

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ 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: «Проектувальний розрахунок на міцність конструкції підвісної стелі
пасажирського літака»**

Виконав:
студент VI курсу, групи МП-02мп
Понирко Дмитрій Олександрович _____

Керівник:
д.т.н., проф.
Крищук Микола Георгійович _____

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»
Навчально-науковий 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
Понирко Дмитрій Олександрович

1. Тема дисертації «Проектувальний розрахунок на міцність конструкції підвісної стелі пасажирського літака», науковий керівник дисертації Крищук Микола, Георгійович, 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: контрукція підвісної стелі пасажирського літака.
4. Предмет дослідження: розрахунок на міцність конструкції підвісної стелі пасажирського літака.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) Огляд контрукція підвісної стелі пасажирського літака.
 - 2) Побудова 3D моделі конструкції в програмі CATIA V5, створення в програмі FEM моделі.
 - 3) Аналіз контрукції, визначення криичних місць контрукці, ті визначення їх запасів міцності.
 - 4) Розробка стартап–проекту.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 31 і більше.
7. Орієнтовний перелік публікацій – 0 публікацій.
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 | Побудова 3Д моделіб та FEM моделі | 20.10.21 – 05.11.21 | |
| 3 | Аналіз контрукції | 05.11.21 – 15.11.21 | |
| 4 | Математичний розрахунок | 15.11.21 – 20.11.21 | |
| 5 | Стартап-проект та висновки | 20.11.21 – 10.12.21 | |

Студент _____

Дмитрій ПОНІРКО

Науковий керівник _____

Микола КРИЩУК

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація містить 61 сторінка, 5 таблиць, 31 рисунок, список використаної літератури з найменувань.

Об'єктом дослідження є конструкція підвісної стелі пасажирського літака.

Задачами роботи було розрахунок запасів міцності в конструкції для визначення чи є ця стеля безпечною під час експлуатації, відповідно до норм безпеки .

Було побудовано відповідно до конструкції FEM модель до якої приклали сили отримані від групи навантаження, завдяки цьому отримали розподіл навантажень на відповідні елементи конструкції. Це дало змогу визначити запаси міцності на всіх необхідних елементах конструкції.

Оскільки розрахунок проводиться за іноземним методом, всі обчислення проводяться в американській системі вимірювань

ABSTRACT

The master's dissertation contains 61 pages, 5 tables, 31 figures, a list of references.

The object of research is the construction of the suspended ceiling of a passenger plane.

The objectives of the work were to calculate the strength reserves in the structure to determine whether this ceiling is safe during operation, in accordance with safety regulations.

The model was built in accordance with the FEM construction, to which the forces received from the load group were applied, due to which the load distribution on the corresponding construction elements was obtained. This made it possible to determine the strength reserves on all the necessary structural elements.

Because the calculation is performed by a foreign method, all calculations are performed in the American system of measurements.

Зміст

| | |
|--|----|
| 1. Опис конструкції..... | 8 |
| 1.0 Опис нижньої рейки..... | 9 |
| 2. Опис матеріалів..... | 10 |
| 2.1 Рейка..... | 10 |
| 2.2 Клевіс..... | 11 |
| 2.3 Болт..... | 12 |
| 3. Опис видів навантаження..... | 13 |
| 4. Опис методу скінченних елементів..... | 14 |
| 4.0 Навантаження та граничні умов..... | 14 |
| 5. Структурний аналіз..... | 15 |
| 5.1 Статичний аналіз перерізу рейки..... | 15 |
| 5.0.1.1 Перерізи В-В..... | 17 |
| 5.0.1.2 Перерізи А-А..... | 20 |
| 5.0.1.3 Аналіз рейки на стиснення..... | 27 |
| 5.2 Міцність з'єднання навісного обладнання з рейкою | 33 |
| 5.0.1.2 Аналіз проушини..... | 34 |
| 5.3 Міцність з'єднання Frame-Fitting з рейкою (продовгуваті отвори)..... | 37 |
| 5.0.1.3 Аналіз проушини..... | 40 |
| 5.4 Міцність кріплення рейки до Клевіса..... | 45 |
| 5.0.1.4 Змінання рейки..... | 46 |
| 5.5 Clevis Strength..... | 47 |
| 5.5.1.1 Змінання клевіса..... | 47 |
| Аналіз проушини Клевіс..... | 49 |
| 6. Розроблення стартап роекту..... | 55 |
| 7. Висновок..... | 63 |
| 8. Література..... | 64 |

1. Опис конструкції

Аналіз напружено деформованого стану рейкової системі підвісної стелі пасажирського салону, розташовані на літаку Boeing.

Рейки забезпечують кріплення в салоні фюзеляжу відсіків для багажу та внутрішніх



систем літака.

Рисунок 1 Вигляд салону літака

Замовник кріпить нову VIP-конструкцію інтер'єру до верхньої та нижньої рейок. Аналіз напружень виконується на основі навантажень в рейковій системі.

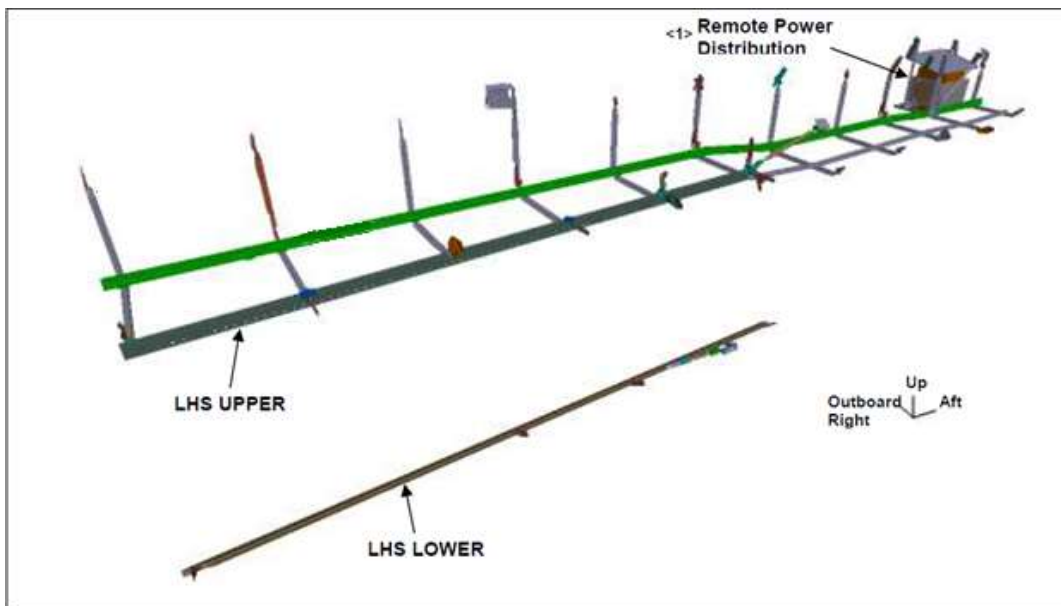


Рисунок 2 Загальний вигляд конструкції

1.0 Опис рейки

Рейка містить вісім фланцевих втулок з прорізами для кріплення рами / міжреберних фітингів за допомогою болтів. Клевіс кріпить нижню рейку до 9G тяги за допомогою болта.

Збірка правої і лівої рейки разом Клевісом зображено на Рсунку 3

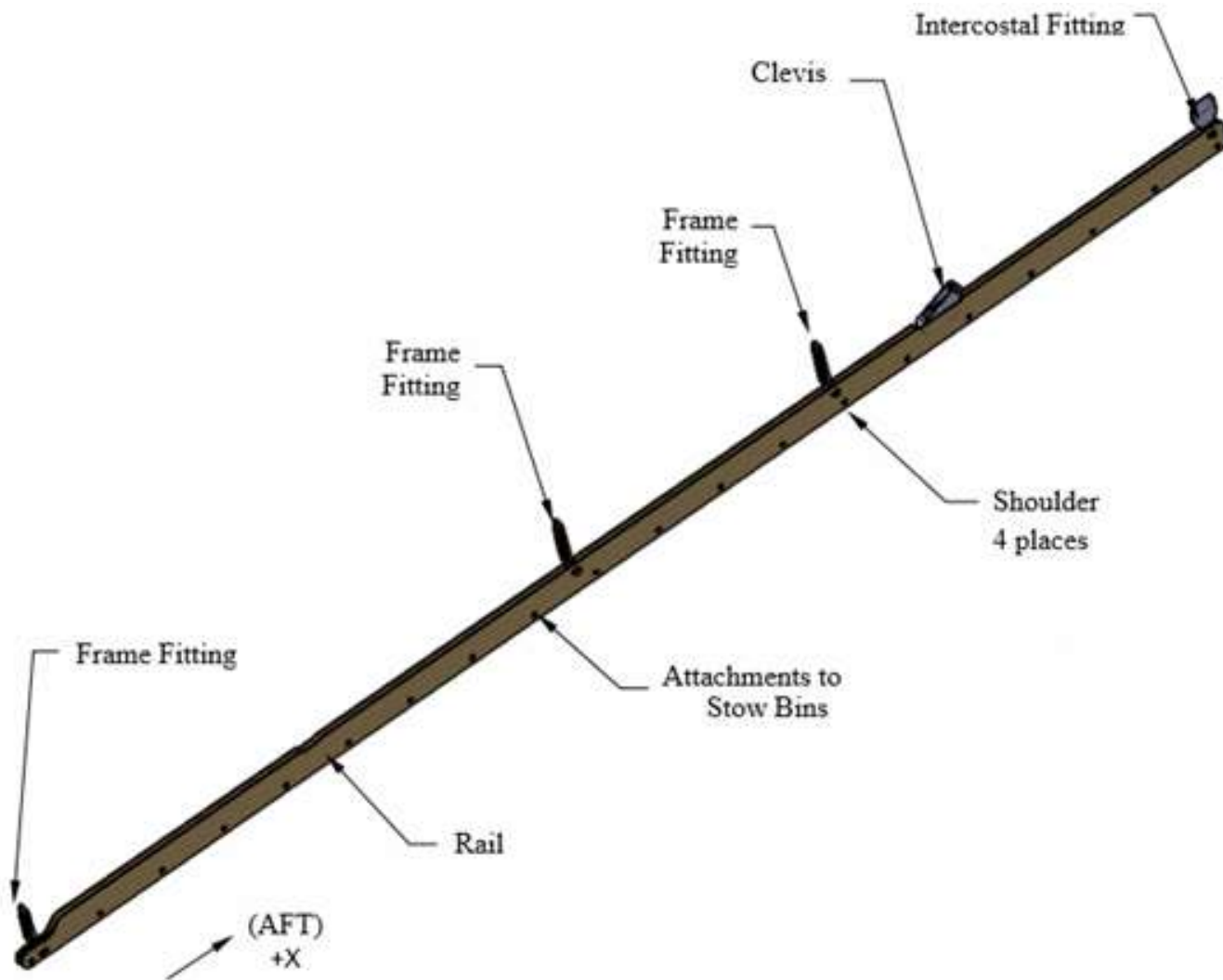


Рисунок 3 Рейка в зборі

2. Опис матеріалів

2.1 Рейка

Нижня рейка виготовлена з екструдованого бруска алюмінієвого сплаву 7075-T7351.

Table 3.7.4.0(g): Design Mechanical and Physical Properties of 7075 Aluminum Alloy Extrusion—Continued

| Specification | AMS-QQ-A-200/11 | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|
| Form | Extrusion (rod, bars, and shapes) | | | | | | | | | | | | | |
| Temper | T73 ^a , T73510, T73511 | | | | | | | | | | | | | |
| Cross-Sectional Area, in. ² | <20 | | >25 | | | | | | | | <20 | | >20, <32 | |
| Thickness, in. ^b | 0.062-0.249 | | 0.250-0.499 | | 0.500-0.749 | | 0.750-1.499 | | 1.500-2.999 | | 3.000-4.499 | | 3.000-4.499 | |
| Basis | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| Mechanical Properties: | | | | | | | | | | | | | | |
| F_u , ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 68 ^c | 72 | 70 ^c | 74 | 70 ^c | 73 | 70 ^c | 73 | 69 ^c | 74 | 68 ^c | 71 | 65 ^c | 70 |
| LT | 66 | 70 | 68 | 72 | 67 | 70 | 66 | 69 | 62 | 67 | 58 | 61 | 56 | 60 |
| $F_{0.2}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 58 | 61 | 60 | 63 | 60 | 63 | 60 | 63 | 59 ^c | 65 | 57 ^c | 62 | 55 ^c | 60 |
| LT | 56 | 59 | 57 | 60 | 57 | 60 | 56 | 58 | 51 | 56 | 46 | 50 | 44 | 48 |
| $F_{0.1}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 58 | 61 | 60 | 63 | 60 | 63 | 60 | 63 | 59 | 65 | 57 | 62 | 55 | 60 |
| LT | 59 | 62 | 60 | 63 | 60 | 63 | 58 | 61 | 54 | 59 | 49 | 53 | 47 | 51 |
| $F_{0.05}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 37 | 39 | 38 | 40 | 38 | 39 | 38 | 39 | 37 | 40 | 37 | 38 | 35 | 38 |
| $F_{0.02}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 101 | 107 | 104 | 110 | 103 | 108 | 103 | 107 | 99 | 106 | 95 | 99 | 91 | 98 |
| (e/D = 1.5) | | | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 2.0) | 129 | 137 | 133 | 141 | 133 | 139 | 132 | 138 | 128 | 138 | 124 | 130 | 119 | 128 |
| $F_{0.01}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 82 | 86 | 84 | 89 | 84 | 88 | 83 | 87 | 79 | 87 | 72 | 79 | 70 | 76 |
| (e/D = 1.5) | | | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 2.0) | 97 | 102 | 100 | 105 | 100 | 105 | 98 | 103 | 93 | 103 | 86 | 94 | 83 | 91 |
| e , percent (S-basis): | | | | | | | | | | | | | | |
| L | 7 | — | 8 | — | 8 | — | 8 | — | 8 | — | 7 | — | 7 | — |
| E , 10 ³ ksi | 10.4 | | | | | | | | | | | | | |
| E_c , 10 ³ ksi | 10.7 | | | | | | | | | | | | | |
| G , 10 ³ ksi | 4.0 | | | | | | | | | | | | | |
| μ | 0.33 | | | | | | | | | | | | | |
| Physical Properties: | | | | | | | | | | | | | | |
| α , lb/in. ² | 0.101 | | | | | | | | | | | | | |
| C, K, and σ | See Figure 3.7.4.0 | | | | | | | | | | | | | |

MIL-PRC-501
1 December 1998

- a Design allowables were based upon data obtained from testing T7351X temper extrusions and from testing samples of extrusions supplied in the O or F temper, which were heat treated to T73 temper to demonstrate response to treatment by suppliers. Properties obtained by the user may be lower than those listed if the material has been formed or otherwise cold worked, particularly in the annealed temper.
- b The mechanical properties are to be based upon the thickness at the time of quench.
- c S-basis. See Table 3.7.4.0(g) for the rounded $T_{0.01}$ values.
- d Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1.

Рисунок 4 Характеристики матеріалу рейки

2.2 Клевiс

Клевiс виготовлений з алюмiнiєвого сплаву 7075-T7451 товщиною 2 дюйми.

MIL-HDBK-5H
1 December 1998

Table 3.7.3.0(b₁). Design Mechanical and Physical Properties of 7050 Aluminum Alloy Plate

| Specification | AMS 4050 | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|
| | Plate | | | | | | | | | | | |
| | T7451 | | | | | | | | | | | |
| | 0.250-1.500 | | 1.501-2.000 | | 2.001-3.000 | | 3.001-4.000 | | 4.001-5.000 | | 5.001-6.000 | |
| Basis | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| Mechanical Properties: | | | | | | | | | | | | |
| F_{br} , ksi: | | | | | | | | | | | | |
| L | 74 ^b | 76 | 74 | 76 | 73 ^b | 75 | 72 | 74 | 71 ^b | 73 | 70 ^b | 72 |
| LT | 74 | 76 | 74 ^b | 76 | 73 ^b | 75 | 72 | 75 | 71 ^b | 74 | 70 | 73 |
| ST | ... | ... | ... | ... | 68 | 72 | 68 ^b | 71 | 67 | 70 | 66 | 69 |
| $F_{0.2}$, ksi: | | | | | | | | | | | | |
| L | 64 ^b | 67 | 64 ^b | 66 | 63 ^b | 66 | 62 ^b | 65 | 61 ^b | 65 | 60 | 63 |
| LT | 64 | 66 | 64 | 66 | 63 ^b | 66 | 62 | 65 | 61 | 64 | 60 | 62 |
| ST | ... | ... | ... | ... | 59 | 61 | 57 | 60 | 57 ^b | 60 | 57 | 59 |
| $F_{0.1}$, ksi: | | | | | | | | | | | | |
| L | 63 | 64 | 62 | 64 | 61 | 64 | 60 | 63 | 58 | 61 | 57 | 59 |
| LT | 66 | 68 | 67 | 69 | 66 | 69 | 65 | 68 | 64 | 67 | 63 | 66 |
| ST | ... | ... | ... | ... | 63 | 66 | 63 | 66 | 63 | 66 | 62 | 64 |
| F_{su} , ksi | 42 | 43 | 43 | 44 | 43 | 44 | 43 | 45 | 43 | 45 | 43 | 45 |
| F_{bru}^a , ksi: | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 1.5) | 107 | 110 | 109 | 112 | 108 | 111 | 107 | 111 | 107 | 111 | 105 | 110 |
| (e/D = 2.0) | 140 | 144 | 142 | 146 | 141 | 144 | 140 | 144 | 138 | 144 | 137 | 142 |
| F_{bry}^a , ksi: | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 1.5) | 86 | 89 | 89 | 92 | 89 | 93 | 90 | 94 | 90 | 95 | 91 | 94 |
| (e/D = 2.0) | 101 | 104 | 104 | 107 | 104 | 109 | 104 | 109 | 105 | 110 | 105 | 108 |
| e , percent (S-basis): | | | | | | | | | | | | |
| L | 10 | ... | 10 | ... | 9 | ... | 9 | ... | 9 | ... | 8 | ... |
| LT | 9 | ... | 9 | ... | 8 | ... | 6 | ... | 5 | ... | 4 | ... |
| ST | ... | ... | ... | ... | 2 | ... | 2 | ... | 2 | ... | 2 | ... |
| E , 10 ³ ksi | 10.3 | | | | | | | | | | | |
| E_c , 10 ³ ksi | 10.6 | | | | | | | | | | | |
| G , 10 ³ ksi | 3.9 | | | | | | | | | | | |
| μ | 0.33 | | | | | | | | | | | |
| Physical Properties: | | | | | | | | | | | | |
| ω , lb/in. ³ | 0.102 | | | | | | | | | | | |
| C , Btu/(lb)(°F) | 0.23 (at 212°F) | | | | | | | | | | | |
| K , Btu/[(hr)(ft ²)(°F)/ft] | 91 (at 77°F) | | | | | | | | | | | |
| α , 10 ⁻⁶ in./in./°F | 12.8 (68 to 212°F) | | | | | | | | | | | |

a See Table 3.1.2.1.1. Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1.

b S-basis values. See Table 3.7.3.0(b₂) for rounded T_{90} values.

Рисунок 5 Характеристики матеріалу Клевiса

2.3 Болт

Болт виготовлений з титанового сплаву 6Al-4V.

Table 5.4.1.0(c). Design Mechanical and Physical Properties of Ti-6Al-4V Bar

| Specification | AMS 4928 | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|
| Form | Bar | | | | | | | | | | | | |
| Condition | Annealed | | | | | | | | | | | | |
| Thickness or diameter, in. | <0.500 | 0.500-1.000 | | 1.001-2.000 | | 2.001-3.000 | | 3.001-4.000 | | 4.001-5.000 | | 5.001-6.000 | |
| Basis | S | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| Mechanical Properties: | | | | | | | | | | | | | |
| F_{ms} , ksi: | | | | | | | | | | | | | |
| L | 135 | 135 ^a | 142 | 134 | 140 | 130 ^a | 138 | 130 | 135 | 128 | 133 | 125 | 131 |
| LT | 135 ^b | 135 ^a | 144 | 135 ^a | 143 | 130 ^a | 142 | 130 ^a | 141 | 130 ^a | 139 | 130 ^a | 138 |
| $F_{0.2}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | |
| L | 125 | 125 ^a | 134 | 125 ^a | 131 | 120 ^a | 128 | 120 | 125 | 117 | 122 | 114 | 119 |
| LT | 125 ^b | 125 ^a | 134 | 125 ^a | 132 | 120 ^a | 131 | 120 ^a | 129 | 120 ^a | 127 | 119 | 125 |
| $F_{0.01}$, ksi: | | | | | | | | | | | | | |
| L | 129 | 129 | 138 | 129 | 135 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| LT | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| F_{ms} , ksi | 83 | 83 | 87 | 82 | 86 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| F_{brp} , ksi: | | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 1.5) | 201 | 201 | 212 | 200 | 209 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| (e/D = 2.0) | 253 | 253 | 266 | 251 | 262 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| F_{brp} , ksi: | | | | | | | | | | | | | |
| (e/D = 1.5) | 177 | 177 | 190 | 177 | 186 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| (e/D = 2.0) | 205 | 205 | 220 | 205 | 215 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| e , percent (S-basis): | | | | | | | | | | | | | |
| L | 10 | 10 | ... | 10 | ... | 10 | ... | 10 | ... | 10 | ... | 10 | ... |
| LT | 10 ^b | 10 ^b | ... | 10 ^b | ... | 10 ^b | ... | 10 | ... | 10 | ... | 10 | ... |
| ST | ... | ... | ... | ... | ... | 10 ^b | ... | 10 | ... | 8 | ... | 8 | ... |
| RA , percent (S-basis): | | | | | | | | | | | | | |
| L | 25 | 25 | ... | 25 | ... | 25 | ... | 25 | ... | 20 | ... | 20 | ... |
| LT | 20 ^b | 20 ^b | ... | 20 ^b | ... | 20 ^b | ... | 20 | ... | 20 | ... | 20 | ... |
| ST | ... | ... | ... | ... | ... | 15 ^b | ... | 15 | ... | 15 | ... | 15 | ... |
| E , 10 ³ ksi | 16.9 | | | | | | | | | | | | |
| E_v , 10 ³ ksi | 17.2 | | | | | | | | | | | | |
| G , 10 ³ ksi | 6.2 | | | | | | | | | | | | |
| μ | 0.31 | | | | | | | | | | | | |
| Physical Properties: | | | | | | | | | | | | | |
| ω , lb/in. ³ | 0.160 | | | | | | | | | | | | |
| C , K , and α | See Figure 5.4.1.0 | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 6 Властивість матеріалу Болта

3. Опис видів навантаження

Навантаження прикладені до конструкції були отримані отримані від команди що займається навантаженнями. Основні типи навантажень взяті на основі 14 CFR Підрозділ С, Розділ 25.561 – Максимальні навантаження

Таблиця 1 FAA Коефіцієнт критичного навантаження

| | Коефіцієнт критичного навантаження FAA |
|-----------|---|
| Вперед | 9.0 G |
| Вниз | 6.0 G |
| В сторону | 3.0 G |
| В верх | 3.0 G |
| Назад | 1.5 G |

4. Опис методу скінченних елементів

Скінченно елементна (FEM) використовуються для отримання навантажень інтерфейсу кріплення рамки:

Детальний вигляд рейки RHS наведено на рисунку 2.

Верхня рейка та адаптери забезпечують фіксацію внутрішньої конструкції та блоку дистанційного розподілу живлення . Вони також діють як частина Current Return Network (CRN) і забезпечують підтримку каналів системи кліматичного контролю та верхньої електропроводки.

4.0 Навантаження та граничні умови

Загальний вигляд геометрії нижньої рейки та FEM: Рисунок 8.

Загальний вигляд FEM рейки з прикладеними навантаженнями: Рисунок 9

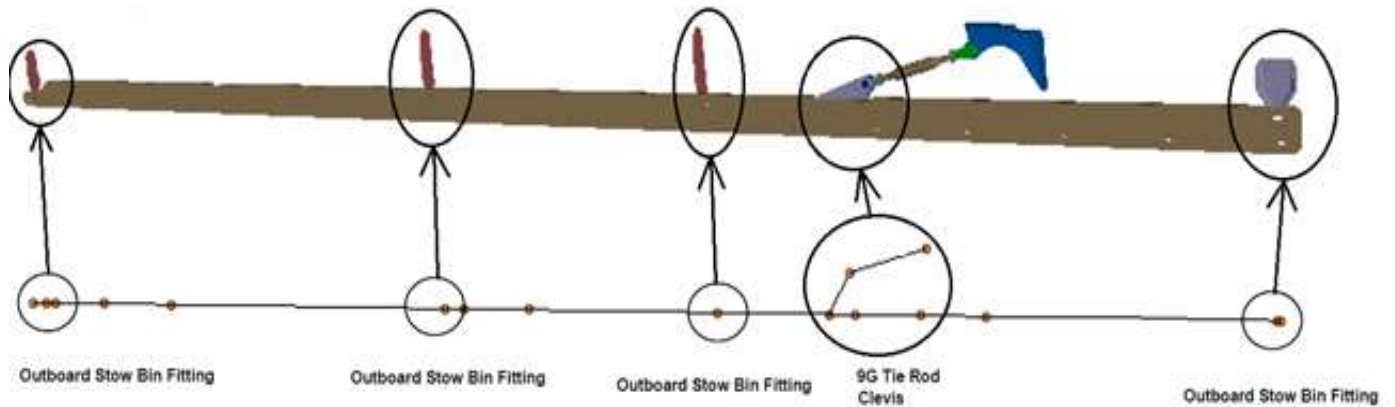


Рисунок 7 Загальний вигляд геометрії нижньої рейки та FEM

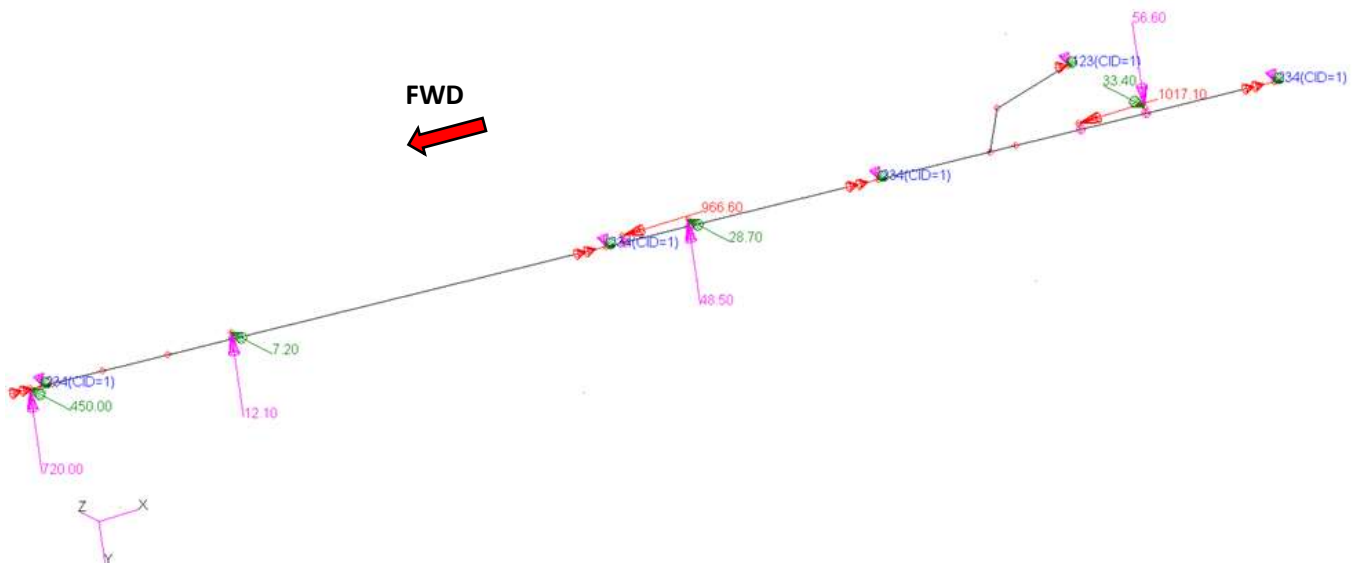


Рисунок 8 FEM рейки з застосованими інтерфейсними навантаженнями та граничними умовами (випадок навантаження 9G Вперед)

напруження в механічній системі

5. - Структурний аналіз

5.1 Статичний аналіз перерізу рейки

Опис аналізу:

Рейка аналізується у двох поперечних перерізах, як показано на малюнку 20:

Переріз А-А – Край рейки (геометрію перерізу див. на малюнку 23);

Переріз В-В – Консервативно взятий переріз рейки з отворами та верхнім вирізом (геометрію перетину див. на малюнку 24).

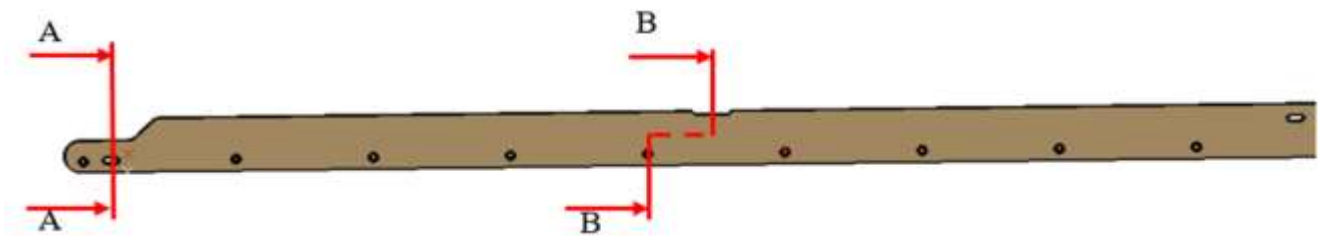


Рисунок 9 Поперечні перерізи нижньої рейки

Компоненти внутрішніх навантажень рейки витягуються з FEM у локальній системі координат як місцеві системи координат (червоний колір) для кожної сторони представлені на рисунках 21 і 22.

Визначено критичне навантаження для обох секцій та обох рейок: 9G Вперед, RHS Rail.

Критичні навантаження в локальній системі координат (позначені F_x' , F_y' , F_z' & M_x' , M_y' , M_z') представлені в таблиці 6.

Таблиця 2 Критичні навантаження для рейок у місцевій системі координат

| Переріз | Елемент# | Навантаження | Сторона | Fx , lb | Fy, lb | Fz, lb | Mx, in-lb | My, in-lb | Mz, in-lb |
|---------|----------|--------------|---------|---------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|
| A-A | 1 | 9G Вперед | RHS | 39.3 | 847.9 | -19.7 | -0.1 | -21.9 | -945.5 |
| B-B | 26 | 9G Вперед | RHS | 1693.9 | 988.3 | -14.1 | -115.3 | -138.9 | -7986.5 |

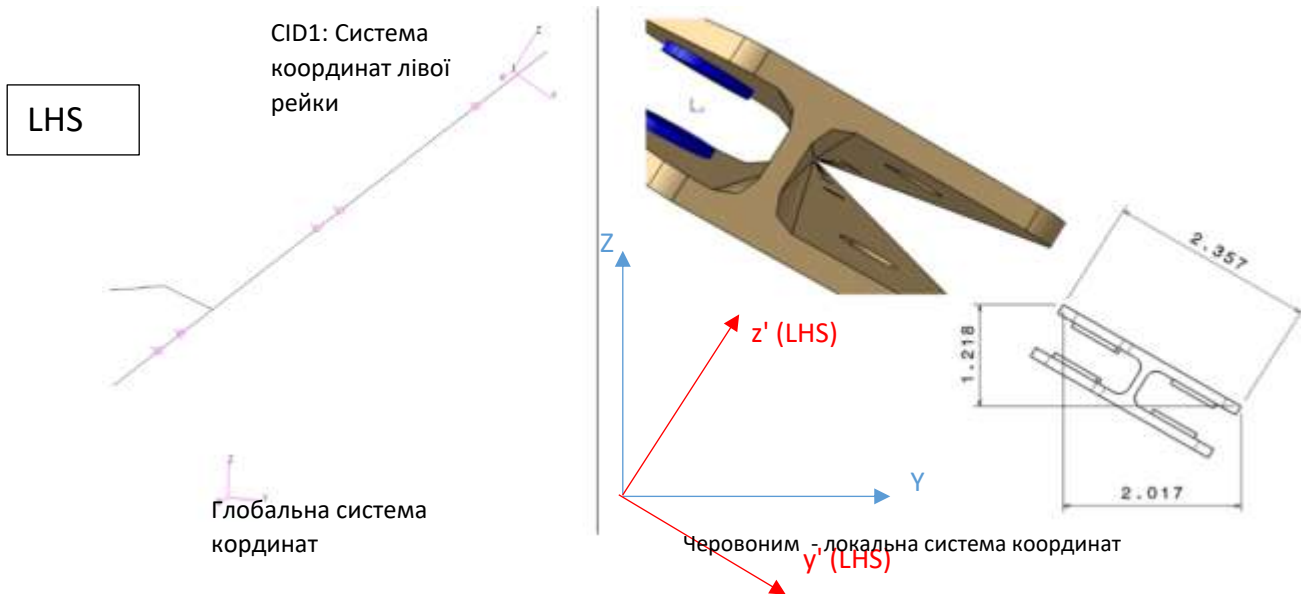


Рисунок 10: Співвідношення глобальної та локальної систем координат

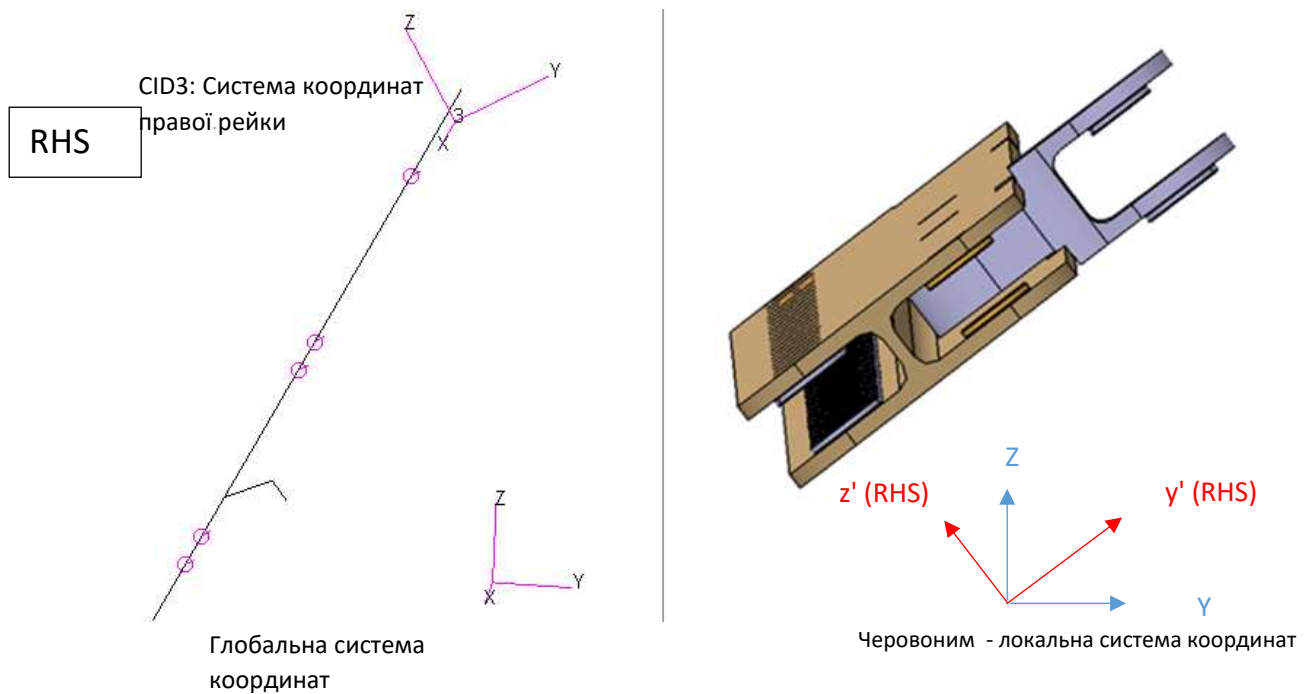


Рисунок 11 Права сторона: Співвідношення глобальної та локальної систем координат

Максимальні напруження зсуву в поперечному перерізі були розраховані шляхом консервативного ручного аналізу з окремих навантажень:

- Максимальна сила зсуву F_y' ;
- Максимальна сила зсуву F_z' ;
- Максимальний крутний момент M_x' .

Запаси безпеки для критичного випадку навантаження 9G Вперед розраховуються в Excel.

Рисунок 3 Запаси безпеки для аналізу рейки

| Переріз | Згин, зсув, кручення |
|---------|----------------------|
| A-A | 2.78 |
| B-B | 0.33 |

5.0.1.1 Переріз B-B

Розрахунок запасу безпеки для критичного випадку навантаження 9G Вперед:

Навантаження, використані для розрахунку, наведені в таблиці 6.

Допустимі значення, використані для розрахунку за малюнком 4:

$$F_{tu} = 73000 \text{ psi}$$

$$F_{cy} = 63000 \text{ psi}$$

$$F_{su} = 42000 \text{ psi}$$

Характеристики поперечного перерізу зображені на рисунку 24.

Максимальні напруження від згину зображені на рисунку 26.

$$f_{b_t} = 53779.31 \text{ psi}$$

$$fb_c = -38963.08 \text{ psi}$$

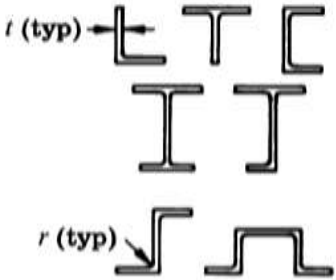
Максимальне напруження зсуву від сил Fy' і Fz' (консервативне припущення: тільки хорди сприймають навантаження Fy' , і тільки стінка сприймає Fz')

$$f_{\text{shear}(Fy')} = \frac{1.5 * Fy'}{A_{\text{shear}}} = \frac{1.5 * 988.3}{(2 * 0.12 * 1.92)} = 3217 \text{ psi}$$

$$f_{\text{shear}(Fz')} = \frac{1.5 * Fz'}{A_{\text{shear}}} = \frac{1.5 * 14.1}{(0.1 * 0.48)} = 440 \text{ psi}$$

Максимальне напруження від кручення Mx' :

Відповідно з Niu Airframe stress Analysis and sizing:

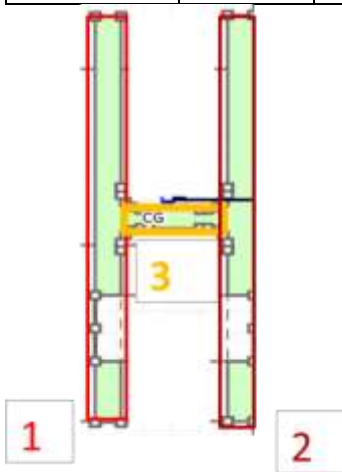
| | | |
|---|---|---|
| <p>Sections composed of 2 or more thin rectangular elements</p>  | $J = \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{i=1}^n b_i t_i^3$ | <p>At any element $i = j$</p> $f_{sj} = \left(\frac{T}{J}\right) t_j$ <p>At $t_i = t_{max}$</p> $f_s(max) = \left(\frac{T}{J}\right) t_{max}$ |
|---|---|---|

$$f_{\text{shear}(Mx')} = \frac{Mx' * t_{max}}{J} = \frac{115.3 * 0.12}{0.0032737} = 4226 \text{ psi}$$

J момент кручення:

| | | |
|------|------|----|
| t1 = | 0,12 | in |
| b1 = | 1,92 | in |
| t2 = | 0,12 | in |

| | | |
|------|------|----|
| b2 = | 1,92 | in |
| t3 = | 0,1 | in |
| b3 = | 0,48 | in |



$$J = 0.0032737 \text{ in}^4.$$

Загальне напруження зсуву:

$$f_s = f_{\text{shear}(M_x')} + f_{\text{shear}(F_y')} + f_{\text{shear}(F_z')} = 4226 + 3217 + 440 = 7883 \text{ psi}$$

Запас міцності для комбінованих осьових, згинальних, крутильних і зсувних, з фітін фактором 1,15:

$$R_b = \frac{f_{b,t}}{Ftu} = \frac{53779.31}{86000} = 0.7367$$

$$R_s = \frac{f_s}{Fsu} = \frac{7883}{44000} = 0.1876$$

$$MS = \frac{1}{f \cdot f_* \cdot (R_b^2 + R_s^2)^{0.5}} - 1 = \frac{1}{1.15 \cdot (0.7367^2 + 0.1876^2)^{0.5}} - 1 = \mathbf{0.14}$$

5.0.1.2 Переріз А-А

Аналіз виконаний аналогічно перерзу В-В

Критичний вид навантаження 9G Вперед

Навантаження, використані для розрахунку, наведені в таблиці 6.

Допустимі значення, використані для розрахунку за малюнком 4:

$$F_{tu} = 73000 \text{ psi}$$

$$F_{cy} = 63000 \text{ psi}$$

$$F_{su} = 42000 \text{ psi}$$

Характеристики поперечного перерізу зображені на рисунку 25.

Максимальні напруження від згину зображені на рисунку 27.

$$f_{b_t} = 13390.76 \text{ psi}$$

$$f_{b_c} = -11319.20 \text{ psi}$$

Максимальне напруження зсуву від сил $F_{y'}$ і $F_{z'}$ (консервативне припущення: тільки хорди сприймають навантаження $F_{y'}$, і тільки стінка сприймає $F_{z'}$)

$$f_{\text{shear}(F_{y'})} = \frac{1.5 * F_{y'}}{A_{\text{shear}}} = \frac{1.5 * 847.9}{(1.2 * 0.12 + 1.2 * 1.2)} = 5196 \text{ psi}$$

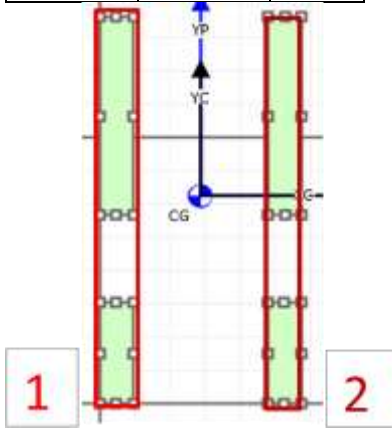
$$f_{\text{shear}(F_{z'})} = \frac{1.5 * F_{z'}}{A_{\text{shear}}} = \frac{1.5 * 19.7}{(0.1 * 0.48)} = 516 \text{ psi}$$

Максимальне напруження від кручення $M_{x'}$:

$$f_{\text{shear}(M_{x'})} = \frac{M_{x'} * t_{\text{max}}}{J} = \frac{0.1 * 0.12}{0.00118} = 5 \text{ psi}$$

J момент кручення:

| | | |
|------|------|----|
| t1 = | 0,12 | in |
| b1 = | 1,02 | in |
| t2 = | 0,12 | in |
| b2 = | 1,02 | in |



$$J = 0.0032737 \text{ in}^4$$

Загальне напруження зсуву:

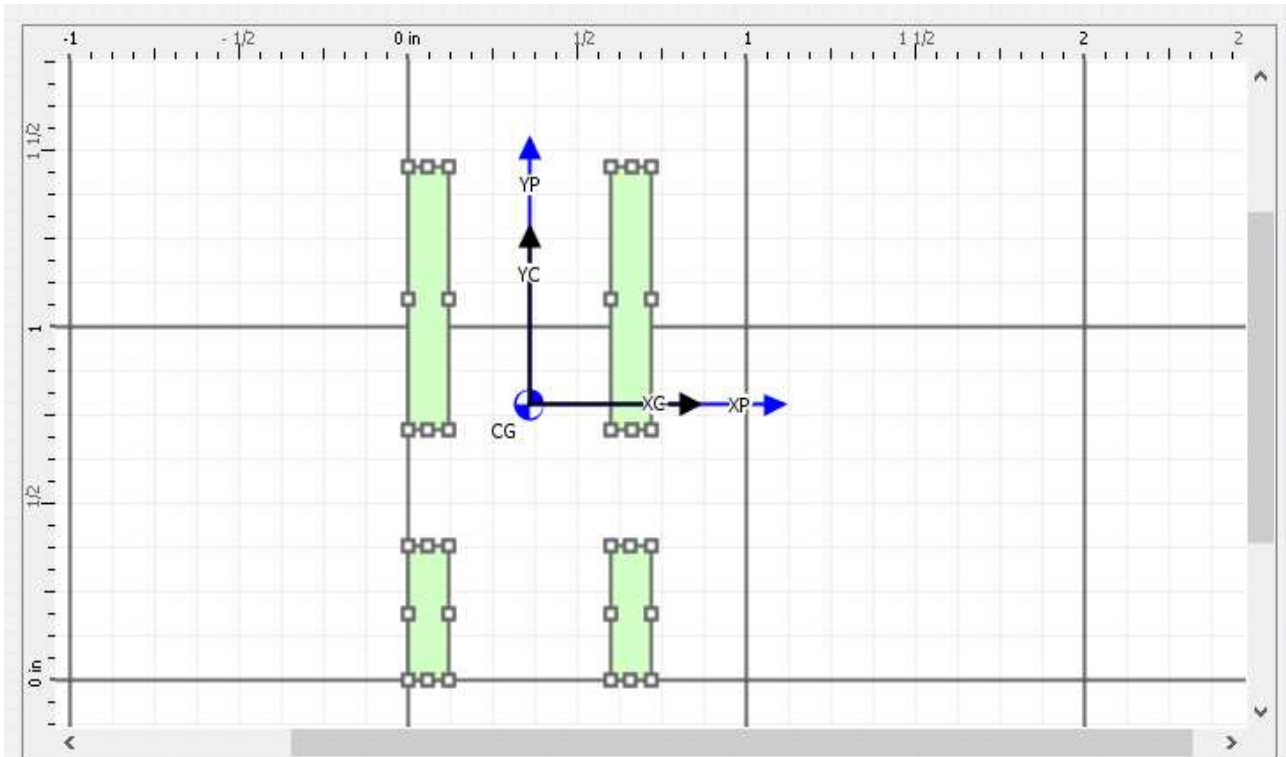
$$f_s = f_{\text{shear}(Mx')} + f_{\text{shear}(Fy')} + f_{\text{shear}(Fz')} = 5 + 5196 + 516 = 5815.7 \text{ psi}$$

Запас міцності для комбінованих осьових, згинальних, крутильних і зсувних, з фітін фактором 1.15:

$$R_b = \frac{f_{b_t}}{Ftu} = \frac{13391}{86000} = 0.183$$

$$R_s = \frac{f_s}{Fsu} = \frac{5815.7}{44000} = 0.138$$

$$MS = \frac{1}{f \cdot f \cdot (R_b^2 + R_s^2)^{0.5}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.183^2 + 0.138^2)^{0.5}} - 1 = 2.78$$



Section Shape Geometry

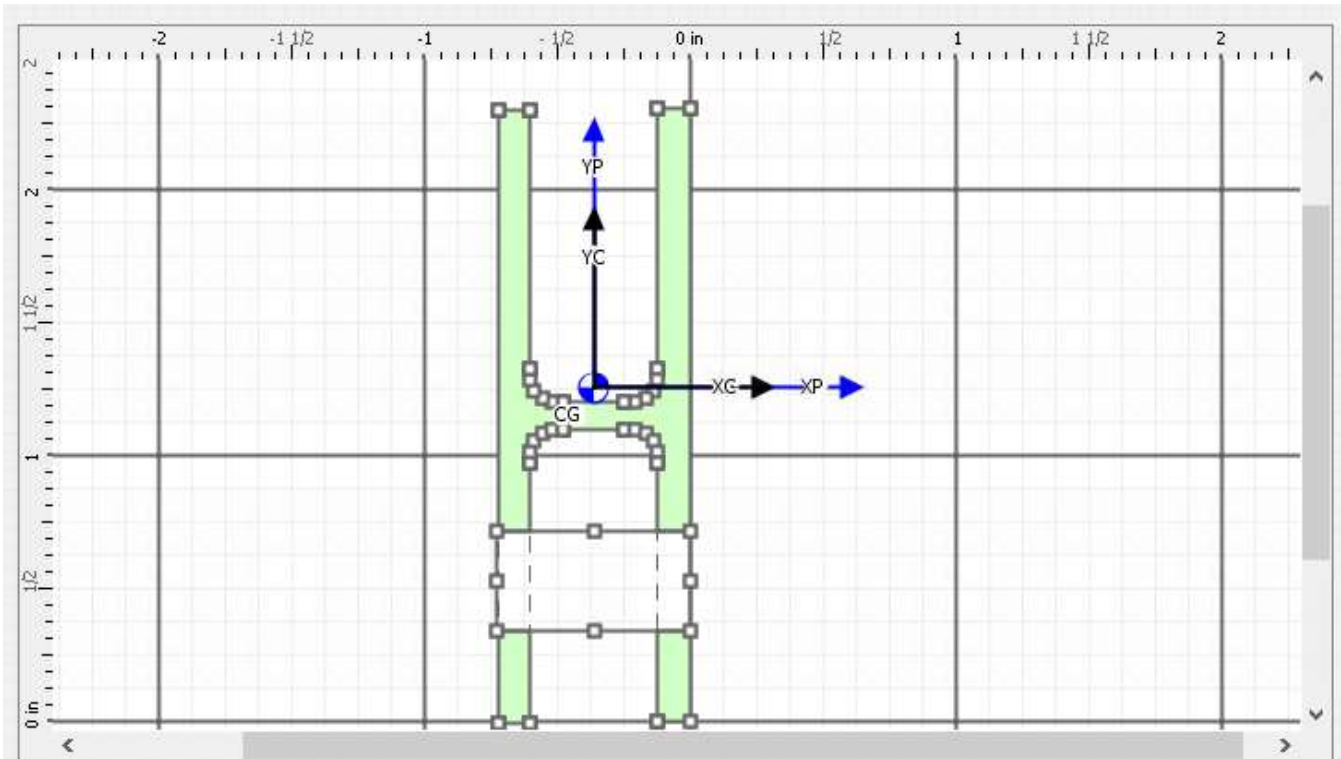
Geometric Properties

| | | |
|--|--|---|
| Area = <input type="text" value="0.2695"/> in ² | $I_{XX} = $ <input type="text" value="0.0571"/> in ⁴ | $\psi = $ <input type="text" value="-0.1"/> deg |
| $X_{CG} = $ <input type="text" value="0.3606"/> in | $I_{YY} = $ <input type="text" value="0.0247"/> in ⁴ | $I_{XP} = $ <input type="text" value="0.0571"/> in ⁴ |
| $Y_{CG} = $ <input type="text" value="0.7799"/> in | $I_{XY} = $ <input type="text" value="4.8252E-5"/> in ⁴ | $I_{YP} = $ <input type="text" value="0.0247"/> in ⁴ |
| $\rho_{XX} = $ <input type="text" value="0.4603"/> in | $\rho_{XP} = $ <input type="text" value="0.4603"/> in | $I_P = $ <input type="text" value="0.0818"/> in ⁴ |
| $\rho_{YY} = $ <input type="text" value="0.3026"/> in | $\rho_{YP} = $ <input type="text" value="0.3026"/> in | $\rho_P = $ <input type="text" value="0.5509"/> in |

Elastic Properties

| | | |
|--|---|---|
| EA = <input type="text" value="2.8025E6"/> lb | $EI_{XX} = $ <input type="text" value="5.9384E5"/> lb·in ² | $\psi_E = $ <input type="text" value="-0.1"/> deg |
| $X_{CG-E} = $ <input type="text" value="0.3606"/> in | $EI_{YY} = $ <input type="text" value="2.5659E5"/> lb·in ² | $EI_{XP} = $ <input type="text" value="5.9384E5"/> lb·in ² |
| $Y_{CG-E} = $ <input type="text" value="0.7799"/> in | $EI_{XY} = $ <input type="text" value="5.0183E2"/> lb·in ² | $EI_{YP} = $ <input type="text" value="2.5659E5"/> lb·in ² |

Рисунок 12 Поперечний переріз Нижньої рейки А-А



Section Shape Geometry

Geometric Properties

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Area = 0.5249 in ² | $I_{XX} = 0.2035$ in ⁴ | $\phi = 0.0$ deg |
| $X_{CG} = -0.3613$ in | $I_{YY} = 0.0441$ in ⁴ | $I_{XP} = 0.2035$ in ⁴ |
| $Y_{CG} = 1.2592$ in | $I_{XY} = -3.0580E-5$ in ⁴ | $I_{YP} = 0.0441$ in ⁴ |
| $\rho_{XX} = 0.6226$ in | $\rho_{XP} = 0.6226$ in | $I_P = 0.2476$ in ⁴ |
| $\rho_{YY} = 0.2898$ in | $\rho_{YP} = 0.2898$ in | $\rho_P = 0.6868$ in |

Elastic Properties

| | | |
|-------------------------|--|---|
| EA = 5.4586E6 lb | $EI_{XX} = 2.1162E6$ lb·in ² | $\psi_E = 0.0$ deg |
| $X_{CG-E} = -0.3613$ in | $EI_{YY} = 4.5840E5$ lb·in ² | $EI_{XP} = 2.1162E6$ lb·in ² |
| $Y_{CG-E} = 1.2592$ in | $EI_{XY} = -3.1803E2$ lb·in ² | $EI_{YP} = 4.5840E5$ lb·in ² |

Рисунок 13 Поперечний переріз Нижньої рейки В-В

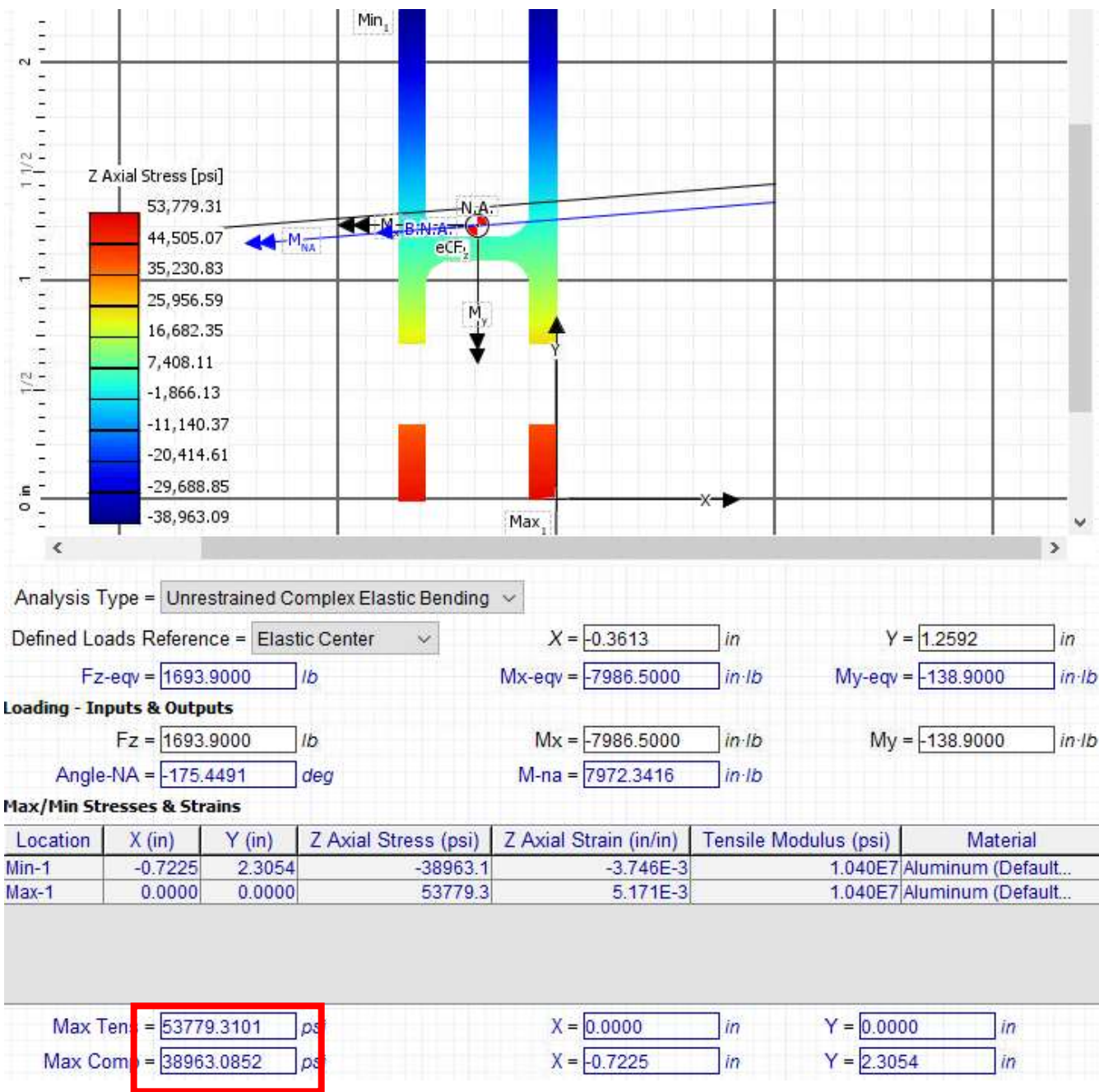


Рисунок 14 Аналіз згину нижньої рейки переріз В-В: максимальне напруження при згині

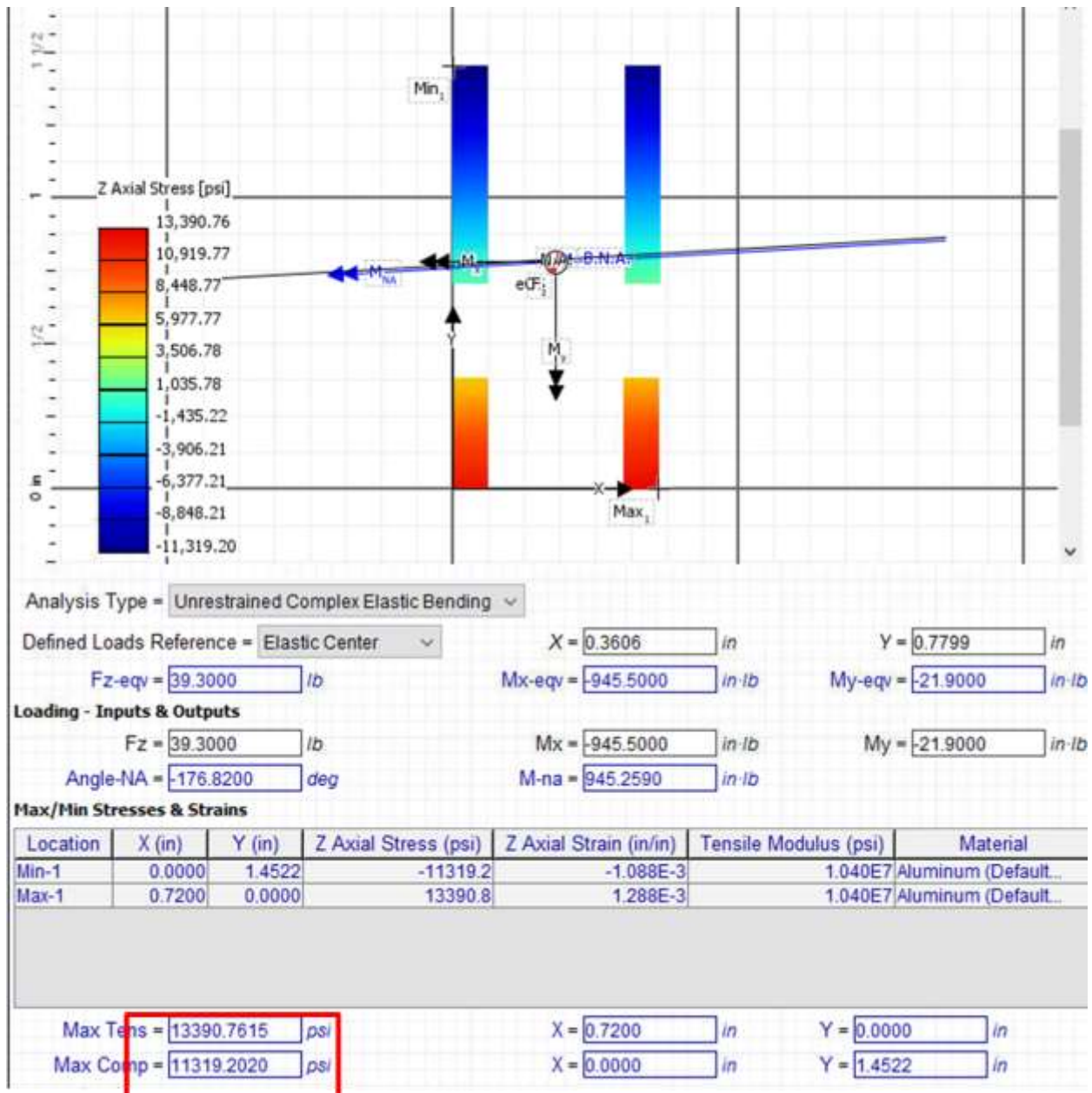


Рисунок 15 Аналіз згину нижньої рейки переріз А-А: максимальне напруження при згині

5.0.1.3 Аналіз рейки на стиснення

В конструктивних елементах літака стиснення може розглядатися як втрата стійкості, і класифікуватися як:

- Загальна втрата стійкості
- Локальна втрата стійкості (зазвичай називають Кріплінг)

Кріплінг аналіз

Коли пошкодження, як показано на рис. , виникає на утвореній ділянці, це виглядає як локальне викривлення. Більш стійкі частини секції продовжують нести навантаження і підтримувати деталі, які вигнуті, доки не відбудеться руйнування всієї секції. Початкова напруга вигину для різних елементів перерізу може бути розрахована, але визначення розривної напруги перерізу неможливо розрахувати математично.

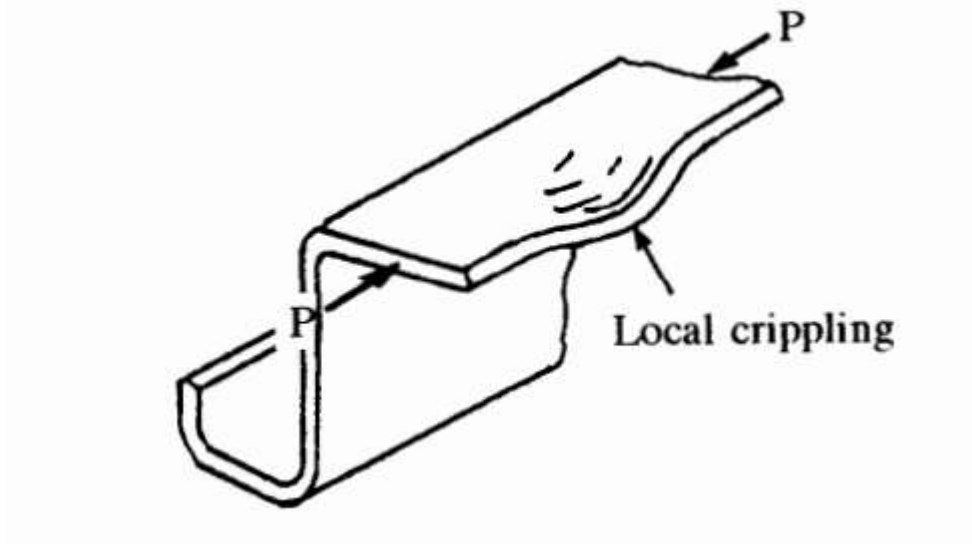


Рисунок 16 Кріплінг фланцю

Не маючи задовільної теорії для передбачення катастрофічного збою, необхідно

Покладайтеся на результати тесту

Використовуйте емпіричні методи

Тому аналіз проведений нижче у відповідності до методу описаному в Niu – Airframe Structural Design. [0] оснований на імпіричних методах. Допустимі напруження, розраховані цими методами, узгоджуються досить добре з результатами тестів.

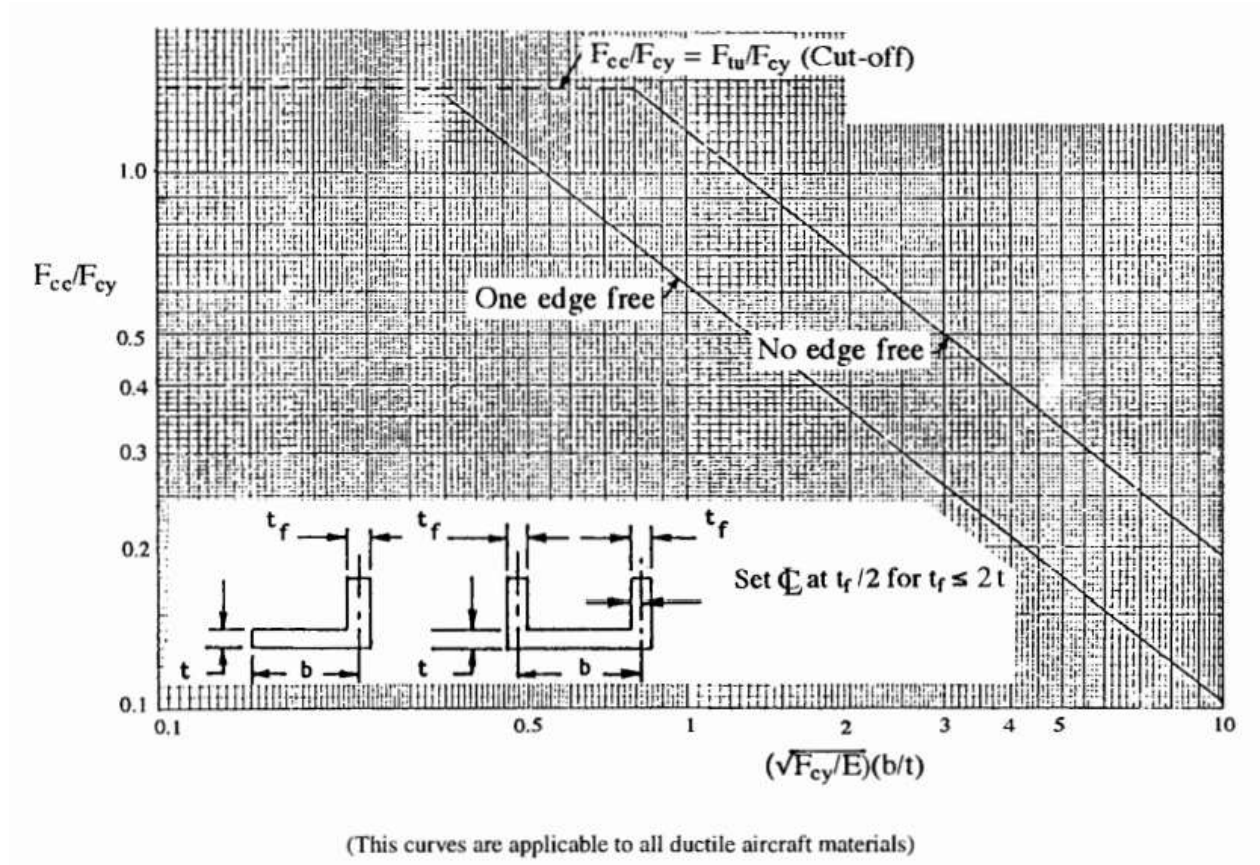


Рисунок 17 Криві напруження для екстудованого матеріалу

Допустиме напруження для всієї секції обчислюється шляхом взяття середнього допустимого для кожного сегмента:

$$F_{cc} = \frac{\sum b_n t_n F_{cc}}{\sum b_n t_n}$$

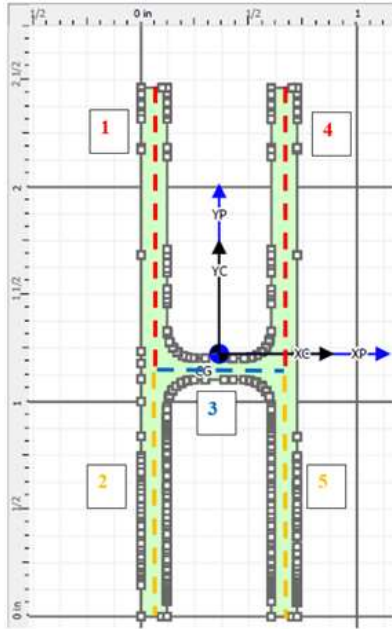


Рисунок 18 Попересний переіз рейки для аналізу на Кріплінг

Таблиця 4 Сегменти поперечного перерізу

| | b | t | b*t | b/t | (Fcy/E)^0.5 | (Fcy/E)^0.5*(b/t) | Fcc/Fcy | Fcc | t*b*Fcc |
|---|------|------|------|------|-------------|-------------------|---------|-------|---------|
| 1 | 1.15 | 0.12 | 0.14 | 9.58 | 0.08 | 0.78 | 0.75 | 52576 | 7255.5 |
| 2 | 1.15 | 0.12 | 0.14 | 9.58 | 0.08 | 0.78 | 0.75 | 52576 | 7255.5 |
| 3 | 0.60 | 0.10 | 0.06 | 6.00 | 0.08 | 0.49 | 0.90 | 63000 | 3780.0 |
| 4 | 1.15 | 0.12 | 0.14 | 9.58 | 0.08 | 0.78 | 0.75 | 52576 | 7255.5 |
| 5 | 1.15 | 0.12 | 0.14 | 9.58 | 0.08 | 0.78 | 0.75 | 52576 | 7255.5 |

$$F_{cc} = 53598 \text{ psi}$$

$$F_{cy} = 63000 \text{ psi}$$

Максимальне напруження при стиску

$$|fb_c| = 38963.08 \text{ psi} \text{ Рисунок 26.}$$

Запас міцності на кріплін для нижньої рейки:

$$MS = \min (F_{cy}, F_{cc}) / f.f. * |fb_c| - 1 = \min (63000, 53598) / 1.15 * 38963.08 - 1 = \mathbf{0.20}$$

Аналіз загальної втрати стійкості

Основним рівнянням для визначення критичної сили втрати стійкості є рівнянням Ейлера:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(L')^2}$$

$$\text{Де } L' = \frac{L}{\sqrt{c}}$$

c = коефіцієнт защемлення

Перепишемо рівняння з сил в напруження:

- Розділемо силу на площу.
- Введемо коефіцієнт $\left(\frac{L'}{\rho}\right)$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L'}{\rho}\right)^2}$$

$$\text{Де } \rho = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Передбачається, що сегмент закріплений шарнірно з обох сторін, це консервативне припущення .

Поперечний переріз представлено на малюнку 27

Проаналізовано два сегменти Рейки:

1) Передній сегмент

Випадок критичного навантаження: 9G вперед.

Розташування переднього сегмента: прямо перед 9G тягою.

Елемент FEM сегмента № 26. Вузли FEM сегмента № 2025 і № 2032.

Довжина сегмента: $L1 = 10,26$ дюйма.

2) Задній сегмент

Випадок критичного навантаження: 9G вперед.

Розташування заднього сегмента: відразу 9G тягою.

Елемент FEM сегмента № 27 і № 28. Вузли FEM сегмента № 2032 і № 2019.

Довжина сегмента: $L2 = 8,35$ дюйма.

Навантаження на сегменти витягуються з FEM і представлені в таблиці 6.

Геометрія поперечного перерізу зображена на Рисунку 28.

Як можна бачити відмінність першого сегмента аналізу від другого тільки в довжині сегмента, тому розрахунок виконано тільки для сегмента більшої довжини

Враховуючи всі попередньо описані формули і припущення отримуємо:

$$E_c = 10,7 * 10^6 \text{ див. Рисуно 4}$$

$$I = 0.0532 \text{ in}^4.$$

$$c = 1$$

$$A = 0.6139 \text{ in}^2.$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{\rho}\right)^2} = 85327 \text{ psi.}$$

Запас міцності:

$$MS = \min (F_{cy}, F_{cr}) / f.f.* |fb_c| - 1 = \min (63000, 85327) / 1.15 * 38963.08 - 1 = \mathbf{0.40}$$

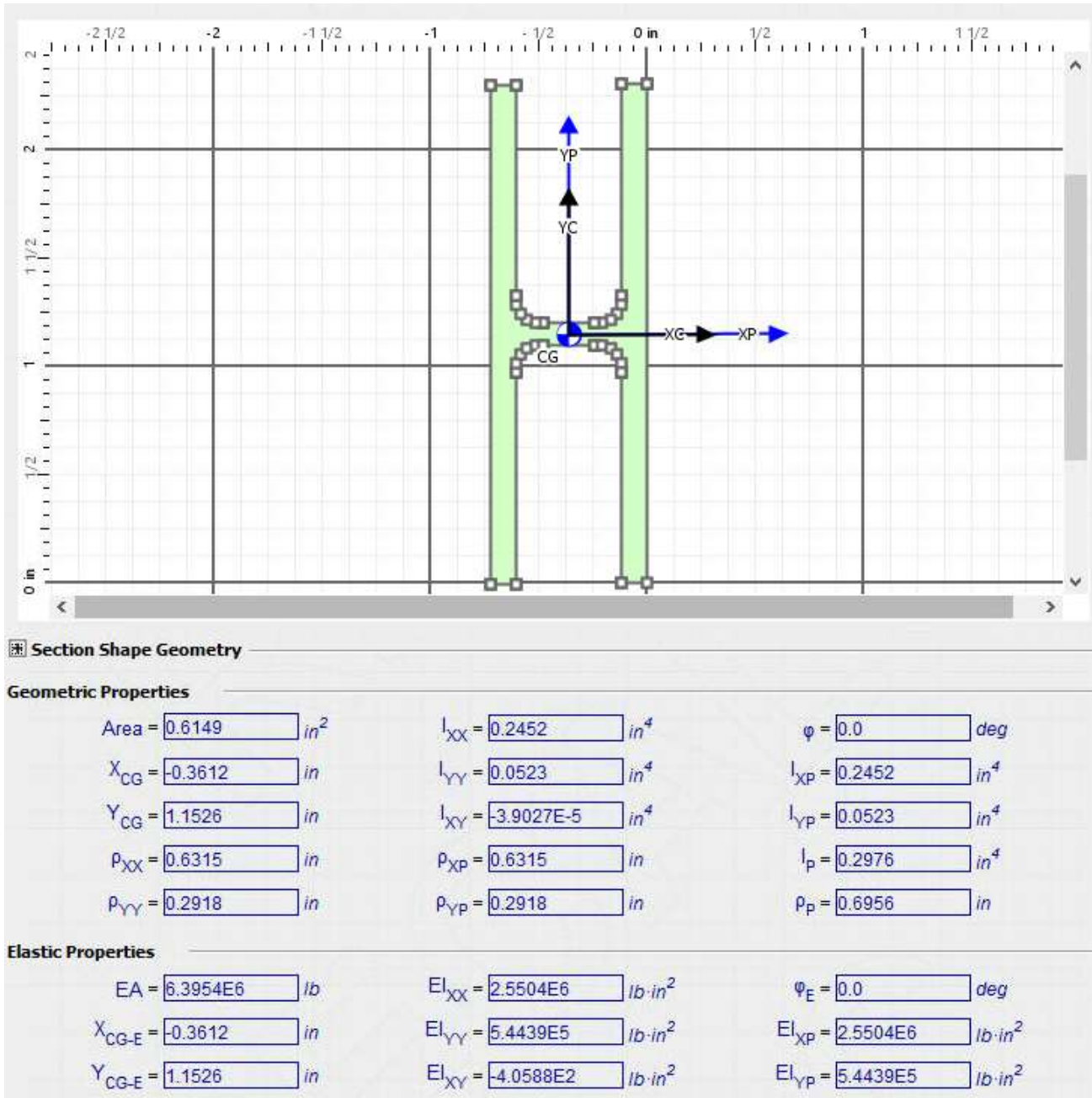


Рисунок 19 Поперечний переріз для аналізу на стиск

5.2 Міцність з'єднання навісного обладнання з рейкою (круглі отвори в рейці)

Максимальне навантаження в круглому отворі виникає від навантаження 9G вперед.

Компоненти максимального навантаження в глобальній системі координат є такими:

$$F_x = -1797.7 \text{ lb}$$

$$F_y = 0 \text{ lb}$$

$$F_z = 0 \text{ lb}$$

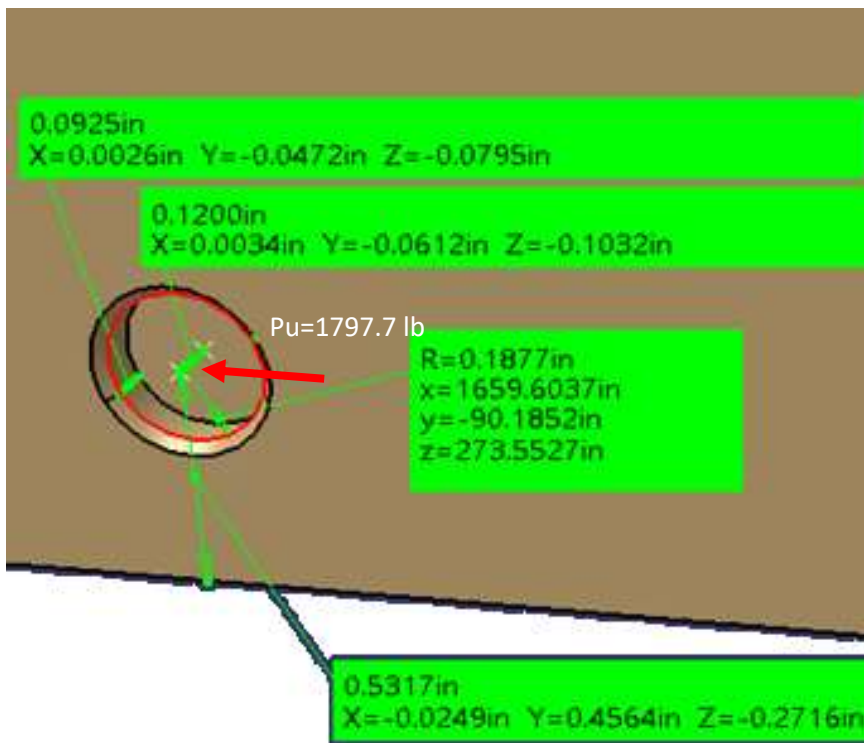


Рисунок 20 Розміри отвору

5.0.1.4 Аналіз прошини

Даний аналіз проведений у відповідності з методикою описаною в Michael C. Y. Niu – Airframe Structural Design.

$D = 0.1877 * 2 = 0.375$ in – діаметр отвору;

$a = 0.532$ in – відстань від краю деталі до краю отвору;

$F_x = 1797.7$ lbs (Рисунок 30)

На одну прошину з припущенням розподілу навантаження 60/40:

$P_u = 1079$ lb – критична сила на одну прошину

$t = 0.12$ in.

Розрахнок на зріз

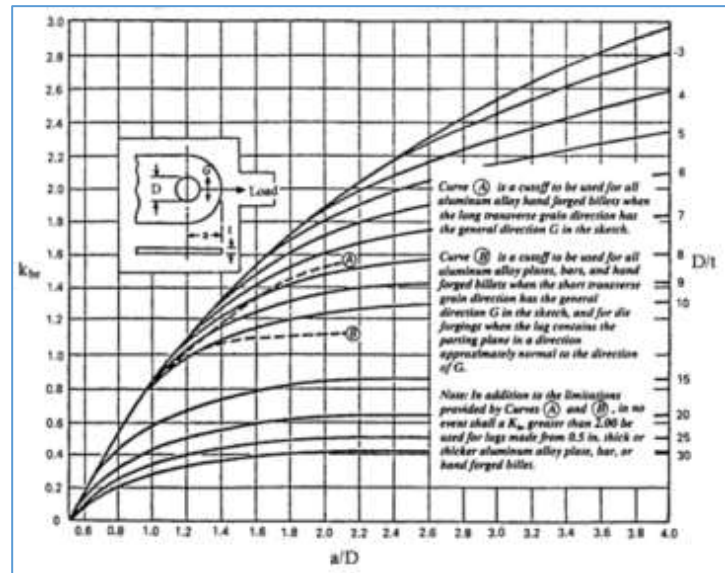
$$P_{bru} = k_{br} F_{tux} A_{br}$$

$$A_{br} = Dt$$

$$a/D = 0.532/0.375 = 1.419$$

$$k_{br} = 1.3$$

$$P_{bru} = 1.3 * 73\text{ksi} * 0.375\text{in} * 0.12\text{in} = 4.27 \text{ kips}$$



Розрахнок на розтяг

$$P_{tru} = k_t F_{tux} A_t$$

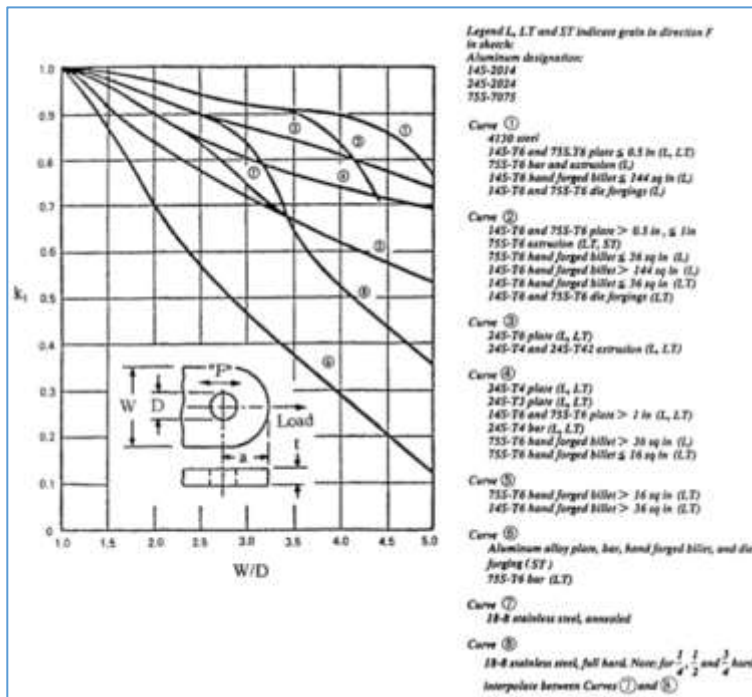
$$A_t = (W - D)t$$

$$W = 2 * a = 1.064 \text{ in}$$

$$W/D = 1.064 \text{ in} / 0.375 \text{ in} = 2.84$$

$$k_t = 0.46$$

$$P_{tru} = 0.46 * 73 \text{ ksi} * (1.064 \text{ in} - 0.375 \text{ in}) * 0.12 \text{ in} = 2.77 \text{ kips}$$



Врахування пластичного руйнування

$$P_y = C(F_{tyx} / F_{tux})(P_u)_{\min}$$

$$P_u = \text{MIN}(P_{bru}; P_{tru}) = 4.27 \text{ kips}$$

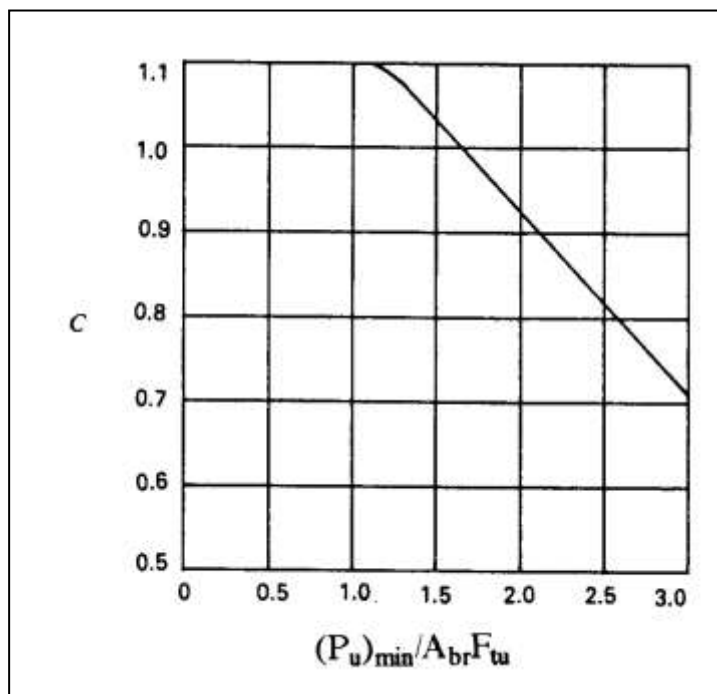
$$P_u / A_{br} F_{tu} =$$

$$4.27 \text{ kips} / (1.64 \text{ in} * 0.12 \text{ in} * 73 \text{ ksi}) = 0.84$$

$$C = 1.1$$

$$F_{tyx} = F_{ty} = 63 \text{ ksi}$$

$$P_y = 1.1(63 \text{ ksi} / 73 \text{ ksi}) * 4.27 \text{ kips} = 2.63 \text{ kips}$$



Прикладена сила:

$$P_a = 1.079 \text{ kips}$$

Допустимые силы:

$$P_{bru} = 4.27 \text{ kips}$$

$$P_{tru} = 2.77 \text{ kips}$$

$$P_y = 2.63 \text{ kips}$$

$$R_{au} = P_a / P_{tru} = 1.079 \text{ kips} / 2.77 \text{ kips} = 0.388$$

$$R_{ay} = P_a / P_y = 1.079 \text{ kips} / (1.5 * 2.63 \text{ kips}) = 0.273$$

Коефіцієнт безпеки по ultimate load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{au}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.388^{1.6})^{0.625}} - 1 = +0.123$$

Коефіцієнт безпеки по limit load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{ay}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.273^{1.6})^{0.625}} - 1 = +2.18$$

5.3 Міцність з'єднання Frame-Fitting з рейкою (продовгуваті отвори)

Рейка кріпиться до Frame-Fitting у чотирьох прорізних отворах з кожної сторони.

Загальний вигляд типових поперечних перерізів рейки в місці кріплення показано на рисунку 23.

Геометрія отвору з прорізами показана на рисунку 24 і рисунку 25.

Максимальне навантаження в отворі виникає при 9G вперед у вузлі 2025

Компоненти навантаження у вузлі 2025 у локальній системі координат є наступними (див. малюнок 33):

$$F_{x'} = 0 \text{ lb}$$

$$F_{y'} = -1146 \text{ lb}$$

$$F_{z'} = 10 \text{ lb}$$

$$F_{rez} = (F_{x'}^2 + F_{y'}^2 + F_{z'}^2) = 1146 \text{ lb}$$

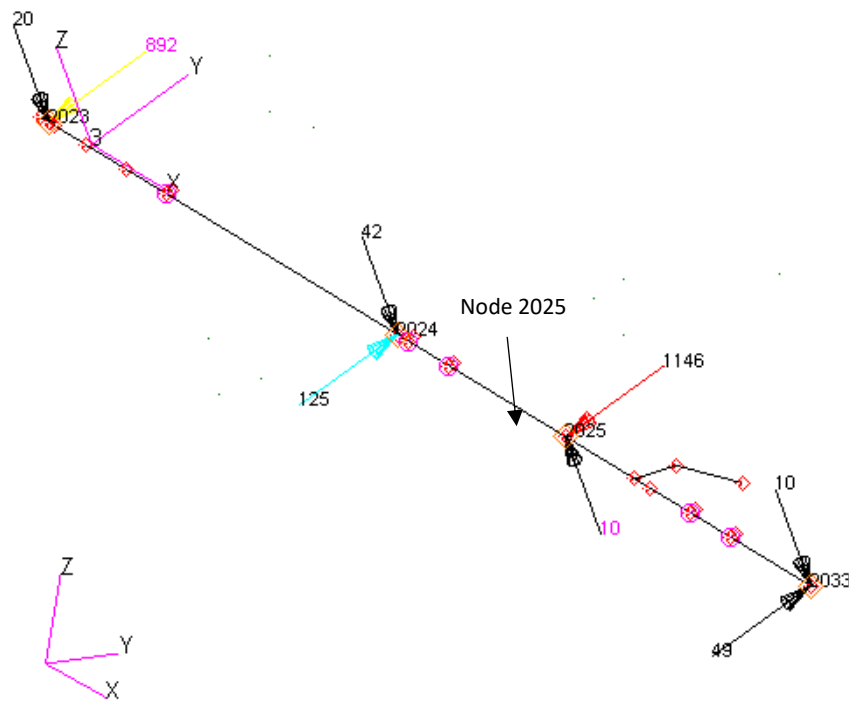


Рисунок 21 Максимальні сили в отворі (навантаження 9G вперед)

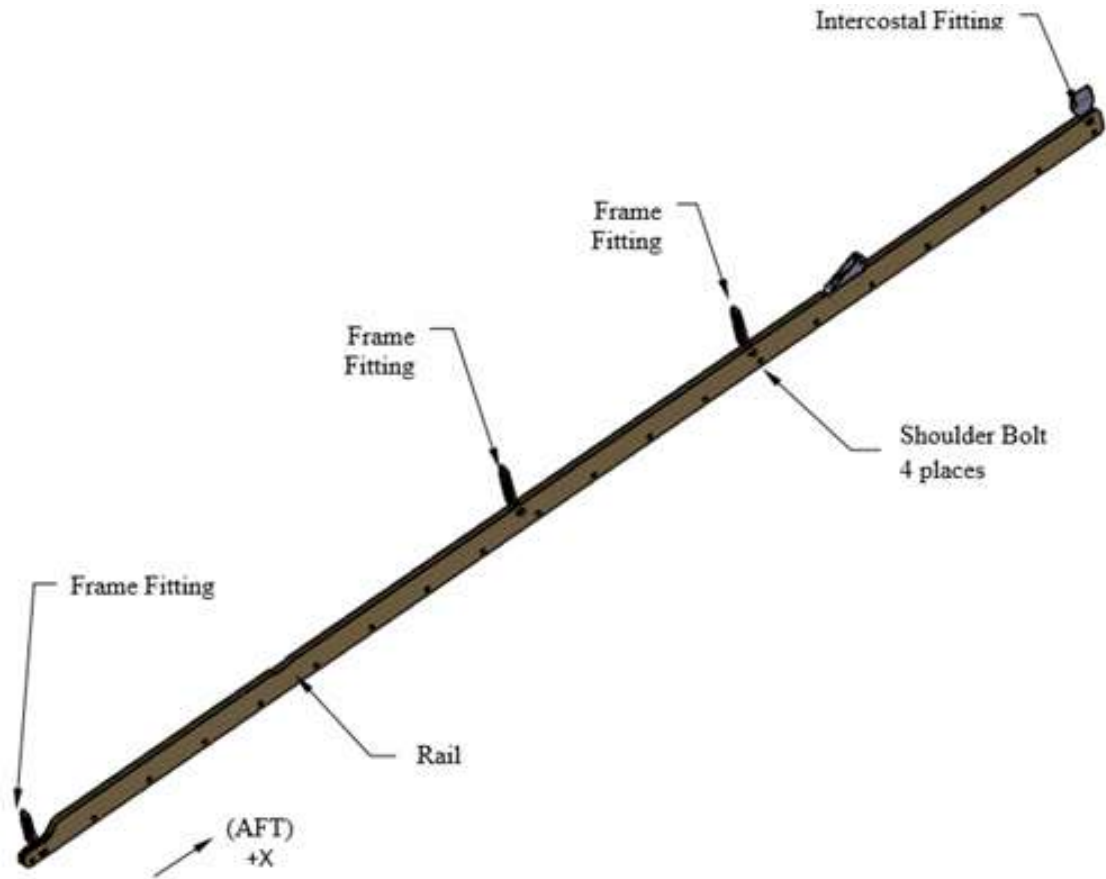


Рисунок 22 Розташування з'єднання рейки з Frame-Fitting

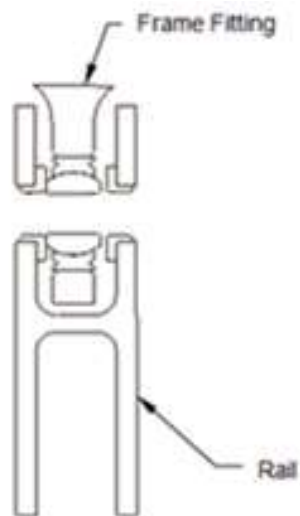


Рисунок 23 Поперечний переріз місця кріплення

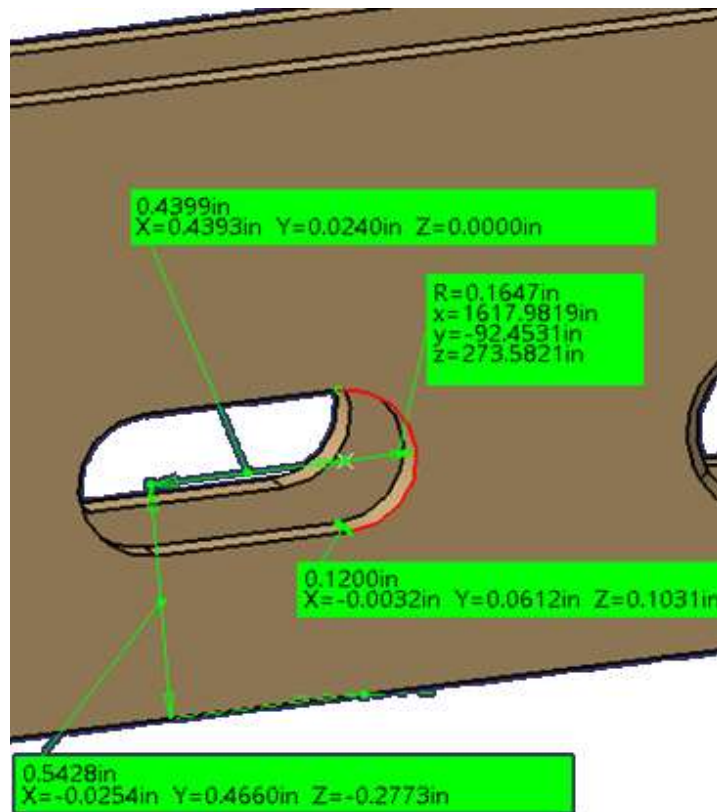
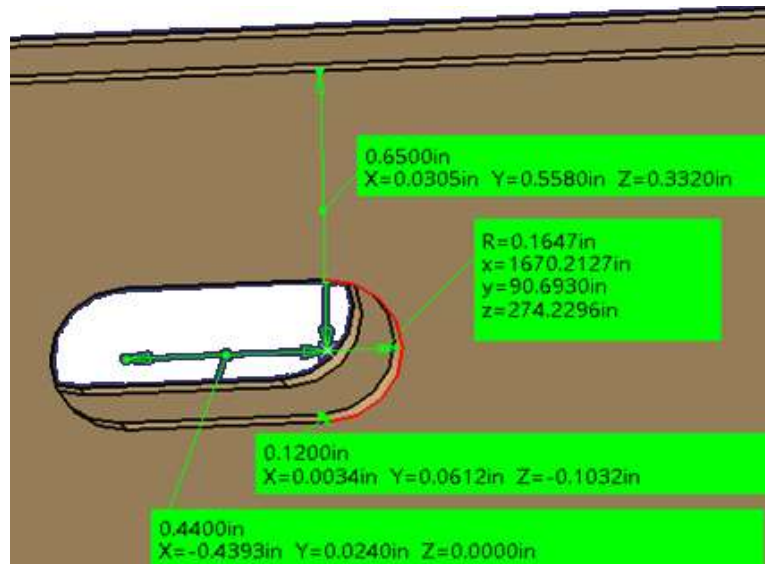


Рисунок 24 Розміри отворів

5.0.1.5 Аналіз проушини

Консервативно прийнятий діаметр отвору для аналізу проушини:

$$D = 0.44 + 2 * 0.1647 = 0.769 \text{ in.}$$

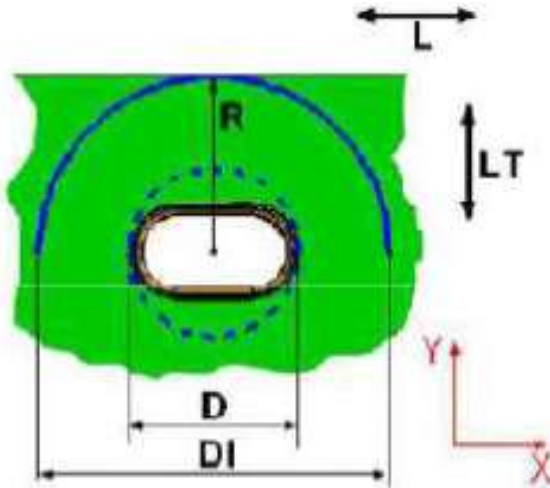


Рисунок 25 Розміри для аналізу отворів рейки

Найменший радіус :

$$R = 0.543 \text{ in.}$$

$$D1 = 1.086 \text{ in.}$$

На одну проушину з припущенням розподілу навантаження 60/40:

$$P_{\theta} = 687.6 \text{ lb} = 0,6876 \text{ kips} \text{ – максимальне наантаження на одну проушину}$$

$$P_{ax} = 0.683 \text{ kips}$$

$$P_{tr} = 0.084 \text{ kips}$$

Розрахнок на зріз

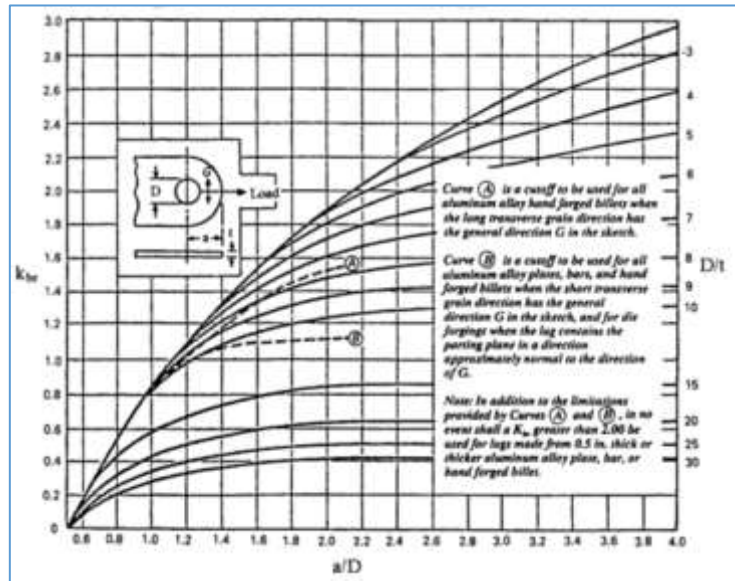
$$P_{bru} = k_{br} F_{tux} A_{br}$$

$$A_{br} = Dt$$

$$a/D = 0.543/0.769 = 0.706$$

$$k_{br} = 0.3$$

$$P_{bru} = 0.3 * 73\text{ksi} * 0.543\text{in} * 0.12\text{in} = 2.02 \text{ kips}$$



Розрахнок на розтяг

$$P_{tru} = k_t F_{tux} A_t$$

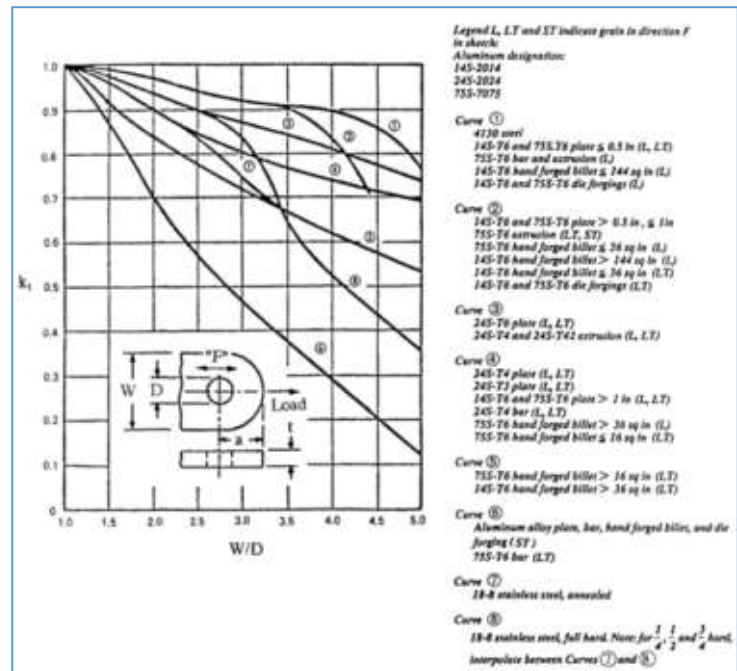
$$A_t = (W - D)t$$

$$W = 2 * a = 1.086 \text{ in}$$

$$W/D = 1.086\text{in}/0.769 \text{ in} = 1.41$$

$$k_t = 0.85$$

$$P_{tru} = 0.85 * 73\text{ksi} * (1.086\text{in} - 0.769\text{in}) * 0.12\text{in} = 2.36 \text{ kips}$$



Врахування пластичного руйнування

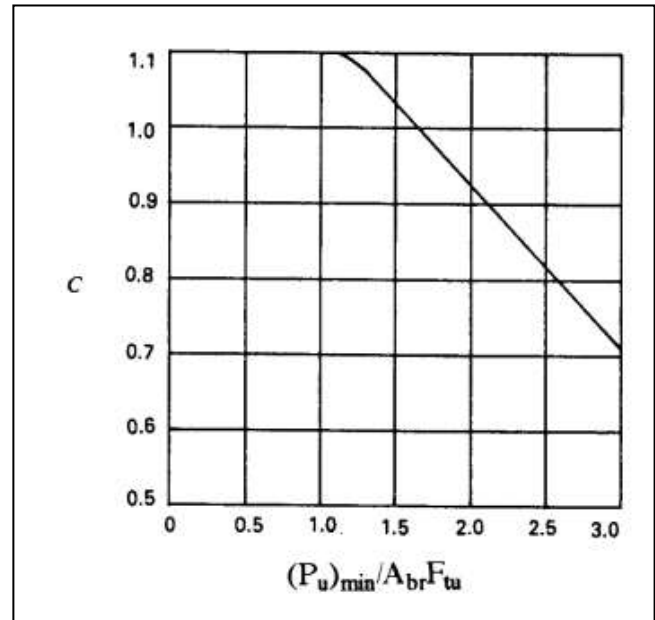
$$P_u = \text{MIN}(P_{bru}; P_{tru}) = 2.02 \text{ kips}$$

$$P_u / A_{br} F_{tu} = 2.02 \text{ kips} / (0.769 \text{ in} * 0.12 \text{ in} * 73 \text{ ksi}) = 0.3$$

$$C = 1.1$$

$$F_{tyx} = F_{ty} = 66 \text{ ksi}$$

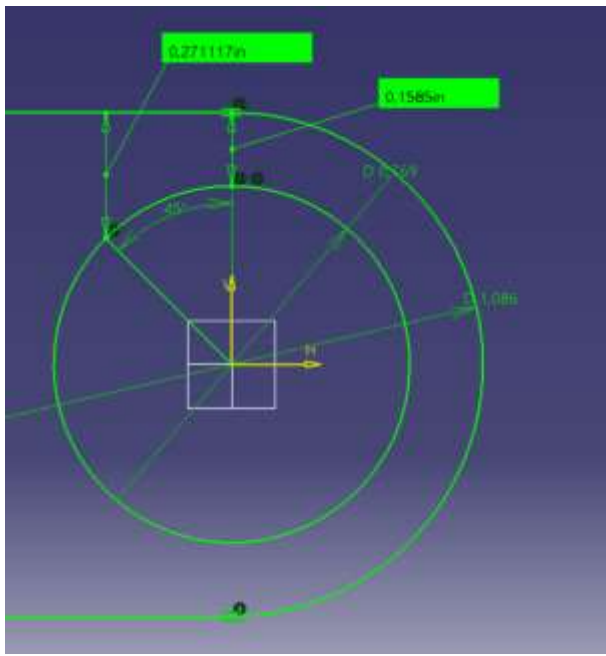
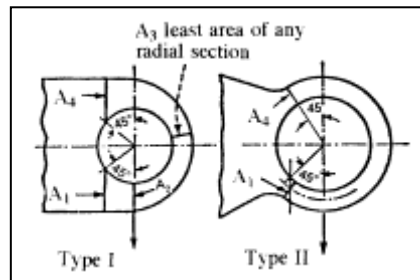
$$P_y = 1.1(66 \text{ ksi} / 76 \text{ ksi}) * 2.02 \text{ kips} = 1.92 \text{ kips}$$



Навантаження поперечною силою

$$P_{tru} = k_{tru} A_{br} F_{tuy}$$

$$P_y = k_{ty} A_{br} F_{ty}$$



$$A_1 = A_4 = L_1 * t = 0.271 \text{ in} * 0.12 \text{ in} = 0.032 \text{ in}^2$$

$$A_2=A_3= L_2*t = 0.158\text{in} * 0.12\text{in} = 0.019\text{in}$$

$$A_v = 6 / (3/A_1+1/A_2+1/A_3+A_4) = 6/(3/0.032+1/0.019+1/0.019+1/0.032) = 0.026 \text{ in}$$

$$A_v/A_{br} = 0.026\text{in}^2/0.092\text{in}^2=0.284$$

$$k_{try} = 0.38$$

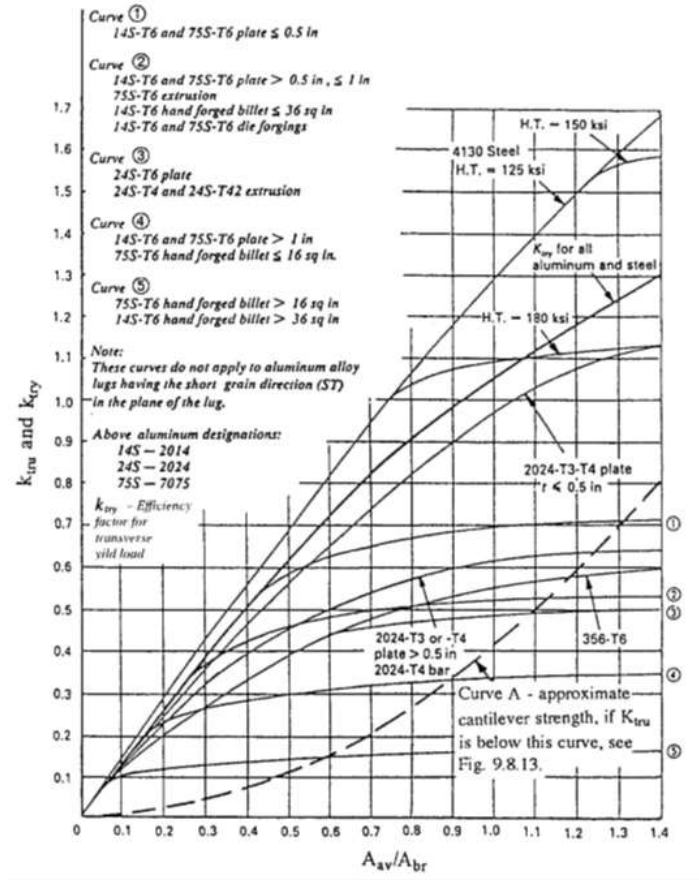
$$k_{tru} = 0.35$$

$$F_{tuy} = F_{tuLT} = 69\text{ksi}$$

$$F_{tyy} = F_{tyLT} = 62\text{ksi}$$

$$P_{tru} = 0.38*0.12\text{in}^2*69\text{ksi} = 2.22\text{kips}$$

$$P_{try} = 0.35*0.12\text{in}^2*62\text{ksi} = 2.17\text{kips}$$



Прикладена осьова сила:

$$P_a = 0.684 \text{ kips}$$

Допустимі сили:

$$P_{bru} = 2.2 \text{ kips}$$

$$P_{tru} = 2.36 \text{ kips}$$

$$P_y = 1.92\text{kips}$$

$$R_{au} = P_a/P_{tru} = 0.684\text{kips}/2.36\text{kips} = 0.338$$

$$R_{ay} = P_a/P_y = 0.684\text{kips} / (1.5*1.92\text{kips}) = 0.237$$

Поперечная нагрузка:

Поперечная сила:

$$P_{tr} = 0.084 \text{ kips}$$

Допустимі сили:

$$P_{tru} = 2.23 \text{ kips}$$

$$P_{try} = 2.17 \text{ kips}$$

$$R_{au} = P_a/P_{bru} = 0.084\text{kips}/2.23\text{kips} = 0.037$$

$$R_{ay} = P_a/P_y = 0.084\text{kips}/(1.5*2.17\text{kips}) = 0.025$$

Коефіцієнт безпеки по ultimate load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{au}^{1.6} + R_{tu}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.338^{1.6} + 0.037^{1.6})^{0.625}} - 1 = +1.52$$

Коефіцієнт безпеки по limit load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{ay}^{1.6} + R_{ty}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.237^{1.6} + 0.025^{1.6})^{0.625}} - 1 = +2.59$$

5.4 Міцність кріплення рейки до Клевіса

Міцність кріплення рейки до Клевіса

Рейка кріпляться до болтів скоби в трьох місцях для кожної рейки (Малюнок 42).

Діаметр болта: $D = 0,19$



Рисунок 25 Розташування клевіа на рейці

Ошибка! Источник ссылки не найден.

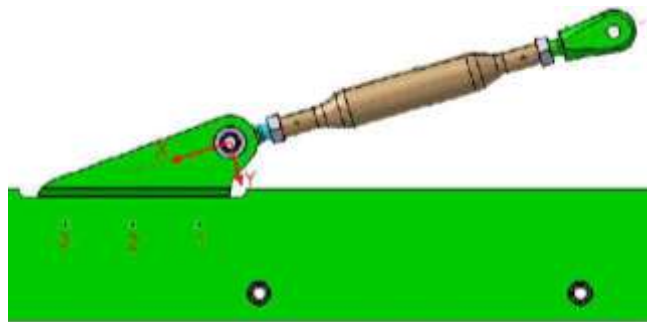


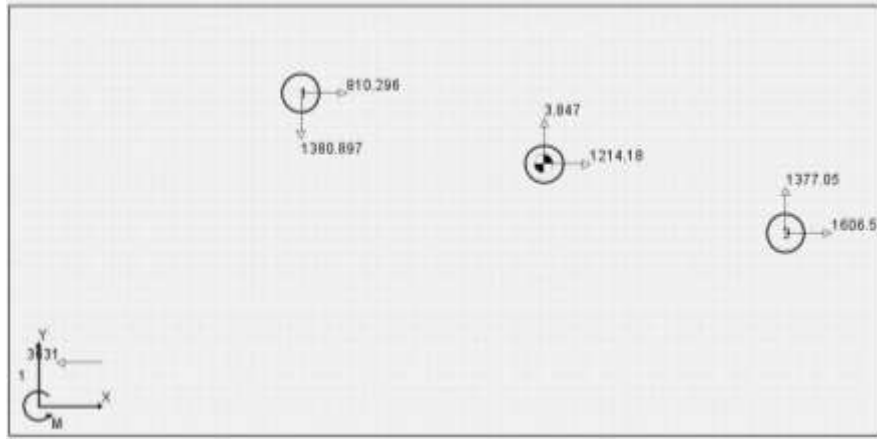
Рисунок 26 З'єднання рейки до клевіса

Максимальне навантаження на Clevis:

$$F_{\max} = (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)^{0.5} = (3490^2 + 55^2 + 1002^2)^{0.5} = 3631 \text{ lbs}$$

Максимальне навантаження в з'єднанні відбувається в кріпильному деталі №3, на основі аналізу групи кріплень, виконаного на рисунку 43

$$F_{\text{fast}} = P_{XY} = 2116 \text{ lbs}$$



Fasteners Output

| ID | PCX | PCY | PEX | PEY | PX | PY | PXY |
|----|-----------|-----|---------|----------|-----------|----------|----------|
| 1 | -1210.333 | 0 | 400.037 | 1380.897 | -810.296 | 1380.897 | 1601.08 |
| 2 | -1210.333 | 0 | -3.847 | -3.847 | -1214.18 | -3.847 | 1214.186 |
| 3 | -1210.333 | 0 | -396.19 | -1377.05 | -1606.524 | -1377.05 | 2115.936 |

Рисунок 27 Реакції в болтах

5.0.1.6 Rail Bearing

Допустиме навантаження (допустиме напруження для матеріалу див. на рисунку 4):

$$P_{br_rail} = F_{bru20} * D * t_{rail} = 124000 * 0.19 * 0.12 = 2827 \text{ lbs}$$

Assume 50/50 load distribution between two rail sides.

Коефіцієнт безпеки, з фітінг фактором 1.15:

$$MS = P_{br_rail} / (1.15 * F_{fast}/2) - 1 = 2827 / (1.15 * 2116/2) - 1 = \mathbf{1.32}$$

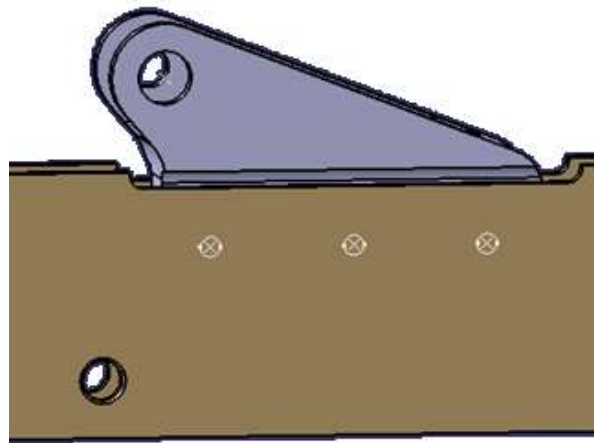


Рисунок 28 Розміщення болтів на рейці

5.5 Clevis Strength

5.5.1.1 Clevis Bearing

Bearing Allowable Load (for material bearing allowable refer to **Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

$$P_{br_clevis} = F_{bru15} * D * t_{clevis} = 101000 * 0.19 * 0.465 = 8923 \text{ lbs}$$

Запас міцності, з фітинг фактором 1.15 :

$$MS = P_{br_clevis} / (1.15 * F_{fast}) - 1 = 8923 / (1.15 * 2116) - 1 = \mathbf{2.67}$$

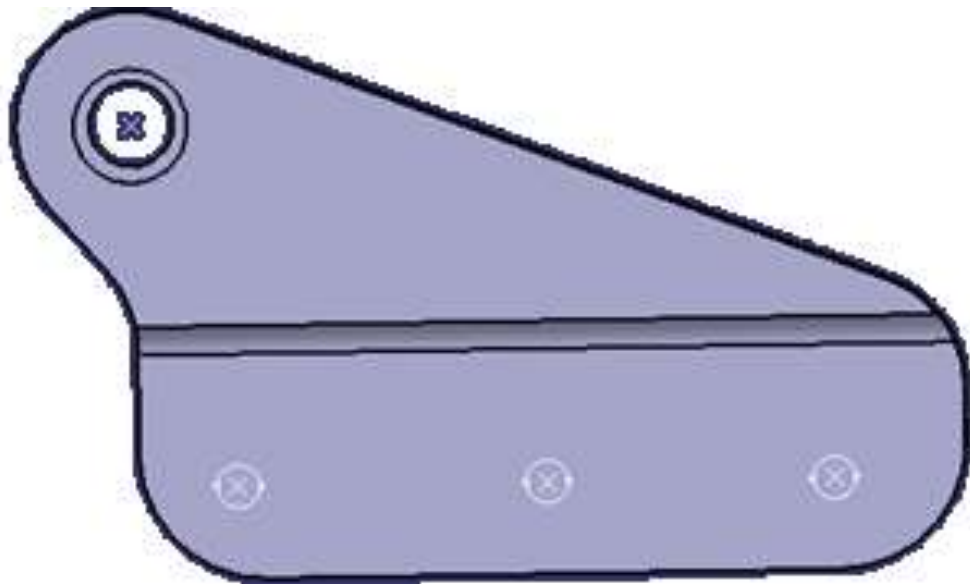


Рисунок 29 Розміщення болтів на Клевiсі

Таблиця 5 Навантаження для аналізу Клевіса в локальній системі координат

| Load Case | LHS (Node 1707) | | | RHS (Node 2026) | | |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | P _x a, lb | P _y a, lb | P _z a, lb | P _x a, lb | P _y a, lb | P _z a, lb |
| Fwd 9.0 | -2020 | 580 | 32 | -3490 | -1002 | 55 |
| Aft 1.5 | 324 | -93 | -5 | 569 | 163 | -9 |
| 3G Right | 94 | -27 | -1 | 190 | 55 | -3 |
| 3G Left | -94 | 27 | 1 | -190 | -55 | 3 |
| 3G Up | -12 | 3 | 0 | -107 | -31 | 2 |
| 6G Down | 18 | -5 | 0 | 207 | 59 | -3 |

Обидва вушка Clevis мають схожу геометрію, за винятком різного діаметру отвору.

Аналізується вушка з більшим діаметром отвору, оскільки вона охоплює обидва вушка скоби

Аналіз проушини Клевіса

Обидві проушини Клевіса мають схожу геометрію, за винятком різного діаметру отвору. Аналізується вушка з більшим діаметром отвору, оскільки вона охоплює обидві проушини.

Геометрія проушини показана на рисунку 30.

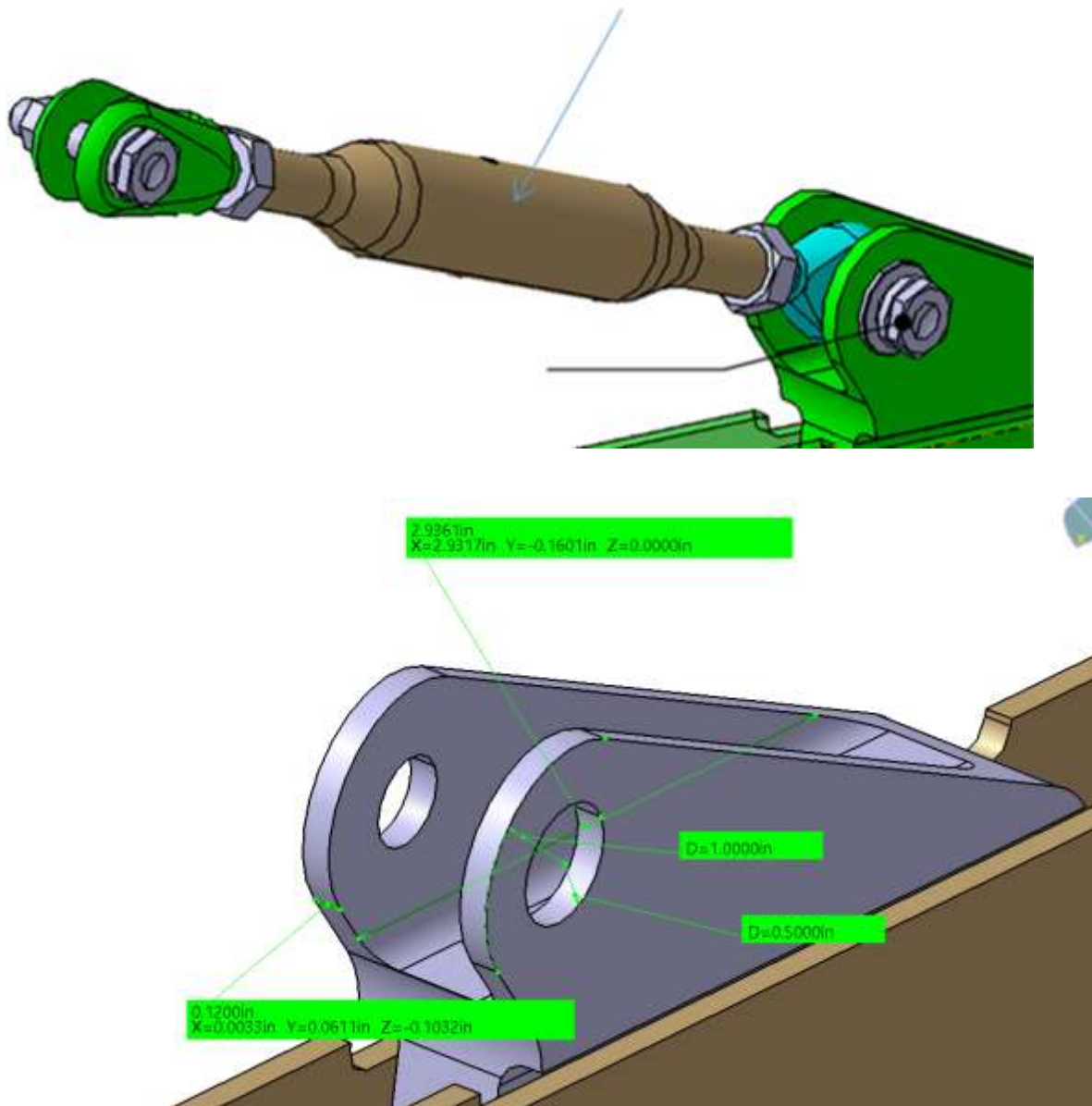


Рисунок 30. Загальний вигляд і розміри Клевіса

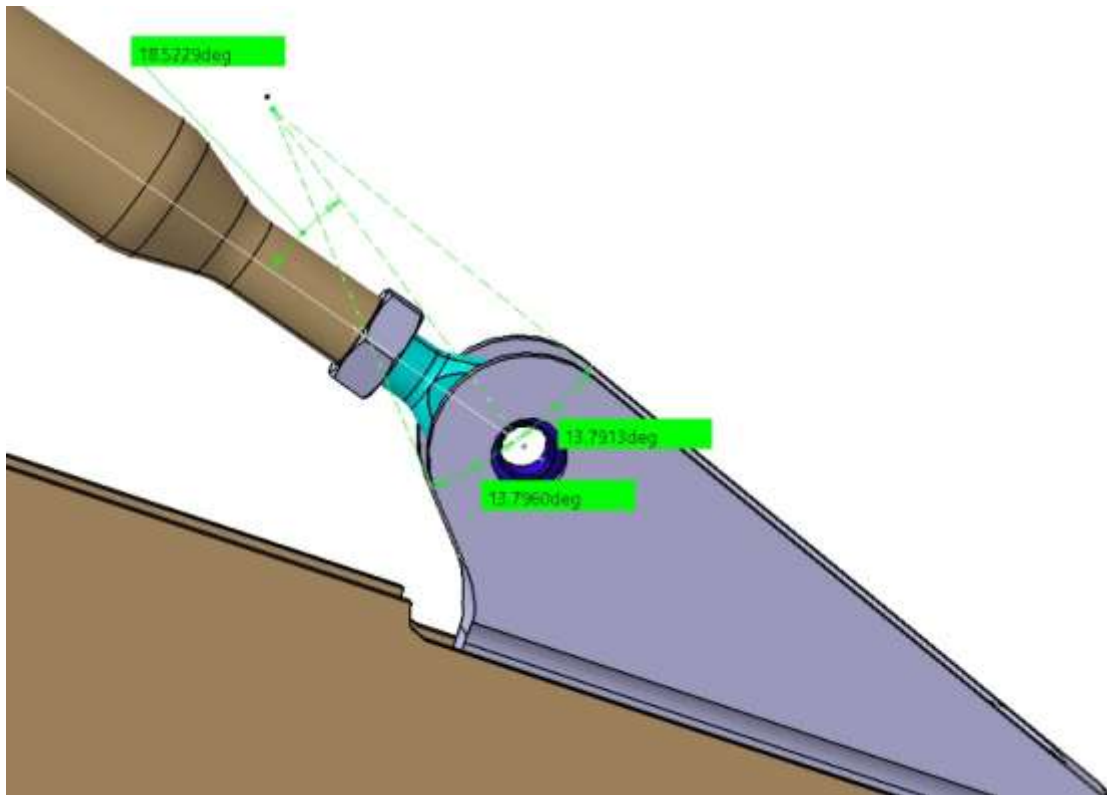


Рисунок 31. Кути прикладання сили

Кути прикладеного навантаження на Клевiс такi:

$$\theta = 18.5 \text{ deg}$$

Максимальне навантаження вiд 9G Вперед (див. таблицю 11):

$$P_{\text{applied}} = \sqrt{P_x a^2 + P_y a^2 + P_z a^2} = \sqrt{3490^2 + 1002^2 + 55^2} = 3631 \text{ lb}$$

Консервативно припустимо: розподiл навантаження 60/40 мiж наконечниками Фiтiнга. Таким чином:

$P_u = P_{\text{lug}} = 0.6 * P_{\text{applied}} = 0.6 * 3631 = 2179 \text{ lb}$ – граничне навантаження на одну провущину.

Розрахнок на зріз

$$P_{bru} = k_{br} F_{tux} A_{br}$$
$$A_{br} = Dt$$

$$a/D = 0.5/0.5 = 1$$

$$k_{br} = 0.84$$

$$P_{bru} = 0.3 * 76 \text{ksi} * 0.5 \text{in} * 0.12 \text{in} = 4.16 \text{kips}$$

Розрахнок на розтяг

$$P_{tru} = k_t F_{tux} A_t$$
$$A_t = (W - D)t$$

$$W = 2 * a = 1 \text{in}$$

$$W/D = 1 \text{in} / 0.5 \text{in} = 2$$

$$k_t = 0.95$$

$$P_{tru} = 0.95 * 76 \text{ksi} * (1 \text{in} - 0.5 \text{in}) * 0.12 \text{in} = 4.332 \text{kips}$$

Врахування пластичного руйнування

$$P_u = \text{MIN}(P_{bru}; P_{tru}) = 4.16 \text{kips}$$

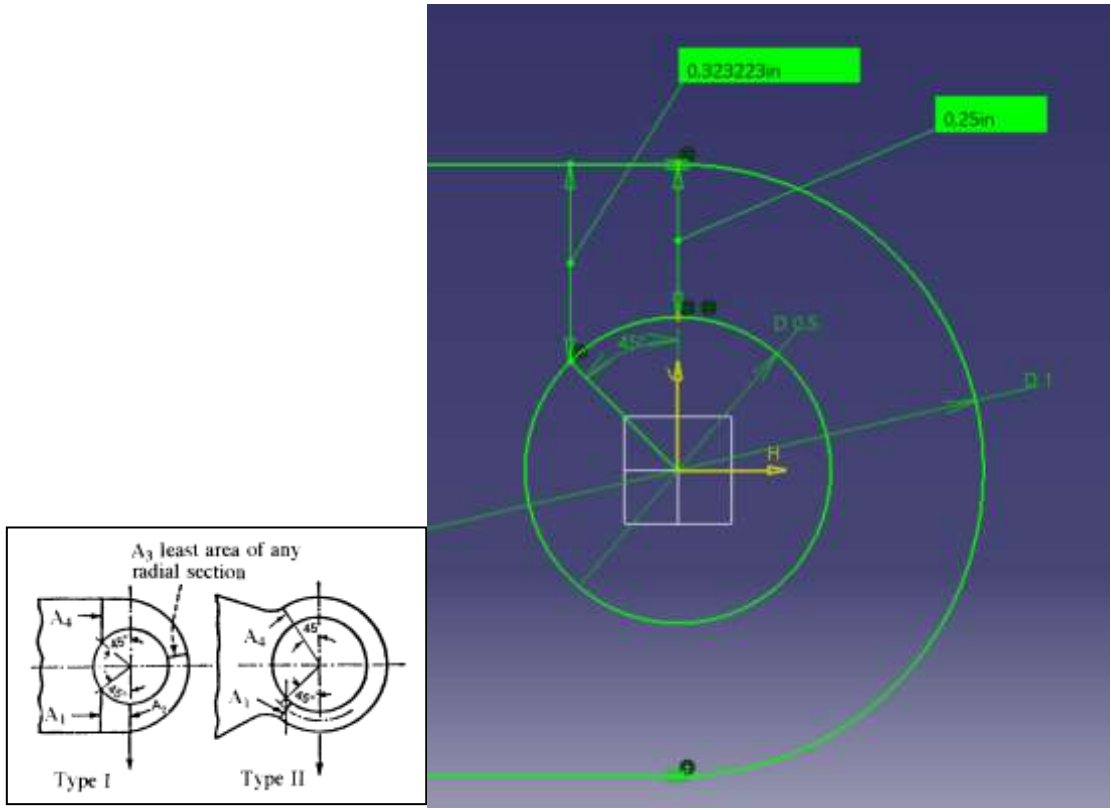
$$P_u / A_{br} F_{tu} = 4.16 \text{kips} / (0.5 \text{in} * 0.12 \text{in} * 76 \text{ksi}) = 0.84$$

$$C = 1.1$$

$$F_{tyx} = F_{ty} = 66 \text{ksi}$$

$$P_y = 1.1 (65 \text{ksi} / 73 \text{ksi}) * 2.02 \text{kips} = 1.92 \text{kips}$$

Навантаження поперечною силою



$$P_{tru} = k_{tru} A_{br} F_{tuy}$$

$$P_y = k_{tyy} A_{br} F_{tyy}$$

$$A1=A4= L1*t = 0.3232in * 0.12in = 0.0384in$$

$$A2=A3= L2*t = 0.25in * 0.12in = 0.03in$$

$$A_v = 6 / (3/A1+1/A2+1/A3+A4) =$$

$$= 6/(3/0.0384+1/0.03+1/0.03+1/0.384) = 0.0351 in$$

$$A_v/A_{br} = 0.026in^2/0.092in^2=0.585$$

$$k_{try} = 0.61$$

$$k_{tru} = 0.72$$

$$F_{tuy} = F_{tuLT} = 76ksi$$

$$F_{tyy} = F_{tyLT} = 66ksi$$

$$P_{tru} = 0.61 * 0.12 \text{in}^2 * 76 \text{ksi} = 2.78 \text{kips}$$

$$P_{try} = 0.72 * 0.12 \text{in}^2 * 66 \text{ksi} = 2.85 \text{kips}$$

Прикладена осьова сила:

$$P_a = 2.07 \text{kips}$$

Допустимі сили:

$$P_{bru} = 3.83 \text{kips}$$

$$P_{tru} = 4.33 \text{kips}$$

$$P_y = 3.65 \text{kips}$$

$$R_{au} = P_a / P_{tru} = 2.07 \text{kips} / 3.83 \text{kips} = 0.541$$

$$R_{ay} = P_a / P_y = 2.07 \text{kips} / (1.5 * 3.65 \text{kips}) = 0.337$$

Поперечная нагрузка:

Поперечная сила:

$$P_{tr} = 0.673 \text{kips}$$

Допустимі сили:

$$P_{tru} = 2.78 \text{kips}$$

$$P_{try} = 2.85 \text{kips}$$

$$R_{au} = P_a / P_{bru} = 0.673 \text{kips} / 2.78 \text{kips} = 0.24$$

$$R_{ay} = P_a / P_y = 0.673 \text{kips} / (1.5 * 2.85 \text{kips}) = 0.15$$

Коефіцієнт безпеки по ultimate load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{au}^{1.6} + R_{tu}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.541^{1.6} + 0.024^{1.6})^{0.625}} - 1 = +0.38$$

Коефіцієнт безпеки по limit load

$$MS = \frac{1}{1.15 * (R_{ay}^{1.6} + R_{ty}^{1.6})^{0.625}} - 1 = \frac{1}{1.15 * (0.337^{1.6} + 0.15^{1.6})^{0.625}} - 1 = +1$$

Перевірка напружень за Мізесом методом скінченних елементів у програмі Patran.

Клевів моделюється з використанням 3D Solid елементів (HEX8). Штифт моделюється як елемент 1D Bar. Для кріплення використовуються граничні умови (123). На штифт прикладається критичне пряме навантаження 9G. MPC (RBE2) використовуються для імітації з'єднання (Малюнок 53).

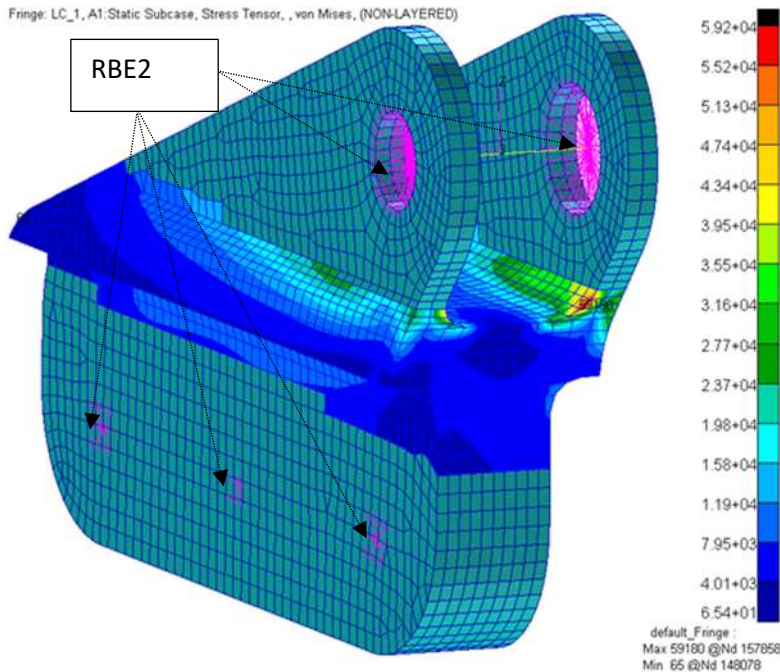


Рисунок 32 Клевів FEM

Критичний тип навантаження для нашого елемента це 9G Вперед
Визначено максимальні напруження за Мізесом, вони знаходяться на радіусі закругення.

$$f_{FEM} = 59180 \text{ psi (Ошибка! Источник ссылки не найден.)}$$

Запас міцності порахований з урахуванням фітінг фактору = 1.15

$$MS = Fallow / (f_{FEM} * 1.15) - 1 = 76000 / (59180 * 1.15) - 1 = \mathbf{0.12}$$

6. Розроблення Стартуп проекту

В розділі проведено маркетинговий аналіз стартуп проекту, визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

A. SWOT-аналіз проекту

Аналіз діючих факторів

| Мета проекту | | |
|--------------|---|---|
| + | S Досвідчена проектна команда Доступні ресурси Сучасне ПО | O Висока продуктивність та наочність САЕ розрахунків в порівнянні з класичними методами розрахунків Висока гнучкість та варіативність при обранні оптимальної конструкції |
| - | W Складність використання ПО Висока ціна комп'ютерної техніки для швидкого отримання результатів | T Потенційно висока ціна на майбутні послуги задля окупання проекту Конкуренція на ринку |

Пошук конструктивного рішення

| Мета проекту | | |
|--------------|--|---|
| | О | Т |
| S | Максимальне використання потенціалу команди, проведення колективних нарад, нарад експертних груп | Скорочення тривалості проекту за рахунок оптимізації процесів |
| W | Ретельна підготовка персоналу | |

В. Узагальнений перелік робіт проекту

- Планування робіт проекту та формування команди проекту
- Вибір основного напрямку діяльності
- Обрання ПО оптимізованого під основні напрямки діяльності
- Розробка то освоєння програм навчання для персоналу
- Пошук партнерів та замовників
- Завершення проекту

С. Перелік посадових осіб, що задіяні у проекті

1. Менеджер проекту
2. Головний інженер з ПО
3. Головний інженер з міцності
4. Інженер з міцності - 5 чол
5. Інженери-конструктори 5 чол

Матриця відповідальності проекту

| робота | менеджер проекту | Головний інженер 3 | Головний інженер 3 | інженер 3 | мішності | контруктор |
|---|------------------|--------------------|--------------------|-----------|----------|------------|
| 1 Організація роботи підприємства | З (В) | | | | | |
| 2.Навчання інженерів складання навчальних програм | | З(В) | | | | |
| 3.Перевірка моделі | | З(В) | | | | |
| 4 Верифікація розрахунку | | | З | | | |
| 5 Створення моделі з допомогою САЕ | | | | З(В) | З(В) | |

Позначення: ОВ – основна відповідальність, В – виконання, С – співвиконання, Е – експертиза, К – консультування, П – необхідно погодження, З – необхідно затвердження тощо.

Д. Перелік витрат проекту

- Витрати на оплату праці.
- Витрати на Програмне Забезпечення.
- Витрати на комп'ютерне обладнання.
- Витрати на утримання устаткування і експлуатацію приміщень.
- Витрати на навчання персоналу.
- Накладні та управлінські витрати.
- Виплати і податки.

Перелік функцій і компетенцій керівника проекту

Функції менеджера проекту:

- визначення цілей, пріоритетів, критеріїв успіху проекту;
- організація розробки плану управління проектом (планування термінів, витрат, ризиків тощо);
- оперативний контроль за ходом проекту (дотримання запланованих термінів, витрат);
- набір команди проекту та координація членів команди, розробка системи мотивації та заохочення членів команди;
- контроль виконання зобов'язань сторін у контексті укладених договорів;

Компетенції керівника проекту:

- знання в галузі управління проектами, навички використання програмних продуктів управління проектами;
- знання в галузі організації та управління персоналом;
- знання основ пакетів SAE;
- ефективний досвід управління проектами;
- знання законодавчих, нормативних і нормативних актів, норм і правил, що регулюють сферу діяльності організації;
- наявність лідерських якостей та організаторських здібностей;
- навички ведення переговорів.

Е. Основні заходи з управління командою

1. Визначення складу проектної групи.
2. Проведення переговорів з керівниками функціональних підрозділів організації щодо відбору штатних спеціалістів для участі в проекті на постійній основі.

4. Проведення установчих зборів з визначенням завдань для кожного члена команди.
5. Проведення планової наради з оцінкою поточної діяльності, обговоренням та вирішенням конфліктних питань.
6. Проведення індивідуальних зустрічей «менеджер проекту-члени команди» з вирішенням конфліктних питань.
7. Організація функціонування системи мотивації та заохочення.
8. Організація навчання членів колективу (тренінги, семінари, профільні виставки).

Г. Ризики проекту

| Ризикована подія (ризик) | Вірогідність події (у балах від 1 до 5) | Вплив події (у балах від 1 до 5) | Рівень ризику (вірогідність x вплив) | Рівень ризику (незначний, середній, недопустимий) |
|---|---|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| Помилковість у розробці концепції проекту | 1 | 4 | 4 | незначний |
| Поява альтернативного продукту | 1 | 3 | 3 | незначний |
| Нестача кваліфікованого персоналу | 3 | 4 | 12 | недопустимий ризик |
| Неплатоспроможність Замовника | 1 | 5 | 5 | середній |

| | | | | |
|---|---|---|---|-----------------|
| Невиконання контрактних зобов'язань підрядниками з надання ПО | 1 | 4 | 4 | незначний ризик |
|---|---|---|---|-----------------|

Г. Основні заходи з контролю якості проекту

- Побудова діаграми Парето для виявлення дефектів у якості запланованих зустрічей для оцінки поточної діяльності. Відповідальний – керівник проекту.
- Тестування працівників. Відповідальний – головний інженер з охорони праці.
- Тестування програмного забезпечення. Відповідальний – головний інженер-програміст

Н. Закупівлі проекту

| Перелік робіт проекту | Рішення щодо реалізації робіт (виконуються самостійно або замовляються зовнішньому постачальнику) | Перелік основних закупівель, що здійснюються для реалізації робіт проекту (канцелярські товари, оргтехніка, інструмент, обладнання, програмне забезпечення, комплектуючі тощо) |
|-------------------------------------|--|---|
| Вибір основного напрямку діяльності | Виконуються самостійно | Ппринтери, канцелярські товари, розхідні матеріали для оргтехніки, послуги з впровадження системи з управління проектами, |

| | | |
|--|-------------------------------|--|
| | | <p>послуги з системного адміністрування ПК, послуги з охорони, послуги телефонного та інтернет-зв'язку, послуги з банківського обслуговування, послуги з юридичного консультування</p> |
| <p>Обрання ПО оптимізованого під основні напрямки діяльності</p> | <p>Виконуються самостійно</p> | <p>Закупівля ліцензії обраного ПО, спеціалізовані пристрої для роботи з великими базами даних</p> |
| <p>Розробка то освоєння програм навчання для персоналу</p> | <p>Виконуються самостійно</p> | <p>Програмне забезпечення, канцелярські товари, розхідні матеріали для оргтехніки</p> |
| <p>Пошук партнерів та замовників</p> | <p>Виконуються самостійно</p> | <p>Канцелярські товари, розхідні матеріали для оргтехніки</p> |
| <p>Завершення проекту</p> | <p>Виконуються самостійно</p> | <p>Канцелярські товари, розхідні матеріали для оргтехніки</p> |

7. Висновок

Результати аналізу показали, що всі запаси міцності є позитивними, що означає, що умови безпеки дотримані. Отже, конструкція задовольняє умовам міцності з урахуванням значних перевантажень, які можуть виникнути в найкритичнішій ситуації під час експлуатації літака.

Вирішення цієї проблеми дозволило сформулювати важливий висновок для практичного використання, що розглянута конструкція може бути встановлена в літальному апараті. Розроблена модель скінчених елементів може бути використана для розрахунку міцності інших подібних конструкцій.

8. Література

- 1) УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ "MSC.PATRAN В ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧАХ", Яхно Б.О., Гладский М.Н.
- 2) Airworthiness Standards FAA FAR Part 25
- 3) Г.И. Житомирский. Конструкция самолетов. – Москва: Машиностроение, 1995. – 415с.
- 4) Michael C. Y. Niu – Airframe Structural Design. – Conmilit Press LTD, 1995. – 612p
- 5) MIL-HDBK-5H 1 DECEMBER 1998
- 6) Зенкевич О. К.. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. -М: Мир, 1975. - 541с. 89 17.
- 7) Писаренко Г.С., Амелянович К.К, Козуб Ю.И., Родичев Ю.М., Охрименко Г.М., Прочные оболочки из силикатных материалов.- Киев: Наукова Думка, 1989.-224 с.
- 8) О. А. Гребеньков Конструкция самолетов. – Москва: Машиностроение, 1984. – 239с.