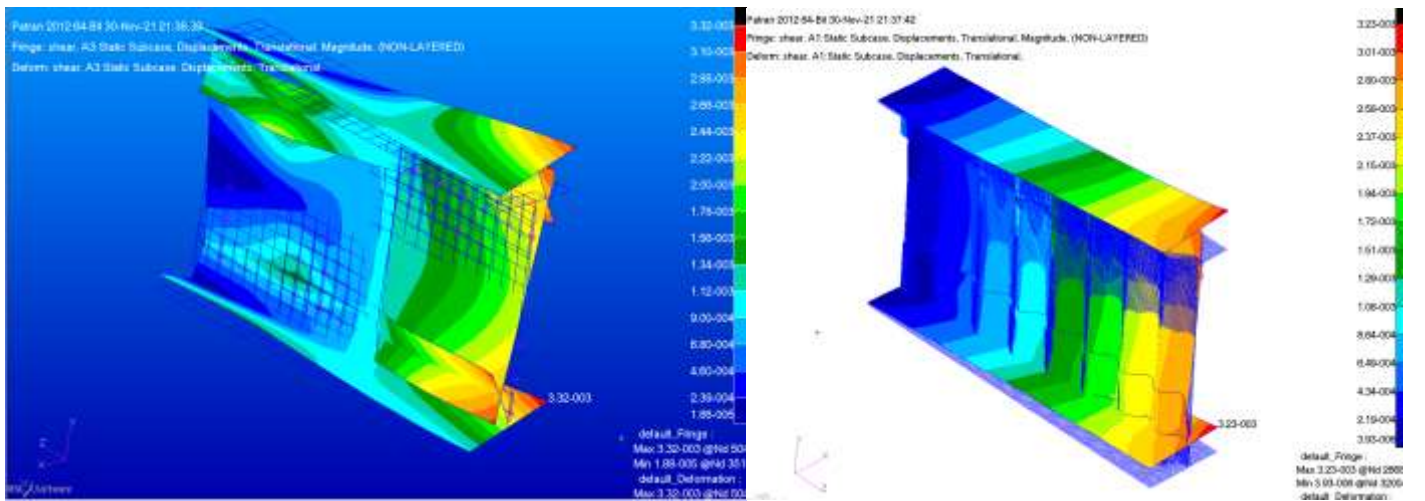


Рисунок 32 Деформація балок при прикладені поперечної сили.

## 2.8 Порівняння результатів

Для перевірки правильності побудування моделі визначимо напруження в полицях від стискання та моменту аналітичним методом, без урахування ремонтних накладок.

У першому варіанті в перетин взяті полки і стінка як на *Рисунок 11 Переріз В-В*, але без накладних пластин. У другому варіанті взято той же перетин без стінки, тому що мається на увазі що стінка не зможе сприймати навантаження уздовж балки.

Таблиця 2.1. Перший варіант.

Площа	0,62	in <sup>2</sup>
I <sub>x</sub>	3,22	in <sup>4</sup>
I <sub>y</sub>	0,11	in <sup>4</sup>
y <sub>max</sub>	2,75	in
Moment	100	lbs*in
shear	100	lbs
tension	100	lbs
f <sub>max_moment</sub> =	86	psi
f <sub>max_comp</sub> =	-162	psi

Таблиця 2.2. Другий варіант.

Площа	0,32	in <sup>2</sup>
I <sub>x</sub>	2,3503	in <sup>4</sup>
I <sub>y</sub>	0,1067	in <sup>4</sup>
y <sub>max</sub>	2,75	in
Moment	100	lbs*in
shear	100	lbs
tension	100	lbs
f <sub>max_moment</sub> =	117	psi
f <sub>max_comp</sub> =	-312	psi

Напруги отримані з патрана для стандартної балки:

$$f_{\max\_moment} \approx 80 - 88\text{psi}$$

$$f_{\max\_comp} \approx 159 - 185\text{psi}$$

Напруги отримані з патрана для балки з хвилястою стінкою:

$$f_{\max\_moment} \approx 107 - 123\text{psi}$$

$$f_{\max\_comp} \approx 293 - 315psi$$

Похибка обчислена за формулою:

$$\delta = \frac{|f_{an} - f_{FEM}|}{f_{an}} * 100\%$$

Похибка для моделі балки з стандартною стінкою:

$$\delta_{moment} = 6.89 - 2.83\%$$

$$\delta_{comp} = 1.44 - 9.67\%$$

Похибка для моделі балки з хвилястою стінкою:

$$\delta_{moment} = 9.35 - 4.87\%$$

$$\delta_{comp} = 6.66 - 0.79\%$$

Похибка напружень не перевищує 10%. Робимо висновок, що при умові того що напруження взяті з моделей в яких ремонтувалась стінка, моделі пройшли валідацію, тобто їх можна використовувати для досліджень несучої спроможності балок.

### **3 Аналіз отриманих результатів.**

#### **3.1 Аналіз деформації**

При дії стиснення і моменту як і очікувалося стінка практично не сприймає ніяке навантаження, але полки деформуються більше. Тим самим збільшується навантаження на полиці в порівнянні з стандартною стінкою. Але плюсом хвилястої стінки є те, що через те що сила в балці зі звичайною сіткою переходить на пластини, а потім назад на стінку, виникає згинальний момент з площини стінки. Подібний ефект не спостерігається в балці з хвилястою стінкою.

При дії поперечної сили Напруги в полицях такі ж як і при дії згинального моменту. Але напруги в плоскій і хвилястою стінках майже однакові.

### 3.2 Аналіз навантаження кріпильних елементів

Для зручності аналізу в таблиці представлені найнавантаженіші елементи.

$F_x$ - відривні зусилля.

$F_y/F_z$  - зусилля зрізу.

	Згинальний момент			Стиск			Поперечна сила		
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
Стандартна балка	0,03	0,23	1,36	0,12	1	4,54	0,47	16,01	12,29
Балка з хвиль. стінкою	0,01	0,03	0,05	0,04	0,17	0,22	2,85	5,65	13,67

Виходячи з даних таблиці ми бачимо, що при дії стиснення і згинального моменту на балку, заклепки в балки з хвилястою стінкою на порядок менше навантажені.

При дії поперечної сили проблемою став відрив заклепки. у той час як зріз так само менше ніж у балки з стандартною стінкою.

### 3.3 Аналіз втрати стійкості

Перевірку стійкості виконувалася за допомогою Patran. Результатом розрахунків є Factor-це величина у скільки разів прикладена навантаження менше тієї при якій конструкція втратить стійкість.

	Стиск	Згинальний момент	Поперечна сила
Factor для балки з стандартною стінкою.	15,08	56,12	3,14
Factor для балки з хвилястою стінкою.	88,73	243,16	22,63
Різниця у відсотках	488	333	621

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

Таблиця 4.1 Опис стартап-проекту

Зміст проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Міцність балки літака з хвилястою стінкою з відновлюваними конструктивними елементами типового ремонту	Машинобудівна галузь	1) Зменшення ваги балки
		2) Збільшення крутильної жорсткості балок.
		3) Можливість використання хвилястих стінок

Запропонована автором методологія дозволяє визначити раціональність використання хвилястих стінок з точки зору ремонтпридатності.

## 4.2 Технологічний аудит

Реалізувати ідею проекту можна за допомогою проектних розрахунків.

В табл. 4.2 проведений аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї у порівнянні з конкурентом №1

*Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту*

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	W	N	S
1.	Грошові витрати		—	Мій проект та конкурент
2.	Складність розрахунку	—	Мій проект	—
3.	Точна оцінка зміни внутрішніх зусиль	—	—	Мій проект та конкурент

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 4.3

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Використання балок з хвилястою стінкою з точки зору ремонтпридатності в літаках.	Теоретичний розрахунок	є	є
		Практичне використання		
Обрана технологія може бути реалізована				

По показникам характеристики стану ринку можна зробити висновок, що даний проект є рентабельним.

Визначення потенційних груп клієнтів.

Потенційні групи клієнтів можна умовно поділити на первинних та вторинних споживачів продукту. Первинною групою є літальні апарати. Надалі визначимо потенційні групи клієнтів. (Таблиця 4.4)

Таблиця 4.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Зменшення ваги літака	Машинобудівна галузь	фінанси	Точність та розширення можливостей абсолютного використання ресурсу

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища, складаємо таблицю факторів, що допоможуть виходу проекту на ринок, та врахування факторів, що цьому можуть перешкодити (табл. 4.5)



Таблиця 4.5 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення собівартості	Зменшення попиту використання	Вдосконалення вже існуючих методик
2.	Розробка покращеної методики		

Таблиця 4.6 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Економія матеріалу	Економність	Гідна оплата праці
2.	Підвищений попит у галузі машинобудування	Проведення ремонтних робіт	Зрозуміння що балки з хвилястою стілкою можливо використовувати.

Надалі проведемо аналіз пропозиції, визначивши загальні риси конкуренції на ринку (табл.4.7).

Таблиця 4.7 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції олігополія	Невелика кількість підприємств, які ведуть між собою здебільшого нецінову конкуренцію.	Не відрізняється помітним впливом
Національний рівень конкурентної боротьби	Даний ринок достатньо відкритий	Помітний вплив на модернізації галузі
Внутрішньогалузева ознака	Боротьба ведеться між методиками розрахунків	Заощадження коштів в наслідок введення методики
Товаро-родова конкуренція за видом методики	Здатність задовольнити потреби галузі	Не велика кількість конкурентів
Нецінова конкуренція	Підвищення якості методики в порівнянні з іншими	Робота над постійним покращенням методики
Марочна інтенсивність	Розглядаємо в якості конкурентів схожі методики	Незалежність від ринку

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл.4.8).

Таблиця 4.8 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари-замінники
	Немає	Бар'єрів впровадження немає	Укрзалізниця	Загрози з боку замінників є
Висновки:	Низька інтенсивність	Є можливість входження в галузь	Диктують умови роботи на ринку. Такі, як час на розрахунок і забезпечення потрібним програмним забезпеченням	Відсутність обмежень від замінників

З огляду на конкурентну ситуацію існує можливість виходу на ринок даної галузі. Щоб бути конкурентоспроможним на ринку даному проекту необхідно розробити програмне забезпечення для швидкісного розрахунку методики.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл.4.8, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту табл.4.2, вимог споживачів до товару табл.4.4 та факторів

маркетингового середовища табл.4.5-4.6 визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється в табл.4.9.

*Таблиця 4.9 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності*

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Менша потреба у витратах	Для методики розрахунку мала необхідність в затратах
2	Використання отриманих даних	Використання балок з хвилястою стінкою

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл.4.9) проведемо аналіз сильних та слабких сторін мого стартап-проекту (табл.4.10).

*Таблиця 4.10 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін*

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг методики у порівнянні з проектом конкурента						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Менша потреба у витратах	20					•		
2	Точність розрахунків	20			•				
3	Використання	20					•		

	отриманих даних								
4	Точність розрахунку в проекті	15			●				

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.11) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.4.10).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

*Таблиця 4.11 SWOT- аналіз стартап-проекту*

Сильні сторони: Використання легших конструкцій	Слабкі сторони: відсутність програмної підтримки методики
Можливості: завоювання частини галузі	Загрози: розробка точнішої методики

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання

ресурсів (табл.4.12).

Таблиця 4.12 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Публічне ознайомлення, перевірка з існуючими методиками (аналогами), державне затвердження	Висока	5 місяці
2	Публічне ознайомлення, перевірка на справжньому експерименті, державне затвердження	Висока	4 роки

Із зазначених альтернатив виберемо першу, бо отримання ресурсів є більш простим та ймовірним а строки реалізації – більш стислими.

### 4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.4.13).

Таблиця 4.13 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Boeing	Повністю готові	Високий	Висока	Складно

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформуванати базову стратегію розвитку (табл.4.14).

Таблиця 4.14 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Альтернативна	Охоплення на 70-80 %	Конк.№1	Спеціалізація

Далі виберемо стратегію конкурентної поведінки (табл.4.15).

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Копіювати лише загально використані ідеї	Стратегія заняття галузі

Результатом даного підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку:

- використання в проекті сучасних технологій;
- напряму роботи лише у заданій ніші ринку.



#### 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл.4.16 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.16 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Не потребує великих затрат на розрхунки	Зменшення собівартості	Достойна оплата праці
2	Підвищений попит у галузі машинобудування	Збільшення виробництва та ремонту	Збільшення кількості працівників

Далі визначаємо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл.4.19).

Таблиця 4.17 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Одноразова покупка	Інформування	Глибока	Державне затвердження методики

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл.4.18).

Таблиця 4.18 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Комунікабельні	Мережа інтернет, наукові праці	Реклама методика на конференціях	Розширення цільових клієнтів	Показати, що наша методика краща та доцільніша

**Результати маркетингового дослідження:**

- даний стартап-проект є актуальним, тому що може вивести машинобудівну галузь на наступну сходинку
- мала кількість конкурентів
- унікальність ідеї
- впровадження в ринок є абсолютно доцільним, прибутковим.

## **Висновки**

## Література

- 1) Abbas H.H. Analysis and design of corrugated web I-girders for bridges using high performance steel: Ph.D. dissertation. –Lehigh University, Bethlehem, USA, 2003. – 425 p.
- 2) Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни: издание второе, переработанное и дополненное [Текст] / В.З. Власов. –М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. –568 с.
- 3) Остриков, Г.М. Легкие стальные конструкции покрытий производственных зданий: Экспресс-информация. Серия: Промышленное строительство. No1 [Текст] / Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов. –Алма-Ата : КазЦНТИС Госстроя КазССР, 1987. –41 с.
- 4) Остриков, Г.М. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой [Текст] / Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов, В.В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. –No 1. –С. 68-70.
- 5) Металлические конструкции. В 3т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. Справочник проектировщика / Под общ. ред. В.В. Кузнецова –М.: АСВ, 1998. –512 с.
- 6) Долинский В.В. Стальные двутавровые ригели с гофрированной стенкой в сейсмостойких многоэтажных рамных каркасах: Авто реф. дис. ...канд. тех. наук. –Новосибирск, 1985. –22 с.
- 7) Металлические конструкции. В 3т. Т.1. Элементы конструкций: Учебник для ВУЗов по специальности "Промышленное и гражданское строительство" / Под ред. В.В. Горева –М.: Высшая школа, 2004. –551 с.
- 8) Металлические конструкции: учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др. –М.: Академия, 2006. –688 с.
- 9) Остриков, Г.М. Оптимальные конструктивные формы стальных двутавровых балок [Текст] / Г.М. Остриков // Известия вузов Строительство и архитектура. –

1988. –No 5. –С. 10-14

- 10) Горнов, В.Н. Новые тонкостенные конструкции [Текст] / В.Н. Горнов // Проект и стандарт. –1937. –No3. –С. 25-28.
- 11) Ажермачев, Г.А. Балки с волнистыми стенками [Текст] / Г.А. Ажермачев //Промышленное строительство. –1963. –No4. –С. 54-56.
- 12) Максимов, Ю.С. Устойчивость гофрированных стенок двутавровых балок [Текст] / Ю.С. Максимов, Г.М. Остриков, В.В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. –1985. –No 6. –С. 43-45.
- 13) Остриков, Г.М. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой [Текст] / Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов, В.В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. –1983. –No 1. –С. 68-70.
- 14) Abbas H.H. Analysis and design of corrugated web I-girders for bridges using high performance steel: Ph.D. dissertation. –Lehigh University, Bethlehem, USA, 2003. –425 p.
- 15) Driver R.G., Abbas H.H., Sause R. Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders // Journal of Structural Engineering. –2006. –Vol. 132. –No2. –pp. 195-203.
- 16) Wang X. Behavior of Steel Members with Trapezoidally Corrugated Webs and Tubular Flanges under Static Loading.: Ph.D. dissertation. –Drexel University, USA, 2003. –192 p.
- 17) Максимов Ю.С., Остриков Г.М. Легкие покрытия одноэтажных производственных зданий // Промышленное строительство. –1987. –No12. –С. 23–25.
- 18) Долинский В.В. Стальные двутавровые ригели с гофрированной стенкой в сейсмостойких многоэтажных рамных каркасах: Авто реф. дис. ...канд. тех. наук. –Новосибирск, 1985. –22 с.
- 19) Abbas H.H., Sause R., Driver R.G. Behavior of Corrugated Web IGirders

- under In-Plane Loads // Journal of Engineering Mechanics. –2006. –Vol. 132. –No8. – pp. 806-814.
- 20) Elgaaly M., Hamilton R.W., Seshadri A. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs // Journal of Structural Engineering. –1996. –Vol. 122. –No4. –pp. 390-398.
- 21) Elgaaly M., Seshadri A., Hamilton R.W. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs // Journal of Structural Engineering. –1997. –Vol. 123. –No6 – pp. 772-782.
- 22) Khalid Y.A., Chan C.L., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending behavior of corrugated web beams // Journal of materials processing technology. –2004. –Vol. 150. –pp. 242-254.
- 23) Virčík J. Skúšky nosníkov z tenkých plechov (Испытания балок, изготовленных из тонкого листа) // Stavebnícky časopis. Bratislava. ČSSR –1983. – Vol. 9 –pp. 711-724.
- 24) Барабаш М.С., Лазнюк М.В., Мартынова М.Л., Пресняков Н.И. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций / Курсовое и дипломное проектирование. Исследовательские задачи: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. проф. Нилова А.А. –М.: АСВ, 2008. –328 с.
- 25) Расчет двутавровой балки с гофрированной стенкой на изгиб в своей плоскости под действием статических нагрузок (Часть 1: Методика расчета) / Кудрявцев С.В.; ГОУ ВПО «Урал. гос. техн. ун-т -УПИ». Екатеринбург, 2007. 17 с.: ил. Библиогр.: 20 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 20.07.07 No 749-B2007.
- 26) Расчет двутавровой балки с гофрированной стенкой на изгиб в своей плоскости под действием статических нагрузок (Часть 2: Расчет методом конечных элементов) / Кудрявцев С.В.; ГОУ ВПО «Урал. гос. техн. ун-т -УПИ». Екатеринбург, 2007. 11 с.: ил. Библиогр.: 11 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 20.07.07 No 750-B2007.

- 27) Рыбкин И.С. Совершенствование конструктивных решений, методов моделирования и расчета гофрированных элементов: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Москва, 2008. –22 с.
- 28) Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // Journal of constructional steel research. – 2002. –Vol. 58. –pp. 1391-1406.
- 29) Elgaaly M., Seshadri A. Depicting the behavior of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis // Advances in engineering software. –1998. –Vol. 29. –No 3–6. –pp. 195-208.
- 30) Huang L., Hikosaka H., Komine K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges // Computers and structures. –2004. –Vol. 82. –pp. 2061-2069.