МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний
(повне найменування інституту, факультету)
Деталі машин та ПТМ
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції стріли автопідйомника

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи М313м

Спеціальності 133 галузеве машинобудування
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Підйомно-транспортні машини та механізми
Іскаров Микита Миколайович
(прізвище та ініціали)
Керівник Фролов Роман Олександрович
(прізвище та ініціали)
Рецензент Сидоренко Михайло Володимирович
(прізвище та ініціали)

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Машинобудівний
Кафедра Деталі Машин та ТТМ
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) підйомно-транспортні машини та механізми
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Житовицький Л.М.
«_____» _____ 20___ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Чепарів Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження напружено деформованого стану металоконструкції стріли автонавантажувача

керівник проєкту (роботи) Фролов Роман Олександрович, ст.викладач,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «11» жовтня 2024 року № 404
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10.12.2024
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Телескопічна стріла автонавантажувача вантажопідйомністю 2т.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз питання розрахунку телескопічної стріли 2. Аналіз місцевої та сумарної напруженості стріли з різними поперечними перерізами. 3. Визначення напружень в розрахункових перерізах методом скінчених елементів 4. Розрахунок місцевих напружень на ділянках дії напружень опорних елементів. 5. Розрахунок напружень МКЕ за допомогою комплексу програм Solidworks

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
5 Креслень формату А1.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Фролов Роман Олександрович		15.10.2024
2	Фролов Роман Олександрович		23.10.2024
3	Фролов Роман Олександрович		31.10.2024
4	Фролов Роман Олександрович		15.11.2024
5	Фролов Роман Олександрович		06.12.2024

7. Дата видачі завдання «11» 12 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз методів розрахунку тонкостінних стрижнів	15.10.2024	
2	Аналіз можливості симетрії навантаженості стрижнів з поперечними перерізами різної форми.	23.10.2024	
3	Визначення напружень в розрахункових перерізах методом скінчених елементів	31.10.2024	
4	Розрахунок місцевих напружень на різних ділянках навантаженість окремих елементів.	15.11.2024	
5	Розрахунок напружень МКЕ за допомогою комплексу програм SolidWorks	06.12.2024	

Студент _____ (підпис) Чагаров М.М. (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ (підпис) Фролов Р.О. (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 130 с., 61 рис., 11 табл., 13 джерел.

Об’єкт дослідження – металоконструкція коробчатої телескопічної стріли автопідйомника.

Мета роботи – дослідження напруженого стану металоконструкції коробчатої телескопічної стріли автопідйомника, порівняння результатів розрахунку напруженого стану в опорних елементах секцій (колін) методом опору матеріалів та методом кінцевих елементів за допомогою комплексу програм SOLIDWORKS.

Були виконані дослідження напруженого стану металоконструкції телескопічної стріли у вигляді перевірного розрахунку в небезпечних перерізах. Для перевірки достовірності результатів був виконаний порівняльний розрахунок секцій стріли методом кінцевих елементів за допомогою комплексу програм SOLIDWORKS. Дослідження не передбачають проектний розрахунок металоконструкції.

Особлива увага приділялась визначенню напружено-деформованого стану в стінках та поясах металоконструкції від опорних елементів телескопічних секцій. Дослідження базувалися на використанні експериментальних досліджень телескопічних стріл. Для визначення напружень була використана рекомендована нею методика. Достовірність використаних формул підтверджена експериментальними дослідженнями організації.

В роботі не розглядаються питання щодо оптимізації форми поперечного перерізу металоконструкції.

В результаті розрахунків обома методами були отримані значення напружень з відносними різницями 8% - визначення напружень від балкового вигину стріли, 20% - визначення напружень в зонах дії опорних елементів.

НАПРУЖЕННЯ, МОМЕНТ, СИЛА, ПРУЖНІСТЬ, ЗГИНАННЯ, КРУЧЕННЯ, СТРІЛА, СЕКЦІЯ, БАЛКА, SOLIDWORKS, СІТКА, КІНЦЕВИЙ ЕЛЕМЕНТ, ОПОРНИЙ ЕЛЕМЕНТ, РОЛИК, МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯ.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ....1
РЕФЕРАТ....4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ....8
ВСТУП....11
РОЗДІЛ 1АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СТРІЛ....13
РОЗДІЛ 2 . АНАЛІЗ МІСЦЕВОЇ ТА СУМАРНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ СТРІЛ З ПОПЕРЕЧНИМИ ПЕРЕРІЗАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ....21
2.1. Умови проведення аналізу....21
2.2. Згинальна та крутильна жорсткість стріли....34
2.3. Напруження від зовнішніх навантажень....34
2.4. Місцева завантаженість (від місцевих тисків опорних вузлів секцій)....35
2.5. Сумарна завантаженість (від зовнішніх навантажень і тисків опорних вузлів)....36
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В РОЗРАХУНКОВИХ ПЕРЕРІЗАХ МЕТОДОМ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ....41
3.1. Визначення геометричних характеристик перерізів секцій....41
3.2. Механічні характеристики матеріалу....44
3.3. Розрахунок головної секції....45
3.4. Розрахунок середньої секції....47
3.5. Розрахунок кореневої секції....49
3.6. Розрахунок зварних з’єднань....51
3.7. Визначення напружень в розрахункових перерізах методом опору матеріалів у овоїдному перетині....52
3.8. Результати розрахунку....56
3.9. Фактичні коефіцієнти запасу....56
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК МІСЦЕВИХ НАПРУЖЕНЬ НА ДІЛЯНКАХ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ ОПОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ....59
4.1. Загальні положення....59
4.2. Розрахункова схема стріли....66

4.3. Розрахунок перерізів А-А, Б-Б 66
4.4. Розрахунок перерізів В-В, Г-Г 71
4.5. Визначення напружень від дії навантажень опорних елементів у секціях стріли 74
4.5.1. Поперечні мембранні напруження 74
4.5.2. Поперечні напруження згину в поясі 76
4.5.3. Поперечні напруження вигину бічної стінки 80
4.5.4. Поздовжні напруження вигину в поясі 81
4.5.5. Поздовжні напруження вигину в бічній стінці 82
4.5.6. Поздовжні мембранні напруження у бічній стінці 84
4.5.7. Напруження від поперечного вигину бічної стінки 85
4.5.8. Напруження від поздовжнього вигину бічної стінки 85
4.6. Визначення приведених напружень в опорних елементах 86
4.7. Напружено-деформований стан стріли від дії навантажень опорних елементів 90
4.8. Результати розрахунку напружень від дії опорних елементів 92
РОЗДІЛ 5 ....РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ МКЕ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСУ ПРОГРАМ SOLIDWORKS 94
5.1. Вступ в Solidworks 94
5.2. Загальні положення розрахунку 94
5.3. Методика розрахунку 95
5.4. Визначення напружень в розрахункових перерізах від балкового вигину стріли 101
5.5. Визначення напружень в опорних елементах секцій стріли 119
РОЗДІЛ 6 ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 126
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 130

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

a_1, a_2 – розміри контурів поперечного перерізу, м

Q – сила ваги вантажу в люльці, Н

$G_л$ – сила ваги люльки, Н

$G_п$ – сила ваги підвіски люльки з ізоляторами та гідроциліндром, Н

G_1 – сила ваги верхньої секції із оголовком, Н

G'_1 - сила ваги ділянки верхньої секції із оголовком, що висунута за межи площини опорних роликів на середній секції, Н

G_2 – сила ваги середньої секції, Н

G'_2 – сила ваги ділянки середньої секції, що висунута за межі площини опорних роликів на нижній секції, Н

G_3 – сила ваги нижньої секції, Н

G'_3 – сила ваги консольної ділянки нижньої секції, Н

$G_{гц}$ – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли, Н

$G_ц$ – сила ваги шарнірного ланцюга із кабелем, РВД, верхнім жолобом та трубопроводами, Н

F – площа поперечного перерізу, $м^2$

I_x - моменти інерції перерізів відносно осі Х-Х, $см^4$

I_y - моменти інерції перерізів відносно осі У-У, $см^4$

W_x - моменти опору для перерізів відносно осі У-У, $см^3$

W_y - моменти опору для перерізів відносно осі Х-Х, $см^3$

S_x – статичний момент площі перерізу, $м^3$

Q – максимальна перерізуючи сила в перерізі, Н

R_i - реакція опорного вузла секції від навантажень, що діють у площині підвісу стріли, Н

E_o - ексцентриситет установки опорних елементів щодо бічних стінок секцій, мм

P_i - і -та ордината епюри розподілу навантаження (у частках від одиниці),

L – довжина периметра, що утворює контур поперечного переріза, м

B, H – розміри прямокутника, утвореного осями полиць та стінок, м

$P_р$ – розрахункова сила тиску одного ролика, Н

К – катет зварювального шва, м

$К_П$ – коефіцієнт поперечного моменту

$К_{в2}$, $К_{в3}$, $К_{в4}$, $К_{в5}$– коефіцієнт, що корегує перехід від зосередженого навантаження $P_р$ до розподіленого

$К_М$ – параметр, що характеризує співвідношення інтенсивностей згинальних моментів у навантаженому поясі і бічній стінці

$К_1$ – коефіцієнт, що враховує пружне защемлення бічних стінок в ненавантаженому поясі

$К_2$ – коефіцієнт, що враховує пружне защемлення бічних стінок в навантаженому поясі

$\sigma_в$ - границя міцності, МПа

$\sigma_т$ - границя текучості, МПа

δ - відносне подовження, %

Е - модуль пружності, МПа

$[\sigma_р]$ – допустимі напруження розтягу та стискання, МПа

$[\tau_{кр}]$ - допустимі напруження кручення, МПа

$[\sigma_{зр}]$ – допустимі напруження зрізу, МПа

$[\sigma_{зг}]$ – допустимі напруження згину, МПа

$\sigma^{с}_{мz}$ - поперечні мембранні напруження стиску або розтягу (у залежності від напрямку дії сил Р в бічній стінці при впливі роликів), (точка «с»), МПа

$\sigma^{п}_{иму}$ - поперечні напруження згину в поясі (точка «п»), МПа

$\sigma^{с}_{имz}$ - поперечні напруження вигину бічної стінки (точка «с»), МПа

$\sigma^{n}_{иму}$ - поздовжні напруження вигину в поясі (точка «п»), МПа

$\sigma^{с}_{иму}$ - поздовжні напруження вигину в бічній стінці (точка «с»), МПа

$\sigma^{с}_{му}$ - поздовжні мембранні напруження (без врахування напружень від балкового вигину стріли) у бічній стінці (точка «с»), МПа

$\sigma^{с}_{имz(с)}$- напруження від поперечного вигину бічної стінки в точці «с», МПа

$\sigma^{c}_{имy(c)}$ - напруження від поздовжнього вигину бічної стінки в точці «с», МПа

$\sigma_{пр}$ - приведені напруження, МПа

$\tau^{п}_{кмxy}$ - дотичні напруження від кручення елементів в поясі, МПа

$\tau^{c}_{кмzy}$ - дотичні напруження від кручення елементів в бічній стінці, МПа

β – коефіцієнт, який враховує тип зварювання

γ – коефіцієнт умов роботи, що враховує вплив навантажень від тиску в бокових опорах секцій, місцевих деформацій перерізу при виготовленні та дотичних напружень від опорних тисків

δ_c, δ_o, $\delta_п$ – товщини відповідно вертикальних стінок, нижнього та верхнього поясів, м

Δ - величина бічного люфту внутрішньої секції щодо зовнішньої, мм

ВСТУП

Дійсна робота виконувалась задля проведення перевірочного розрахунку коробчатої металоконструкції телескопічної стріли автопідйомника щодо виявлення дійсних величин напружень в місцях стику рухомих секцій та опорному кронштейні гідроциліндра підіймання стріли.

Телескопічні стріли в значній мірі визначають технічний рівень кранів та підйомників, так як від їх конструкції та маси залежить вантажовисотна характеристика машини.

Одним із шляхів підвищення вантажовисотних характеристик є зниження матеріаломісткості стріли при проектуванні шляхом визначення достовірності методів розрахунку.

Дослідження впливу навантажень від опорних елементів на напружено-деформований стан в наш час є досить актуальним, оскільки проведені раніш роботи в цій області не дозволяють проводити розрахунки стріл із врахуванням дії навантажень від опорних елементів, які значно впливають на загальну міцність стріли.

Іноземні фірми в основному застосовують телескопічні стріли прямокутного поперечного перерізу для невеликих автопідйомників. В сучасних телескопічних кранах та підйомниках застосовують перерізи відмінні від прямокутного, наприклад, шести- та восьмигранні (COLES), трубчасті та найсучасніші конструкції – овало-подібного перерізу (LIEBHERR). Тому виникає необхідність обґрунтування раціональності кожної форми поперечного перерізу стріли.

В різних роботах співставлення форм перерізів телескопічних стріл проводилось шляхом порівняння напружено-деформованого стану стріли від дії зовнішнього навантаження, без врахування навантажень від опорних елементів, величина яких може бути досить суттєвою та мати вирішальне значення при оцінки працездатності стріли.

Створення раціональної конструкції телескопічної стріли при її мінімальній масі залежить від правильного вибору форми поперечного перерізу та врахуванні всіх діючих навантажень.

Таким чином, ціллю досліджень є:

- теоретичне визначення параметрів форми поперечного перерізу коробчатої телескопічної стріли автопідйомника із врахуванням впливу навантажень в опорних елементах секцій шляхом аналізу існуючих форм поперечних перерізів;
- визначення прямим розрахунком дійсних напружень в перерізах стріли;
- визначення дійсних напружень в перерізах стріли, за допомогою комплексу програм Solidworks;
- всебічний аналіз результатів та висновок щодо доцільності використання комплексу програм Solidworks в дослідженнях металоконструкцій телескопічних стріл;
- розрахунок напружень від опорних елементів телескопічних секцій за методикою з дослідження [3]
- розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану від дії місцевих навантажень опорних елементів методом кінцевих елементів за допомогою комплексу програм Solidworks.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СТРІЛ

Розрахунок телескопічних стріл у вітчизняній практиці базується на переносі методів, розроблених для решітчастих кранових стріл, без врахування специфіки навантаження, а саме - сил, що виникають в опорних елементах секцій (колін) стріли.

Таким чином розрахунок напружено-деформованого стану від дії зовнішніх навантажень, не викликає ускладнень, оскільки стріла являє собою стиснуто-зігнутий стержень змінної жорсткості та з точки зору розрахунку внутрішніх силових факторів є статично-визначеною системою, в якій напруження та деформації визначаються відомими методами.

Ще у 80-х роках були розроблені програми для розрахунку на ЕОМ телескопічних стріл не тільки на міцність від дії зовнішніх навантажень, але й визначати їх раціональні геометричні параметри. Так, наприклад, тогочасна версія програми «Ліра» застосовувалась для розрахунку на міцність телескопічних стріл з кількістю секцій до 5-ти, визначала геометричні параметри стріл прямокутного та трапецієподібного поперечних перерізів і напружень в небезпечних перерізах секцій від дії зовнішніх навантажень. Однак, ця програма не дозволяла визначити напруження, що виникають від реакцій в опорних елементах секцій стріли.

Інші відомі алгоритми розрахунку телескопічних стріл також не забезпечують повного визначення напруженого стану в перерізах стріли, де напруження від зовнішніх навантажень (згину, стискання та кручення) підсумовуються з місцевими напруженнями від реакцій опорних елементів секцій стріли.

Місцеві напруження, що виникають від навантажень опорних елементів секцій телескопічних стріл, порівнюються з напругами від загального вигину стріли і навіть можуть їх перевищувати. Це підтверджується спостереженнями в експлуатації самохідних кранів випадками руйнування зварних з'єднань по поясах стріли, пластичних деформацій поясів і бічних стінок секцій у зонах найбільших навантажень опорних елементів секцій (колін). Ймовірно, на

величину місцевих напружень, крім величини навантаження опорних елементів, впливає також тип опорного елемента (сковзуни, ролики), ексцентриситет дії навантаження опорного елемента, а також форма і співвідношення геометричних параметрів поперечних перерізів секцій.

Проведені раніше дослідження місцевої завантаженості телескопічних стріл базувалися на розчленовуванні елементів поперечного переріза секції і роздільному розгляді напруженого стану пояса, на який безпосередньо впливає навантаження опорних елементів і бічних стінок. У цьому випадку розрахунки напружень у поясах проводилися методом кінцевих різностей, а бічних стінок – методом перехресних балок.

При такому розрахунку поясів і стінок секцій не можуть бути точно визначені граничні значення навантажень у місцях з'єднання поясів і стінок, що впливає на точність і трудомісткість розрахунків. Це може бути усунуто застосуванням найбільш сучасного методу розрахунку конструкцій – методу кінцевих елементів, що зроблено в дійсних дослідженнях.

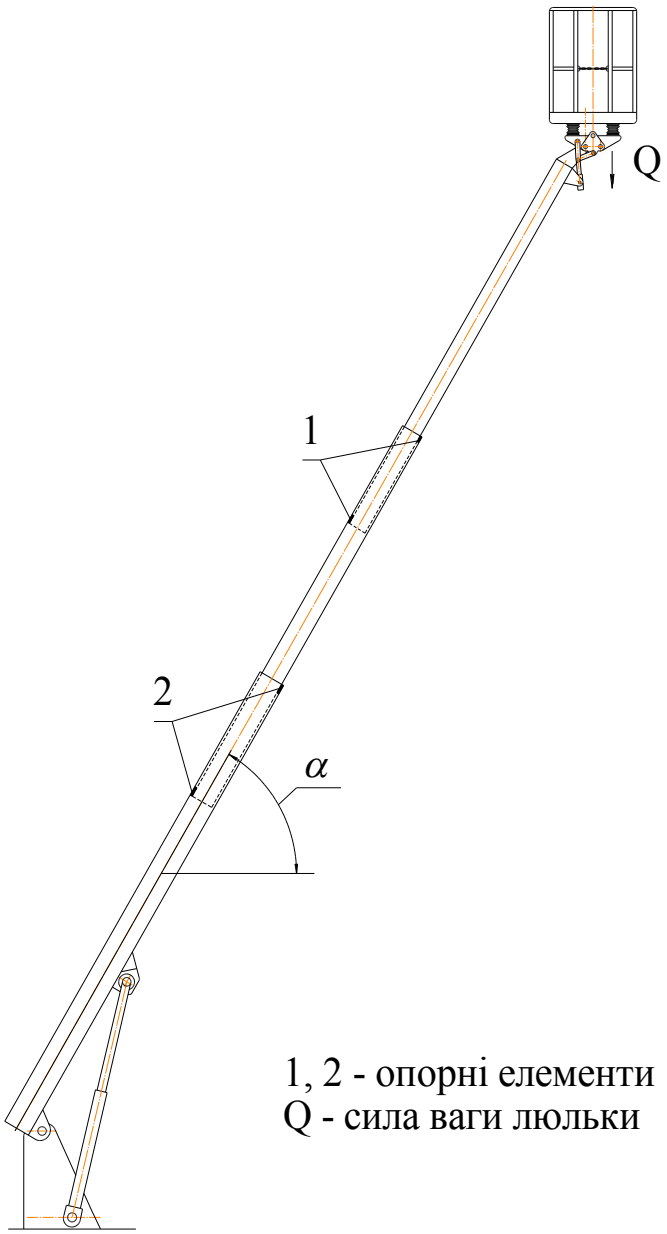


Рисунок 1.1 – Схема телескопічної стріли підйомника

Аналіз конструкцій телескопічних стріл (рис. 1.1), показує, що в останні роки, крім застосовуваних стріл із традиційними поперечними перерізами, ряд фірм DEMAG GOTTWALD (Німеччина), GROVE (США) і COLES CRANES (Англія), TADANO (Китай) стали застосовувати стріли трапецеїдального перерізу, прямокутного перерізу з закругленими кутами, перемінною товщиною стінок і поясів, (рис. 1.2). Інші фірми, наприклад, DEMAG GOTTWALD, використовують скоси і закруглення кутів перерізів для утворення площадок ковзання опорних елементів секцій. Фірма LIEBHERR впровадила у виробництво

стрілові самохідні крани із овалоїдною формою перерізу стріли, вважаючи, що саме така вона є найбільш оптимальною, (рис. 1.3).

Фірма GROVE на кранах вантажопідйомністю 25-30 т і більш застосовує стріли трапецієподібного перетину вважаючи, що цей перетин щонайкраще сприймає навантаження, що діють на стрілу, і при цьому забезпечується велика згинальна в обох площинах і крутильна жорсткості. Недоліком такого перетину є наявність у середині поясу великої зони деформації, що не приймає участі у роботі всього перетину на стиск від загального вигину стріли, і навантаження перерозподіляється на периферійні частини поясу, поки напруги там не досягнуть границі текучості, Тому нижній пояс перетину приходиться підсилювати по краях смугами значної товщини. Такий нижній пояс дозволяє зменшити масу стріли, сприяючи зниженню напруги в бічних стінках внутрішньої секції при передачі на них навантаження від нижніх опор зовнішньої секції. Більш вузький верхній пояс створює кращі, чим у прямокутному перерізі, умови для сприйняття місцеві навантажень від верхніх опор внутрішньої секції. Для деяких конструкцій стріл фірма GROVE застосовує гнуті профілі з підсиленими поясами.

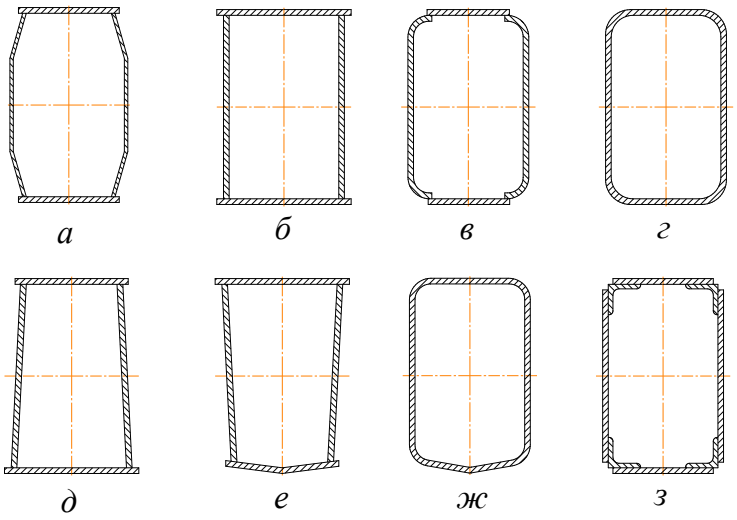


Рисунок 1.2 – Схеми поперечних перерізів стріл

У США для самохідних кранів розроблена телескопічна стріла з перевернутим А-образним поперечним перерізом (аналогічно трапецоїдному перетинові, але перевернутою основою нагору). Розробники вважають, що перетин

найбільш повно сприймає діючі на стрілу навантаження, забезпечуючи підвищену згинальну і крутильну жорсткості колін. При цьому стиснутий нижній пояс і бічні стінки перетину цілком беруть участь у роботі на стиск так само, як і більш широкий верхній пояс, що працює на розтягання від загального вигину стріли. Недоліками такого перетину, у порівнянні з коробчатим і трапецеїдальним перетинами, є великі ексцентриситети установки верхніх опорних елементів щодо бічних стінок, що збільшує місцеві напруження, а також велика концентрація напружень у зоні з'єднання стінки і верхнього поясу з внутрішньої сторони перетину, що збільшує імовірність появи тріщин.

Фірма COLES CRANES створила для самохідних кранів вантажопідйомністю більш 50 т, принципово нову конструкцію стріли восьмикутного перетину (рис.1,2 а), що одержала назву «Октаг». Ця стріла виготовлена з чотирьох аркушів стали з високою межею міцності. Верхня і нижня полиці мають відносно велику товщину та утворюють дві з восьми сторін восьмикутника. Бічні елементи виконані з двох більш тонких аркушів, кожний з яких двічі згинається для утворення інших шести сторін багатокутника. Стріла «Октаг» відрізняється багатьма перевагами в порівнянні з традиційними стрілами. Бічні сторони і стовщена нижня полиця протистоять короблению, а стовщена вузька верхня полиця чинить опір сильним місцевим напруженням у місцях перекриття секцій стріли. Збільшена площа поперечного переріза підвищує міцність стріли, зменшуючи можливість прогину стріли під час її підйому і знижує бічні деформації при повороті. Однак слід зазначити, що закордонні фірми, рекламуючи окремі позитивні якості таких стріл, не приводять результатів аналізу місцевої завантаженості в зонах дії навантажень опорних елементів секцій. У вітчизняній і закордонній літературі відсутня порівняльна оцінка завантаженості телескопічних стріл, а також не приводяться результати аналізу місцевої завантаженості в зонах дії навантаження опорних елементів секцій.

На початку XXI століття в закордонному кранобудуванні були відмічені прогресивні технічні рішення щодо конструкції телескопічних стріл. Світовим лідером у виробництві автомобільних кранів є фірма LIEBHERR, яка звела основні вимоги до сучасних стрілових кранів до 3-ох позицій:

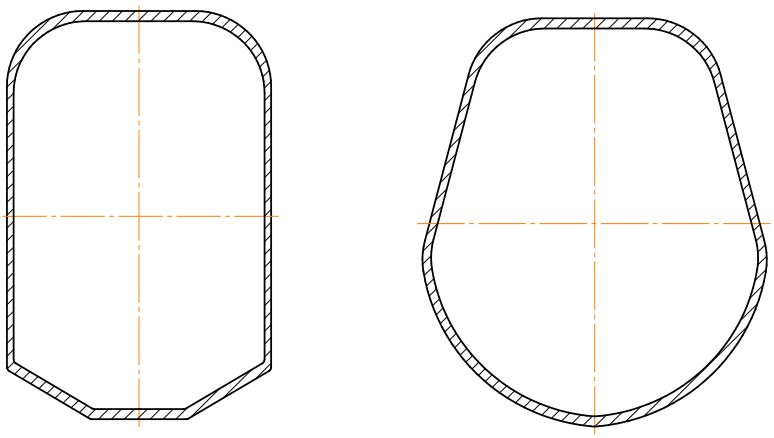
- висока вантажопідйомність;
- висока маневреність;
- оптимізоване співвідношення.

Цих вимог можна дотриматись тільки використовуючи високоміцні конструкційні сталі з границею текучості **$[\sigma_т]$=1100 МПа**. До телескопічних стріл, встановлених на кранах в межах допустимої маси, висуваються вимоги охоплення більшого вильоту та висоти підйому, що обумовлює збільшення їх довжини при збереженні конструктивної маси. Вимоги до полегшення конструкції обумовлюють використання листового металу товщиною не більше 8 мм навіть на кранах дуже великої вантажопідйомності.

Внаслідок несприятливих геометричних умов, таких, як обмежена ширина, висота, довжина транспортного засобу та обмеження тиску на вісі ходової частини, з одного боку, та вимогою збільшення максимальної довжини стріли при її невеликій масі та високому опорі деформації з іншого боку, конструкція стріли підлягає серйозним дослідженням. Розвиток розмаїття форм поперечних перерізів спонукав фірму перейти з прямокутного перерізу із округленим верхнім поясом та посіченим нижнім (рис. 1.3, а) до овалоїдного (рис. 1.3, б).

Впровадження овалоїдного профілю дозволило задовольнити широке коло вимог. Основні характеристики цієї форми перерізу такі:

- оптимізована регуляція статичних та динамічних навантажень;
- зниження конструктивної маси стріли у зрівнянні із попереднім поперечним перерізом співставленої вантажопідйомності;
- можливість регулювання положення стріли за рахунок системи телескопування із одним штоком;
- отримання оптимальної конструкції в технологічному плані.



а) б)

Рисунок 1.3 – Профіль поперечних перерізів телескопічних стріл фірми LIEBHERR

Даний овалоїдний переріз телескопічної стріли використовується на кранах LTM1500 із довжиною стріли 84 м. Оскільки відсутня необхідність в ребрах жорсткості, що перешкоджають короблению або здвоюванню поперечного перерізу в межах зони основного тиску, повне висування кожної секції може здійснюватися внаслідок зменшення відстані між окремими секціями стріли. Несуча здатність, загальна стійкість та характеристика поперечного перерізу точно відповідають одне одному, що досягається макророзрахунком за допомогою методу кінцевих елементів, який також використовується для визначення розмірів. Вимоги до високої вантажопідйомності на малих (стійкість) та на великих вильотах, а також координація індивідуальних секцій стріли – залежить від вибору марки конструкційної сталі, профілю поперечного перерізу та товщини листа.

В стрілі овалоїдного профілю покращується деформаційна характеристика. При використанні високоміцних конструкційних сталей S960QL в верхньому поясі та S110QL в нижньому, досягається стійкість до великих деформацій при різних типах навантаження крану.

Гнуті профілі повинні виготовлятися з великою точністю. Об’єм зварних швів, в порівнянні з попередньою конструкцією, суттєво зменшений, що означає значне зниження термічного впливу, а отже й залишкових зварювальних деформацій, та означає зменшений об’єм контролю зварювальних з’єднань, час на

здійснення рихтування. Однак, збільшується кількість згинальних операцій для отримання овалоїдного профілю стріли. Напівкруглий нижній пояс отримують шляхом холодного згинання, тоді як загальний час на обробку та виготовлення всієї конструкції зменшується.

Звичайна телескопічна стріла складається з базової секції, голівки та індивідуальних телескопічних секцій з ворітниками. Усередині стріли знаходиться механізм висування, що регулює за допомогою гідравліки та електроніки телескопування до різних (в тому числі попередньо вибраних) довжин.

Концепція сучасної телескопічної стріли фірми LIEBHERR заснована на наступних технологічних принципах:

- система висування секцій одним штоком;
- автоматизована операція телескопування;
- овалоїдний профіль стріли із високоміцної конструкційної сталі.

Проведений аналіз конструкцій телескопічних стріл показав, що в практиці кранобудування ведуться роботи з удосконалення стріл, особливий інтерес представляють пошуки раціональних поперечних перерізів стріл, що забезпечують достатню несучу здатність при економічно прийнятній технології.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ МІСЦЕВОЇ ТА СУМАРНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ СТРІЛ З ПОПЕРЕЧНИМИ ПЕРЕРІЗАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ

Проведемо теоретичне дослідження впливу форм поперечних перерізів на вантажну спроможність телескопічних стріл.

2.1.Умови проведення аналізу

На рис. 2.1 представлені варіанти поперечних перерізів секцій стріл, для яких проведений аналіз напруженого стану від зосереджених навантажень опорних вузлів секцій і визначені параметри, що характеризують роботу перерізів при дії на стрілу зовнішніх навантажень.

Розрахунок напружень від навантажень опорних вузлів проведений методом кінцевих елементів.

Для одержання порівняльних розрахункових даних прийняті однаковими наступні параметри: довжина відсіку **L** секції стріли; частота розбивки конструкції на кінцеві елементи; ексцентриситет додатка навантаження зсередини контуру перерізу **E=0,125·B** (де **B** - ширина прямокутного перерізу); вертикальна складова **P** навантаження опорного вузла; товщина металу по всьому контуру перерізу; довжина периметра, що утворює контур перерізу.

Ексцентриситет **E=0,125·B** прийнятий для найбільш розповсюджених в практиці варіантів конструкцій стріл. Так як товщина елементів перерізу і довжина периметра перерізу однакові у всіх варіантах площа перерізу також однакова, а отже однакова і маса секцій. Таким чином, співставлення проводиться при однакових масових показниках секцій стріл.

Результати розрахунків зведені в табл. 2.1. Напружений стан у точках «П» і «С» характеризується дією напружень, зображених на рис. 2.2. Схеми *а* та *в* характеризують мембранні напруження, викликані дією зовнішніх навантажень на стрілу і не враховують впливу деформацій від опорних тисків **P.**

Схеми *б* и *д* характеризують напружений стан від згинання полки і стінки, викликаного місцевим впливом опорних тисків **Р** (через **М** позначені місцеві згинальні моменти).

Схема *г* характеризує мембранний напружений стан у т. «С» стінки, викликаний місцевим впливом опорних тисків **Р.** Мембранні напруги в т. «П» полки від місцевого впливу опорних тисків **Р** незначні і їх можна не враховувати.

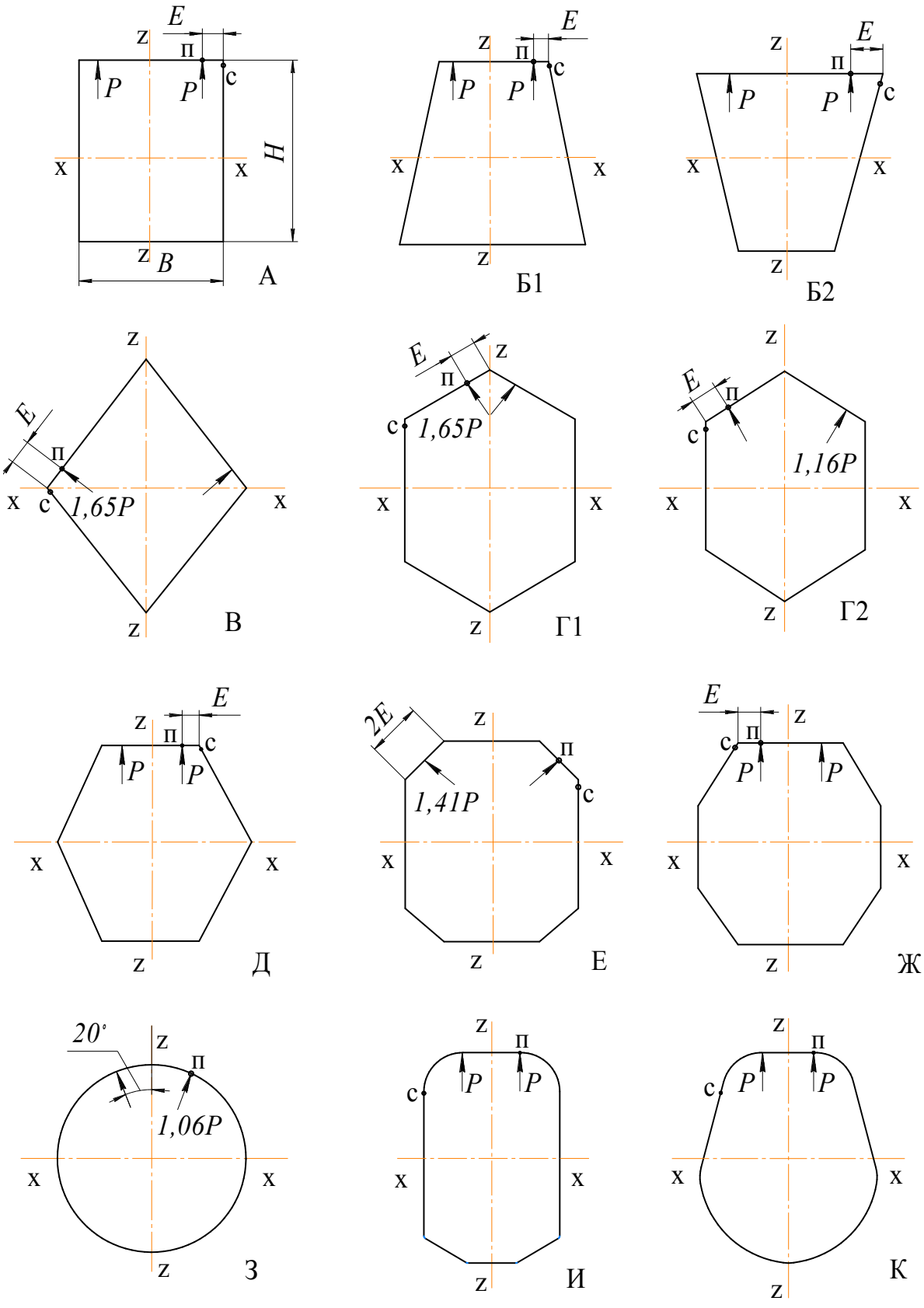
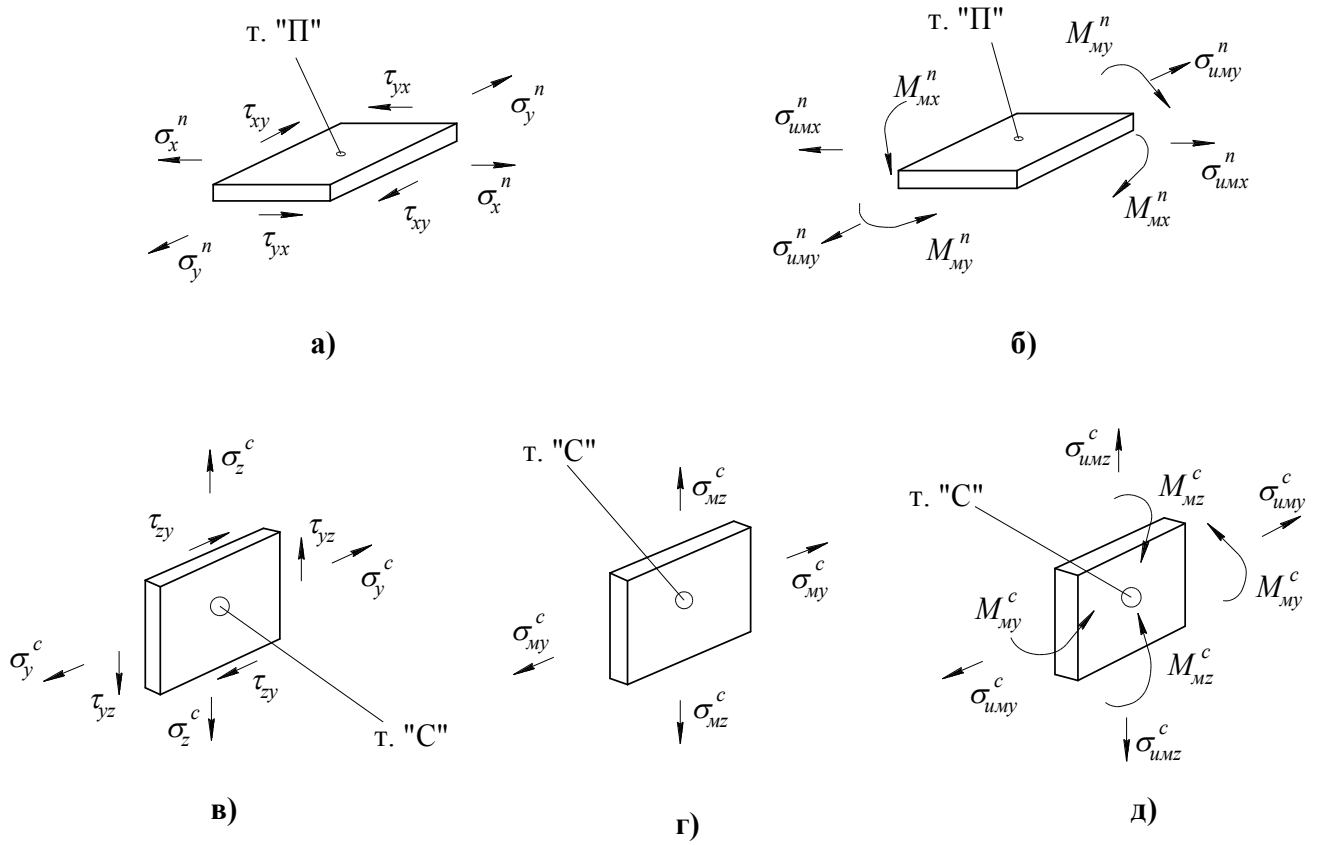


Рисунок 2.1 – Варіанти поперечних перерізів секцій телескопічних стріл



а, в - від зовнішніх навантажень (балочний прогин)
б, г, д - від навантажень в опорних елементах

Рисунок 2.2 – Схеми напруженого стану в точках «П» та «С»

При аналізі напруженого стану варіантів поперечних перерізів секцій стріл мембранні напруження від місцевих навантажень (тисків в опорах) не враховувалися, тому що їх значення суттєво менше інших.

Через те, що співставлення проводиться за відносним значенням моментів інерції, моментів опору і напруженням у табл. 2.1 вони відзначені рисою зверху.

Порівняльна оцінка геометричних параметрів перерізів, що характеризують жорсткість і опір стріл загальному (балковому) згинові і крученню, проводилася відносно прямокутного перерізу (тип А), моменти інерції і моменти опору якого прийняті за одиницю. Для встановлення моменту інерції використовувалися комп'ютерні алгоритми розрахунку –підпрограма «властивості перетину», що входить до Solidworks. Для розрахунку моменту спротиву перетину використовувалася формула (3.42), за якою момент спротиву розраховується як частка від ділення моменту інерції на відстань від центру мас, до найвіддаленішої точки у вибраній площині. Момент інерції при крученні розраховувався за

формулою, за якою це частка від ділення добутку чотирьох товщин контуру на квадрат площі перетину обмеженої серединною лінією цього перегину на периметр контуру, а момент спротиву – добуток двох площ перетину обмеженої серединною лінією на товщину контуру.

Порівняння по напруженому стані від дії косого балочного згину також проведено відносно перерізу А. Для цього використовувався Solidworks Simulation, деякі зображення з цього розрахунку приведені нижче (рисунок 2.3-2.9):

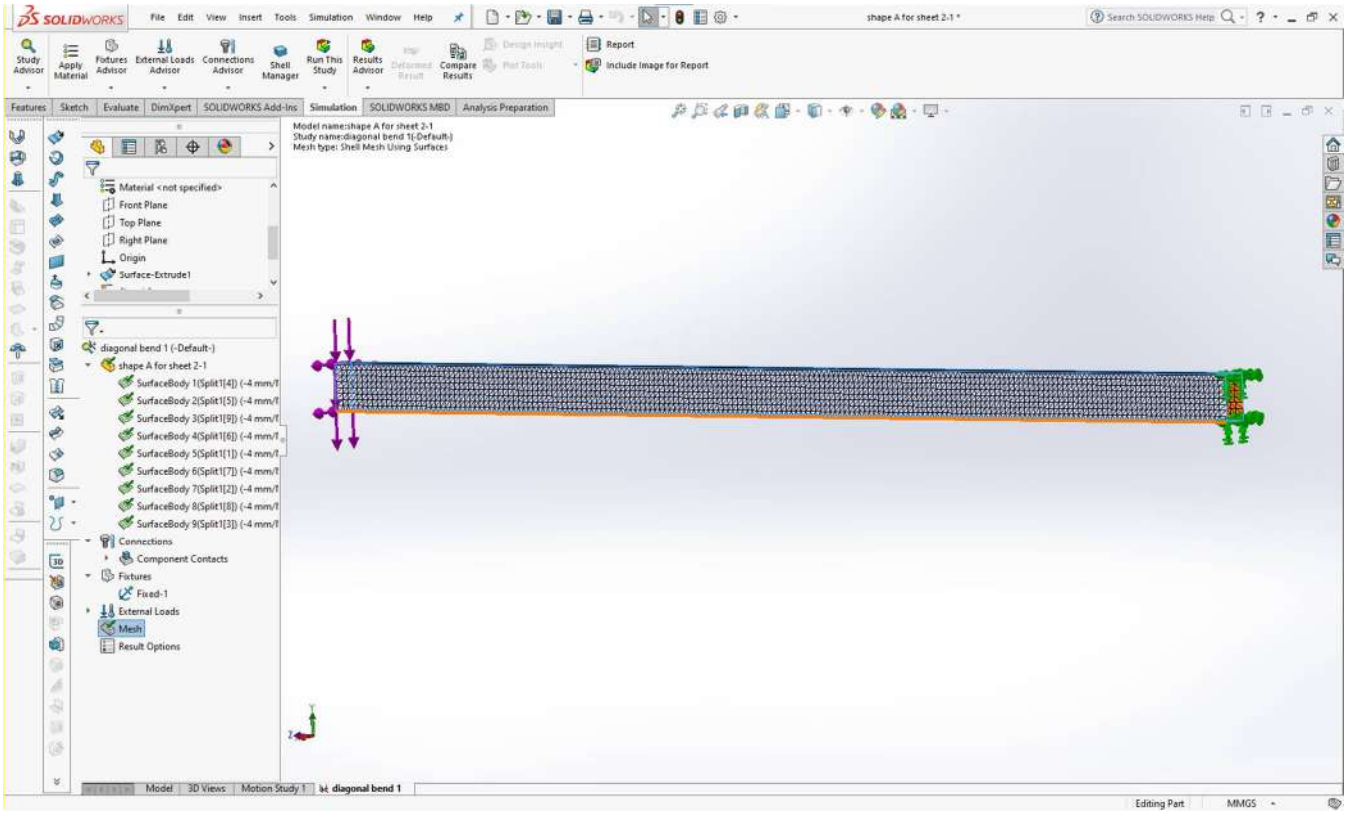


Рисунок 2.3 – В'язі до розрахунку на консольний згин

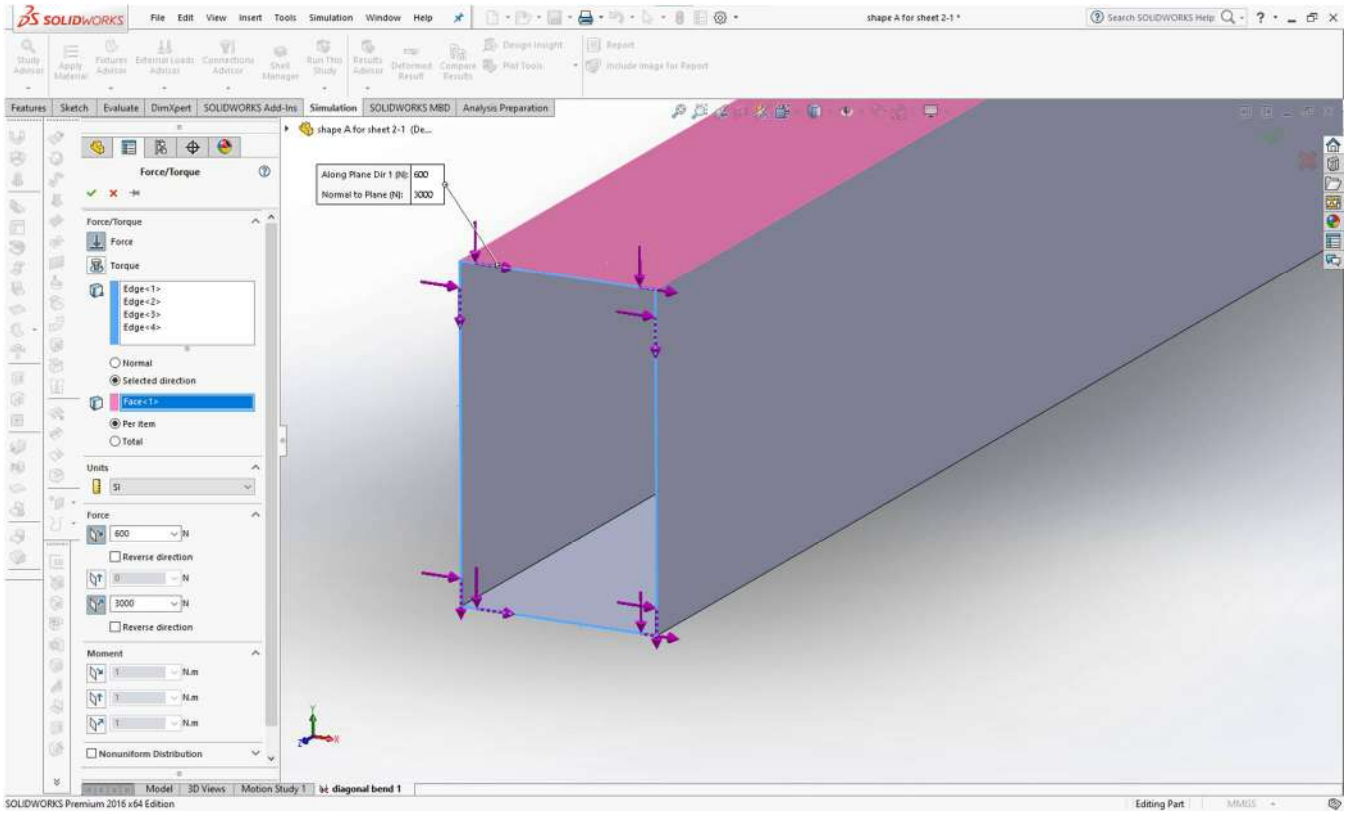


Рисунок 2.4 – Сили згину

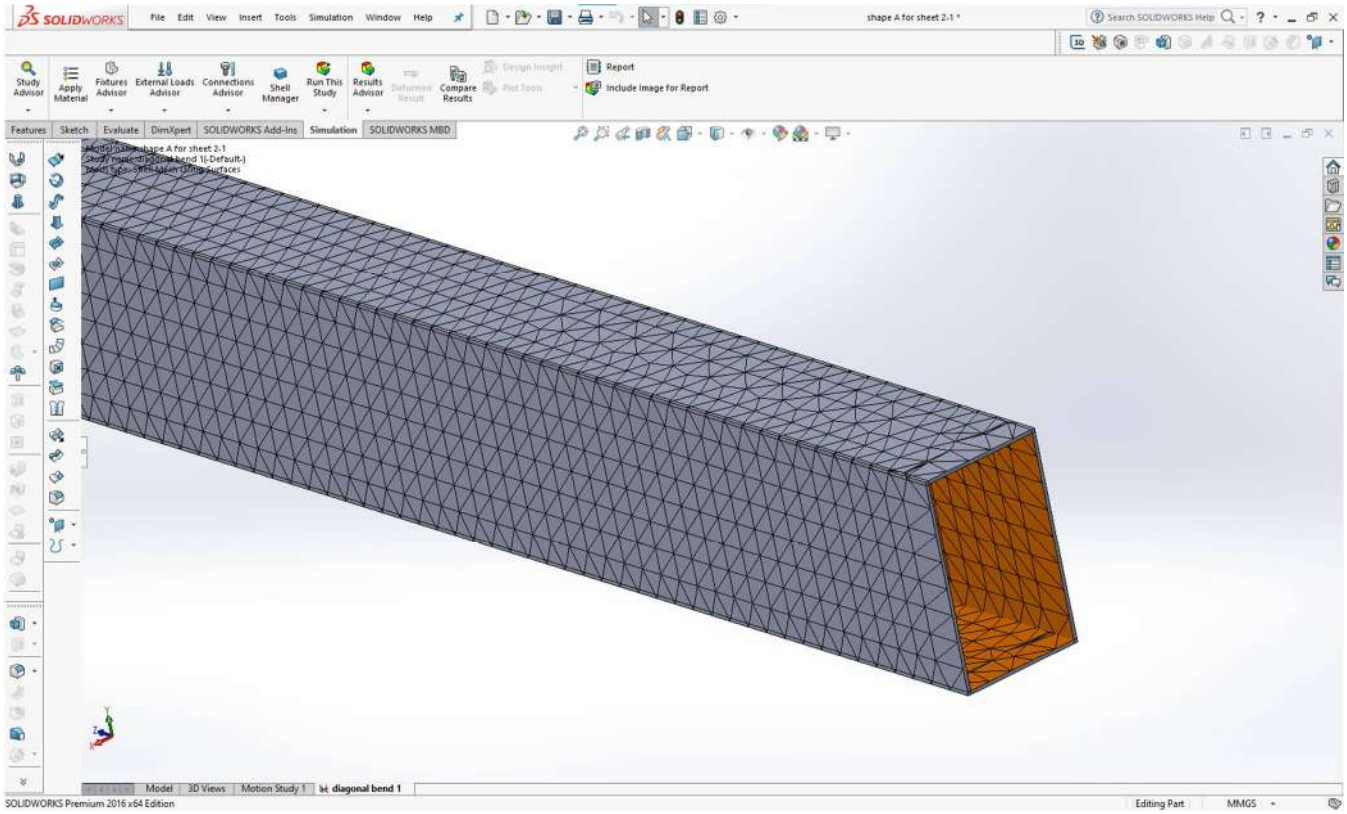


Рисунок 2.5 – Щільність сітки на прикладі перетину А

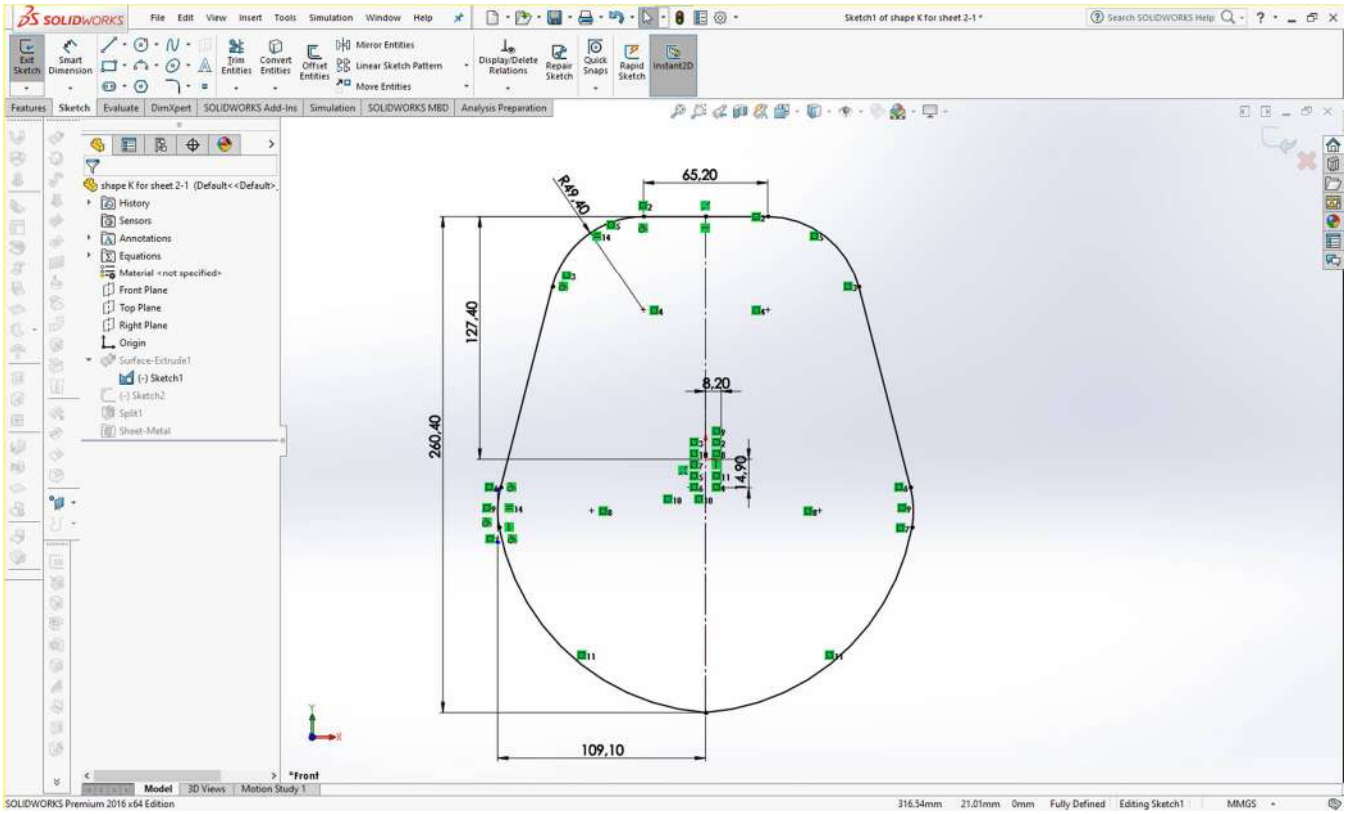


Рисунок 2.6 – Ескіз перетину К

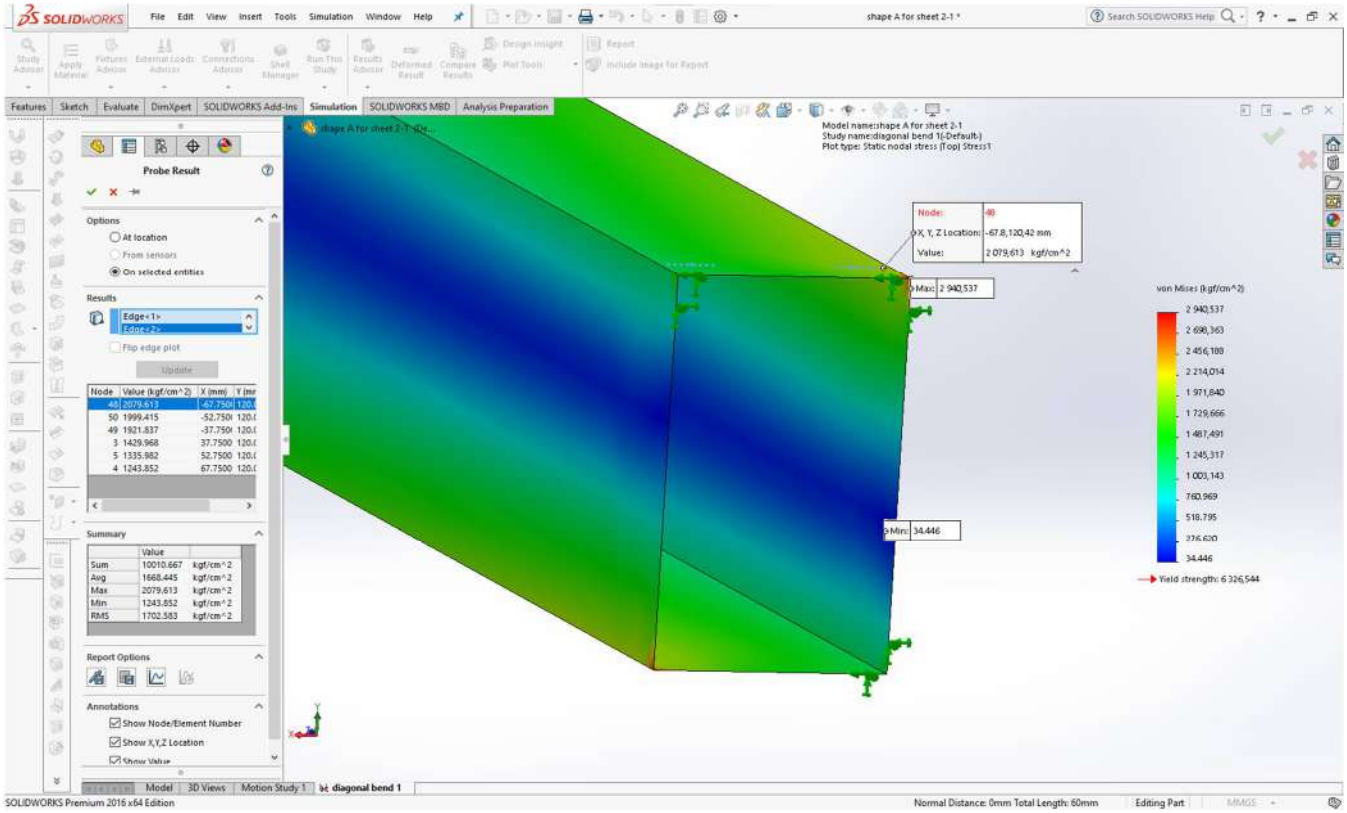


Рисунок 2.7 – Епюра напруження від балочного згину для перетину А в т.«п»

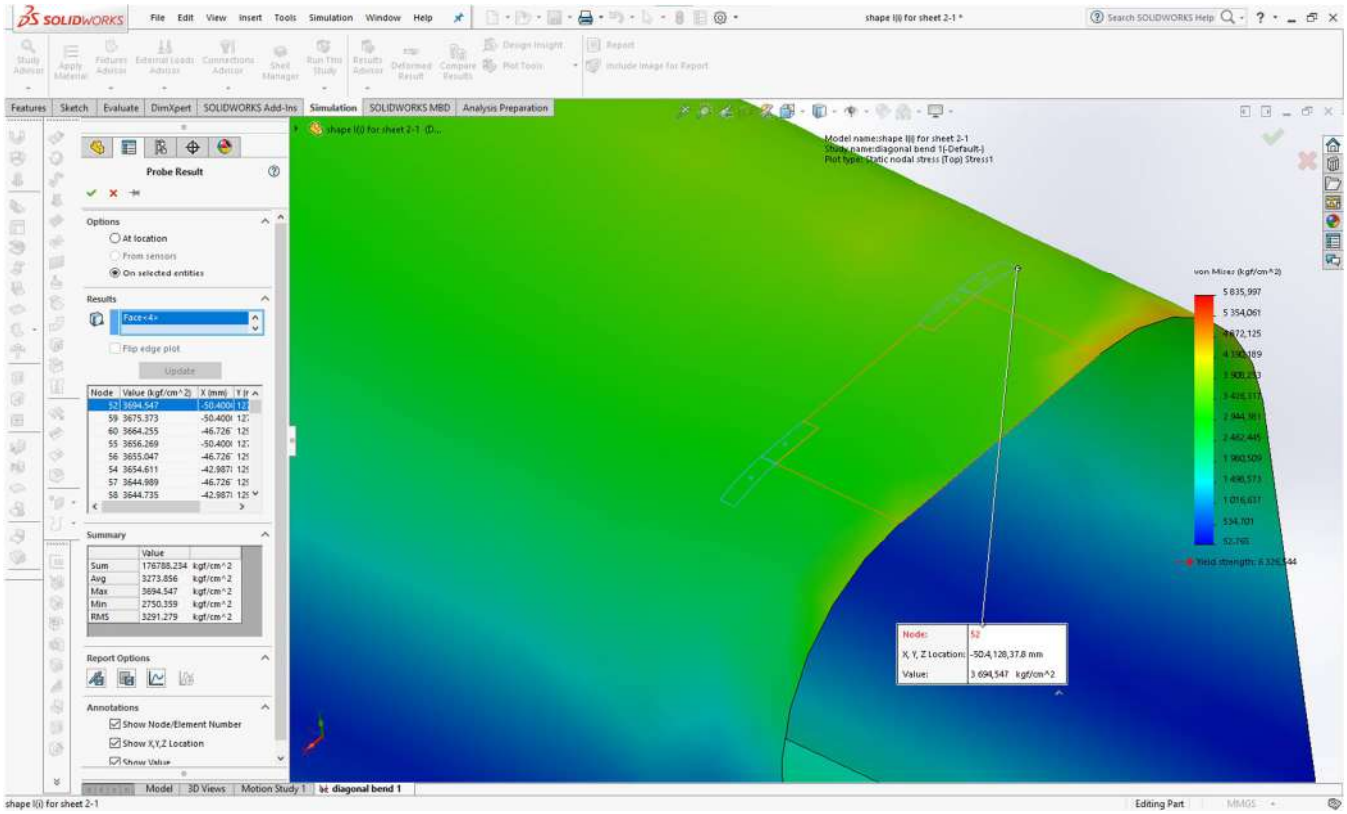


Рисунок 2.8 – Епюра напруження від балочного згину для перетину И в т.«п»

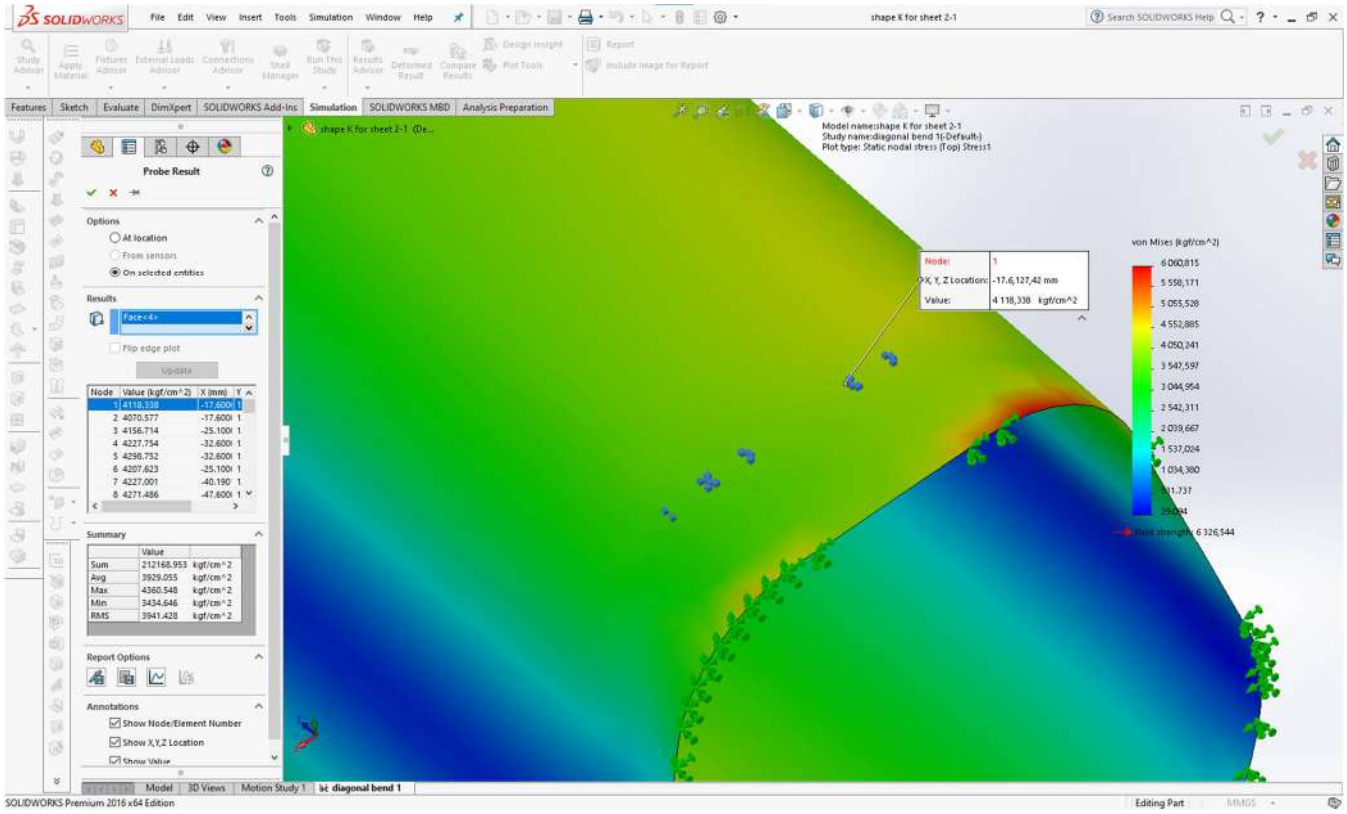


Рисунок 2.9 – Епюра напруження від балочного згину для перетину К в т.«п»

Порівняння по напруженому стані від дії зосереджених сил **P** також проведено відносно перерізу А. За одиницю прийнято напруження в поясі (точка «П») від косого (у двох площинах) балкового згину стріли прямокутного перерізу А. Підраховувалися відносні значення окремих компонентів напружень у поясах (у зоні дії сили **P** - точка «П») і бічних стінках (точка «С»), у Solidworks Simulation, деякі зображення з цього розрахунку приведені нижче (рисунок 2.10-2.14):

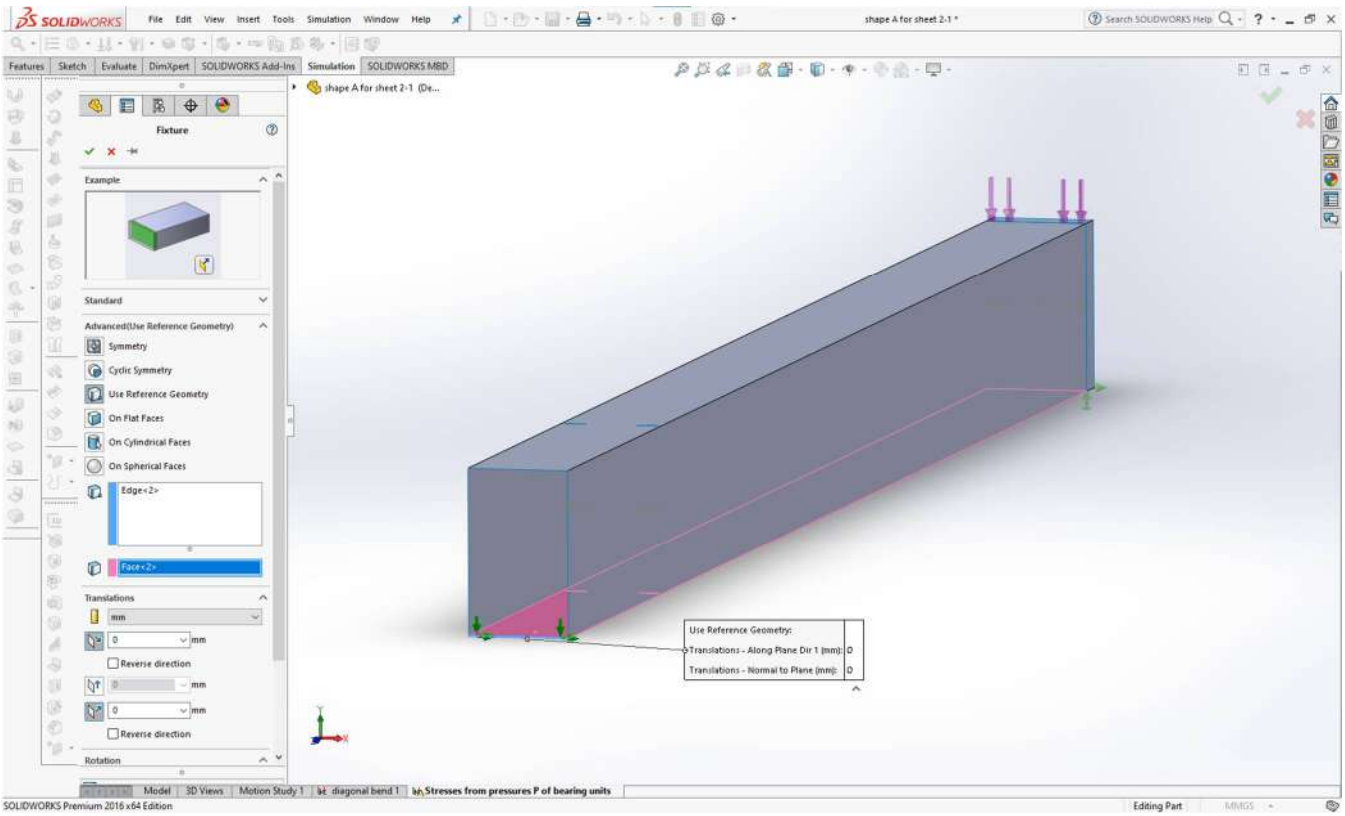


Рисунок 2.10 – В'язі до розрахунку напружень від дії зосереджених сил

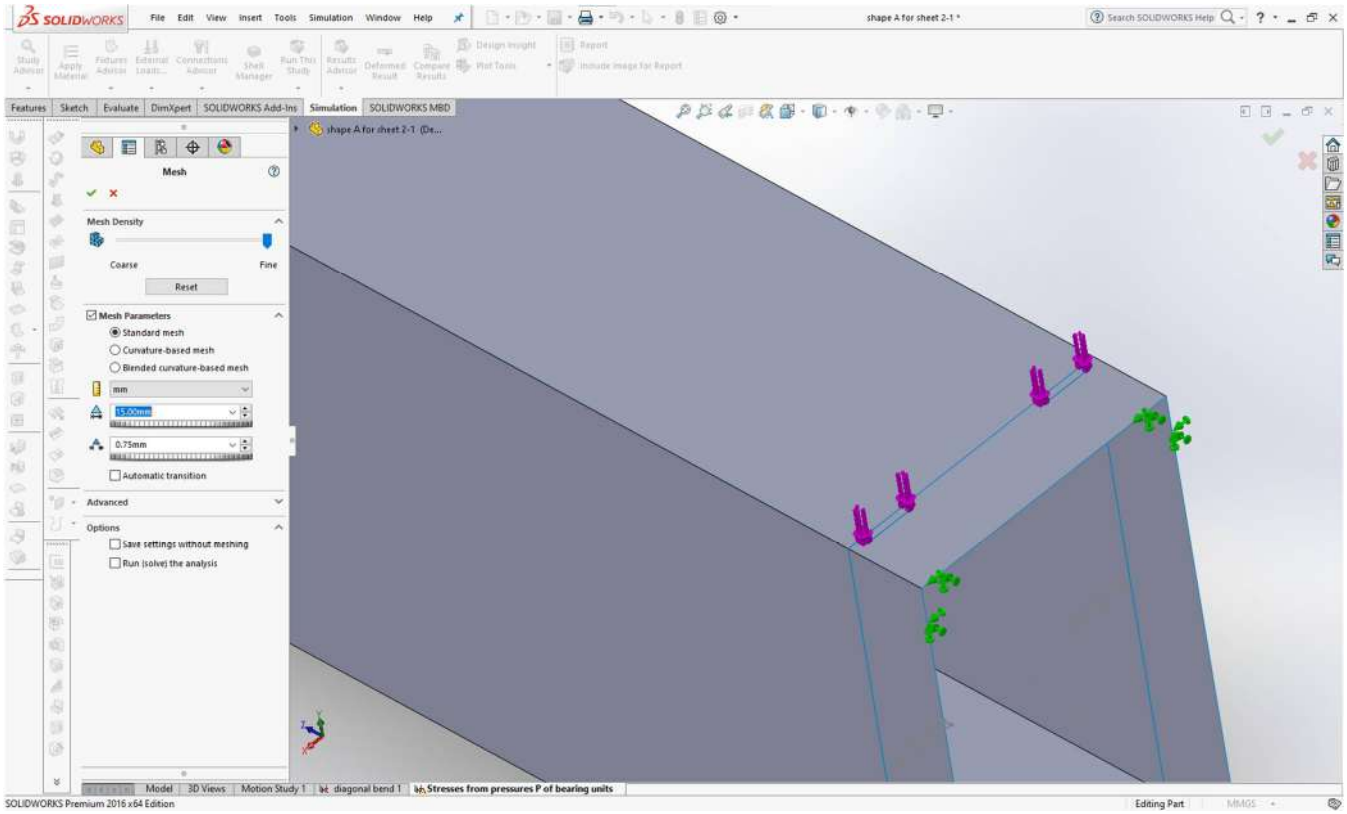


Рисунок 2.11 – Прикладання сил дії зосереджених сил (фіолетові стрілки)на плями контакту від роликів/ковзунів

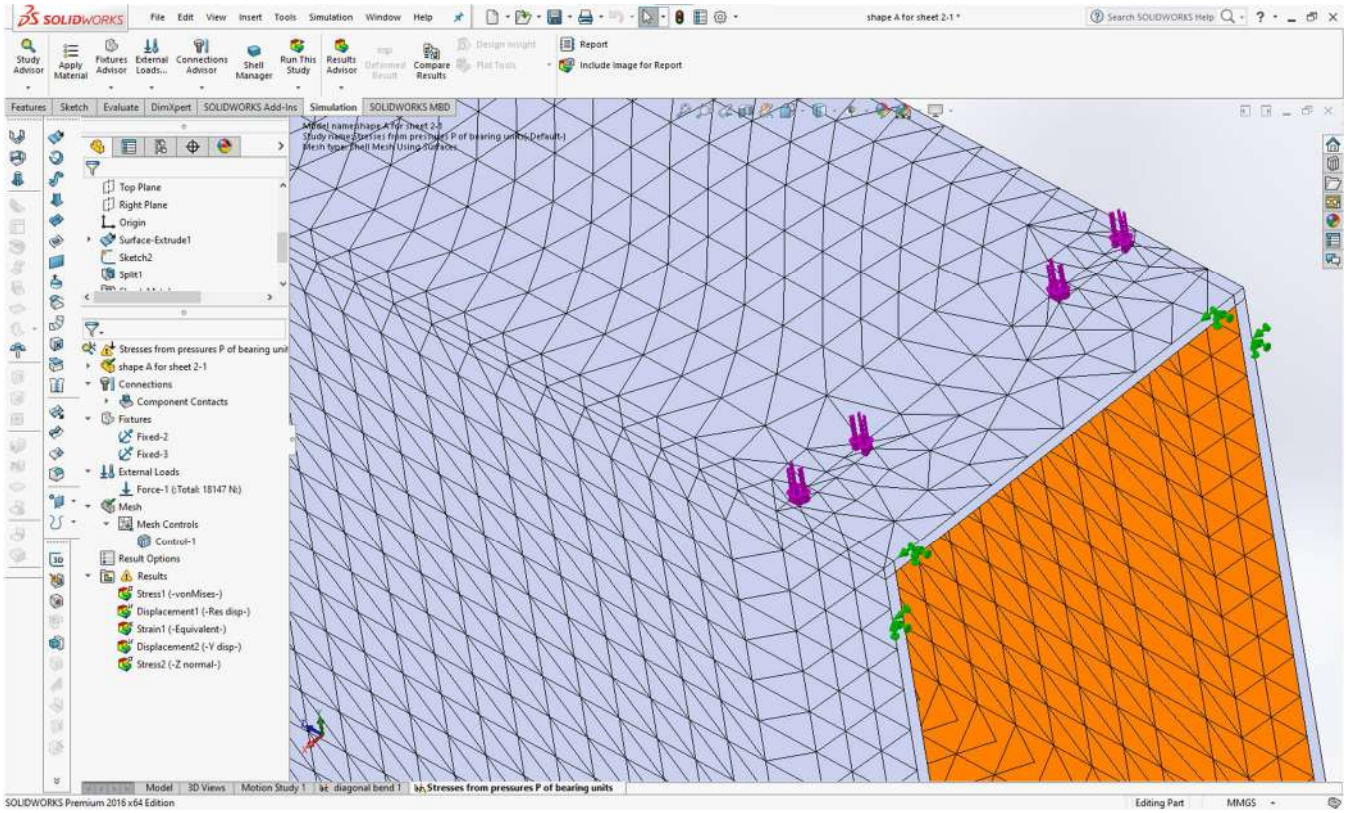


Рисунок 2.12 – Перемінна щільність сітки на прикладі перетину А

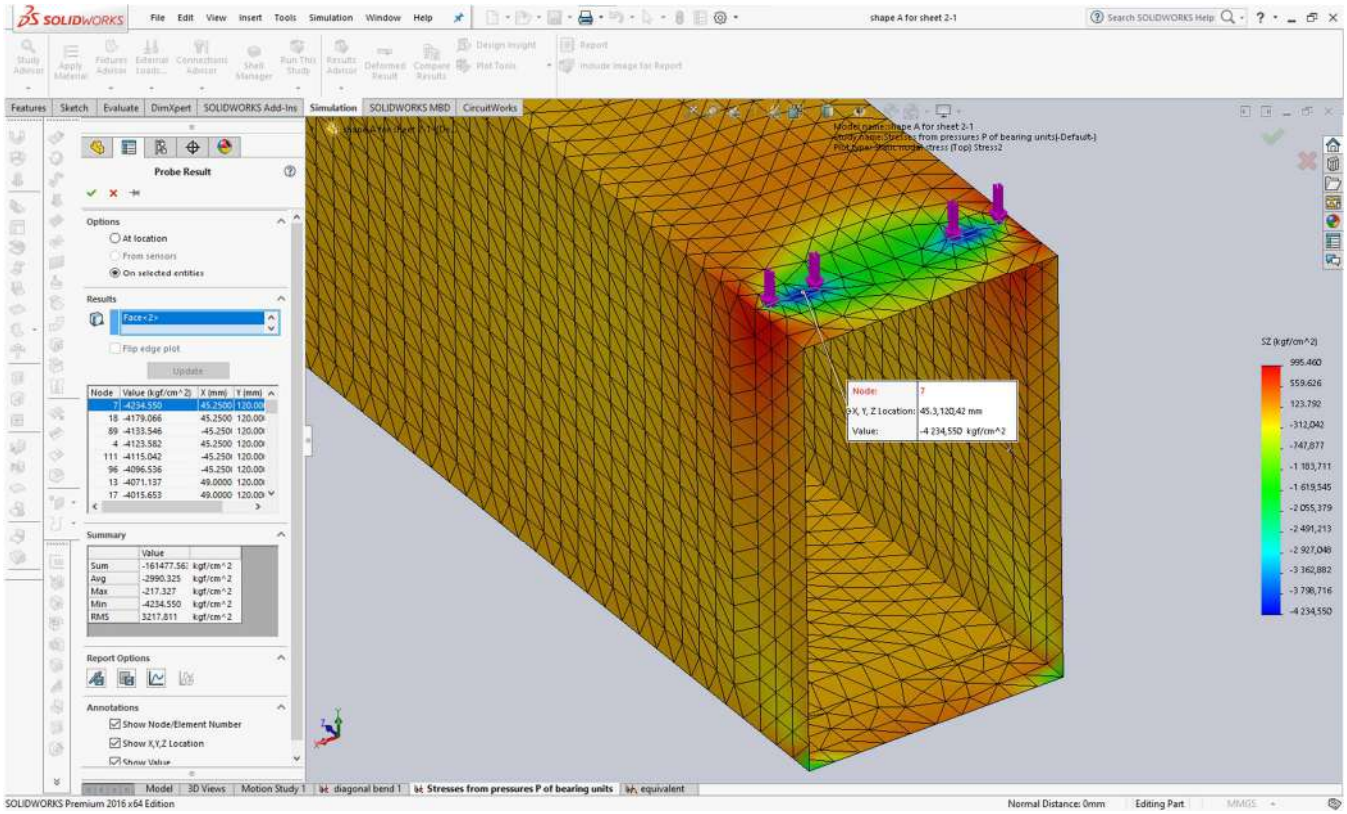


Рисунок 2.13 – Епюра напруження від дії зосереджених сил для перетину А в т.«П»

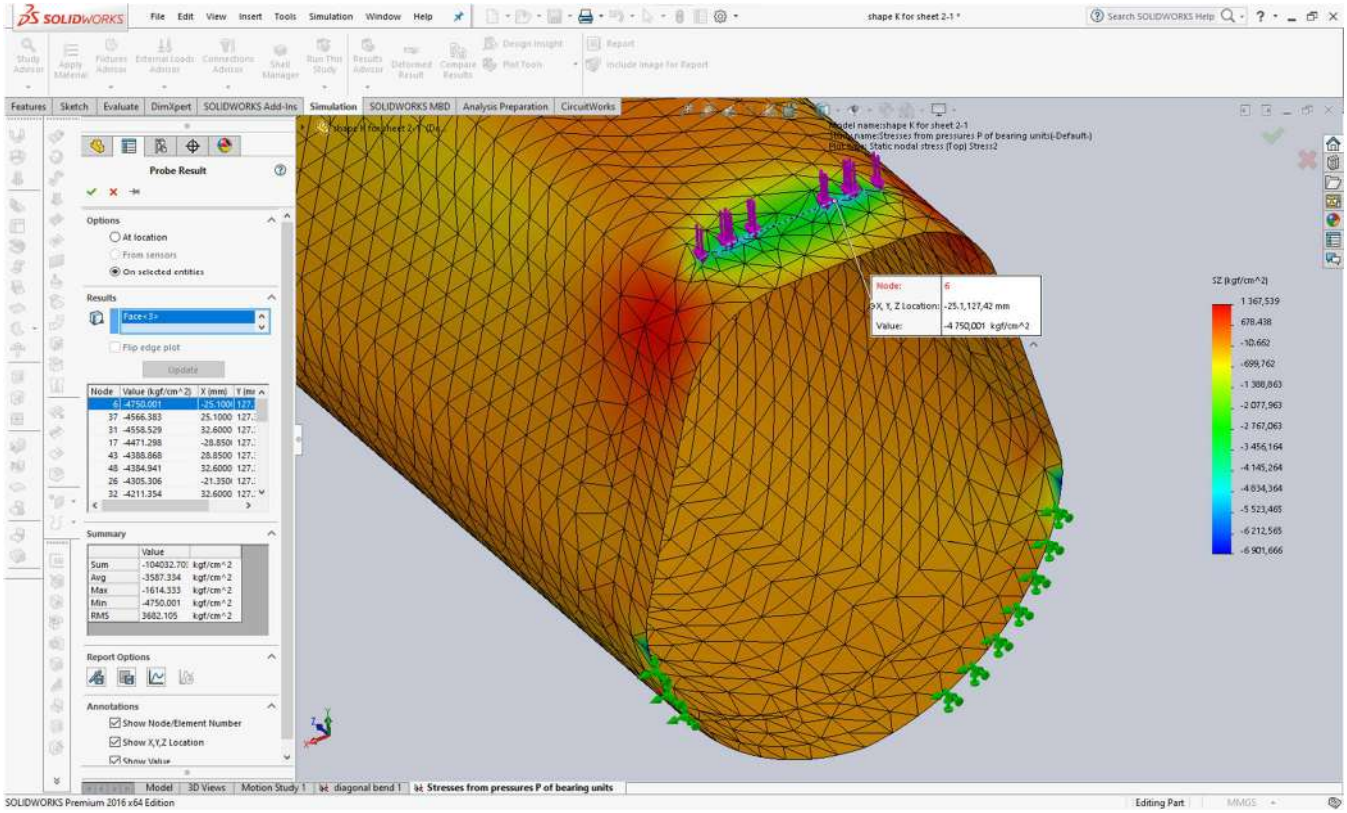


Рисунок 2.14 – Епюра напруження від дії зосереджених сил для перетину К в т.«П»

Також порівняні еквівалентні напруження (від місцевої завантаженості та сумарні - із врахуванням балкового згину) по відомих розрахункових залежностях для плосконапруженого стану за 4-ю теорією міцності. У табл. 2.1 приведені тільки значення нормальних напружень від балкового згину стріли і напружень від місцевого згину в поясах і бічних стінках. Для всіх типів перерізів ці компоненти напружень при розглянутих схемах навантаження є основними. За одиницю напружень від тисків опорних вузлів прийнята напруга від поперечного (по осі X) згину в найбільш навантаженому кінцевому елементі поясу перерізу А.

Проведемо аналіз результатів розрахунків і даних, приведених у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльні показники геометричних характеристик від напруженого стану варіантів перерізів секцій стріл

Геометричні характеристики та параметри напруженого стану	Значення у відносних одиницях для варіантів перерізів стріл (рис. 2.1)											
	А	Б1	Б2	В	Г1	Г2	Д	Е	Ж	З	И	К
Момент інерції $\overline{I}_X$	1	0,94	0,94	1,09	1,14	1,14	1,08	1,1	1,09	1,03	1,1	1,01
Момент інерції $\overline{I}_Y$	1	1,35	1,35	0,9	1,05	1,05	1,13	1,11	1,2	1,48	1,28	1,53
Момент інерції при круч. $\overline{I}_K$	1	0,96	0,96	0,97	1,29	1,29	1,32	1,3	1,42	1,67	1,22	1,29
Мінімальні моменти опору:												
- осьовий $\overline{W}_X$	1	0,96	0,96	0,77	0,89	0,89	0,99	1,01	0,99	0,92	1,1	1,03
- осьовий $\overline{W}_Z$	1	0,85	0,85	0,66	0,98	0,96	0,87	1,02	0,99	1,03	0,99	0,91
- при крученні $\overline{W}_K$	1	0,87	0,87	0,95	1,1	1,1	1,11	1,1	1,15	1,33	1,2	1,29
Напруження від балочного згину:												
- в точці «П» $\overline{\sigma}_y^n$	1	0,98	0,72	0,38	0,93	0,93	0,95	0,89	0,94	0,94	1,78	1,98
- в точці «С» $\overline{\sigma}_y^c$	1,05	1,03	0,77	0,29	0,79	0,79	0,99	0,81	0,98	0,18	1,59	1,74

Напруження від тисків ***P*** опорних вузлів:												
в поясі (точка «П»):												
- від поперечного згину $\overline{\sigma}^{n}_{имх}$	1	1,07	0,96	1,63	0,89	1,16	1,04	0,69	1,04	0,53	1,6	1,47
- від поздовжн. згину $\overline{\sigma}^{n}_{иму}$	0,83	0,88	0,81	1,26	0,7	0,88	0,87	0,51	0,88	0,39	0,91	0,92
- еквівалентні $\overline{\sigma}^{n}_{ем}$	0,99	1,06	0,96	1,61	0,99	1,15	1,05	0,94	1,08	0,8	1,4	1,29
в стінці (точка «С»):												
- від поперечного згину $\overline{\sigma}^{c}_{им\ z}$	0,76	0,74	0,78	1,17	0,22	0,56	0,78	0,33	0,77	0,01	0,7	0,61
- від поздовжн. згину $\overline{\sigma}^{c}_{им\ y}$	0,3	0,29	0,3	0,45	0,09	0,23	0,3	0,13	0,28	-	0,19	0,21
- еквівалентні $\overline{\sigma}^{c}_{ем}$	0,72	0,7	0,72	1,12	0,21	0,55	0,74	0,35	0,73	0,01	0,63	0,59
Сумарні еквівалентні напруження (від балкового згину та тисків ***P***):												
- в поясі (точка «П»): $\overline{\sigma}^{n}_{e}$	1,63	1,68	1,39	1,76	1,58	1,59	1,65	1,41	1,68	1,37	1,11	1,02
- в стінці (точка «С»): $\overline{\sigma}^{c}_{e}$	1,2	1,19	1	1,13	0,9	0,95	1,19	0,86	1,19	0,18	0,8	0,73
Примітка. Вісь Y напрямлена вздовж вісі стріли.												

2.2.Згинальна та крутильна жорсткість стріли

Прогини і кути закручування стріл зворотно пропорційні їх згинальної (**E·I**) та крутильної (**G·I$_к$**) жорсткості, де **E** и **G** - відомі константи; **I** і **I$_k$** - моменти інерції поперечних перерізів (осьовий та при крученні).

Як видно з таблиці, круглий, шести- і восьмикутний поперечний перерізи у порівнянні з прямокутним забезпечують телескопічним стрілам більш високу згинальну та крутильну жорсткість. У вертикальній площині найбільше підвищення (на 8...14%) згинальної жорсткості забезпечують ромбічне, шести- і восьмикутні перерізи; круглий переріз дає незначне (на 3%) збільшення, а трапецієподібне - зменшення жорсткості на (6%). У бічній площині круглий і трапецієподібний переріз у порівнянні з прямокутним забезпечують найбільше підвищення (на 48 і 35%) жорсткості. Найменша бічна жорсткість - у ромбічного перерізу. Найбільшу крутильну жорсткість забезпечує круглий перетин - на 67% більше, ніж у прямокутного; шести- і восьмикутні перерізи підвищують жорсткість крутіння на 29…42%, сучасні перетини И та К теж забезпечують приріст крутильної жорсткості – на 40-48%.

2.3.Напруження від зовнішніх навантажень

Нормальні напруження стиску в стрілі від поздовжніх сил при усіх варіантах поперечних перерізів однакові через рівність їх площ.

Непрямий аналіз напружень від кручення стріли може бути проведений по моментах опору. Найбільший момент опору при крученні забезпечує круглий переріз З (на 25% більше в порівняння з прямокутним). У шести- і восьмикутних перерізів моменти опору при крученні на 10...15% більше, ніж у прямокутного. Найменші моменти опору мають трапецієподібне Б и ромбічне В типи перерізів. При підрахунку напружень від загального (балкового) згину стріли прийняте співвідношення між величинами згинальних моментів у бічній і вертикальній площинах **M$_y$/M$_x$=0,2**, характерне для натурних телескопічних стріл при навантаженні в умовах експлуатації.

Осьові моменти опору, що визначають рівень напружень від балкового згину стріли, приведені в таблиці для найбільш віддалених від осей симетрії X і Z точок перерізів (мінімальні моменти опору). Як видно, найбільші осьові моменти опору в обох площинах забезпечує прямокутний переріз А и восьмикутний типу Е. Найменші моменти опору у вертикальній і бічній площинах у ромбічного перерізу В (на 23 і 33,5% менше, ніж у перерізу А). Однак у точках «П» та «С», де напруження від тиску опорних вузлів у поясі і бічній стінці найбільші, моменти опору при всіх типах поперечних перерізів від Б до З більше (а напруження від балкового згину менше), чим у прямокутного перерізу А. Найменше значення напружень від балкового згину в цих точках отримані у ромбічного перерізу В: у 2,6 рази у поясі та у 3,4 рази в точці «С» бічної стінки менше, ніж у прямокутного перерізу. Помітне зниження балкових напружень згину в точках «П» і «С» дають перерізу Г (за схемою Г2) і Е: у поясі на 7 і 11%, у бічній стінці - на 21 і 19%. Інші типи перерізів у порівнянні з перерізом А також забезпечують зниження напружень, але в меншому ступені, чим перерізу по варіантах У, Г2 і Е.

2.4. Місцева завантаженість (від місцевих тисків опорних вузлів секцій)

Аналіз проведений для телескопічних стріл при симетричному навантаженні без врахування бічних навантажень і перерозподілу тисків опорних вузлів від дії на стрілу крутних моментів. Бічні навантаження не роблять сильного впливу на напружений стан, тому що по величині вони значно менше вертикальних опорних тисків і, крім того, бічні опорні вузли можуть бути розміщені в зонах малої завантаженості.

Характеризуючи напружений стан від місцевого впливу тисків опорних вузлів секцій, можна відзначити наступні особливості:

- У поясах і бічних стінках перерізів має місце явне виражений двохосьовий напружений стан від згину і мембранних зусиль.
- Основними компонентами напружень, найбільшою мірою визначаючими рівень еквівалентних напружень, є поздовжні (по напрямку

поздовжньої осі Y стріли) і поперечні напруження згину пояса (у зоні точки «П») і бічної стінки (точка «С»).

- Напруження від мембранних зусиль значні в бічних стінках (у перерізах з А до Ж) і безпосередньо в зоні дії тисків ***P*** (у перерізах Г, Е та З).

За рівнем еквівалентних напружень розглянуті варіанти перерізів стріл суттєво нерівноцінні. Найбільші еквівалентні напруження отримані в ромбічному перерізі В, що обумовлено, в основному, значною величиною рівнодіючої тиску опорного вузла, у 1,65 рази більшої тиску опорних вузлів при прямокутному перерізі А. Трапецієподібне Б, шестикутне Д и восьмикутне Ж типи перерізів та сучасні И та К мають трохи більш високий рівень еквівалентних напружень (як у поясах, так в у бічних стінках, окрім И та К), чим прямокутний переріз А; переріз за схемою Г1 при незначному збільшенні завантаженості поясу забезпечує суттєве (більш ніж у 3 рази) зниження напружень у бічній стінці. Варіант Е в порівнянні з А знижує еквівалентні напруження в навантаженому поясі - на 5 %, у бічній стінці - більш ніж у 2 рази. Круглий переріз дає найбільше зниження еквівалентних напружень у зоні дії опорних вузлів - на 19,5%. Це обґрунтовується тим, що кругова поверхня цього перерізу, що представляє собою положисту оболонку, забезпечує зниження (у порівнянні з пластиною) згинаючих напружень за рахунок значних мембранних зусиль, що з'являються в серединному шарі оболонки і що створюють протидію, що розвантажує, на згинальні моменти в елементах конструкції.

2.5.Сумарна завантаженість (від зовнішніх навантажень і тисків опорних вузлів)

Порівняння варіантів перерізів проведено по еквівалентним напруженням, при розрахунку яких враховувались усі компоненти напружень від тисків опорних вузлів і напруження від балкового (в обох площинах) згину стріли. Напруження від кручення не враховувалися, тому що вони порівняно невеликі. Напруження стиску від поздовжніх сил також не приймалися до уваги, тому що вони звичайно

значно менше напружень від згину і для усіх варіантів перерізів однакові. Крім того, у багатьох конструкціях стріл поздовжні зусилля сприймаються механізмами висування секцій.

Сумарні еквівалентні напруження залежать від співвідношення між напруженнями від навантажень опорних вузлів і від балкового згину: для пояса і для бічної стінки. Ці співвідношення, у свою чергу, залежать від конкретних конструктивних параметрів стріли (кількості секцій і їхньої довжини, типу опорних вузлів і ексцентриситету установки їх щодо бічних стінок) і для натурних конструкцій можуть коливатися в досить широких межах. Тому еквівалентні напруження були підраховані для широкого діапазону **К**: для пояса $\mathbf{К_п=0…4}$, для стінки $\mathbf{К_с=0...3}$. За результатами розрахунків побудовані графіки залежності еквівалентних напружень у поясах і бічних стінках від значень $\mathbf{К_п}$ і $\mathbf{К_С}$ для варіантів перерізів А, В, Е и З (рис. 2.15). Як видно з графіків, перерізи стріл по варіантах Е и З забезпечують зниження в порівнянні з прямокутним перерізом еквівалентних напружень у всьому діапазоні зміни $\mathbf{К_п}$ і $\mathbf{К_С}$, причому криві напружень для розглянутих типів перерізів мають тенденцію до розбіжності при $\mathbf{К_п>4}$ і $\mathbf{К_с>3}$. Завантаженість бічних стінок у перерізів Е и З (у точці «с») знижується в більшому ступені, чим у точці «п», що сприяє підвищенню місцевої стійкості. Ромбічний переріз В знижує еквівалентні напруження лише при малих значеннях $\mathbf{К_п}$ і $\mathbf{К_С}$**.** З огляду на перераховані вище недоліки перерізу В и, приймаючи в увагу необхідність значного збільшення (у 1,65 рази в порівнянні з варіантом А) зусилля для висування секції стріли, можна зробити висновок про недоцільність застосування стріл з ромбічним перерізом.

Для з'ясування можливостей зниження маси телескопічних стріл круглий переріз був переглянутий при декількох значеннях товщини стінки. У результаті встановлено, що при однаковому рівні сумарних еквівалентних напружень для діапазону зміни $\boldsymbol{К_п}$ від 0,5 до 4 і прийнятих розрахункових схемах (тобто при ексцентриситеті $\mathbf{Е=0,125\cdot В}$, де **В** - ширина прямокутного перерізу) площа поперечного переріза типу З у порівнянні з перерізом А може бути зменшена

приблизно на 9%. При **Е=0,2·В** можливе зменшення площі перерізу, а, отже, і маси, складає близько 20%.

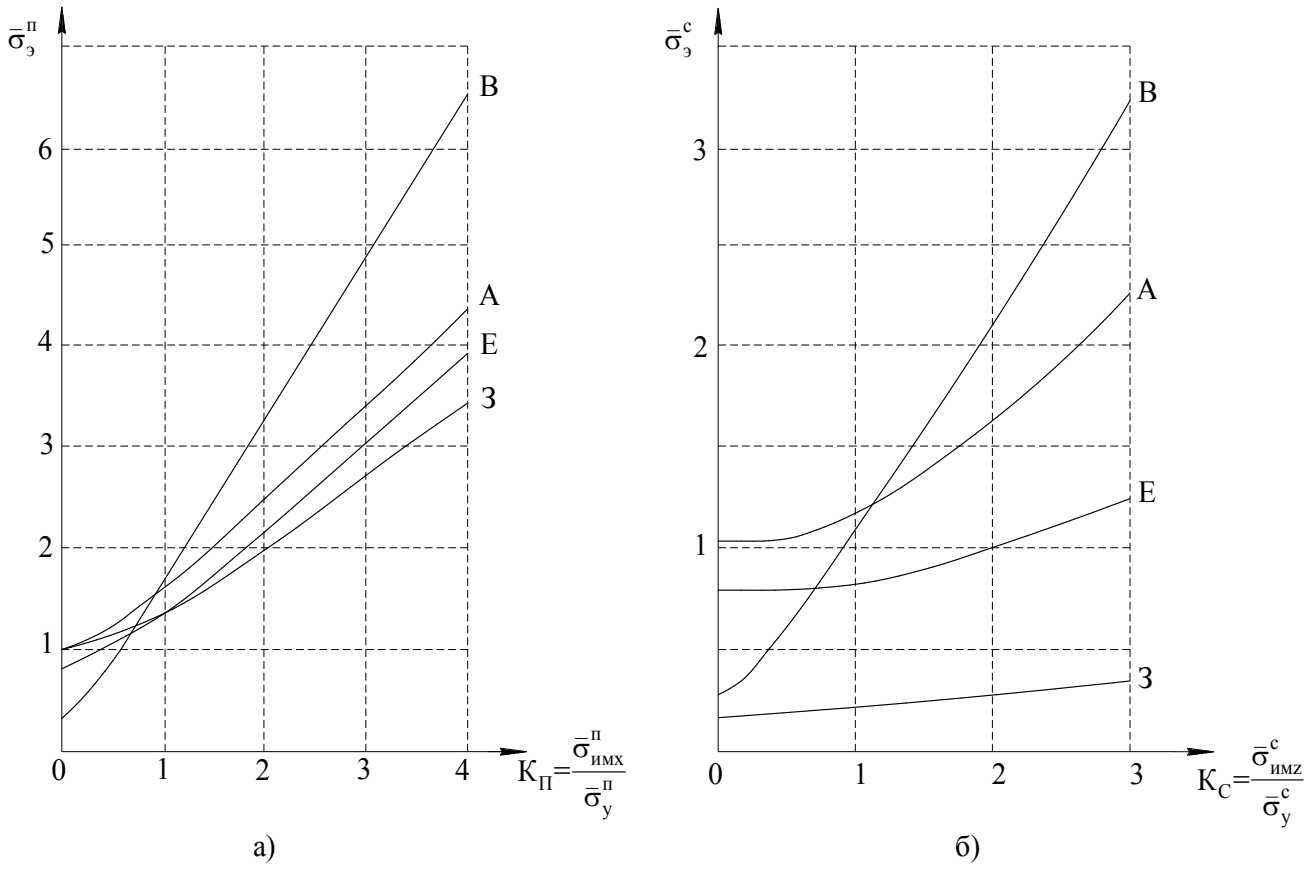


Рисунок 2.15 – Графіки залежності сумарних еквівалентних напружень в поясах (а) та в стінках (б) від $\mathbf{К_п}$ та $\mathbf{К_с}$ для варіантів А, В, Е, З

Однак таке зниження маси може бути реалізовано тільки в найбільш навантаженій першій секції стріли, де навантаження від опорних вузлів діють зсередини контуру поперечного переріза й ексцентриситет Е їхнього додатка найбільший. Проміжні висувні секції піддаються завантаженню від опорних вузлів як зсередини контуру перерізу, так і зовні, причому при завантаженні зовні тиску опор більше, ніж при завантаженні зсередини. Оскільки зовнішні опорні вузли при всіх типах перерізів, за винятком Е та З, встановлюються з меншим ексцентриситетом ($\mathbf{E_1<E}$), чим внутрішні, то рівень напружень при завантаженні зовні може бути помітно нижче, ніж при завантаженні зсередини. Тому проміжні секції стріл (по тим же розумінням крайні висувні секції) з

поперечними переріз типів Е и З можуть виявитися більш навантаженими, ніж секції стріл прямокутного перерізу А.

Для виявлення області доцільного застосування перерізів типів Е и З прямокутний переріз А було перераховано при декількох значеннях ексцентриситету **E=0…0,25·B.** За результатами розрахунків побудований графік залежності еквівалентних (по місцевої завантаженості) напружень у поясі від відносного ексцентриситету **α=E/B** (рис. 2.16). Там же відзначені рівні еквівалентних напружень для перерізів З и Е. Із графіка видно, що застосування круглого перерізу стає доцільним при значеннях ексцентриситету **E>0,1·B.** Для перерізу типу Е рівень напружень на рис. 2.16 відповідає навантаженню зусиллями **P** на кутові скоси перерізу, довжина яких прийнята рівної **2·E=0,25·B** (**B** - ширина прямокутного перерізу). При зменшенні довжини кутових скосів рівень напружень у перерізі Е знижується і його застосування може виявитися доцільним навіть при **E<0,1·B.** При остаточній оцінці варіанта Е варто враховувати, що при роботі стріли з таким типом перерізу потрібне значне збільшення (на 41%) зусилля для висування секцій у порівнянні зі стрілами прямокутного перерізу А. Крім того, у стрілах з перерізом Е бічні навантаження, що діють на стрілу, безпосередньо сприймаються кутовими скосами, що викликає деяке збільшення місцевої завантаженості, тоді як бічні опори при перетинах інших типів можуть бути винесені в зони низкою завантаженості.

На закінчення відзначимо, що розглянуті варіанти поперечних перерізів (а також створені на їхній основі комбіновані перерізи) забезпечують різні (по ступені ефективності) можливості для реалізації конструктивних рішень, спрямованих на зниження (або усунення) згинальних силових факторів в елементах перерізів від тисків опорних вузлів секцій.

Подальші дослідження доцільно продовжити в напрямку порівняльного аналізу завантаженості телескопічних стріл з комбінованими формами поперечних перерізів при різних конструктивних рішеннях.

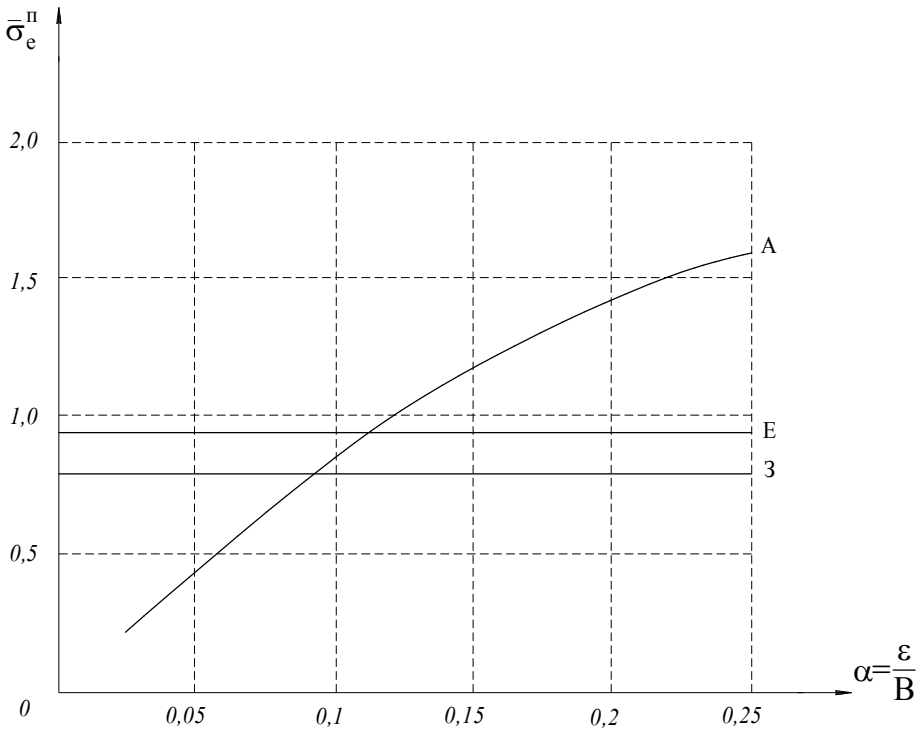


Рисунок 2.16 - Графіки залежності еквівалентних (за місцевою завантаженістю) напружень від відносного ексцентриситету α=E/B для варіантів А, Е, З поперечного перерізу

РОЗДІЛ 3
ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В РОЗРАХУНКОВИХ ПЕРЕРІЗАХ МЕТОДОМ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ

В розрахунку телескопічної стріли не враховуємо навантаження від дії сил вітру, відцентрових сил обертання поворотної частини. Для спрощення розрахункової моделі приймаємо, що на стрілу діють тільки сили власної ваги та корисного навантаження, тобто, горизонтальні сили відсутні.

3.1.Визначення геометричних характеристик перерізів секцій

Площа перерізів секцій:

$$F = 2 \cdot (a_1 \cdot \delta_1 + a_2 \cdot \delta_2) \quad (3.1)$$

де a_1, a_2 – розміри контурів поперечного перерізу, ***м*** (рис. 3.1)

δ_1, δ_2 – товщини відповідно поясів та вертикальних стінок, ***м***

Для головної секції:

$$F = 2 \cdot (0{,}124 \cdot 0{,}003 + 0{,}188 \cdot 0{,}003) = 0{,}00187 м^2 (18{,}7 см^2)$$

Для середньої секції:

$$F = 2 \cdot (0{,}158 \cdot 0{,}003 + 0{,}234 \cdot 0{,}004) = 0{,}00282 м^2 (28{,}2 см^2)$$

Для кореневої секції:

$$F = 2 \cdot (0{,}197 \cdot 0{,}005 + 0{,}280 \cdot 0{,}004) = 0{,}00421 м^2 (42{,}1 см^2)$$

Статичний момент площі перерізів відносно вісі, що проходить через середини стінок:

$$S_x = a_1 \cdot \delta_1 \cdot \frac{a_2 + \delta_1}{2} + a_2 \cdot \delta_2 \cdot \frac{a_2}{4} \quad (3.2)$$

Для головної секції:

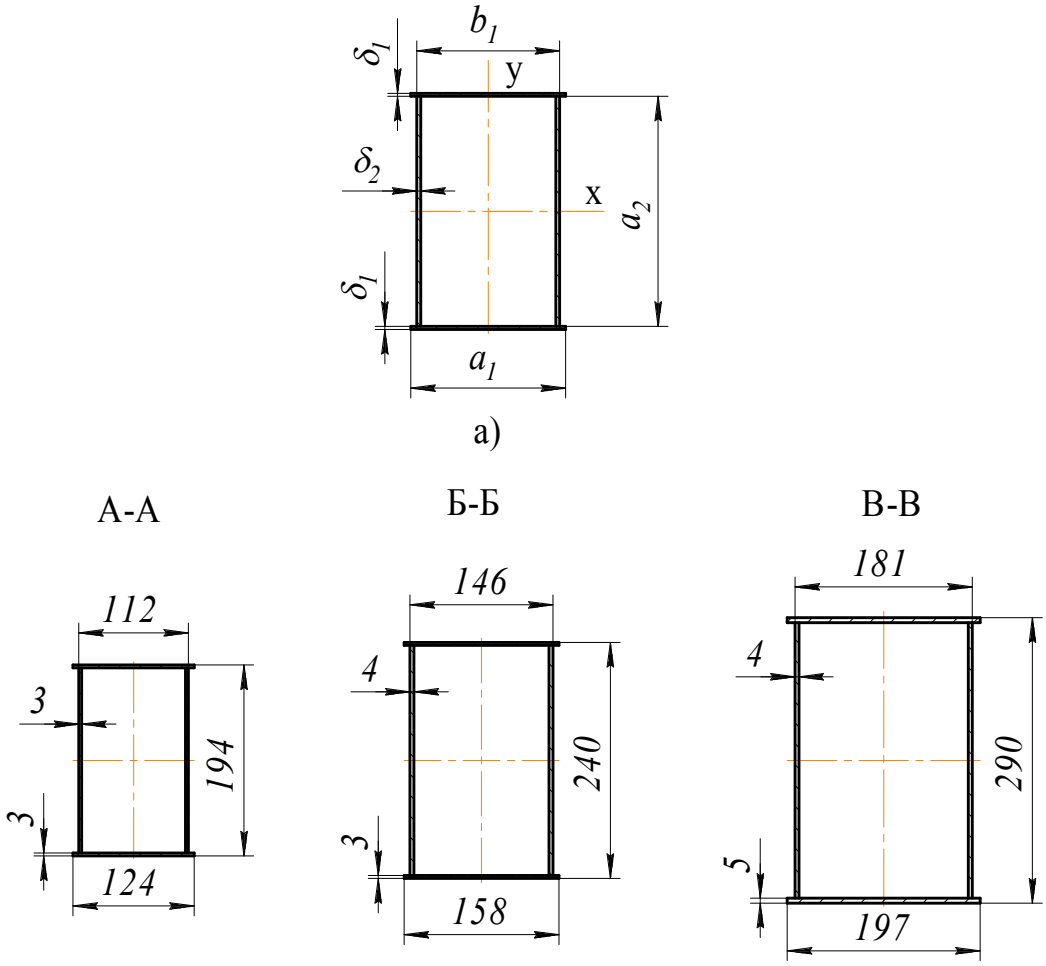
$$S_x = 0{,}124 \cdot 0{,}003 \cdot \frac{0{,}188 + 0{,}003}{2} + 0{,}188 \cdot 0{,}003 \cdot \frac{0{,}188}{4} = 0{,}62 \cdot 10^{-4} м^3 (62 см^3)$$

Для середньої секції:

$$S_x = 0{,}158 \cdot 0{,}003 \cdot \frac{0{,}234 + 0{,}003}{2} + 0{,}234 \cdot 0{,}004 \cdot \frac{0{,}234}{4} = 1{,}1 \cdot 10^{-4} м^3 (110 см^3)$$

Для кореневої секції:

$$S_x = 0{,}197 \cdot 0{,}005 \cdot \frac{0{,}28 + 0{,}005}{2} + 0{,}28 \cdot 0{,}004 \cdot \frac{0{,}28}{4} = 2{,}2 \cdot 10^{-4} м^3 (220 см^3)$$



а) розрахункова схема;

б) головна секція;

в) середня секція;

г) коренева секція

Рисунок 3.1 - Схеми поперечних перерізів

Моменти інерції перерізів відносно осі *X-X*:

$$I_x = 2 \cdot \left[\left(\frac{a_1 \cdot \delta_1^3}{12} + a_1 \cdot \delta_1 \cdot \left(\frac{a_2 + \delta_1}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{\delta_2 \cdot a_2^3}{12} \right) \right] \quad (3.3)$$

Для головної секції:

$$I_x = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}124 \cdot 0{,}003^3}{12} + 0{,}124 \cdot 0{,}003 \cdot \left(\frac{0{,}188 + 0{,}003}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{0{,}003 \cdot 0{,}188^3}{12} \right) \right] = 10{,}1 \cdot 10^{-6} м^4$$

$$I_x = 1010см^4$$

Для середньої секції:

$$I_x = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}158 \cdot 0{,}003^3}{12} + 0{,}158 \cdot 0{,}003 \cdot \left(\frac{0{,}234 + 0{,}003}{2}\right)^2\right) + \left(\frac{0{,}004 \cdot 0{,}234^3}{12}\right)\right] = 21{,}8 \cdot 10^{-6}м^4$$

$$I_x = 2180см^4$$

Для кореневої секції:

$$I_x = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}197 \cdot 0{,}005^3}{12} + 0{,}197 \cdot 0{,}005 \cdot \left(\frac{0{,}28 + 0{,}005}{2}\right)^2\right) + \left(\frac{0{,}004 \cdot 0{,}28^3}{12}\right)\right] = 54{,}6 \cdot 10^{-6}м^4$$

$$I_x = 5460см^4$$

Моменти інерції перерізів відносно осі *У-У*:

$$I_y = 2 \cdot \left[\left(\frac{\delta_1 \cdot a_1^3}{12}\right) + \left(\frac{a_2 \cdot \delta_2^3}{12} + a_2 \cdot \delta_2 \cdot \left(\frac{b_1}{2} - 2 \cdot \delta_2 + \frac{\delta_2}{2}\right)^2\right)\right] \quad (3.4)$$

Для головної секції:

$$I_y = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}003 \cdot 0{,}124^3}{12}\right) + \left(\frac{0{,}188 \cdot 0{,}003^3}{12} + 0{,}188 \cdot 0{,}003 \cdot \left(\frac{0{,}112}{2} - 2 \cdot 0{,}003 + \frac{0{,}003}{2}\right)^2\right)\right] =$$

$$= 3{,}94 \cdot 10^{-6}м^4$$

$$I_y = 394см^4$$

Для середньої секції:

$$I_y = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}003 \cdot 0{,}158^3}{12}\right) + \left(\frac{0{,}234 \cdot 0{,}004^3}{12} + 0{,}234 \cdot 0{,}004 \cdot \left(\frac{0{,}146}{2} - 2 \cdot 0{,}004 + \frac{0{,}004}{2}\right)^2\right)\right] =$$

$$= 11{,}95 \cdot 10^{-6}м^4$$

$$I_y = 1195см^4$$

Для кореневої секції:

$$I_y = 2 \cdot \left[\left(\frac{0{,}005 \cdot 0{,}197^3}{12}\right) + \left(\frac{0{,}28 \cdot 0{,}004^3}{12} + 0{,}28 \cdot 0{,}004 \cdot \left(\frac{0{,}181}{2} - 2 \cdot 0{,}004 + \frac{0{,}004}{2}\right)^2\right)\right] =$$

$$= 22{,}37 \cdot 10^{-6}м^4$$

$$I_y = 2237см^4$$

Моменти опору для перерізів відносно осі *Х-Х*:

$$W_x = \frac{2 \cdot I_x}{a_2 + \delta_1} \quad (3.5)$$

Для головної секції:

$$W_x = \frac{2 \cdot 10{,}1 \cdot 10^{-6}}{0{,}188 + 0{,}003} = 1{,}05 \cdot 10^{-4}м^3(105см^3)$$

Для середньої секції:

$$W_x = \frac{2 \cdot 21{,}8 \cdot 10^{-6}}{0{,}234 + 0{,}003} = 1{,}84 \cdot 10^{-4} м^3 (184 см^3)$$

Для кореневої секції:

$$W_x = \frac{2 \cdot 54{,}6 \cdot 10^{-6}}{0{,}28 + 0{,}005} = 3{,}83 \cdot 10^{-4} м^3 (383 см^3)$$

Моменти опору для перерізів відносно осі *У-У*:

$$W_y = \frac{2 \cdot I_y}{a_1} \qquad (3.6)$$

Для кореневої секції:

$$W_y = \frac{2 \cdot 3{,}94 \cdot 10^{-6}}{0{,}124} = 0{,}64 \cdot 10^{-4} м^3 (64 см^3)$$

Для середньої секції:

$$W_y = \frac{2 \cdot 11{,}95 \cdot 10^{-6}}{0{,}158} = 1{,}51 \cdot 10^{-4} м^3 (151 см^3)$$

Для головної секції:

$$W_y = \frac{2 \cdot 22{,}37 \cdot 10^{-6}}{0{,}197} = 2{,}27 \cdot 10^{-4} м^3 (227 см^3)$$

3.2.Механічні характеристики матеріалу

Механічні характеристики сталі 09Г2С [5; 9]:

- границя міцності $\sigma_в$, МПа ……500
- границя текучості $\sigma_т$, МПа ……350
- відносне подовження δ, % ……21
- модуль пружності Е, МПа ……$1{,}86 \cdot 10^5$

Допустимі напруження:

- розтягу та стискання $[\sigma_р]$, МПа ……250
- згину $[\sigma_{зг}]$, МПа ……260
- зрізу $[\tau_{зр}]$, МПа ……145

- кручення $[\tau_{кр}]$, МПа ……180

3.3.Розрахунок головної секції

Рівняння рівноваги головної секції:

$$\sum P_y = 0$$

$$V_5 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) = 0 \quad (3.7)$$

$$V_5 = Q + (G_Л + G_П) + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) + G_1 + (G_{ГЦ2} + G_{Ц2})$$

$$V_5 = 2000 + (500 + 550) + (120 + 80) + 1180 + (250 + 100) = 4780Н$$

$$H_5 = 0 \quad (3.8)$$

$$\sum M_{зг} = 0$$

$$-M_5 + Q \cdot 3{,}885 + (G_Л + G_П) \cdot 3{,}585 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 3{,}015 + G`_1 \cdot 2{,}1 +$$

$$+(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 0 = 0 \quad (3.9)$$

$$M_5 = Q \cdot 3{,}885 + (G_Л + G_П) \cdot 3{,}585 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 3{,}015 + G`_1 \cdot 2{,}1 +$$

$$+(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 0 \quad (3.10)$$

$$M_5 = 2000 \cdot 3{,}885 + (500 + 550) \cdot 3{,}585 + (120 + 80) \cdot 3{,}015 + 1180 \cdot 2{,}1 + (250 + 100) \cdot 0 =$$

$$= 14615Н \cdot м$$

Крутний момент від скручування стріли при ексцентричному навантаженні:

$$\sum M_к = 0$$

$$M_к - Q \cdot b = 0 \quad (3.11)$$

$$M_к = Q \cdot b = 2000 \cdot 0{,}6 = 1200Н \cdot м \quad (3.12)$$

де $b = 0{,}6$ м - (рис. 3.2)

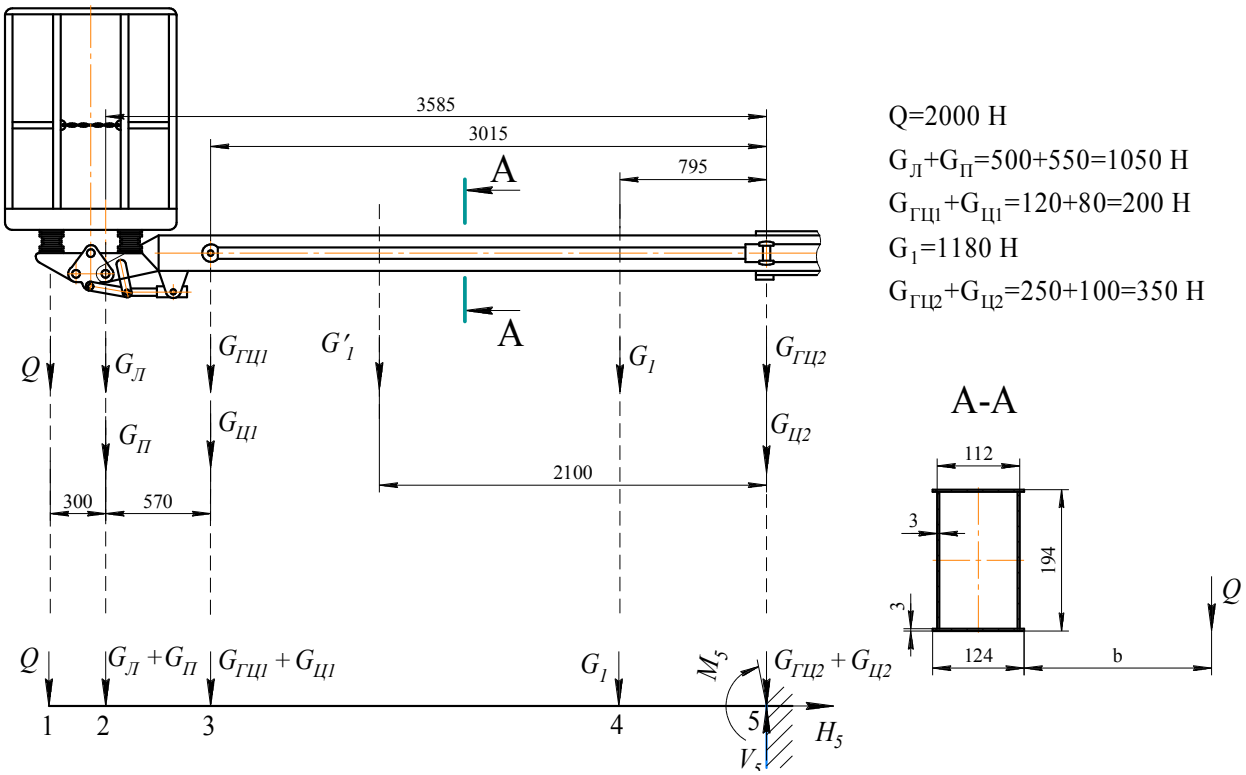


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема головної секції

Нормальні напруження при згині від дії навантаження в вертикальній площині:

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W_x} \leq [\sigma_{зг}] \tag{3.13}$$

де $[\sigma_{зг}] = 260$ МПа – допустиме напруження згину для сталі 09Г2С,

$W_x = 1{,}05 \cdot 10^{-4}$ м^3 – момент опору перерізу,

$$\sigma = \frac{14615}{1{,}05 \cdot 10^{-4}} = 139{,}19 МПа \leq [\sigma_{зг}]$$

Дотичні напруження в опорному перерізі:

$$\tau_1 = \frac{V_5 \cdot S_x}{I_x \cdot 2 \cdot \delta_2} \tag{3.14}$$

де $S_x = 0{,}62 \cdot 10^{-4}$ м^3 – статичний момент площі перерізу,

$I_x = 10{,}1 \cdot 10^{-6}$ м^4 – момент інерції перерізу,

$\delta_2 = 0{,}003$ м – товщина вертикальної стінки,

$$\tau_1 = \frac{4780 \cdot 0{,}62 \cdot 10^{-4}}{10{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 0{,}003} = 4{,}89 \text{МПа}$$

Дотичні напруження в опорному перерізі від дії крутного моменту:

$$\tau_2 = \frac{M_к}{4 \cdot \delta_2 \cdot S} \tag{3.15}$$

де S = 0,112·0,191= 0,02139 м^2 – площа прямокутника, обмеженого осями, що проходять через середини стінок та поясів перерізу,

$$\tau_2 = \frac{1200}{4 \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}02139} = 4{,}67 МПа$$

Максимальні дотичні напруження:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leq [\tau_{кр}] \quad (3.16)$$

$$\tau = 4{,}89 + 4{,}67 = 9{,}56 МПа \leq [\tau_{кр}] = 180 МПа$$

3.4.Розрахунок середньої секції

Рівняння рівноваги середньої секції:

$$\sum P_y = 0$$

$$V_9 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - G_{ГЦ3} - G_2 - G_{Ц3} = 0 \quad (3.17)$$

$$V_9 = Q + (G_Л + G_П) + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) + G_1 + (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) + G_{ГЦ3} + G_2 + G_{Ц3} \quad (3.18)$$

$$V_9 = 2000 + (500 + 550) + (120 + 80) + 1180 + (250 + 100) + 400 + 1460 + 160 = 6800 Н$$

$$H_9 = 0 \quad (3.19)$$

$$\sum M_{зг} = 0$$

$$-M_9 + Q \cdot 6{,}84 + (G_Л + G_П) \cdot 6{,}54 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 5{,}97 + G_1 \cdot 5{,}055 +$$
$$+(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 2{,}955 + G_{ГЦ3} \cdot 0{,}49 + G_2 \cdot 0{,}16 = 0 \quad (3.20)$$

$$M_9 = Q \cdot 6{,}84 + (G_Л + G_П) \cdot 6{,}54 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 5{,}97 + G_1 \cdot 5{,}055 +$$
$$+(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 2{,}955 + G_{ГЦ3} \cdot 0{,}49 + G_2 \cdot 0{,}16 \quad (3.21)$$

$$M_9 = 2000 \cdot 6{,}84 + (500 + 550) \cdot 6{,}54 + (120 + 80) \cdot 5{,}97 + 1180 \cdot 5{,}055 +$$
$$+(250 + 100) \cdot 2{,}955 + 400 \cdot 0{,}49 + 1460 \cdot 0{,}16 = 29170 Н \cdot м$$

Крутний момент від скручування стріли при ексцентричному навантаженні:

$$\sum M_к = 0$$

$$M_к - Q \cdot b = 0 \quad (3.22)$$

$$M_к = Q \cdot b = 2000 \cdot 0{,}6 = 1200 Н \cdot м$$

де b = 0,6 м - (рис. 3.2)

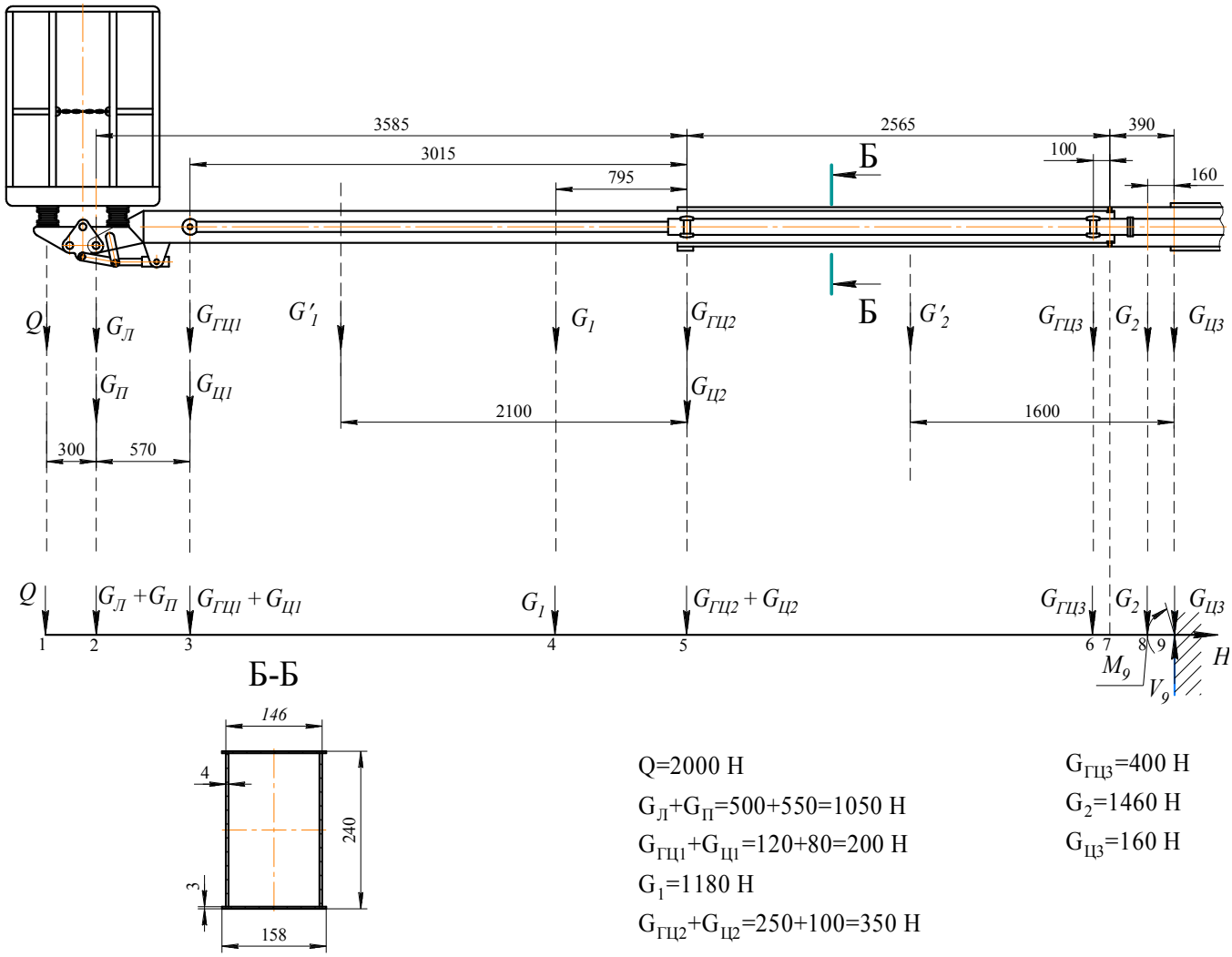


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема середньої секції

Нормальні напруження при згині від дії навантаження в вертикальній площині:

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W_x} \leq [\sigma_{зг}] \qquad (3.23)$$

де $[\sigma_{зг}]$ = 260 МПа – допустиме напруження згину для сталі 09Г2С,

$W_x = 1{,}84 \cdot 10^{-4}$ м^3 – момент опору перерізу,

$$\sigma = \frac{29170}{1{,}84 \cdot 10^{-4}} = 158{,}53 \text{МПа} \leq [\sigma_{зг}]$$

Дотичні напруження в опорному перерізі:

$$\tau_1 = \frac{V_9 \cdot S_x}{I_x \cdot 2 \cdot \delta_2}, \qquad (3.24)$$

де $S_x = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^3 – статичний момент площі перерізу,

$I_x = 21{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^4 – момент інерції перерізу,

$\delta_2 = 0{,}004$ м – товщина вертикальної стінки,

$$\tau_1 = \frac{6800 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-4}}{21{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 0{,}004} = 4{,}29\text{МПа}$$

Дотичні напруження в опорному перерізі від дії крутного моменту:

$$\tau_2 = \frac{M_к}{4 \cdot \delta_2 \cdot S} \tag{3.25}$$

де $S = 0{,}142 \cdot 0{,}237 = 0{,}03365$ м^2 – площа прямокутника, обмеженого осями, що проходять через середини стінок та поясів перерізу,

$$\tau_2 = \frac{1200}{4 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}03365} = 2{,}23\text{МПа}$$

Максимальні дотичні напруження:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \le [\tau_{кр}] \tag{3.26}$$

$$\tau = 4{,}29 + 2{,}23 = 6{,}52\text{МПа} \le [\tau_{кр}] = 180\text{МПа}$$

3.5.Розрахунок кореневої секції

Рівняння рівноваги кореневої секції:

$$\sum M_B = 0$$

$$\begin{gathered} -V_{12} \cdot 1{,}805 + Q \cdot 12{,}15 + (G_Л + G_П) \cdot 11{,}85 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 11{,}28 + G_1 \cdot 9{,}06 + \\ +(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 8{,}265 + G_{ГЦ3} \cdot 5{,}8 + G_2 \cdot 5{,}47 + G_{Ц3} \cdot 5{,}31 + \\ +G_{ГЦ4} \cdot 2{,}875 + G_3 \cdot 2{,}22 = 0 \end{gathered} \tag{3.27}$$

$$V_{12} = \frac{1}{1{,}805} \cdot \begin{bmatrix} Q \cdot 12{,}15 + (G_Л + G_П) \cdot 11{,}85 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 11{,}28 + G_1 \cdot 9{,}06 + \\ +(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 8{,}265 + G_{ГЦ3} \cdot 5{,}8 + G_2 \cdot 5{,}47 + G_{Ц3} \cdot 5{,}31 + \\ +G_{ГЦ4} \cdot 2{,}875 + G_3 \cdot 2{,}22 \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$V_{12} = \frac{1}{1{,}805} \cdot \begin{bmatrix} 2000 \cdot 12{,}15 + (500 + 550) \cdot 11{,}85 + (120 + 80) \cdot 11{,}28 + \\ +1180 \cdot 9{,}06 + (250 + 100) \cdot 8{,}265 + 400 \cdot 5{,}8 + 1460 \cdot 5{,}47 + \\ +160 \cdot 5{,}31 + 250 \cdot 2{,}875 + 2680 \cdot 2{,}22 \end{bmatrix} = \frac{70406}{1{,}805} = 39006\text{Н}$$

$$\sum P_y = 0$$

$$\begin{gathered} -V_{14} + V_{12} - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - \\ -G_{ГЦ3} - G_2 - G_{Ц3} - G_{ГЦ4} - G_3 - G_{ГЦ5} = 0 \end{gathered} \tag{3.29}$$

$$\begin{gathered} V_{14} = V_{12} - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - \\ -G_{ГЦ3} - G_2 - G_{Ц3} - G_{ГЦ4} - G_3 - G_{ГЦ5} \end{gathered} \tag{3.30}$$

$$\begin{gathered} V_{14} = 39006 - 2000 - (500 + 550) - (120 + 80) - 1180 - (250 + 100) - \\ -400 - 1460 - 160 - 250 - 2680 - 120 = 29156H \end{gathered}$$

$$H_{14} = 0 \tag{3.31}$$

Визначимо згинальний момент в опорному перерізі (відносно т. 12 на рис. 3.4):

$$M_{зг} + G_{ГЦ5} \cdot z + V_{14} \cdot z = 0, \tag{3.32}$$

при $z = 0$, $M_{зг} = 0$

при $z = 1{,}805$ м, $M_{зг} = -G_{ГЦ5} \cdot z - V_{14} \cdot z = -120 \cdot 1{,}805 - 29156 \cdot 1{,}805 = 52843 Н \cdot м$ (3.33)

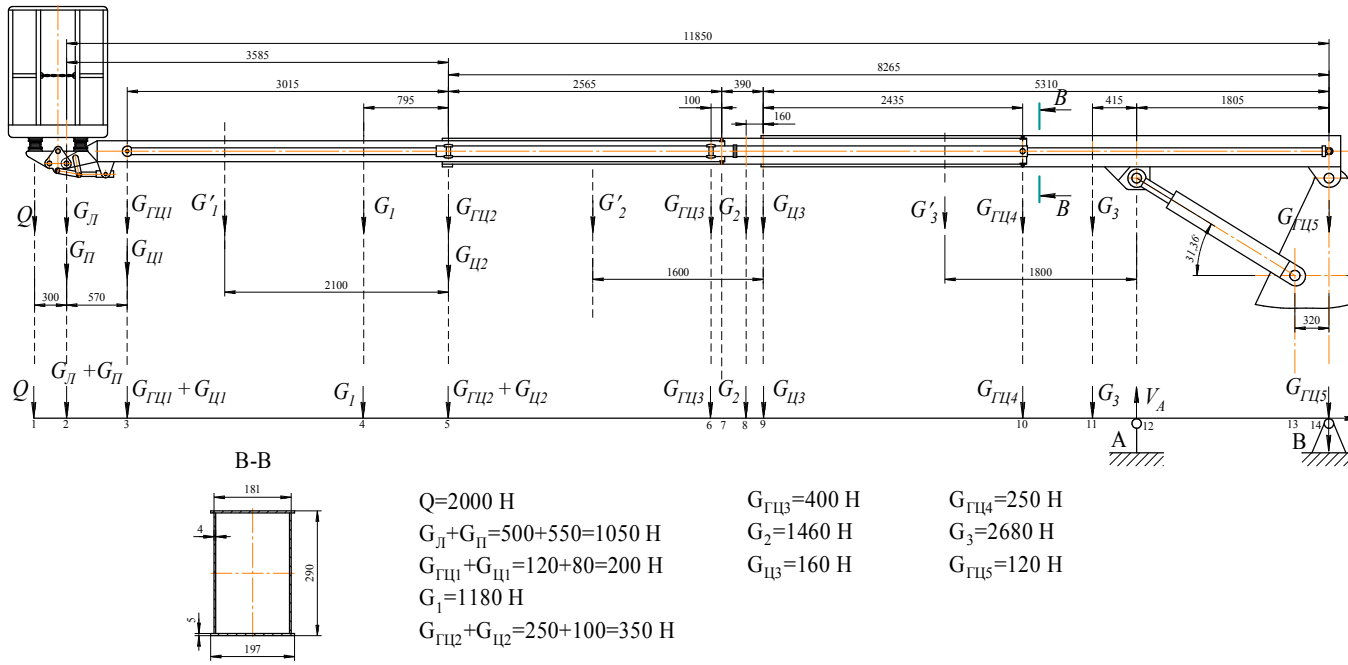
Крутний момент від скручування стріли при ексцентричному навантаженні:

$$\sum M_к = 0$$

$$M_к - Q \cdot b = 0 \tag{3.34}$$

$$M_к = Q \cdot b = 2000 \cdot 0{,}6 = 1200 Н \cdot м \tag{3.35}$$

де $b = 0{,}6$ м - (рис. 3.2)



В-В

Q=2000 Н
$G_Л+G_П$=500+550=1050 Н
$G_{ГЦ1}+G_{Ц1}$=120+80=200 Н
G_1=1180 Н
$G_{ГЦ2}+G_{Ц2}$=250+100=350 Н
$G_{ГЦ3}$=400 Н
G_2=1460 Н
$G_{Ц3}$=160 Н
$G_{ГЦ4}$=250 Н
G_3=2680 Н
$G_{ГЦ5}$=120 Н

Рисунок 3.4 – Розрахункова схема кореневої секції

Нормальні напруження при згині від дії навантаження в вертикальній площині:

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W_x} \le [\sigma_{зг}] \tag{3.36}$$

де $[\sigma_{зг}] = 260$ МПа – допустиме напруження згину для сталі 09Г2С,

$W_x = 3{,}83 \cdot 10^{-4}$ м^3 – момент опору перерізу,

$$\sigma = \frac{52843}{3{,}83 \cdot 10^{-4}} = 137{,}97 МПа \le [\sigma_{зг}]$$

Дотичні напруження в опорному перерізі:

$$\tau_1 = \frac{V_{12} \cdot S_x}{I_x \cdot 2 \cdot \delta_2} \tag{3.37}$$

де $S_x = 2{,}2 \cdot 10^{-4}$ м^3 – статичний момент площі перерізу,

$I_x = 54{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^4 – момент інерції перерізу,

$\delta_2 = 0{,}004$ м – товщина вертикальної стінки,

$$\tau_1 = \frac{39006 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-4}}{54{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 0{,}004} = 19{,}65\text{МПа}$$

Дотичні напруження в опорному перерізі від дії крутного моменту:

$$\tau_2 = \frac{M_к}{4 \cdot \delta_2 \cdot S} \tag{3.38}$$

де $S = 0{,}177 \cdot 0{,}285 = 0{,}05044$ м^2 – площа прямокутника, обмеженого осями, що проходять через середини стінок та поясів перерізу,

$$\tau_2 = \frac{1200}{4 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}05044} = 1{,}48\text{МПа}$$

Максимальні дотичні напруження:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leq [\tau_{кр}] \tag{3.39}$$

$$\tau = 19{,}65 + 1{,}48 = 21{,}13\text{МПа} \leq [\tau_{кр}] = 180\text{МПа}$$

3.6.Розрахунок зварних з'єднань

З'єднання поясів балок із стінкою виконується за допомогою кутових швів. Зварні поясні кутові шви розраховуємо на зріз [8]:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{2 \cdot \beta \cdot K \cdot I_x} \leq [\tau_{зв}] \tag{3.40}$$

де Q – максимальна перерізуючи сила в перерізі, Н

S_x – статичний момент поясу відносно нейтральної вісі, м^3

β – коефіцієнт, який враховує тип зварювання,

β = 1 – для автоматичного зварювання,

β = 0,8 – для напівавтоматичного зварювання,

β = 0,7 – для ручного дугового зварювання,

К – катет зварювального шва, м

I_x – момент інерції перерізу, м^4

$[\tau_{зв}]$ – допустимі напруження в зварному з'єднанні [9], МПа

$$[\tau_{зв}]=0,6\cdot[\sigma_р] = 0,6\cdot 250 = 150 \text{ МПа} \quad (3.41)$$

де $[\sigma_р]$ – допустимі напруження розтягу, МПа

Для головної секції:

$$\tau = \frac{4780 \cdot 0,62 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,003 \cdot 10,1 \cdot 10^{-6}} = 6,1\text{МПа} \leq [\tau_{зв}]$$

Для середньої секції:

$$\tau = \frac{6800 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,003 \cdot 21,8 \cdot 10^{-6}} = 7,1\text{МПа} \leq [\tau_{зв}]$$

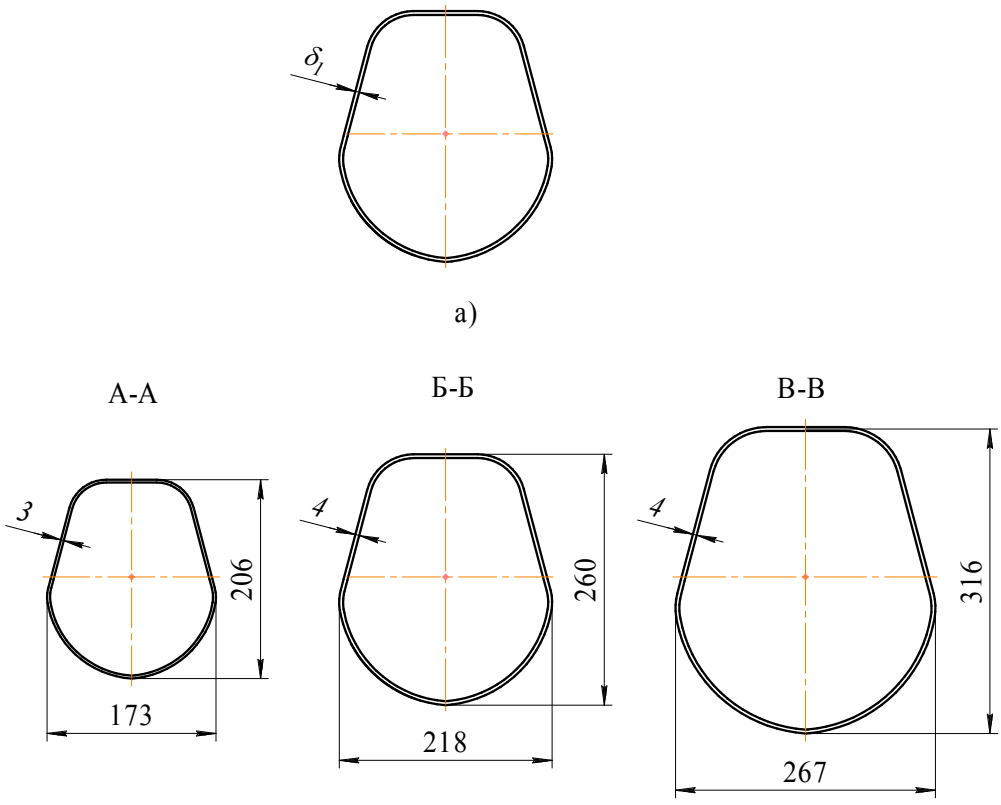
Для кореневої секції:

$$\tau = \frac{39006 \cdot 2,2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,004 \cdot 54,6 \cdot 10^{-6}} = 24,5\text{МПа} \leq [\tau_{зв}]$$

3.7. Визначення напружень в розрахункових перерізах методом опору матеріалів у овоїдному перетині

Визначення геометричних характеристик перерізів секцій.

На відміну від простих перетинів, таких як прямокутник, коло, чи фігура, що складається з набору прямокутників овоїдний перетин не має аналітичної формули для розрахунку таких геометричних характеристик перетину, як моменти інерції. В таких випадках покладаються на комп’ютерні алгоритми розрахунку цієї характеристики, наприклад така функція є у Solidworks.



а) розрахункова схема;

б) головна секція;

в) середня секція;

г) коренева секція

Рисунок 3.5 - Схеми поперечних перерізів

Тож ось визначені таким чином моменти інерції осі X-X:

- Для головної секції: $I_x = 0{,}00000932$ м^4 або $9{,}32 \cdot 10^{-6}$ м^4
- Для середньої секції: $I_x = 0{,}0000248$ м^4 або $24{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^4 ;
- Для кореневої секції: $I_x = 0{,}0000457$ м^4 або $45{,}7 \cdot 10^{-6}$ м^4 .

Моменти опору для перерізів відносно осі X-X:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}} \tag{3.42}$$

де y_{max} – це відстань від центру мас, до найвіддаленішої точки у вертикальній площині. Центр мас встановлює також згадана раніше обчислювальна програма в складі пакету Solidworks. Оскільки y_{max} не застосовується в подальших розрахунках, то буде приведено вже розрахований момент опору.

- Для головної секції: Wx = 0,8834□10^{-4} м^3 або 88,34 см^3;
- Для середньої секції: Wx = 1,8646□10^{-4} м^3 або 186,46 см^3;
- Для кореневої секції: Wx = 2,9948□10^{-4} м^3 або 299,48 см^3;

Розрахунок секцій.

Рівняння рівноваги головної секції залишається таким самим як і для прямокутного перетину, оскільки всі координати закріплень люльки, гідроциліндру, тощо залишаються на попередніх місцях. Тому момент заливається таким самим 14615, 29170, 52843 Н□м для головної, середньої та кореневої секції відповідно.

Крутний момент від скручування стріли при ексцентричному навантаженні також залишається 1200 Н□м

Нормальні напруження при згині від дії навантаження в вертикальній площині розраховуються за формулою 3.13 зі підставленням розрахованого моменту опору перетину для овоїдного профіля:

Головна секція:

$$\sigma = \frac{14615}{0{,}8834 \cdot 10^{-4}} = 165{,}84\text{МПа} \leq [\sigma_{зг}]$$

Середня секція:

$$\sigma = \frac{29170}{1{,}8646 \cdot 10^{-4}} = 156{,}44\text{МПа} \leq [\sigma_{зг}]$$

Коренева секція:

$$\sigma = \frac{52843}{2{,}9948 \cdot 10^{-4}} = 176{,}44\text{МПа} \leq [\sigma_{зг}]$$

Дотичні напруження в опорному перерізі можна розрахувати за формулою:

$$\tau_1 = \frac{V_5}{F} \qquad (3.43)$$

де **F –** площа перетину, 0,0018; 0,003024; 0,003704 м^4, для головної, середньої та кореневої секції відповідно.

Отже:

Головна секція:

$$\tau_1 = \frac{4780}{0{,}0018} = 2{,}65\ \text{МПа}$$

Середня секція:

$$\tau_1 = \frac{6800}{0{,}003024} = 2{,}1 \text{ МПа}$$

Коренева секція:

$$\tau_1 = \frac{39006}{0{,}003704} = 10{,}5 \text{ МПа}$$

Дотичні напруження в опорному перерізі від дії крутного моменту:

$$\tau_2 = \frac{M_к}{W_{кр}} \quad (3.44)$$

де $\mathbf{M_к}$ – Момент кручення

$\mathbf{W_{кр}}$ – момент опору при крученні, розраховується за формулою:

$$W_{кр} = 2 \cdot F_{ср\ лін} \cdot \delta \quad (3.45)$$

де $\mathbf{F_{ср\ лін}}$ – площа фігури, що обмежена середньою лінією контуру тонкостінного перетину, 0,027328; 0,043386; 0,065092 м^2, для головної, середньої та кореневої секції відповідно.

Головна секція:

$$W_{кр} = 2 \cdot 0{,}027328 \cdot 0{,}003 = 0{,}000163968 \text{ м}^3$$

Середня секція:

$$W_{кр} = 2 \cdot 0{,}043386 \cdot 0{,}004 = 0{,}000347088 \text{ м}^3$$

Коренева секція:

$$W_{кр} = 2 \cdot 0{,}065092 \cdot 0{,}004 = 0{,}000520736 \text{ м}^3$$

Отже:

Головна секція:

$$\tau_2 = \frac{1200}{0{,}000163968} = 7{,}3 \text{ МПа}$$

Середня секція:

$$\tau_2 = \frac{1200}{0{,}000347088} = 3{,}46 \text{ МПа}$$

Коренева секція:

$$\tau_2 = \frac{1200}{0{,}000520736} = 2{,}3 \text{ МПа}$$

Максимальні дотичні напруження:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leq [\tau_{кр}]$$

Головна секція:

$$\tau = 2{,}65 + 7{,}3 = 9{,}95 \text{ МПа} \leq [\tau_{кр}] = 180\text{МПа}$$

Середня секція:

$$\tau = 2{,}1 + 3{,}46 = 5{,}56 \text{ МПа} \leq [\tau_{кр}] = 180\text{МПа}$$

Коренева секція:

$$\tau = 10{,}5 + 2{,}3 = 12{,}8 \text{ МПа} \leq [\tau_{кр}] = 180\text{МПа}$$

Розрахунок зварних з'єднань.

З'єднання двох частин овоїдного перетину виконується за допомогою шва, що завдяки особливості конструкції розташовується на нейтральній лінії, також зварний шов – стиковий. Саме тому на шов не діють перерізуючи напруження які можна розрахувати аналітично.

3.8.Результати розрахунку

Результати проведених розрахунків напружень зводимо в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків прямокутний та овоїдний

Секція (точка)	Напруження, **МПа**						напруження в зварному з'єднанні	
	нормальні			дотичні				
	дійсні **σ** (прямокутний /овоїдний)		допустимі **[σ$_{зг}$]**	дійсні **τ** (прямокутний /овоїдний)		допустимі **[τ]**	дійсні **τ**	допустимі **[τ$_{зв}$]**
Головна (т. 5)	139,16	165,8	260	9,56	9,95	180	6,1	150
Середня (т. 9)	158,53	156,4		6,52	5,56		7,1	
Коренева (т. 12)	137,97	176,4		21,13	12,8		24,5	

3.9.Фактичні коефіцієнти запасу

Як видно з результатів розрахунку дійсні напруження не перевищують допустимі.

Проте, лише не перебільшення напруг допустимих значень недостатньо, для такої відповідальної сфери як вантажопідйомне обладнання існують свої, додаткові, коефіцієнти запасу мірності. Стосовно стріли крану, що розраховується, це буде коефіцієнт запасу міцності для металоконструкції кранів. Згідно [13, с13] [ή] становить 1,4 (для розрахункової комбінації з

максимальними робочими і максимальними динамічними навантаженнями та граничних вітрових сил робочого стану крана). Це величина запасу, з якою слід порівняти отримані отриманий фактичний запас.

Дотичні напруження, як видно з таблиці, не наближаються до граничних, а нормальні навпаки – досить великі, тому для їх розрахунку та порівняння слід скористатися формулою:

$$\eta_{факт} = \frac{[\sigma_{зг}]}{\sigma} \geq [\eta] \tag{3.46}$$

Отже для прямокутного перетину:

Головна секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{158{,}53} = 1{,}64 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Середня секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{139{,}16} = 1{,}86 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Коренева секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{137{,}97} = 1{,}88 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Та для овоїдного перетину:

Головна секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{165{,}8} = 1{,}56 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Середня секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{156{,}4} = 1{,}66 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Коренева секція:

$$\eta_{факт} = \frac{260}{176{,}4} = 1{,}47 \geq [\eta] = 1{,}4$$

Отже, результати розрахунку стріл з прямокутним перетином свідчать про те, що реальна металоконструкція спроектована з достатнім коефіцієнтом запасу міцності. Дійсні напруження в металоконструкції не перевищують допустимих з різницею для всіх секцій на 65-90%. А якщо дивитися по запасу міцності для

металоконструкцій крана то для більших згинальних напружень запас становить 17-34%. Такий запас свідчить про раціональне використання матеріалу

Також був розрахований сучасний овоїдний перетин. Як видно з таблиць нормальні напруження не сильно збільшились (збільшення пов’язане зі зменшенням Wx відносно прямокутного перетину) проте зменшились дотичні напруження. Фактичні коефіцієнти запасу міцності перебільшують коефіцієнт для металоконструкцій крану, перебільшення до 18%.

Слід зазначити, що результати розрахунку можливо навіть поліпшити оскільки в розрахунку не було враховано певне зменшення маси. Мова йде про те, що для такого перерізу відсутня необхідність в ребрах жорсткості, що перешкоджають короблению або здвоюванню поперечного перерізу в межах зони основного тиску та використовується гідроциліндр з одним штоком а не двома.

Овоїдний профіль розраховувався в більш тонкому виконанні товщини контуру перетину ніж як для прямокутного перетину, кажучи про саму важку, кореневу секцію. Так як завдяки підвищенню стійкості нижнього поясу до поздовжнього стиснення профіль не має підсилювальних платин чи просто потовщень поясу, як це є з прямокутним з даного розрахунку.

РОЗДІЛ 4
РОЗРАХУНОК МІСЦЕВИХ НАПРУЖЕНЬ НА ДІЛЯНКАХ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ ОПОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

4.1.Загальні положення

Проведені далі розрахунки поширюються на телескопічні стріли з прямокутною або трапецієподібною конфігурацією перерізу при співвідношенні розмірів (по ширині) меншої полиці до більшої не менш 0,65 при використанні в стрілах наступних опорних елементів: ролики, ролики на балансирах, сковзуни [3].

Оцінка несучої здатності (міцності) проводяться по двох найбільш напружених точках перерізу, розташованим на ділянці передачі навантаження від опорного елемента на секцію стріли. Одна точка розташована на поличці (точка «П»), друга - на стінці (точка «С»).

Методика не передбачає визначення напруженого стану в точках «П» і «С», викликаних зовнішнім навантаженням, прикладеним до стріли. Передбачається, що ці напруження до моменту розрахунку визначені по відомих залежностях при розрахунку стріли як стиснуто-зігнутого стрижня при наявності крутного моменту, але без врахування місцевих напружень від навантажень опорних елементів у секціях.

Напружений стан (від навантажень опорних елементів) у точках «П» і «С» розраховується методом кінцевих елементів (МКЕ) на ЕОМ за допомогою кінцево-елементної програми "SolidWorks", теоретичний зміст якої відображають наведені нижче формули.

Розрахунок напруженого стану методом кінцевих елементів дає найбільш точні результати. Тензометричні випробування цілком підтверджують якісну картину розподілу напружено-деформованого стану. Кількісна розбіжність експериментальних даних з розрахунковими при використанні рекомендацій, викладених у методиці не перевищує 15%. Ця розбіжність обґрунтовується, в основному, точністю одержання експериментальних даних при тензометруванні.

Для розрахунку МКЕ була використана кінцево-елементна модель (рисунок 4.2), що представляє собою ¼ частину розрахункового відсіку (на рисунку 4.1 він обведений особливо). Використання цієї умови симетрії було викликане необхідністю зменшенню як часу розрахунку, так і для формування щільної сітки розбиття конструкції на кінцеві елементи (КЕ), що забезпечує найбільш достовірні результати розрахунків [3]. Вибирається загальна система координат *X, Y, Z*, виконується розбивка моделі на КЕ, нумерація вузлів та елементів. Апроксимація здійснюється плоскими КЕ (прямокутними та трикутними) оболонки з 6 ступенями волі кожного вузла. Розбиття моделі на КЕ виконувалось згідно рекомендацій:

- мінімальний розмір КЕ в плані в зонах найбільшої завантаженості повинен бути не менше трьох його товщин ($4{,}5\cdot\delta_п \le a \le 3{,}0\cdot\delta_п$). Отримана сітка зображенна на рисунку 4.3;
- в зонах найбільшої завантаженості форма сітка повинна ущільнюватися для забезпечення точності розрахунків як це зображено на рисунку 4.4;
- в зонах з низьким рівнем напружень елементи можуть бути прямокутними або трикутними;
- розміри найбільш завантаженої ділянки поясу з рівномірною сіткою розбиття на КЕ назначаються в залежності від типу опорних елементів та ексцентриситету встановлення відносно вертикальної стінки;
- розміри КЕ в завантаженому поясі та вертикальній стінці (в місті їх безпосереднього примикання) повинні бути однаковими.

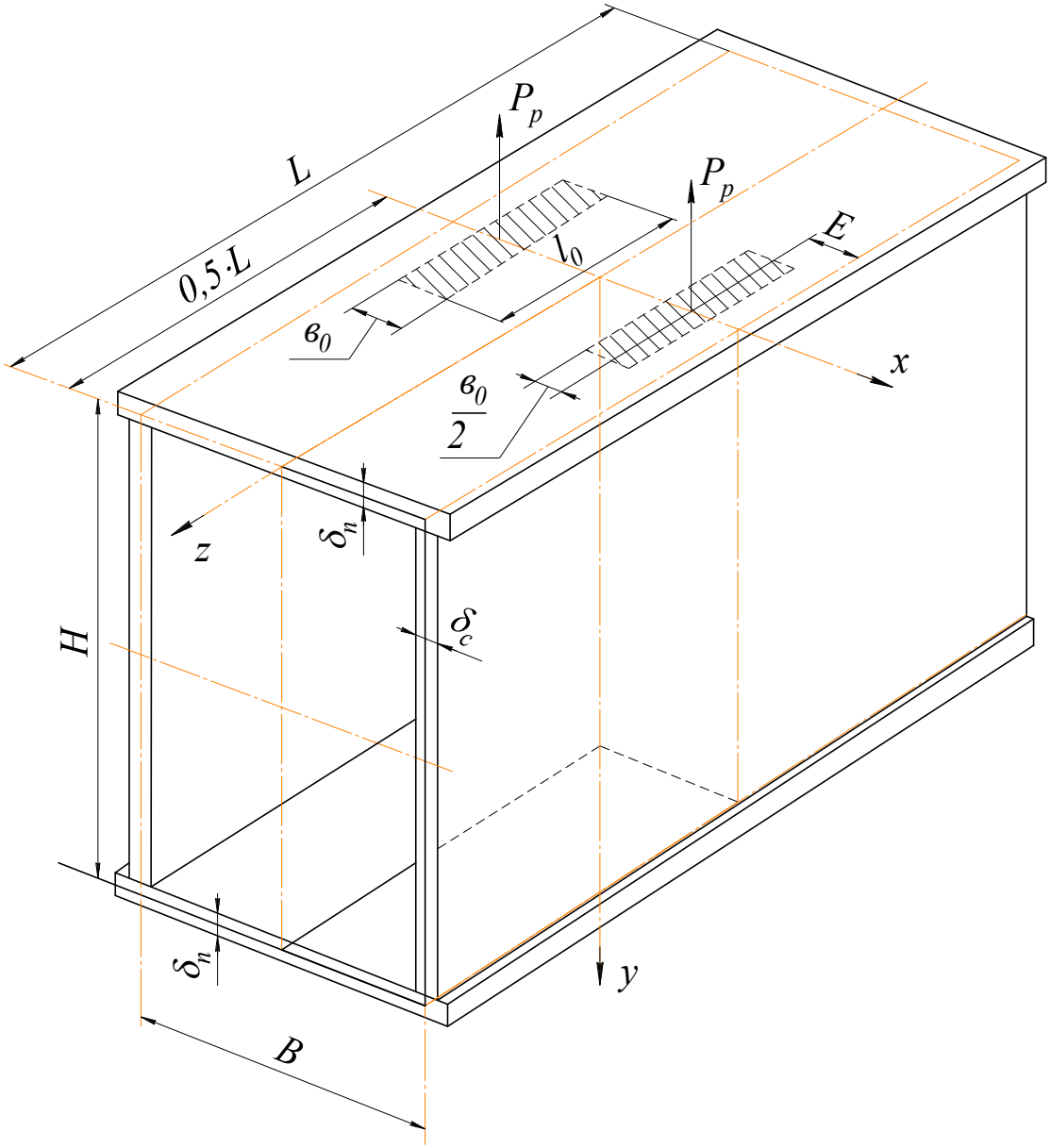


Рисунок 4.1 – Схема розрахункового відсіку

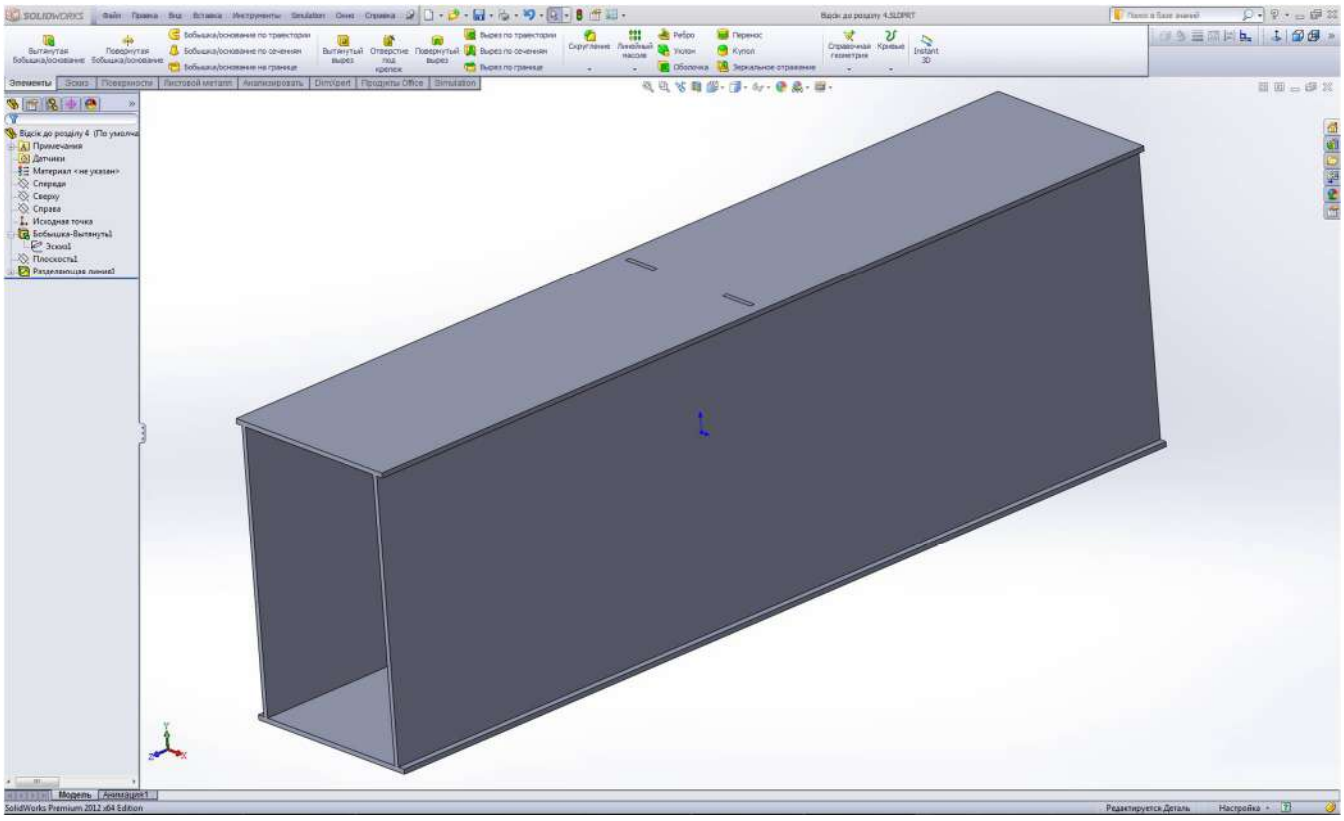


Рисунок 4.2 – Модель відсіку

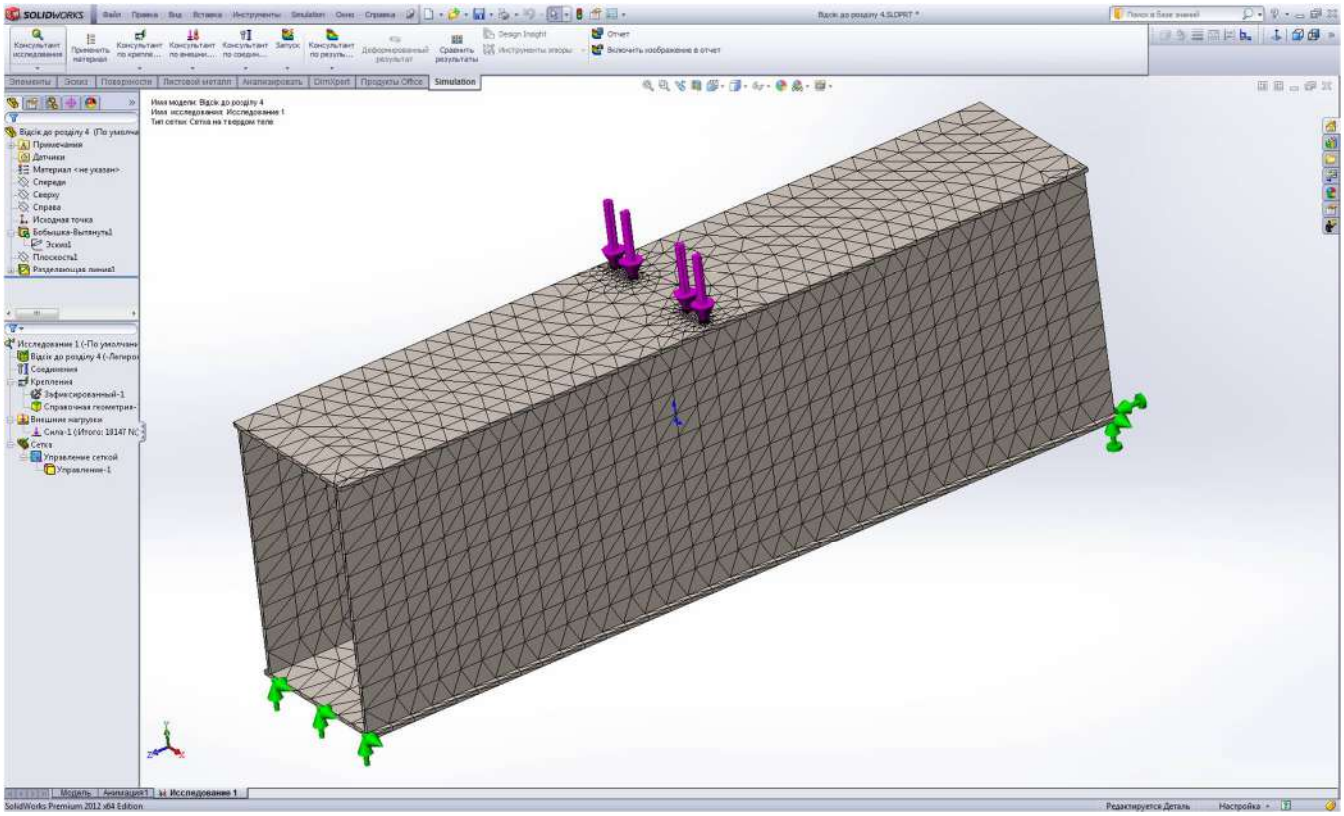


Рисунок 4.3 – Сітка

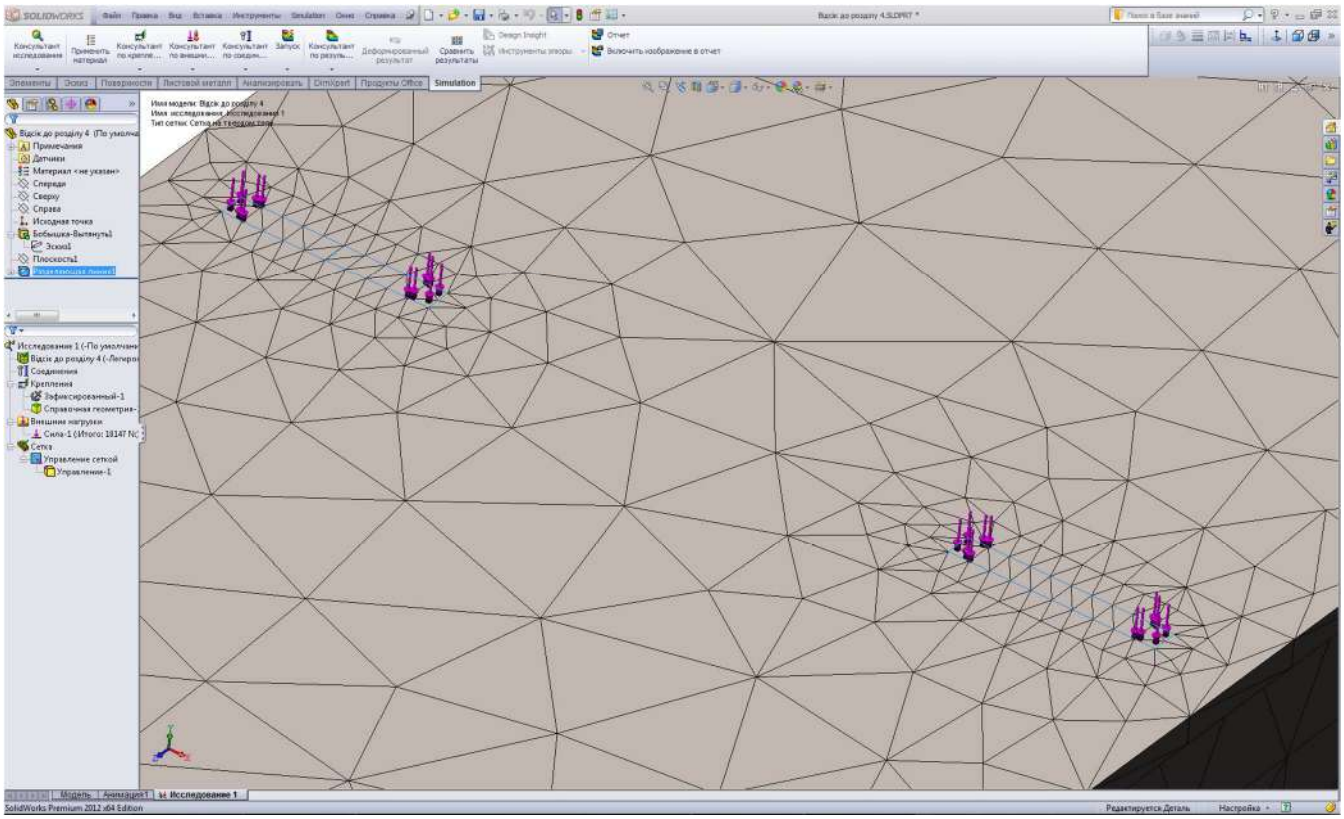


Рисунок 4.4 – Згущення сітки для точності

В'язі та опорні закріплення формуються у відповідністю з обраною системою координат до вузлів. Навантаження $\mathbf{P_p}$ від роликів прикладаються у відповідних вузлах в залежності від варіанту навантаження (ззовні або зсередини контуру поперечного перерізу секції стріли) із врахуванням того, що на за умов симетрії на вузол приходиться ¼ розрахункового навантаження $\mathbf{P_p}$ від опорного елементу. Рисунок 4.5 демонструє схему в'язів.

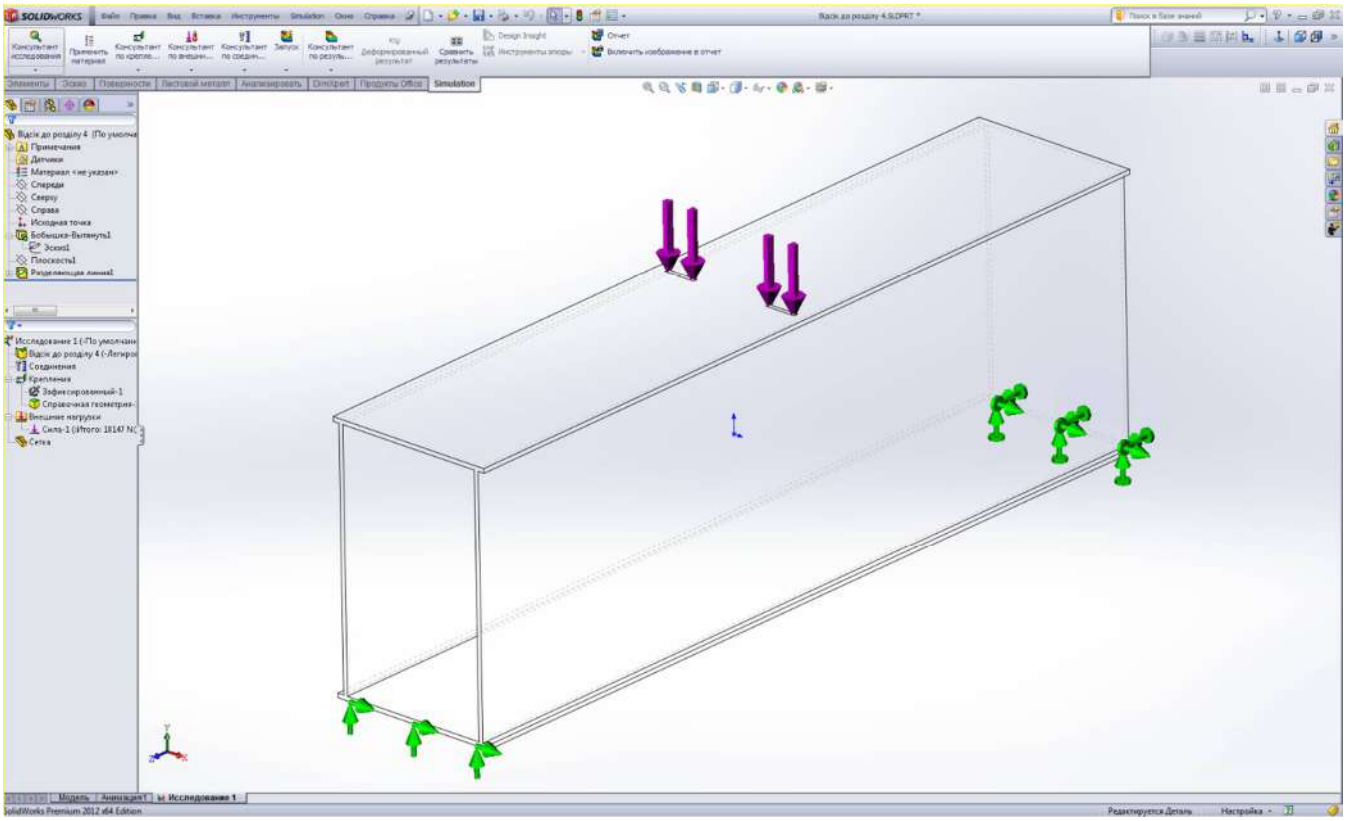


Рисунок 4.5 – Схема в'язів

Результатом розрахунку є наступні параметри напружено-деформованого стану:

- переміщення вузлів. Рисунок 4.6 до прикладу;
- мембранні нормальні та дотичні напруження в центрах ваги КЕ;
- внутрішні силові фактори, прикладені в центрах ваги КЕ (інтенсивності згинальних в двох площинах моментів, перерізуючи сил).

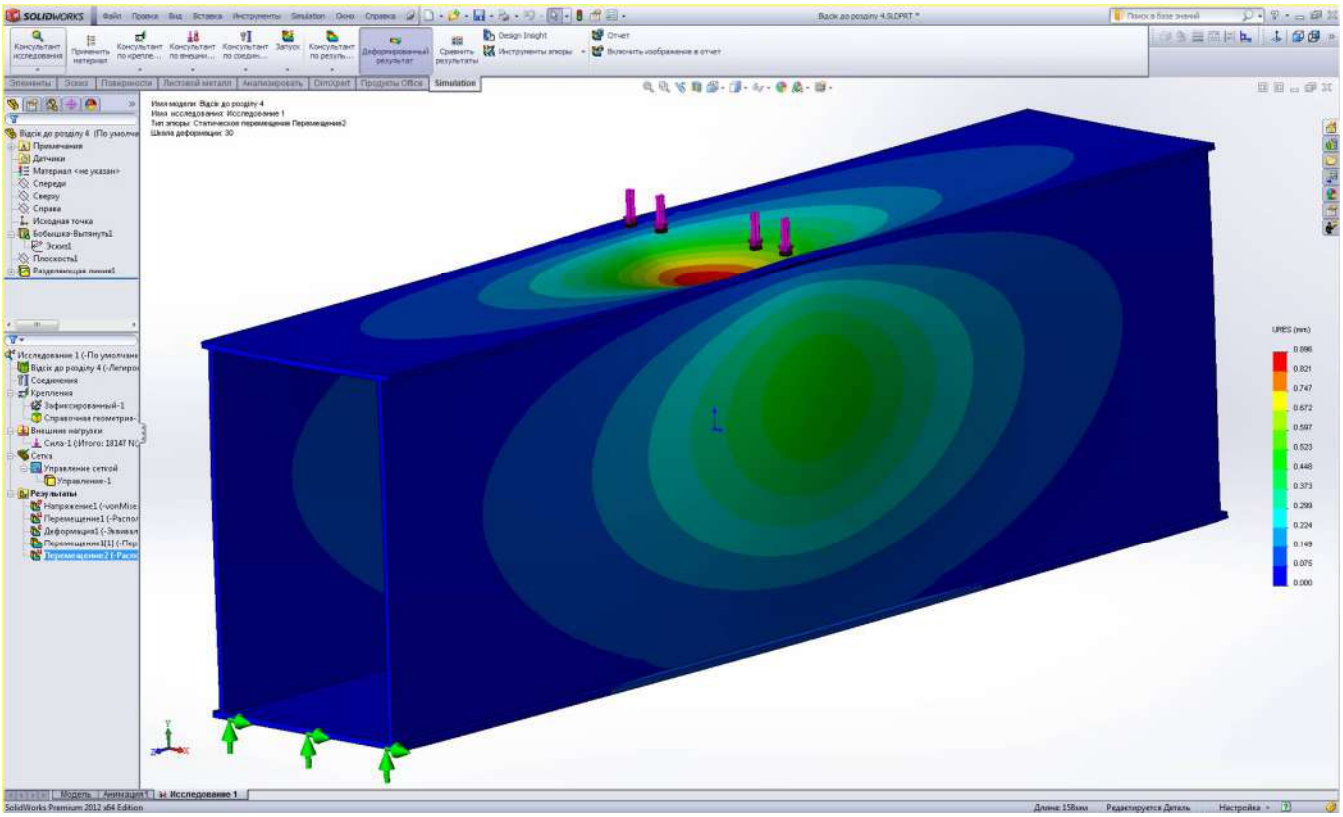


Рисунок 4.6 – Переміщення вузлів

Розрахунок напруженого стану в найбільш навантажених точках «П» і «С» по приведеним залежностям забезпечує достатню точність, похибка не перевищує 9% у порівнянні з розрахунком по методу кінцевих елементів. Розрахункові залежності отримані на підставі теоретичних викладень і результатів досліджень місцевої завантаженості секцій стріл, проведених методом кінцевих елементів. Обчислення напруженого стану по розрахункових залежностях не вимагає обов'язкового застосування ЕОМ.

За критерій несучої здатності (міцності) прийняте утворення місцевого пластичного шарніра в полках або стінках при їхньому вигині з площини. При цьому передбачається, що пружно-пластична деформація локальної ділянки не робить впливу на працездатність стріли.

Кількісно критерій утворення місцевого пластичного шарніра виражається через розрахунковий опір $\mathbf{R_м}$, рівний $\mathbf{1{,}5 \cdot \sigma_{0,2}}$ (або $\mathbf{1{,}5 \cdot \sigma_т}$), де $\mathbf{\sigma_{0,2}}$ - границя текучості матеріалу при залишковому подовженні 0,2%.

Розрахунок напруженого стану в точках «П» і «С» при наявності місцевої пластичної деформації, з метою спрощення методики розрахунку, виконуємо по формулах пружної деформації.

4.2.Розрахункова схема стріли

На рис. 4.7 приведена схема підвіски телескопічної стріли у вертикальній площині з указівкою розрахункових перерізів *А-А, Б-Б, В-В, Г-Г*, в яких виконується перевірка міцності при цілком висунутій стрілі. Навантаження від крутного моменту не враховуємо.

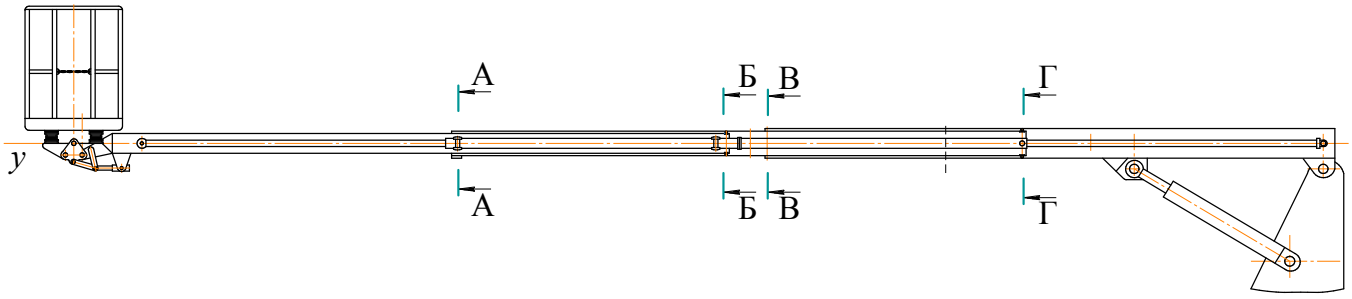


Рисунок 4.7 – Схема телескопічної стріли

4.3.Розрахунок перерізів А-А, Б-Б

Реакції $\mathbf{R_i}$ опорних вузлів секцій у розрахункових перерізах визначаються від дії зовнішніх навантажень із загального розрахунку стріли (рис. 4.8).

Рівняння рівноваги:

$$Q \cdot 6{,}45 + (G_Л + G_П) \cdot 6{,}15 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 5{,}58 + G_1 \cdot 3{,}36 + \\ +(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 2{,}565 + G_{ГЦ3} \cdot 0{,}1 - R_2 \cdot 2{,}565 = 0 \quad (4.1)$$

$$R_2 = \frac{1}{2{,}565} \cdot \begin{pmatrix} Q \cdot 6{,}45 + (G_Л + G_П) \cdot 6{,}15 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 5{,}58 + G_1 \cdot 3{,}36 + \\ +(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 2{,}565 + G_{ГЦ3} \cdot 0{,}1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

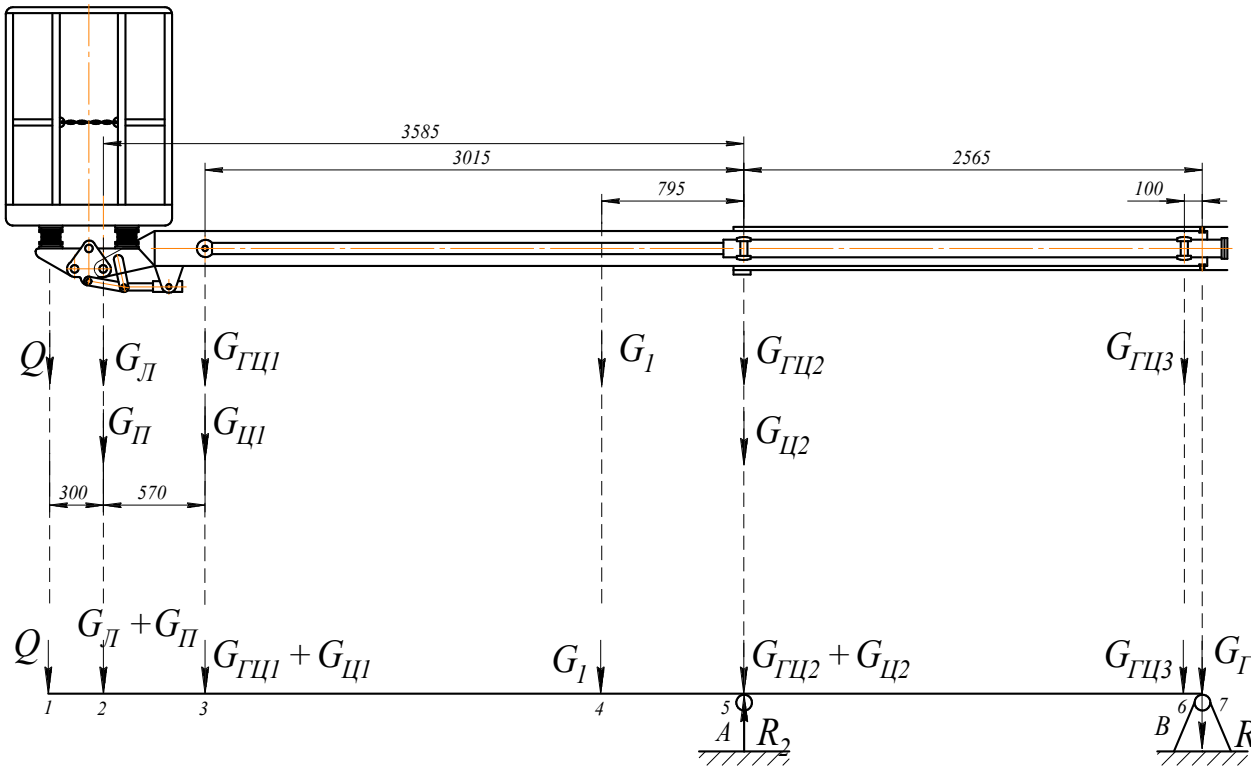
$$R_2 = \frac{1}{2{,}565} \cdot \begin{pmatrix} 2000 \cdot 6{,}45 + (500 + 550) \cdot 6{,}15 + (120 + 80) \cdot 5{,}58 + \\ +1180 \cdot 3{,}36 + (250 + 100) \cdot 2{,}565 + 400 \cdot 0{,}1 \end{pmatrix} = 9893Н$$

$$\sum P_x = 0$$

$$R_2 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - G_{ГЦ3} - R_1 = 0 \quad (4.3)$$

$$R_1 = R_2 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - G_{ГЦ3} = 0 \quad (4.4)$$

$$R_1 = 9893 - 2000 - (500 + 550) - (120 + 80) - 1180 - (250 + 100) - 400 = 4713Н$$



Q=2000 Н

$G_{Л}+G_{П}$=500+550=1050 Н

$G_{ГЦ1}+G_{Ц1}$=120+80=200 Н

G_1=1180 Н

$G_{ГЦ2}+G_{Ц2}$=250+100=350 Н

$G_{ГЦ3}$=400 Н

G_2=1460 Н

$G_{Ц3}$=160 Н

Рисунок 4.8 – Розрахункова схема головної (середньої) секції стріли

Розрахункове навантаження одного опорного ролика $\boldsymbol{P_P}$ визначається без урахування крутного моменту, що діє на стрілу:

$$P_P = c \cdot \frac{R_i}{2} \qquad (4.5)$$

де $c = 1$ – для опорних вузлів типу роликів.

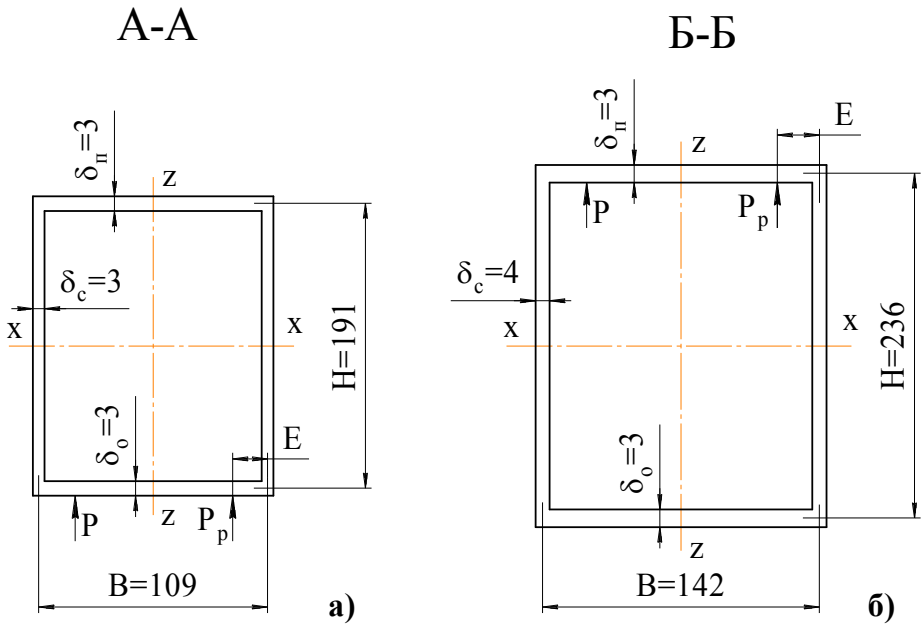
R_i - реакція опорного вузла секції від навантажень, що діють у площині підвісу стріли;

$$P_{РА-А} = 1 \cdot \frac{9893}{2} = 4946{,}5Н$$

$$P_{РБ-Б} = 1 \cdot \frac{4713}{2} = 2356{,}5Н$$

Розрахункові ексцентриситети **E** навантаження опорних елементів залежать від їх типу, ширини та ексцентриситету $\mathbf{E_o}$ установки щодо бічних стінок секцій.

Величина розрахункового ексцентриситету **E** місцевого навантаження менше ексцентриситету $\mathbf{E_o}$ внаслідок нерівномірного розподілу тиску по ширині опорного елемента. На рис. 4.10 приведені епюри розподілу навантаження по ширині опорного елемента типу ролика, характерні для випадків дії сил **P** ззовні і зсередини контуру поперечного переріза. На рис 4.11 зображено функція побудови графіку для зручної побудови епюр для рисунка 4.10



а) при навантаженні ззовні перерізу,

б) при навантаженні зсередини перерізу

Рисунок 4.9 – Розрахункові перерізи стріли

Наближені значення розрахункових ексцентриситетів навантаження для роликів:

$$E = E_O - \frac{в_o}{2} + \Delta + 0{,}1 \cdot в_o \cdot \sum_{i=1}^{10}(i - 0{,}5) \cdot P_i \qquad (4.6)$$

де E_o =12 мм - ексцентриситет установки ролика (відстань від серединної площини бічної стінки до серединної площини ролика),

$в_o$= 30 мм - ширина ролика,

i – номер індексу P_i – навантаження (i=1, 2, ..., 10)

P_i - i-та ордината епюри розподілу навантаження (у частках від одиниці), (табл. 4.1)

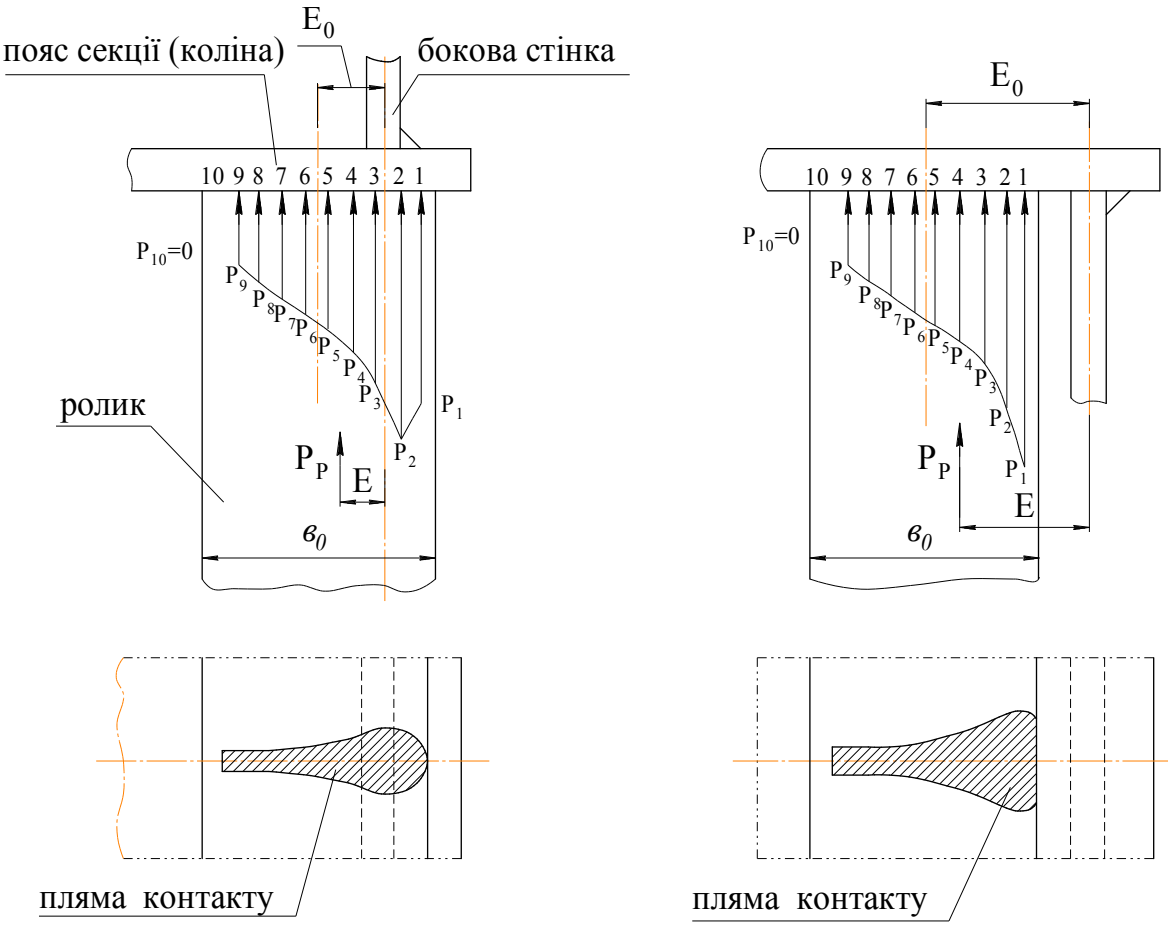
Δ= 1 мм - величина бічного люфту внутрішньої секції щодо зовнішньої (приймається орієнтовно).

Для перерізу *А-А* (навантаження ззовні):

$$E_{А-А} = 12 - \frac{30}{2} + 1 + 0{,}1 \cdot 30 \cdot \sum_{i=1}^{10} \begin{bmatrix} (1-0{,}5)\cdot 0{,}242 + (2-0{,}5)\cdot 0{,}165 + \\ +(3-0{,}5)\cdot 0{,}136 + (4-0{,}5)\cdot 0{,}114 + \\ +(5-0{,}5)\cdot 0{,}094 + (6-0{,}5)\cdot 0{,}076 + \\ +(7-0{,}5)\cdot 0{,}061 + (8-0{,}5)\cdot 0{,}057 + \\ +(9-0{,}5)\cdot 0{,}055 + (10-0{,}5)\cdot 0 \end{bmatrix} = 7{,}72\text{мм}$$

Для перерізу *Б-Б* (навантаження зсередини):

$$E_{Б-Б} = 12 - \frac{30}{2} + 1 + 0{,}1 \cdot 30 \cdot \sum_{i=1}^{10} \begin{bmatrix} (1-0{,}5)\cdot 0{,}31 + (2-0{,}5)\cdot 0{,}19 + \\ +(3-0{,}5)\cdot 0{,}12 + (4-0{,}5)\cdot 0{,}086 + \\ +(5-0{,}5)\cdot 0{,}077 + (6-0{,}5)\cdot 0{,}061 + \\ +(7-0{,}5)\cdot 0{,}055 + (8-0{,}5)\cdot 0{,}051 + \\ +(9-0{,}5)\cdot 0{,}005 + (10-0{,}5)\cdot 0 \end{bmatrix} = 5{,}52\text{мм}$$



а) при навантаженні ззовні контуру;

б) при навантаженні зсередини контуру

Рисунок 4.10 – Розподіл навантаження по ширині ролика

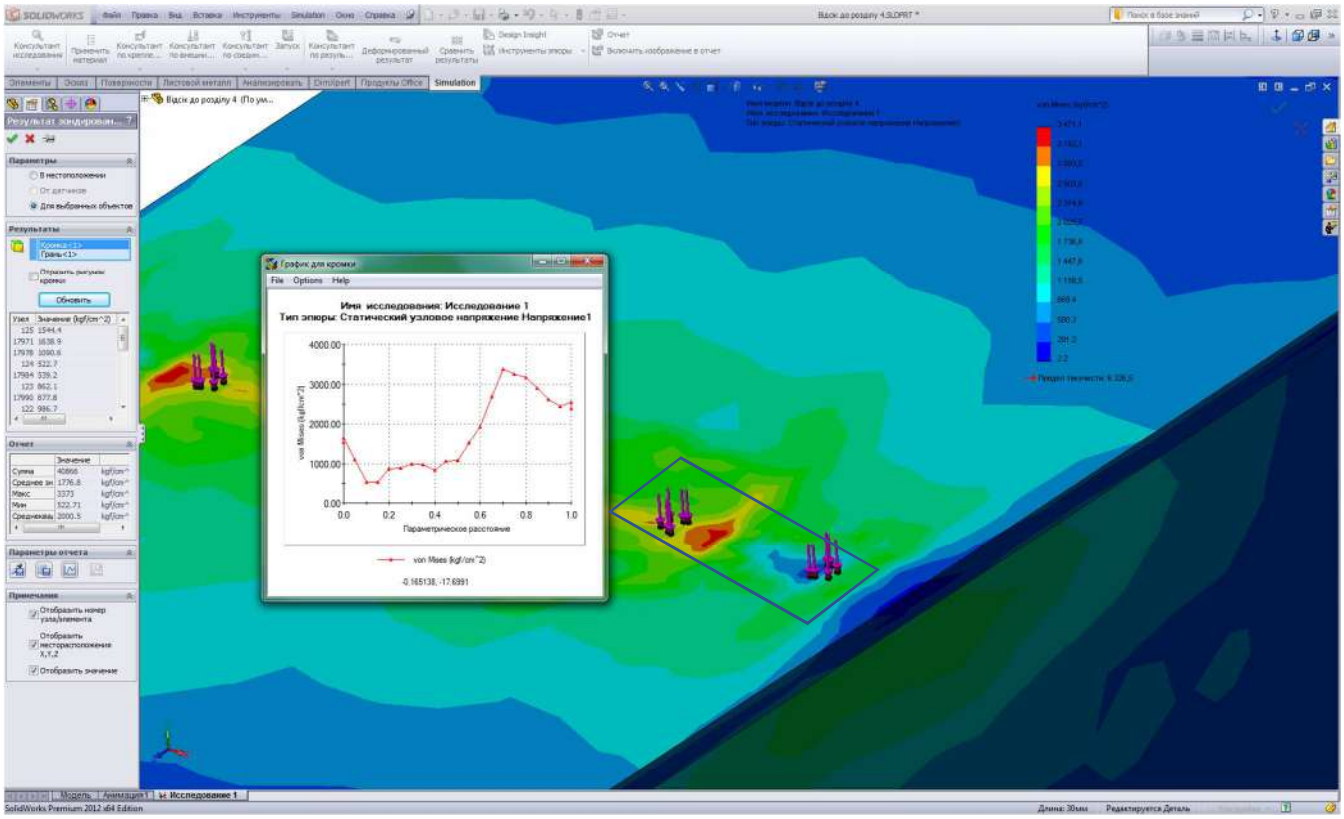


Рисунок 4.11 – Функція побудови графіка для визначення навантаження по ширині ролика

Таблиця 4.1 – Дані для визначення розрахункового ексцентриситету навантаження роликами.

P_i	Відносні значення ексцентриситету установки роликів E_o/B (B – ширина перерізу секції стріли)						
	0,015	0,041	0,066	0,092	0,117	0,143	0,189
P_1	0	0,16	0,25	0,31	0,242	0,28	0,25
P_2	0,14	0,2	0,2	0,19	0,165	0,16	0,17
P_3	0,26	0,15	0,155	0,12	0,136	0,12	0,13
P_4	0,33	0,12	0,125	0,086	0,114	0,1	0,114
P_5	0,22	0,095	0,109	0,077	0,094	0,09	0,095
P_6	0,05	0,08	0,084	0,061	0,076	0,078	0,075
P_7	0	0,07	0,072	0,055	0,061	0,065	0,059
P_8	0	0,065	0	0,051	0,057	0,055	0,05
P_9	0	0,06	0	0,05	0,055	0,051	0,057

0,117 (0,11)	- для перерізу А-А – навантаження ззовні (рис. 4.10)
0,092 (0,08)	- для перерізу Б-Б - навантаження зсередини (рис. 4.10)

4.4.Розрахунок перерізів в-В, Г-Г

Реакції R_i опорних вузлів секцій у розрахункових перерізах визначаються від дії зовнішніх навантажень із загального розрахунку стріли (рис. 4.12).

Рівняння рівноваги:

$$\sum M_B = 0$$

$$Q \cdot 9{,}275 + (G_Л + G_П) \cdot 8{,}975 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 8{,}405 + G_1 \cdot 6{,}185 +$$

$$+(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 5{,}39 + G_{ГЦ3} \cdot 2{,}925 + G_2 \cdot 2{,}595 + G_{Ц3} \cdot 2{,}435 - R_2 \cdot 2{,}435 = 0 \quad (4.7)$$

$$R_2 = \frac{1}{2{,}435} \cdot \begin{pmatrix} Q \cdot 9{,}275 + (G_Л + G_П) \cdot 8{,}975 + (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) \cdot 8{,}405 + G_1 \cdot 6{,}185 + \\ +(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) \cdot 5{,}39 + G_{ГЦ3} \cdot 2{,}925 + G_2 \cdot 2{,}595 + G_{Ц3} \cdot 2{,}435 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$R_2 = \frac{1}{2{,}435} \cdot \begin{pmatrix} 2000 \cdot 9{,}275 + (500 + 550) \cdot 8{,}975 + (120 + 80) \cdot 8{,}405 + \\ +1180 \cdot 6{,}185 + (250 + 100) \cdot 5{,}39 + 400 \cdot 2{,}925 + \\ +1460 \cdot 2{,}595 + 160 \cdot 2{,}435 \end{pmatrix} = 18147\text{Н}$$

$$\sum P_x = 0$$

$$R_2 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 - (G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) -$$

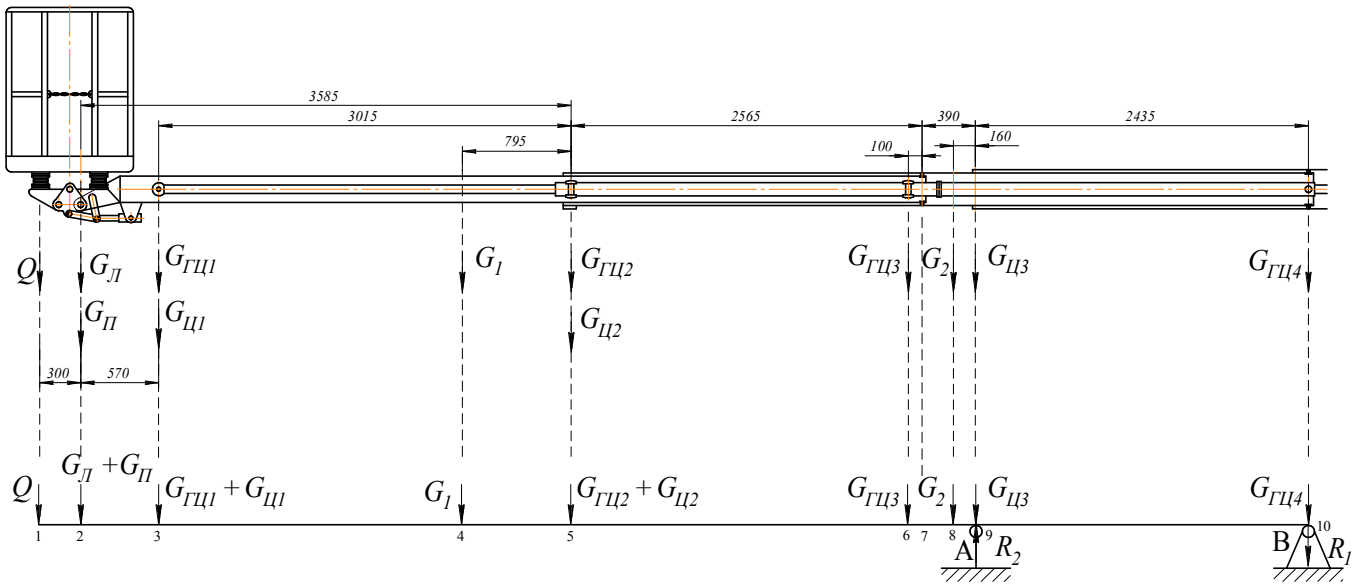
$$-G_{ГЦ3} - G_2 - G_{Ц3} - G_{ГЦ4} - R_1 = 0 \quad (4.9)$$

$$R_1 = R_2 - Q - (G_Л + G_П) - (G_{ГЦ1} + G_{Ц1}) - G_1 -$$

$$-(G_{ГЦ2} + G_{Ц2}) - G_{ГЦ3} - G_2 - G_{Ц3} - G_{ГЦ4} \quad (4.10)$$

$$R_1 = 18147 - 2000 - (500 + 550) - (120 + 80) - 1180 -$$

$$-(250 + 100) - 400 - 1460 - 160 - 250 = 11097\text{Н}$$



Q=2000 Н
$G_Л$+$G_П$=500+550=1050 Н
$G_{ГЦ1}$+$G_{Ц1}$=120+80=200 Н
G_1=1180 Н
$G_{ГЦ2}$+$G_{Ц2}$=250+100=350 Н
$G_{ГЦ3}$=400 Н
G_2=1460 Н
$G_{Ц3}$=160 Н
$G_{ГЦ4}$=250 Н

Рисунок 4.12 – Розрахункова схема середньої (кореневої) секції стріли

Розрахункове навантаження одного опорного ролика $P_Р$:

$$P_{РВ-В} = 1 \cdot \frac{18147}{2} = 9073{,}5Н$$

$$P_{РГ-Г} = 1 \cdot \frac{11097}{2} = 5548{,}5Н$$

Наближені значення розрахункових ексцентриситетів навантаження для роликів:

$$E = E_О - \frac{в_о}{2} + \Delta + 0{,}1 \cdot в_о \cdot \sum_{i=1}^{10}(i - 0{,}5) \cdot P_i \qquad (4.11)$$

де $E_о$ =18 мм - ексцентриситет установки ролика (відстань від серединної площини бічної стінки до серединної площини ролика),

$в_о$= 40 мм - ширина ролика,

i – номер індексу P_i – навантаження (i=1, 2, ..., 10)

P_i - i -та ордината епюри розподілу навантаження (у частках від одиниці), (табл. 4.1)

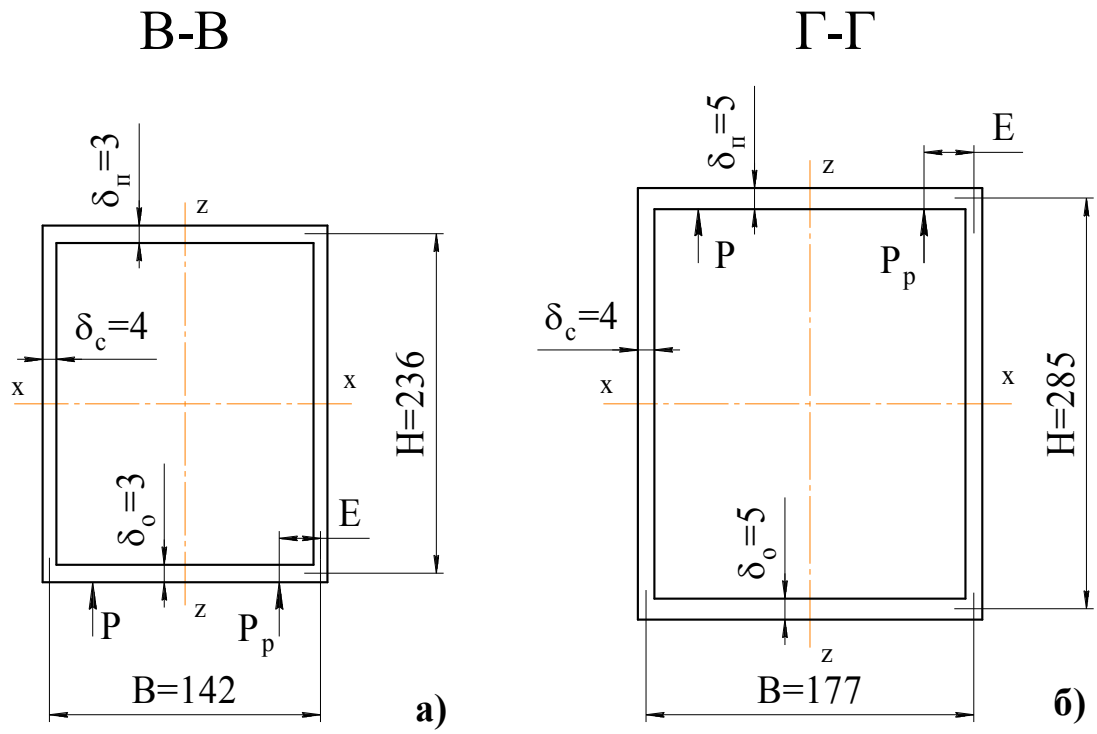
Δ= 1 мм - величина бічного люфту внутрішньої секції щодо зовнішньої.

Для перерізу В-В (навантаження ззовні):

$$E_{B-B} = 18 - \frac{40}{2} + 1 + 0{,}1 \cdot 40 \cdot \sum_{i=1}^{10} \begin{bmatrix} (1-0{,}5)\cdot 0{,}242 + (2-0{,}5)\cdot 0{,}165 + \\ +(3-0{,}5)\cdot 0{,}136 + (4-0{,}5)\cdot 0{,}114 + \\ +(5-0{,}5)\cdot 0{,}094 + (6-0{,}5)\cdot 0{,}076 + \\ +(7-0{,}5)\cdot 0{,}061 + (8-0{,}5)\cdot 0{,}057 + \\ +(9-0{,}5)\cdot 0{,}055 + (10-0{,}5)\cdot 0 \end{bmatrix} = 11{,}96\text{мм}$$

Для перерізу Г-Г (навантаження зсередини):

$$E_{Г-Г} = 18 - \frac{40}{2} + 1 + 0{,}1 \cdot 40 \cdot \sum_{i=1}^{10} \begin{bmatrix} (1-0{,}5)\cdot 0{,}31 + (2-0{,}5)\cdot 0{,}19 + \\ +(3-0{,}5)\cdot 0{,}12 + (4-0{,}5)\cdot 0{,}086 + \\ +(5-0{,}5)\cdot 0{,}077 + (6-0{,}5)\cdot 0{,}061 + \\ +(7-0{,}5)\cdot 0{,}055 + (8-0{,}5)\cdot 0{,}051 + \\ +(9-0{,}5)\cdot 0{,}005 + (10-0{,}5)\cdot 0 \end{bmatrix} = 9{,}02\text{мм}$$



а) при навантаженні ззовні перерізу,

б) при навантаженні зсередини перерізу

Рисунок 4.13 – Розрахункові перерізи стріли

Таблиця 4.2 – Дані для визначення розрахункового ексцентриситету навантаження роликами

P_i	Відносні значення ексцентриситету установки роликів E_o/B (B – ширина перерізу секції стріли)						
	0,015	0,041	0,066	0,092	0,117	0,143	0,189
P_1	0	0,16	0,25	0,31	0,242	0,28	0,25
P_2	0,14	0,2	0,2	0,19	0,165	0,16	0,17

P_3	0,26	0,15	0,155	0,12	0,136	0,12	0,13
P_4	0,33	0,12	0,125	0,086	0,114	0,1	0,114
P_5	0,22	0,095	0,109	0,077	0,094	0,09	0,095
P_6	0,05	0,08	0,084	0,061	0,076	0,078	0,075
P_7	0	0,07	0,072	0,055	0,061	0,065	0,059
P_8	0	0,065	0	0,051	0,057	0,055	0,05
P_9	0	0,06	0	0,05	0,055	0,051	0,057
0,117 (0,12)	- для перерізу В-В – навантаження ззовні (рис. 4.7)						
0,092 (0,1)	- для перерізу Г-Г - навантаження зсередини (рис. 4.7)						

4.5. Визначення напружень від дії навантажень опорних елементів у секціях стріли

Розрахункові залежності розроблені на основі комплексного використання результатів дослідження напружено-деформованого стану телескопічних стріл методом кінцевих елементів, проведених в дослідженні [3]. Значення напружень нижче приведені для точок "п" (пояс) і "с" (бічна стінка) - за рис. 4.9 та рис. 4.13.

4.5.1. Поперечні мембранні напруження

Поперечні мембранні напруження стиску або розтягу (у залежності від напрямку дії сил Р в бічній стінці при впливі роликів), (точка «с») МПа:

$$\sigma_{mz}^{c} = \frac{P_p \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{\delta_п}{\delta_c} + 10{,}3\right) \cdot (B \cdot \delta_o + H \cdot \delta_c) \cdot \left(0{,}8 \cdot e^{\frac{-45 \cdot E}{L}} + 0{,}2\right)}{[B \cdot (\delta_п + \delta_o) + 2 \cdot H \cdot \delta_c]^2 \cdot \sqrt{\frac{B \cdot (\delta_п + \delta_o) + 2 \cdot H \cdot \delta_c}{(B + \delta_c) \cdot \left(H + \frac{\delta_п + \delta_o}{2}\right)}}} \qquad (4.12)$$

де P_p – розрахункова сила тиску одного ролика, Н

Е – розрахунковий ексцентриситет навантаження, м

$L = 2 \cdot B + 2 \cdot H$ – довжина периметра, що утворює контур поперечного переріза, м

де В, Н – розміри прямокутника, утвореного осями полиць та стінок (рис. 4.3, 4.6), м

$\delta_с$, $\delta_о$, $\delta_п$ – товщини відповідно вертикальних стінок, нижнього та верхнього поясів, м

Поперечне мембранне напруження для перерізу А-А при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{4946{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}003} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}109 \cdot 0{,}003 + 0{,}191 \cdot 0{,}003) \cdot \left(0{,}8 \cdot e^{\frac{-45 \cdot 0{,}00772}{0{,}6}} + 0{,}2\right)}{[0{,}109 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}191 \cdot 0{,}003]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}109 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}191 \cdot 0{,}003}{(0{,}109 + 0{,}003) \cdot \left(0{,}191 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{46}{3{,}24 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}2878} = 49{,}2\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{4946{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}142 \cdot 0{,}003 + 0{,}237 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot e^{\frac{-45 \cdot 0{,}00772}{0{,}758}} + 0{,}2\right)}{[0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004}{(0{,}142 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}237 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{69{,}54}{7{,}55 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}28} = 33\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{2356{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}003} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}109 \cdot 0{,}003 + 0{,}191 \cdot 0{,}003) \cdot \left(0{,}8 \cdot e^{\frac{-45 \cdot 0{,}00552}{0{,}6}} + 0{,}2\right)}{[0{,}109 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}191 \cdot 0{,}003]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}109 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}191 \cdot 0{,}003}{(0{,}109 + 0{,}003) \cdot \left(0{,}191 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{24{,}63}{3{,}24 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}2878} = 26{,}41\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{2356{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}142 \cdot 0{,}003 + 0{,}237 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot e^{\frac{-45 \cdot 0{,}00552}{0{,}758}} + 0{,}2\right)}{[0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004}{(0{,}142 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}237 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{мz}^{с} = \frac{36{,}5}{7{,}55 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}28} = 17{,}26\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{9073{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}142 \cdot 0{,}003 + 0{,}237 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot \text{e}^{\frac{-45 \cdot 0{,}01196}{0{,}758}} + 0{,}2\right)}{[0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004}{(0{,}142 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}237 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{107{,}5}{7{,}55 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}28} = 50{,}86\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *B-B* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{9073{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}005}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}177 \cdot 0{,}005 + 0{,}285 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot \text{e}^{\frac{-45 \cdot 0{,}01196}{0{,}924}} + 0{,}2\right)}{[0{,}177 \cdot (0{,}005 + 0{,}005) + 2 \cdot 0{,}285 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}177 \cdot (0{,}005 + 0{,}005) + 2 \cdot 0{,}285 \cdot 0{,}004}{(0{,}177 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}285 + \frac{0{,}005 + 0{,}005}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{206}{16{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}278} = 45{,}2\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{5548{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}003}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}142 \cdot 0{,}003 + 0{,}237 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot \text{e}^{\frac{-45 \cdot 0{,}00902}{0{,}758}} + 0{,}2\right)}{[0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}142 \cdot (0{,}003 + 0{,}003) + 2 \cdot 0{,}237 \cdot 0{,}004}{(0{,}142 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}237 + \frac{0{,}003 + 0{,}003}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{73{,}87}{7{,}55 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}28} = 35\text{МПа}$$

Поперечне мембранне напруження для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{5548{,}5 \cdot \left(5{,}616 \cdot \frac{0{,}005}{0{,}004} + 10{,}3\right) \cdot (0{,}177 \cdot 0{,}005 + 0{,}285 \cdot 0{,}004) \cdot \left(0{,}8 \cdot \text{e}^{\frac{-45 \cdot 0{,}00902}{0{,}924}} + 0{,}2\right)}{[0{,}177 \cdot (0{,}005 + 0{,}005) + 2 \cdot 0{,}285 \cdot 0{,}004]^2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}177 \cdot (0{,}005 + 0{,}005) + 2 \cdot 0{,}285 \cdot 0{,}004}{(0{,}177 + 0{,}004) \cdot \left(0{,}285 + \frac{0{,}005 + 0{,}005}{2}\right)}}}$$

$$\sigma_{\text{MZ}}^{\text{c}} = \frac{139{,}5}{16{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}278} = 30{,}6\text{МПа}$$

4.5.2. Поперечні напруження згину в поясі

Поперечні напруження згину в поясі (точка «п»), МПа:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot \sigma_{мz}^{с} \cdot \delta_{с} \cdot E \cdot К_{П} \cdot (1 - К_{М}) \cdot К_{в4}}{\delta_{п}^{2}} \quad (4.13)$$

де $К_{в4}$ – коефіцієнт, що корегує перехід від зосередженого навантаження $P_р$ до розподіленого [3].

$К_П$ – коефіцієнт поперечного моменту,

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{E}{L} + 0{,}61 \quad (4.14)$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{7{,}72}{600} + 0{,}61 = 0{,}642$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{7{,}72}{758} + 0{,}61 = 0{,}635$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{5{,}52}{600} + 0{,}61 = 0{,}633$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{5{,}52}{758} + 0{,}61 = 0{,}628$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{11{,}96}{758} + 0{,}61 = 0{,}649$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{11{,}96}{924} + 0{,}61 = 0{,}642$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{9{,}02}{758} + 0{,}61 = 0{,}640$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$К_{П} = 2{,}475 \cdot \frac{9{,}02}{924} + 0{,}61 = 0{,}634$$

$К_М$ – параметр, що характеризує співвідношення інтенсивностей згинальних моментів у навантаженому поясі і бічній стінці,

$$К_{М} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\delta_{п}}{\delta_{с}}\right)^{3} \cdot \frac{(1 - К_{1} \cdot К_{2})^{2}}{\left(0{,}35 \cdot \frac{B}{H} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot E}{L}}\right)}} \quad (4.15)$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{3}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}269 \cdot 0{,}269)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{109}{191} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 7{,}72}{600}}\right)}} = 0{,}449$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}16 \cdot 0{,}16)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{142}{237} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 7{,}72}{758}}\right)}} = 0{,}578$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{3}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}269 \cdot 0{,}269)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{109}{191} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 5{,}52}{600}}\right)}} = 0{,}459$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}16 \cdot 0{,}16)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{142}{237} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 5{,}52}{758}}\right)}} = 0{,}653$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}16 \cdot 0{,}16)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{142}{237} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 11{,}96}{758}}\right)}} = 0{,}633$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{5}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}339 \cdot 0{,}339)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{177}{285} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 11{,}96}{924}}\right)}} = 0{,}320$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{3}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}16 \cdot 0{,}16)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{142}{237} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 9{,}02}{758}}\right)}} = 0{,}642$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$К_М = \frac{1}{1 + \left(\frac{5}{4}\right)^3 \cdot \frac{(1 - 0{,}339 \cdot 0{,}339)^2}{\left(0{,}35 \cdot \frac{177}{285} + 0{,}52\right) \cdot \left(0{,}515 + 0{,}609 \cdot e^{-\frac{21{,}8 \cdot 9{,}02}{924}}\right)}} = 0{,}327$$

де $К_1$ – коефіцієнт, що враховує пружне защемлення бічних стінок в ненавантаженому поясі,

$$К_1 = \frac{Н}{2 \cdot Н + 3 \cdot В \cdot \left(\frac{\delta_с}{\delta_о}\right)^3} \quad (4.16)$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$К_1 = \frac{191}{2 \cdot 191 + 3 \cdot 109 \cdot \left(\frac{3}{3}\right)^3} = 0{,}269$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$К_1 = \frac{237}{2 \cdot 237 + 3 \cdot 142 \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^3} = 0{,}16$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$К_1 = \frac{191}{2 \cdot 191 + 3 \cdot 109 \cdot \left(\frac{3}{3}\right)^3} = 0{,}269$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$К_1 = \frac{237}{2 \cdot 237 + 3 \cdot 142 \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^3} = 0{,}16$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$К_1 = \frac{237}{2 \cdot 237 + 3 \cdot 142 \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^3} = 0{,}16$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$К_1 = \frac{285}{2 \cdot 285 + 3 \cdot 177 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3} = 0{,}339$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$К_1 = \frac{237}{2 \cdot 237 + 3 \cdot 142 \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^3} = 0{,}16$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$К_1 = \frac{285}{2 \cdot 285 + 3 \cdot 177 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3} = 0{,}339$$

$К_2$ – коефіцієнт, що враховує пружне защемлення бічних стінок в навантаженому поясі,

$$К_2 = \frac{Н}{2 \cdot Н + 3 \cdot В \cdot \left(\frac{\delta_с}{\delta_п}\right)^3} \quad (4.17)$$

Так як $\delta_п = \delta_о$, то коефіцієнти $К_1 = К_2$.

Поперечні напруження згину для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 49{,}2 \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}00772 \cdot 0{,}642 \cdot (1 - 0{,}449) \cdot 0{,}35}{0{,}003^2} = 94\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 33 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}00772 \cdot 0{,}635 \cdot (1 - 0{,}578) \cdot 0{,}48}{0{,}003^2} = 87{,}6\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 26{,}41 \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}00552 \cdot 0{,}633 \cdot (1 - 0{,}459) \cdot 0{,}35}{0{,}003^2} = 35\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 17{,}26 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}00552 \cdot 0{,}628 \cdot (1 - 0{,}653) \cdot 0{,}48}{0{,}003^2} = 26{,}6\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 50{,}86 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}01196 \cdot 0{,}649 \cdot (1 - 0{,}633) \cdot 0{,}35}{0{,}003^2} = 135{,}5\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 45{,}2 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}01196 \cdot 0{,}642 \cdot (1 - 0{,}320) \cdot 0{,}44}{0{,}005^2} = 100\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 35 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}00902 \cdot 0{,}640 \cdot (1 - 0{,}642) \cdot 0{,}35}{0{,}003^2} = 67{,}5\text{МПа}$$

Поперечні напруження згину для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{имх}^{п} = \frac{6 \cdot 30{,}6 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}00902 \cdot 0{,}634 \cdot (1 - 0{,}327) \cdot 0{,}47}{0{,}005^2} = 53\text{МПа}$$

4.5.3. Поперечні напруження вигину бічної стінки

Поперечне напруження вигину бічної стінки (точка «с»):

$$\sigma_{имz}^{c} = \frac{6 \cdot \sigma_{мz}^{c} \cdot E \cdot K_{П} \cdot K_{М} \cdot K_{в2}}{\delta_c} \qquad (4.18)$$

де $K_{в2}$ – коефіцієнт**,** що корегує перехід від зосередженого навантаження $P_р$ до розподіленого [3].

Поперечне напруження вигину для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{имz}^{с} = \frac{6 \cdot 49{,}2 \cdot 0{,}00772 \cdot 0{,}642 \cdot 0{,}449 \cdot 0{,}608}{0{,}003} = 103\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 33 \cdot 0{,}00772 \cdot 0{,}635 \cdot 0{,}578 \cdot 0{,}7}{0{,}004} = 98\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 26{,}41 \cdot 0{,}00552 \cdot 0{,}633 \cdot 0{,}459 \cdot 0{,}608}{0{,}003} = 52\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 17{,}26 \cdot 0{,}00552 \cdot 0{,}628 \cdot 0{,}653 \cdot 0{,}7}{0{,}004} = 41\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 50{,}86 \cdot 0{,}01196 \cdot 0{,}649 \cdot 0{,}633 \cdot 0{,}608}{0{,}004} = 181\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 45{,}2 \cdot 0{,}01196 \cdot 0{,}642 \cdot 0{,}320 \cdot 0{,}8}{0{,}004} = 134\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 35 \cdot 0{,}00902 \cdot 0{,}640 \cdot 0{,}642 \cdot 0{,}608}{0{,}004} = 118\text{МПа}$$

Поперечне напруження вигину для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz} = \frac{6 \cdot 30{,}6 \cdot 0{,}00902 \cdot 0{,}634 \cdot 0{,}327 \cdot 0{,}8}{0{,}004} = 69\text{МПа}$$

4.5.4. Поздовжні напруження вигину в поясі

Поздовжні напруження вигину в поясі (точка «п»):

$$\sigma^{п}_{иму} = \frac{\sigma^{п}_{имх} \cdot K_{в5}}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot e^{\frac{-99 \cdot E}{L}}} \qquad (4.19)$$

де $K_{в5}$ – коефіцієнт**,** що корегує перехід від зосередженого навантаження $\boldsymbol{P_p}$ до розподіленого [3].

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{п}_{иму} = \frac{94 \cdot 0{,}5}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot e^{\frac{-99 \cdot 7{,}72}{600}}} = 34\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{87{,}6 \cdot 0{,}55}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 7{,}72}{758}}} = 35\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{35 \cdot 0{,}5}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 5{,}52}{600}}} = 12\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{26{,}6 \cdot 0{,}55}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 5{,}52}{758}}} = 10\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{135{,}5 \cdot 0{,}5}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 11{,}96}{758}}} = 51\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{100 \cdot 0{,}55}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 11{,}96}{924}}} = 40\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{67{,}5 \cdot 0{,}5}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 9{,}02}{758}}} = 24\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в поясі для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{п}} = \frac{53 \cdot 0{,}55}{1{,}15 + 0{,}85 \cdot \text{e}^{\frac{-99 \cdot 9{,}02}{924}}} = 20\text{МПа}$$

4.5.5. Поздовжні напруження вигину в бічній стінці

Поздовжні напруження вигину в бічній стінці (точка «с»):

$$\sigma_{\text{иму}}^{\text{с}} = (0{,}34\ldots0{,}4) \cdot \text{К}_{\text{в3}} \cdot \sigma_{\text{имz}}^{\text{с}} \qquad (4.20)$$

де $К_{в3}$ – коефіцієнт, що корегує перехід від зосередженого навантаження $Р_р$ до розподіленого [3], (у середньому, при дії сил Р зсередини контуру поперечних перерізів 0,36, при зовнішньому навантаженні – 0,38).

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}36 \cdot 0{,}755 \cdot 103 = 28\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}38 \cdot 0{,}61 \cdot 98 = 23\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}36 \cdot 0{,}755 \cdot 52 = 14\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}38 \cdot 0{,}61 \cdot 41 = 10\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}36 \cdot 0{,}755 \cdot 181 = 49\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}38 \cdot 0{,}61 \cdot 134 = 31\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}36 \cdot 0{,}755 \cdot 118 = 32\text{МПа}$$

Поздовжнє напруження вигину в бічній стінці для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{с}_{иму} = 0{,}38 \cdot 0{,}61 \cdot 69 = 16\text{МПа}$$

4.5.6. Поздовжні мембранні напруження у бічній стінці

Поздовжні мембранні напруження (без врахування напружень від балкового вигину стріли) у бічній стінці (точка «с»):

$$\sigma_{му}^{c} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{\delta_n}{\delta_c}\right) \cdot K_{в1} \cdot \sigma_{мz}^{c} \qquad (4.21)$$

де $К_{в3}$ – коефіцієнт**,** що корегує перехід від зосередженого навантаження $Р_р$ до розподіленого [3].

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *А-А* при навантаженні зовні:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{3}\right) \cdot 0{,}775 \cdot 49{,}2 = 13\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{4}\right) \cdot 0{,}875 \cdot 33 = 10{,}3\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{3}\right) \cdot 0{,}775 \cdot 26{,}41 = 7\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{4}\right) \cdot 0{,}875 \cdot 17{,}26 = 6\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{4}\right) \cdot 0{,}775 \cdot 50{,}86 = 15\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{5}{4}\right) \cdot 0{,}875 \cdot 45{,}2 = 12\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{3}{4}\right) \cdot 0{,}775 \cdot 35 = 10\text{МПа}$$

Поздовжнє мембранне напруження для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{му}^{с} = \left(0{,}4 - 0{,}06 \cdot \frac{5}{4}\right) \cdot 0{,}875 \cdot 30{,}6 = 9\text{МПа}$$

4.5.7. Напруження від поперечного вигину бічної стінки

Напруження від поперечного вигину бічної стінки в точці «с»:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx (0{,}1\ldots0{,}12) \cdot \sigma^{c}_{имz} \quad (4.22)$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу А-А при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 103 = 10{,}3\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу А-А при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 98 = 9{,}8\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу Б-Б при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 52 = 5{,}2\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу Б-Б при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 41 = 4{,}1\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу В-В при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 181 = 18{,}1\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу В-В при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 134 = 13{,}4\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу Г-Г при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 118 = 11{,}8\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу Г-Г при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{имz(c)} \approx 0{,}1 \cdot 69 = 7\text{МПа}$$

4.5.8. Напруження від поздовжнього вигину бічної стінки

Напруження від поздовжнього вигину бічної стінки в точці «с»:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx (0{,}3\ldots0{,}35) \cdot \sigma^{c}_{\text{имz(с)}} \quad (4.23)$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 10{,}3 = 3{,}3\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 9{,}8 = 3{,}1\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 5{,}2 = 2\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 4{,}1 = 1{,}3\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 18{,}1 = 5{,}8\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 13{,}4 = 4{,}3\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу Г-Г при навантаженні ззовні:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 11{,}8 = 3{,}8\text{МПа}$$

Напруження від поперечного вигину бічної стінки для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma^{c}_{\text{иму(с)}} \approx 0{,}32 \cdot 7 = 2{,}2\text{МПа}$$

4.6. Визначення приведених напружень в опорних елементах

Приведені напруження визначаємо з припущенням, що дотичні напруження від скручування стріли та дії поперечних сил порівняно малі, тому їх не враховуємо,($\tau_{xy} = 0, \tau_{yz} = 0$).

Приведені напруження для точки "п":

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma^{п}_{имх})^2 + \left(\sigma^{п}_{иму}\right)^2 - \sigma^{п}_{имх} \cdot \sigma^{п}_{иму} + 3 \cdot \tau^2_{ху}} \quad (4.24)$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{94^2 + 34^2 - 94 \cdot 34 + 3 \cdot 0} = 82{,}4\text{МПа}$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{87{,}6^2 + 35^2 - 87{,}6 \cdot 35 + 3 \cdot 0} = 76{,}4\text{МПа}$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{35^2 + 12^2 - 35 \cdot 12 + 3 \cdot 0} = 30{,}8\text{МПа}$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{26{,}6^2 + 10^2 - 26{,}6 \cdot 10 + 3 \cdot 0} = 23{,}3\text{МПа}$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{135{,}5^2 + 51^2 - 135{,}5 \cdot 51 + 3 \cdot 0} = 118{,}5\text{МПа}$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{100^2 + 40^2 - 100 \cdot 40 + 3 \cdot 0} = 87{,}2\text{МПа}$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{67{,}5^2 + 24^2 - 67{,}5 \cdot 24 + 3 \cdot 0} = 59{,}3\text{МПа}$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{53^2 + 20^2 - 53 \cdot 20 + 3 \cdot 0} = 46{,}4\text{МПа}$$

Приведені напруження для точки "с":

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma^{с}_{имz} + \sigma^{с}_{мz})^2 + \left(\sigma^{с}_{иму} + \sigma^{с}_{му}\right)^2 - (\sigma^{с}_{имz} + \sigma^{с}_{мz}) \cdot \left(\sigma^{с}_{иму} + \sigma^{с}_{му}\right) + 3 \cdot \tau^2_{уz}} \quad (4.25)$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(103 + 49{,}2)^2 + (28 + 13)^2 - (103 + 49{,}2) \cdot (28 + 13) + 3 \cdot 0} = 136{,}4\text{МПа}$$

Для перерізу *А-А* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(98 + 33)^2 + (23 + 10{,}3)^2 - (98 + 33) \cdot (23 + 10{,}3) + 3 \cdot 0} = 118\text{МПа}$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(52 + 26{,}41)^2 + (14 + 7)^2 - (52 + 26{,}41) \cdot (14 + 7) + 3 \cdot 0} = 70{,}3\text{МПа}$$

Для перерізу *Б-Б* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(41 + 17{,}26)^2 + (10 + 6)^2 - (41 + 17{,}26) \cdot (10 + 6) + 3 \cdot 0} = 52{,}1\text{МПа}$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(181 + 50{,}86)^2 + (49 + 15)^2 - (181 + 50{,}86) \cdot (49 + 15) + 3 \cdot 0} = 207{,}5\text{МПа}$$

Для перерізу *В-В* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(134 + 45{,}2)^2 + (31 + 12)^2 - (134 + 45{,}2) \cdot (31 + 12) + 3 \cdot 0} = 162\text{МПа}$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні ззовні:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(118 + 35)^2 + (32 + 10)^2 - (118 + 35) \cdot (32 + 10) + 3 \cdot 0} = 139{,}5\text{МПа}$$

Для перерізу *Г-Г* при навантаженні зсередини:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(69 + 30{,}6)^2 + (16 + 9)^2 - (69 + 30{,}6) \cdot (16 + 9) + 3 \cdot 0} = 90\text{МПа}$$

Умова несучої здатності [3]:

$$\sigma_{пр} \leq 1{,}5 \cdot \gamma \cdot \sigma_{Т} = 1{,}5 \cdot 0{,}95 \cdot 350 = 500\text{МПа} \qquad (4.26)$$

де γ – коефіцієнт умов роботи, що враховує вплив навантажень від тиску в бокових опорах секцій, місцевих деформацій перерізу при виготовленні та дотичних напружень від опорних тисків [3].

Розрахунок методами опору матеріалів характеризує напружений стан перерізу в цілому, тому має нижчі значення напружень. Навантаження в опорних елементах стріл виникають внаслідок місцевого згину та можуть перевищувати напруження від балочного згину стріли, тому при проектуванні телескопічних стріл необхідно вибирати такі конструктивні рішення, які забезпечували б зниження цих напружень, а саме правильно вибирати форму поперечного перерізу та тип опорного елемента, а також співвідношення згинальних жорсткостей опорного елемента та елементів перерізів секцій (поясів та стінок). Математичні залежності цієї методики ґрунтуються на теоретичних та експериментальних дослідженнях.

Зі збільшенням ексцентриситету рівнодіючої навантаження опорних елементів, викликані нею напруження вигину в поясах і стінках секцій стріл зростають (у поясах інтенсивніше, ніж у стінках), а їх градієнти зменшуються при будь-яких параметрах поперечних перерізів; у той же час мембранні (серединні) напруження розтягання (стиску) у стінці і їхній градієнт істотно зменшуються. Розподіл навантаження по ширині пояса при однаковій рівнодіючій приводить до зниження максимальних

напружень; однак на рівень напружень зміна ексцентриситету впливає сильніше, ніж розподіл навантаження по ширині пояса.

Збільшення товщини пояса за рахунок зменшення товщини бічної стінки забезпечує зниження напружень; обмеженням товщини стінки повинне бути забезпечення місцевої стійкості від напружень загального згину стріли (балкового згину) і напружень, викликаних навантаженням в опорних елементах.

Найбільша економія металу досягається при зосередженні металу у вузлах перетину секцій на довжині впливу опорних навантажень при одночасному зниженні товщини середньої частини полиць і стінок.

Кращим варіантом поперечного переріза для крайніх висувних секцій телескопічних стріл, що випробують місцеве навантаження тільки "ззовні", є прямокутний.

При остаточному виборі варіанта поперечного переріза інших секцій варто враховувати істотний вплив ексцентриситету установки опорних елементів. Найбільш сприятливий розподіл напружень від місцевих навантажень при їхньому впливі "зсередини" секцій має місце у восьмикутному перерізі типу Е и круглому типу З. Однак зі зменшенням відносного ексцентриситету прикладання навантаження напружений стан у секціях з перетинами типів Е и З може виявитися навіть вище, ніж у прямокутних типах А.

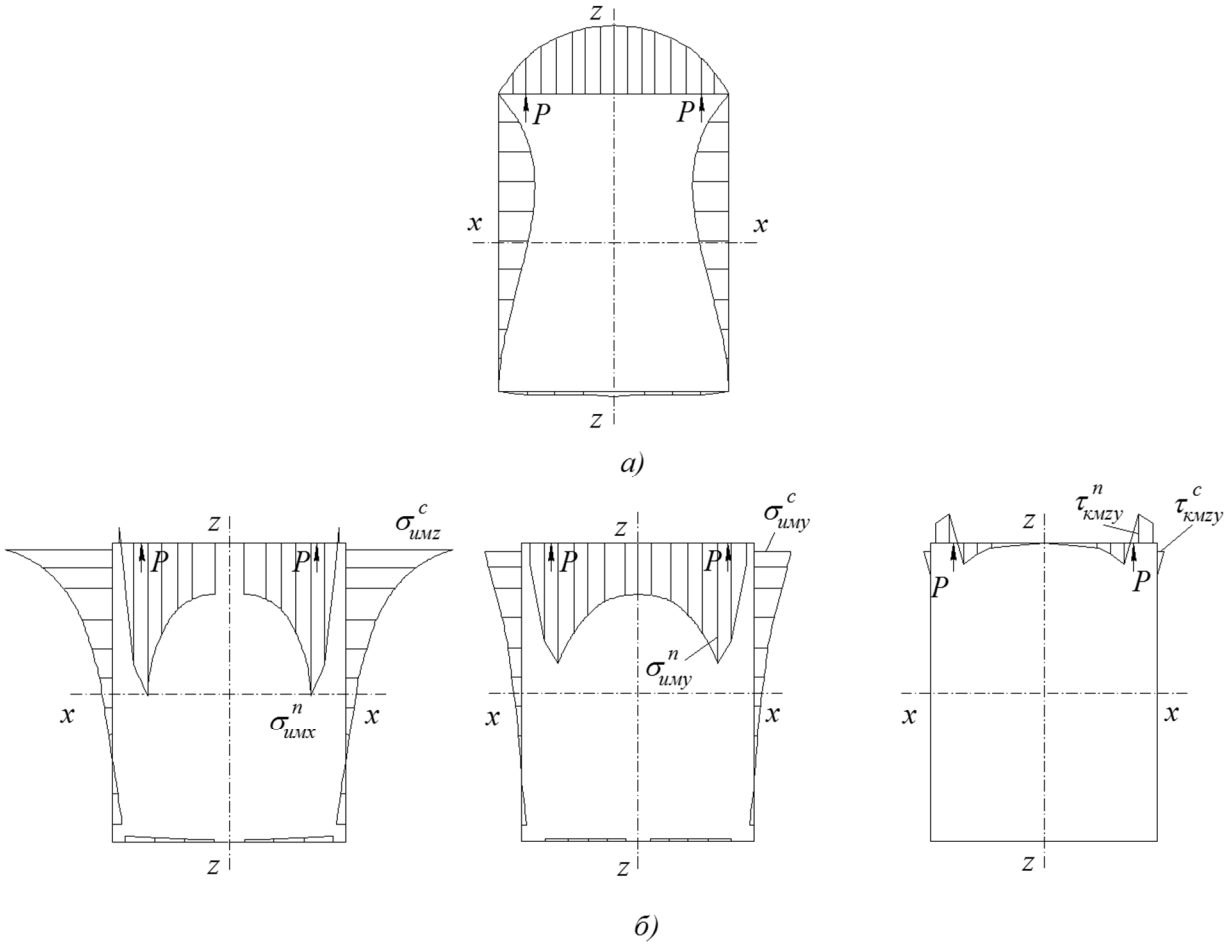
Шести- та восьмикутні перетини забезпечують телескопічним стрілам підвищення згинальної та крутильної жорсткості. При виборі конструкції телескопічної стріли рекомендується використовувати стріли із шести- та восьмикутним перерізами.

Розроблена методика розрахунку місцевих напружень телескопічних стріл дозволяє на стадії проектування розраховувати місцеві напруження в поясах і стінках перерізів стріли, що дозволяє раціонально використовувати матеріал у перерізі і зменшити загальну масу стріли.

4.7. Напружено-деформований стан стріли від дії навантажень опорних елементів

На рис. 4.14 приведені епюри переміщень (прогинів) і напружень у поперечному перерізі стріли від дії зосереджених сил **P**, що імітують навантаження опорних елементів секцій, побудовані за результатами розрахунків методом кінцевих елементів.

Епюра переміщень дана для перерізу стріли, в якому безпосередньо діють сили **P.** Епюри напруження приведені для перерізу, що відстоїть від площини, у якій діють сили **P**, на відстані, що дорівнює $\mathbf{6{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot L}$ (**L** - довжина периметра, що утворює контур поперечного переріза стріли**: L=2·B+2·H)**. Прогини навантаженого пояса максимальні в середній його точці; у бічній стінці прогини максимальні на відстані 0,3 її висоти від серединної площини навантаженого пояса. Співвідношення між максимальними значеннями прогинів бічної стінки і навантаженого пояса залежить від ексцентриситету навантаження. Ненавантажений пояс прогинається у бік, протилежний напрямкові прогинів навантаженого пояса. У поясах і бічних стеках має місце двохосьовий напружений стан, що відрізняється великими градієнтами в зоні дії сил **P** (у поясі) і в зоні з'єднання стінки з навантаженим поясом. Основними компонентами напруженого стану для навантаження з **E>0** є напруження від місцевого поздовжньо-поперечного вигину елементів перерізу. Найбільші напруження в навантаженому поясі мають місце в зоні дії сил **P**: $\sigma^{п}_{имх}$ - напруження від поперечного (по напрямку осі X) і $\sigma^{п}_{иму}$ - від поздовжнього (по напрямку подовжньої осі Y стріли) вигину. Ці напруження змінюють свій знак у зоні, пов'язаною з бічною стінкою, тому що остання є опорою пояса і створює пружне защемлення при його вигині.



а) епюри переміщень (прогинів);

б) епюри напружень

Рисунок 4.14 – Вплив зосереджених сил ***P*** в зоні опорних елементів

У бічних стінках згинальні напруження максимальні в місці з'єднання їх з навантаженим поясом: $\sigma^{c}_{имz}$- напруження від поперечного (по напрямку осі Z) і $\sigma^{c}_{иму}$ - від поздовжнього (по напрямку осі Y стріли) вигину. В міру видалення від навантаженого пояса величина напруження та їх градієнт різко знижується, а на відстані приблизно **0,7·H** вони змінюють знак, що зв'язано з впливом пружного защемлення в ненавантаженому поясі. Поздовжнє напруження вигину стінки $\sigma^{c}_{иму}$ характеризується меншими градієнтом і величиною, чим поперечне. На відстані приблизно **0,82·H** вони також змінюють свій знак.

Дотичні напруження від кручення елементів $\tau^{п}_{кмxy}$ і $\tau^{c}_{кмzy}$ в поясі і бічній стінці обумовлені ексцентричним впливом сил **P** щодо центрів ваги кінцевих елементів і в межі, коли їхні розміри прагнуть до нуля, вони будуть мати нульові

значення. В міру видалення від місця дії сил **P** (у поясі) і від зони примикання до навантаженого пояса (у бічній стінці) ці напруження швидко згасають. Нормальні і дотичні мембранні напруження в поясі незначні в порівнянні із згинальними. У бічній стінці істотне значення мають поперечні мембранні напруження σ^{c}_{mz}. Вони максимальні в місці з'єднання стінки з навантаженим поясом і зменшуються до нуля в місці з'єднання її з незавантаженим поясом. Поздовжні мембранні напруження σ^{c}_{my} в бічній стінці, обумовлені тільки дією сил **P** (без обліку напружень від балкового вигину стріли), по величині менше поперечних σ^{c}_{mz}, особливо при малих ексцентриситетах навантаження. По висоті стінки напруження σ^{c}_{my} швидко згасають. Мембранні дотичні напруження $\tau^{п}_{mxy}$ і τ^{c}_{mzy} у поясі та бічній стінці в порівнянні із згинальними незначні та у перерізі, що збігається з площиною дії сил **P**, дорівнюють нулеві по тим причинам, що і дотичні напруження кручення $\tau^{п}_{kmxy}$ і τ^{c}_{kmzy}.

4.8.Результати розрахунку напружень від дії опорних елементів

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку місцевих напружень на ділянках дії опорних елементів.

Переріз та спосіб навантаження	Напруження, ***МПа***									
	σ^{c}_{mz}	$\sigma^{n}_{имx}$	$\sigma^{c}_{имz}$	$\sigma^{n}_{иму}$	$\sigma^{c}_{иму}$	$\sigma^{c}_{му}$	$\sigma^{c}_{имz\,(c)}$	$\sigma^{c}_{иму\,(c)}$	$\sigma^{n}_{пр}$	$\sigma^{c}_{пр}$
	Поперечні мембранні напруження в вертикальній стінці	Поперечні напруження згину в поясі	Поперечні напруження згину вертикальної стінки	Поздовжні напруження згину в поясі	Поздовжні напруження згину в вертикальній стінці	Поздовжні мембранні напруження в вертикальній стінці	Напруження від поперечного згину вертикальної стінки	Напруження від поздовжнього згину вертикальної стінки	Приведені напруження для поясів	Приведені напруження для вертикальної стінки
А-А при навантаженні ззовні:	49,2	94	103	34	28	13	10,3	3,3	82,4	136,4
А-А при навантаженні зсередини:	33	87,6	98	35	23	10,3	9,8	3,1	76,4	118
Б-Б при навантаженні ззовні:	26,41	35	52	12	14	7	5,2	2	30,8	70,3

Б-Б при навантаженні зсередини:	17,26	26,6	41	10	10	6	4,1	1,3	23,3	52,1
В-В при навантаженні ззовні:	50,86	135,5	181	51	49	15	18,1	5,8	118,5	207,5
В-В при навантаженні зсередини:	45,2	100	134	40	31	12	13,4	4,3	87,2	162
Г-Г при навантаженні ззовні:	35	67,5	118	24	32	10	11,8	3,8	59,3	139,5
Г-Г при навантаженні зсередини:	30,6	53	69	20	16	9	7	2,2	46,4	90

РОЗДІЛ 5
РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ МКЕ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСУ ПРОГРАМ SOLIDWORKS

5.1.Вступ в Solidworks

Програмний комплекс SolidWorks є засобом, за допомогою якого створюється комп'ютерна модель та обробляється CAD-модель конструкції, виробу або його складової частини; прикладаються діючі зусилля або інші проектні впливи; досліджується відгуки системи різної фізичної природи у виді розподілів напружень і температур. Програма використовується для оптимізації проектних розробок на ранніх стадіях, що знижує вартість продукції. Усе це допомагає проектним організаціям скоротити цикл розробки, що складає у виготовленні зразків-прототипів, їхніх іспитів і повторному виготовленні зразків, а також виключити дорогий процес доробки виробу.

У ряді випадків випробування зразків є небажаними або неможливими. Проектувальники, що використовують програму SolidWorks, можуть виявити можливі недоліки проекту або знайти його оптимальний варіант до початку виготовлення або експлуатації продукції. Компанії, що конкурують, шукають способи зробити продукцію високої якості при мінімальних витратах. Кінцево-елементний аналіз за допомогою програми SolidWorks може допомогти значно зменшити витрати на проектування і виготовлення, додати впевненості розробнику в правильності прийнятих їм рішень. Кінцево-елементний аналіз найбільш ефективний на концептуальній стадії проекту. Він також корисний при верифікації остаточного варіанта розробки перед проведенням іспитів зразків.

5.2.Загальні положення розрахунку

Розрахунок в Solidworks є заключним етапом виконання роботи. Ціллю є визначення напружень в дослідних перерізах та точках, а також порівняння

результатів з визначеними вище за методом опору матеріалів. Розрахунок проводимо за декількома напрямками:

- визначення напружень та деформацій в дослідних перерізах секцій стріли;
- визначення напружень та деформацій в місцях дії опорних елементів секцій стріли.

Порівняння буде виконуватись з результатами, отриманими відповідно за методом опору матеріалів та методикою дослідження [3].

Розрахункові моделі металоконструкцій секцій стріли виконуємо за допомогою програми Solidworks 2016, а потім розраховуємо за допомогою вбудованої підпрограми Solidworks Simulation.

5.3.Методика розрахунку

- Геометрія

Solidworks включає в себе безліч модулей та підпрограм і моделювання деталей є його базовою функцією. Тож усі моделі секцій стріл, в тому числі різних перетинів для першого розділу, були змодельовані в середовищі цієї програми. Файли моделей мають розширення .sldprt. Утім, за необхідності не складе труднощів імпортувати вже готові моделі із інших програм, як от:

- CATIA (*.CATPart, .CATProduct): Формати файлів, використовувані в системі CATIA;
- Pro/ENGINEER (*.prt, .asm): Формати файлів, використовувані в системі Pro/ENGINEER;
- NX (*.prt, .asm): Формати файлів, використовувані в системі NX;
- І багато інших форматів популярних CAD-систем;
- Та нейтральні формати:
  - STEP (*.stp, .step): Стандартний формат обміну даними для подання 3D-моделей;

- IGES (*.igs, .iges): Ще один стандартний формат обміну даними для 3D-моделей;
- Parasolid (*.x_t): Бінарний формат, який використовується багатьма CAD-системами для зберігання геометричної інформації;
- ACIS (*.sat): Ще один бінарний формат для зберігання геометричної інформації.

Також може стати в нагоді корисна функція Solidworks – генерація дерева побудови імпортованої з іншої програми деталі, що дозволить зручно вносити зміни вже не виходячи за рамки програмного пакету застосовуючи імпорт/експорт моделей.

- Присвоєння матеріалу

Вибір матеріалу є суттєвим етапом у процесі конструювання та аналізу (розрахунку) моделей у SolidWorks. Вибраний матеріал безпосередньо впливає на міцність, жорсткість, вагу та інші характеристики виробу.

SolidWorks має велику вбудовану бібліотеку матеріалів з різними властивостями та дозволяє створити власний матеріал, якщо потрібного матеріалу немає в бібліотеці. Знаючи механічні властивості, а саме:

- Модуль Юнга (модуль пружності);
- Коефіцієнт Пуассона;
- Межа міцності на розтяг;
- Межа текучості;
- Густина.

Матеріал можна ввести в цю бібліотеку для подальшого застосування.

Далі вибраний матеріал, в даному випадку 09Г2С слід призначити до деталей що підлягають розрахунку.

- Налаштування з’єднання

Наступним етапом йде налаштування з’єднань між деталями, якщо розраховується збірка, а не одна деталь. Це робиться для забезпечення правильного моделювання взаємодії моделей збірки в рамках симуляції.

SolidWorks Simulation підтримує різні типи з'єднань для різних ситуацій:

- Bonded (жорстке з'єднання): Використовується для моделювання деталей, які приклеєні або зварені одна до одної, тобто вони деформуються як єдине ціле.
- No Penetration (без проникнення): Дозволяє частинам стикатися, але не проходити одна крізь іншу.
- Allow Penetration (дозволене проникнення): Ігнорує контакт і взаємодію між частинами.
- Contact Sets (набори контактів): Специфікує, які поверхні чи тіла контактують, і яким чином.
- Elastic Support (еластична підтримка): Використовується для моделювання гнучких опор або матеріалів, які забезпечують часткову підтримку.

Загалом програма автоматично застосовує опцію «глобальний контакт» – з’єднання застосовується до всіх частин моделі, тип вибирається «Bonded», але за необхідності дозволяється зробити спеціальні налаштування для конкретних пар поверхонь або граней. Ще програма дозволяє задати коефіцієнти тертя між поверхнями контакту (з’єднання).

В цьому розділі знаходиться і імітація наявності болтів, штифтів, зварних швів без їх моделювання – вони ураховуються у SolidWorks Simulation як тип з’єднання.

- Завдання кріплень

Цей розділ розрахунку визначає, як модель закріплена у просторі, тобто задає умови фіксації, що імітують реальну поведінку конструкції.

Серед запропонованих можна вибрати:

- Fixed Geometry (фіксована геометрія): Повністю блокує всі переміщення та обертання для вибраних граней, ребер чи вершин;
- Immovable (нерухоме): Дозволяє зміну кута, але блокує переміщення. Використовується для моделювання структур, які деформуються без зміни положення;
- Hinged (шарнірне кріплення): Обмежує переміщення в заданих напрямках, дозволяючи обертання;
- Elastic Support (еластична підтримка): Моделює гнучкі опори, наприклад, гумові основи чи пружини. Слід зазначити, що відсутня у SolidWorks 2016.

Для більш тонкого налаштування під конкретну розрахункову ситуацію можна керувати обмеженнями для окремих ступенів свободи (переміщення вздовж осей X, Y, Z або обертання навколо них).

- Прикладання зовнішніх навантаження

Зовнішні навантаження в SolidWorks – це сили або моменти, які застосовуються до моделі, щоб імітувати реальні умови експлуатації. Це можуть бути сили тяжіння, просто сили, тиск, температурні навантаження, сили від контакту з іншими деталями та моменти, що діють на модель чи збірку.

Типи навантажень:

- Force (сила): Додається до граней, ребер, точок чи областей. Вказуються величина та напрямок дії. Можна задати як точкові так і розподілені;
- Pressure (тиск): Розподілене навантаження на поверхню. Часто використовується для моделювання рідин або газів;
- Torque (момент): Момент сили, який прикладається до осі обертання;
- Gravity (гравітація): Врахування власної ваги моделі (залежно від матеріалу та щільності);
- Temperature (температура): Моделювання температурних змін і їх впливу на конструкцію;

- Remote Load (віддалене навантаження): Навантаження, яке прикладається до умовної точки, а не до геометрії.

Навантаження можуть задаватися проектантом як змінним чи сталі за часом, лінійними чи нелінійними.

- Створення сітки

Формування сітки представляє собою розбиття моделі на скінченні елементи для проведення чисельного аналізу. Програма використовує ці елементи для розрахунків напружень, переміщень, температур, тиску тощо. Точність аналізу значною мірою залежить від якості та деталізації сітки.

Основною характеристикою сітки є розмір елемента, що відповідає за середній розмір скінченних елементів. Менший розмір дає більшу точність, але довший час розрахунку.

Такі елементи бувають декількох типів:

- Тетраедри (3D): Використовуються для об'ємних моделей.
- Трикутники (2D): Застосовуються для поверхонь.
- Лінійні елементи: Використовуються для балок і стрижнів.

На якість сітки впливає співвідношення сторін елементів, гострі кути, розташування вузлів.

В програмі дозволяється корім глобального налаштування сітки – загальний розмір елементів для всієї моделі, задати локальні налаштування. Такі локальні налаштування використовуються для уточнення сітки в зонах концентрації напружень або областях із складною геометрією (наприклад, отвори, ребра жорсткості). Для цього у Simulation Tree натиснути правою кнопкою на "Mesh" → Apply Mesh Control потім вибрати грані, ребра або вершини, які потребують уточнення і вказати детальніший розмір елементів.

Також, для складних гнутих форм, по типу перетинів И та К можна застосувати Curvature-Based Mesh (Сітка на основі кривизни): Адаптується до вигнутої геометрії, автоматично зменшуючи розмір елементів у вигнутих областях. Але краще буде використати Blended Curvature-Based Mesh – поєднання

криволінійної та стандартної сітки дасть компроміс між точністю та швидкістю розрахунку.

- Запуск розрахунку. Перегляд результатів, формування звіту

Заключний та найтриваліший етап. Розділ перегляду розрахунку дозволяє візуалізувати й аналізувати поведінку моделі під дією прикладених навантажень і обмежень.

Основні епюри, що виводить SolidWorks Simulation:

Графічні епюри (Plots): Відображають результати аналізу у вигляді кольорових градацій (епюр), які показують розподіл певних величин на моделі.

- Напруження (Stress):
  - EQV (фон Мізес – IV теорія міцності);
  - SINT (інтенсивність напружень – III теорія міцності);
  - Максимальні/мінімальні головні напруження;
  - Напруження в певних напрямках (X, Y, Z);
  - Зсув в трьох площинах.
- Переміщення (Displacement):
  - Загальне переміщення;
  - Переміщення в напрямках X, Y, Z.
- Деформація (Strain):
  - Загальна (еквівалентна)
  - Лінійна чи пластична
- Контактні напруження (Contact Pressure) для аналізу контактів між деталями.
- Температура (Temperature):

Епюри можливо відобразити по різному:

- Контурна діаграма (Contour Plot): Показує розподіл результатів по поверхні моделі за допомогою кольорів.

- Деформована форма (Deformed Shape): Відображає змінену форму моделі після прикладання навантажень.
- Векторна діаграма (Vector Plot): Показує напрямки й величини певних параметрів, наприклад, переміщення чи теплових потоків.
- Ізолінії (Iso Clipping): Відображає лінії однакових значень параметрів.

Можуть знадобитися і додаткові функції:

- Розрізи (Section Clipping) – дає змогу побачити результати всередині моделі, відрізаючи певні частини для кращого огляду.
- Графіки та діаграми (Graphs) – будуються за обраними лініями, поверхнями або краями.
- Наприклад, графік напруження вздовж довжини балки чи стріли.
- Анімація (Animation) – можна анімувати результати (наприклад, переміщення або деформацію), щоб краще зрозуміти динаміку моделі.

Ще SolidWorks дає змогу дивитися реакції, що допоможе для запевнення в правильності моделі, оцінити міцність кріплень. Якщо реакції мають нелогічні значення або напрямки, це може вказувати на помилки у моделі або прикладених навантаженнях.

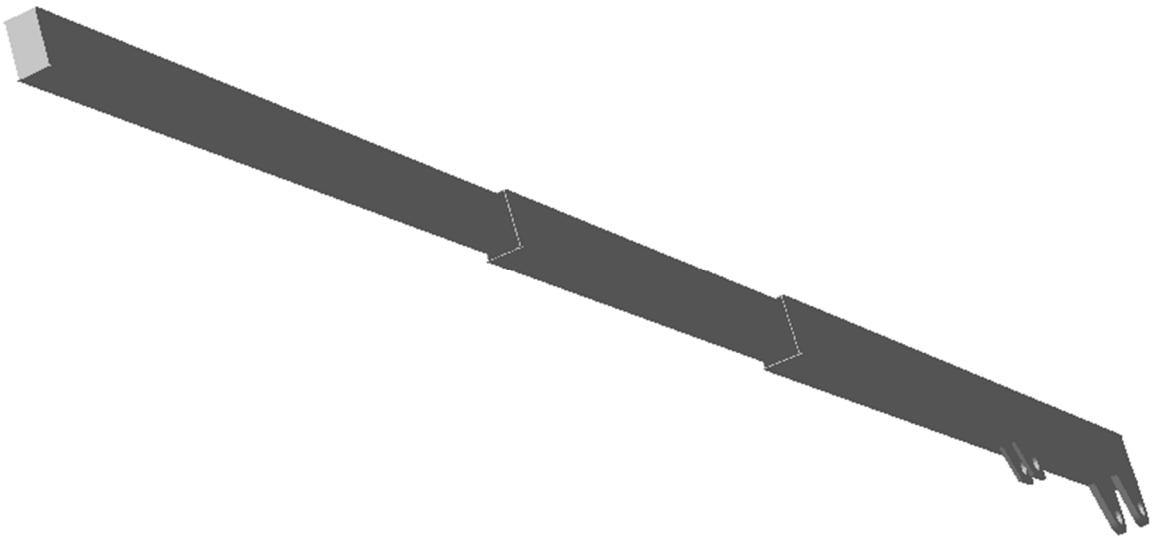
Реакції в точках кріплення дозволяють оцінити, чи витримують кріплення прикладені навантаження, а також оцінити можливість зменшення розмірів кріплення для оптимізації маси

Суттєво полегшує роботу проектантам, що працюють в програмі можливість автоматичного формування звітів з усіма параметрами аналізу й результатами. Звіт можна експортувати в PDF, Word.

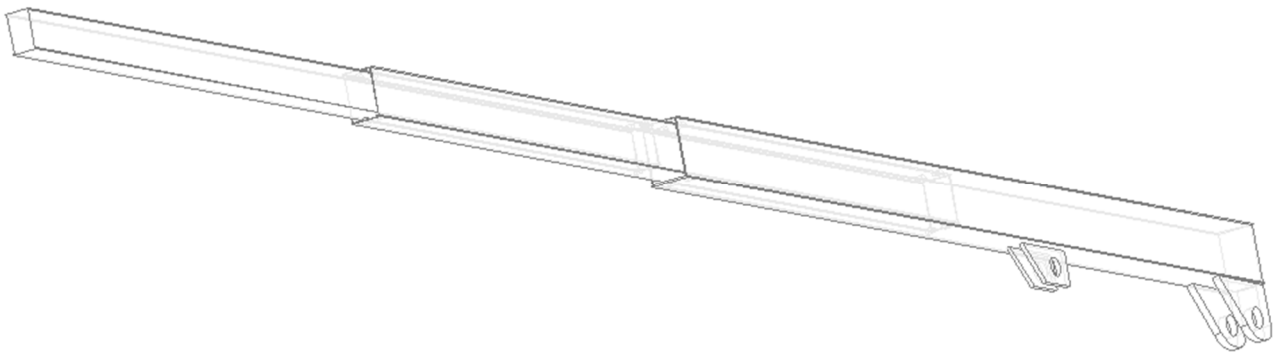
5.4.Визначення напружень в розрахункових перерізах від балкового вигину стріли

За допомогою програми Solidworks 2016 була створена твердотільна модель металоконструкції стріли автопідйомника. Намагання виконати розрахунок стріли в цілому не дали ймовірних результатів, так як велика кількість елементів (а отже й

рівнянь) вимагає дуже великих ресурсів як часу, так і апаратного забезпечення. Збільшення розміру КЕ не забезпечить необхідної точності. Тому розрахунок стріли виконуємо посекційно з прикладанням відповідних сил та в'язів.



а)



б)

а) вигляд із заливкою;

б) каркасна будова

Рисунок 5.1 – Модель стріли автопідйомника

Вихідні дані, статистичні дані про хід розрахунку та результати зводимо в табл. 5.1. Модель, побудова сітки кінцевих елементів, в’язі, характер розподілу напружень в секціях у вигляді кольорових ізоліній на рис. 5.2 - 5.11.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку напружень від дії опорних елементів МКЕ

Секція	Тип КЕ, його розмір та рівень розміру	Кількість		Характеристика в'язів	Характер та величина навантаження
		вузлів	елементів		
Головна	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	10544	57074	1. Закріплення в т.5, нижній пояс (ролик/сковзун) 2. Закріплення в т.7, верхній пояс (ролик/сковзун) 3. Закріплення торця (блокування за повздовжньою вісю)	1. Q = 2000 Н - сила ваги вантажу в люльці. 2. Gл = 500 Н – сила ваги люльки. 3. Gп = 550 Н – сила ваги підвіски люльки з ізоляторами та гідроциліндром. 4. $G_{гц1}$=120 Н – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли. 5. $G_{ц1}$=80 Н – сила ваги шарнірного ланцюга із кабелем, РВД, верхнім жолобом та трубопроводами. 6. G_1 = 1180 Н – сила ваги верхньої секції із оголовком. 7. $G_{гц2}$=250 Н – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли. 8. $G_{ц2}$=100 Н – сила ваги шарнірного ланцюга із кабелем, РВД, верхнім жолобом та трубопроводами.
Середня	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	103477	52890	1. Закріплення в т.9, нижній пояс (ролик/сковзун) 2. Закріплення в т.10, верхній пояс (ролик/сковзун) 3. Закріплення торця (блокування за повздовжньою вісю)	1. F=9893 Н - реакція в точці 5 від головної секції до нижнього поясу. 2. F=4713 Н - реакція в точці 7 від головної секції до верхнього поясу. 3. $G_{гц3}$=400 Н – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли. 4. G_2 = 1460 Н – сила ваги середньої секції. 5. $G_{ц3}$=160 Н – сила ваги шарнірного ланцюга із кабелем, РВД, верхнім жолобом та трубопроводами. 6. $G_{гц4}$=250 Н – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли.

Коренева	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	129606	65669	1. Закріплення в т.12, отвір провушини (дозволяється лише повздовжнє переміщення) 2. Закріплення в т.14, отвір провушини (переміщення не дозволяються)	1. F=18147 Н - реакція в точці 9 від середньої секції до нижнього поясу. 2. F=11097 Н - реакція в точці 10 від середньої секції до верхнього поясу. 3. G_3 =2680 Н – сила ваги кореневої секції. 4. $G_{гц4}$=250 Н – сила ваги шарнірного ланцюга із кабелем, РВД, верхнім жолобом та трубопроводами. 5. $G_{гц5}$=120 Н – сила ваги гідроциліндра висування секцій стріли.

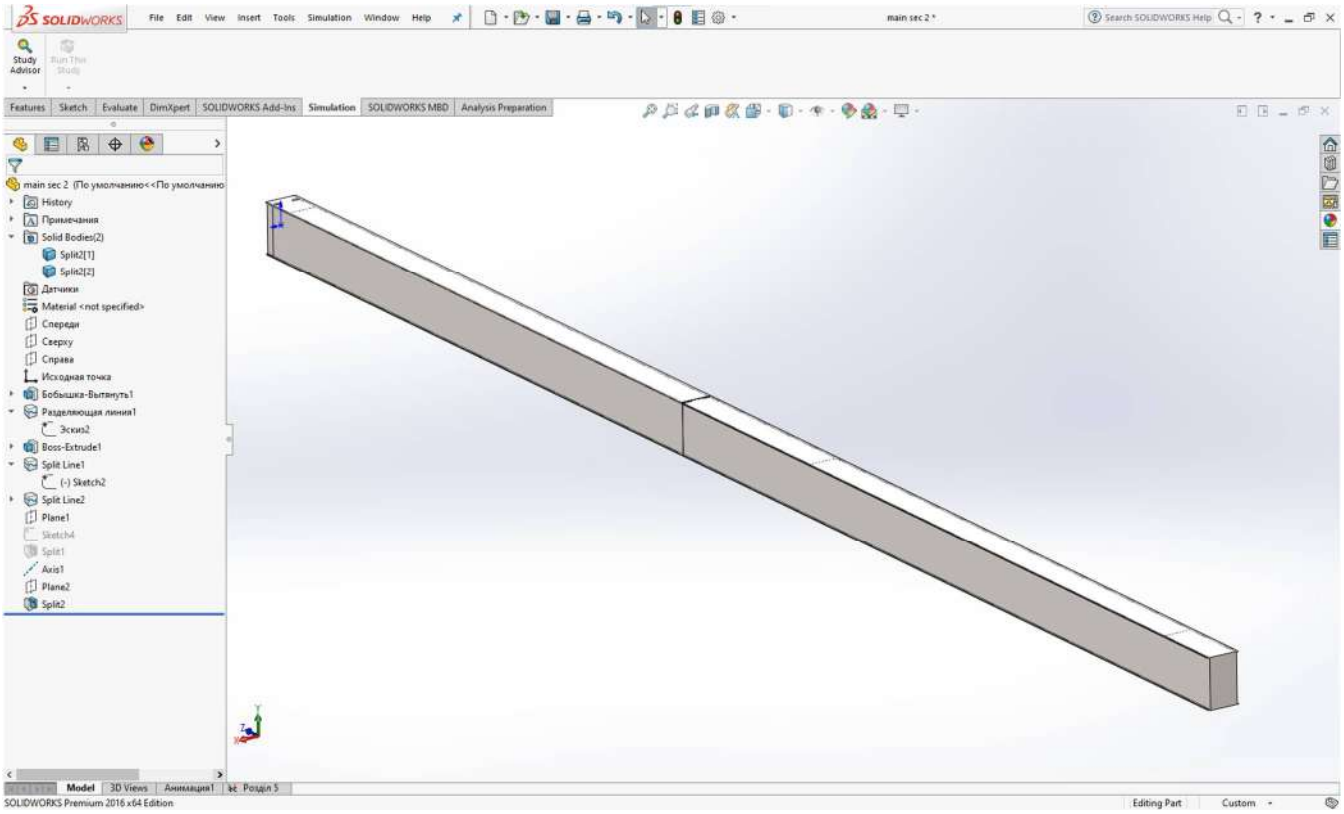


Рисунок 5.2 – Модель головної секції з деревом побудови

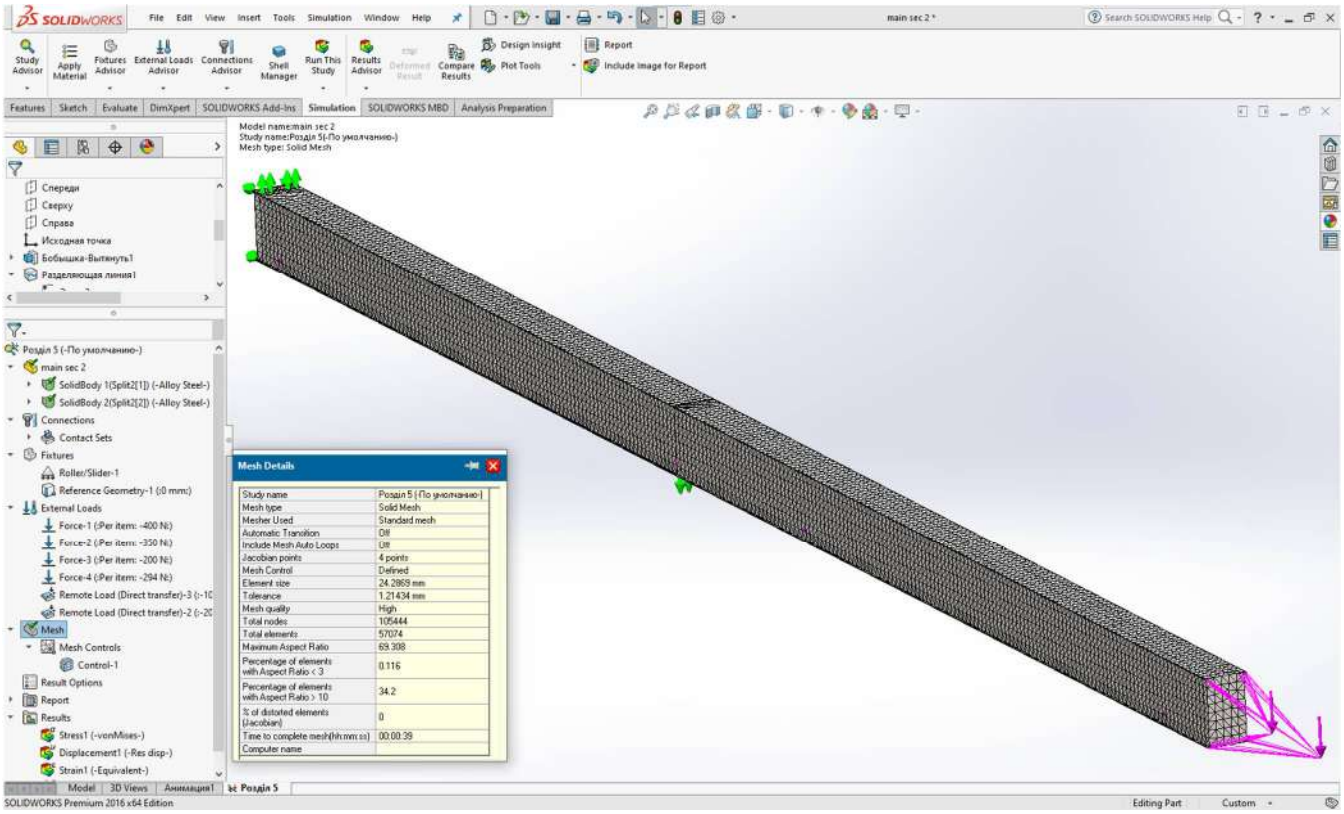


Рисунок 5.3 – Побудова сітки головної секції та її параметри

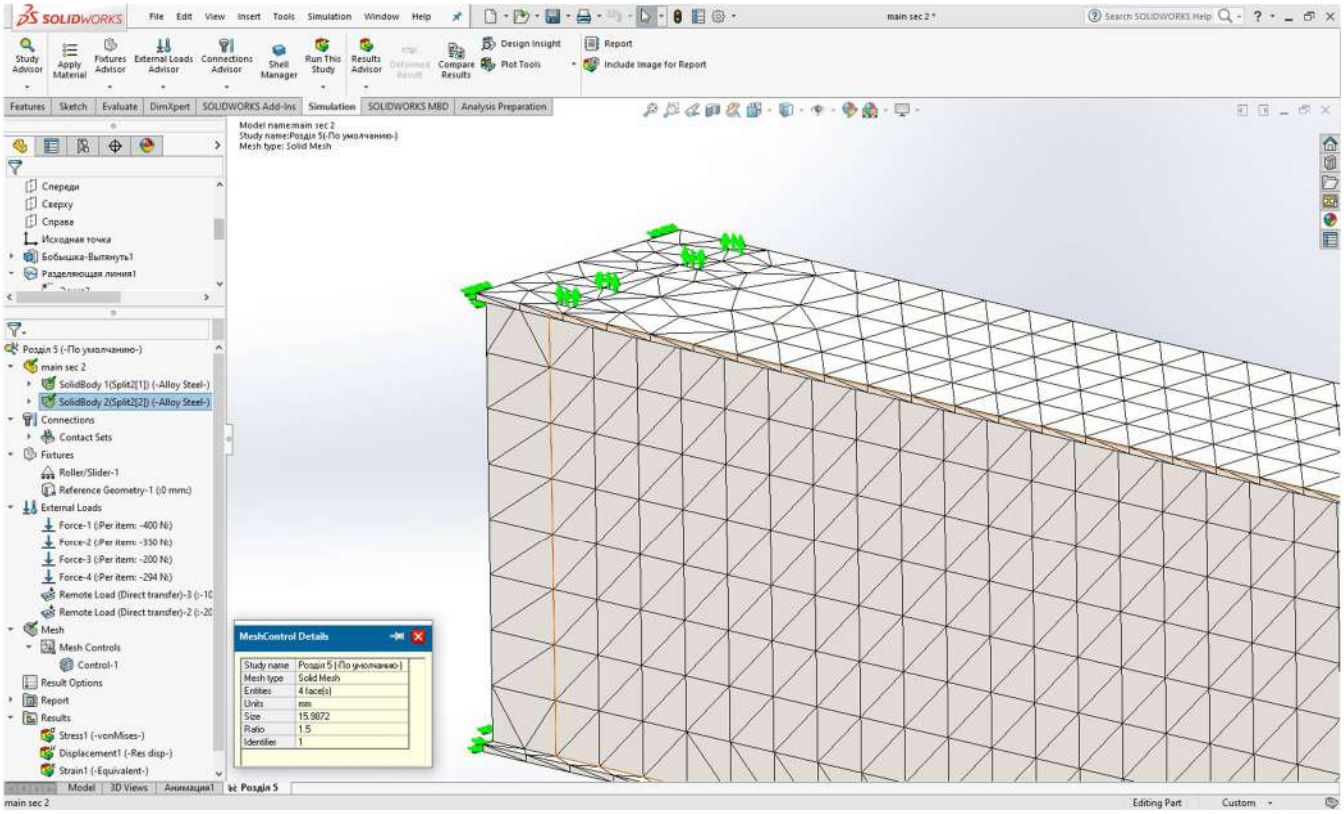


Рисунок 5.4 – Побудова ущільненої сітки під місця контакту між секціями

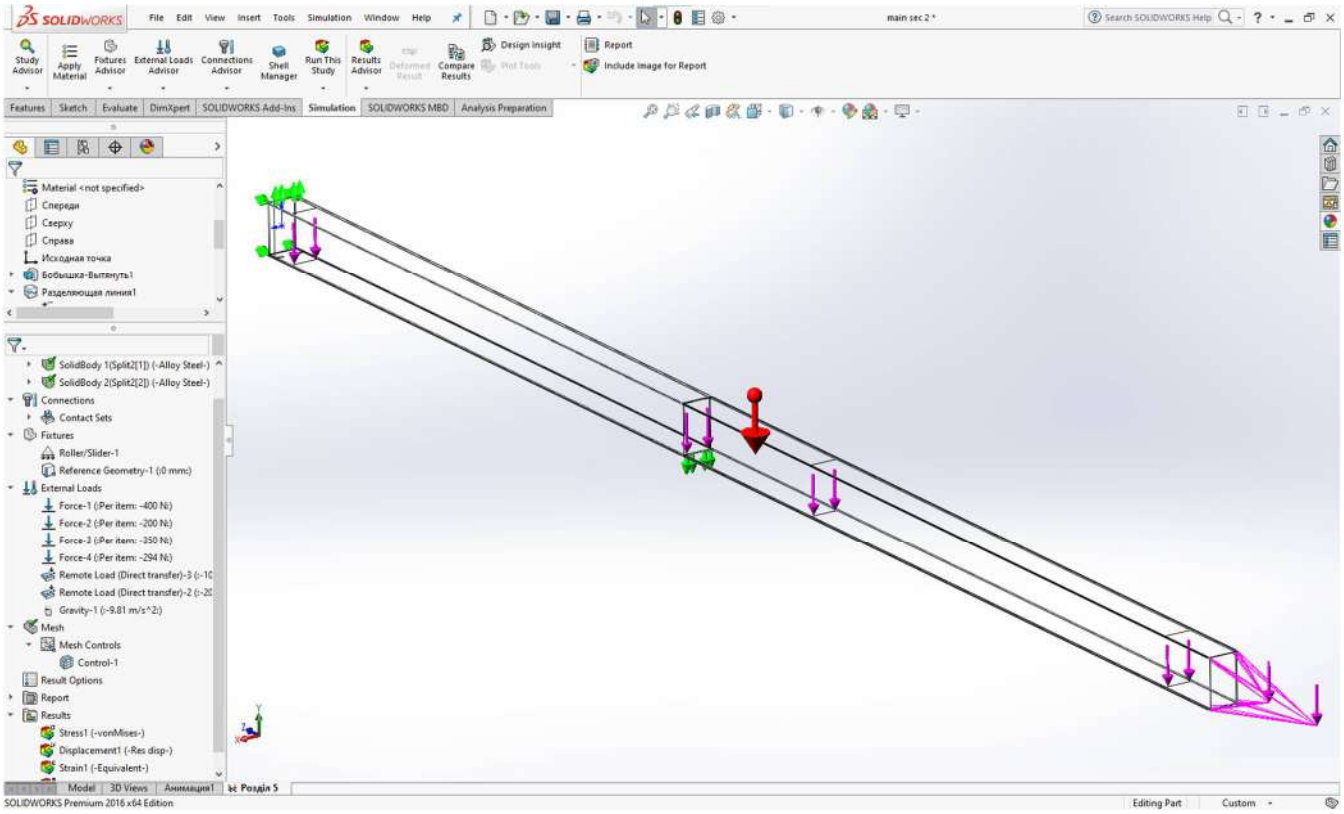


Рисунок 5.5 – В’язі головної секції

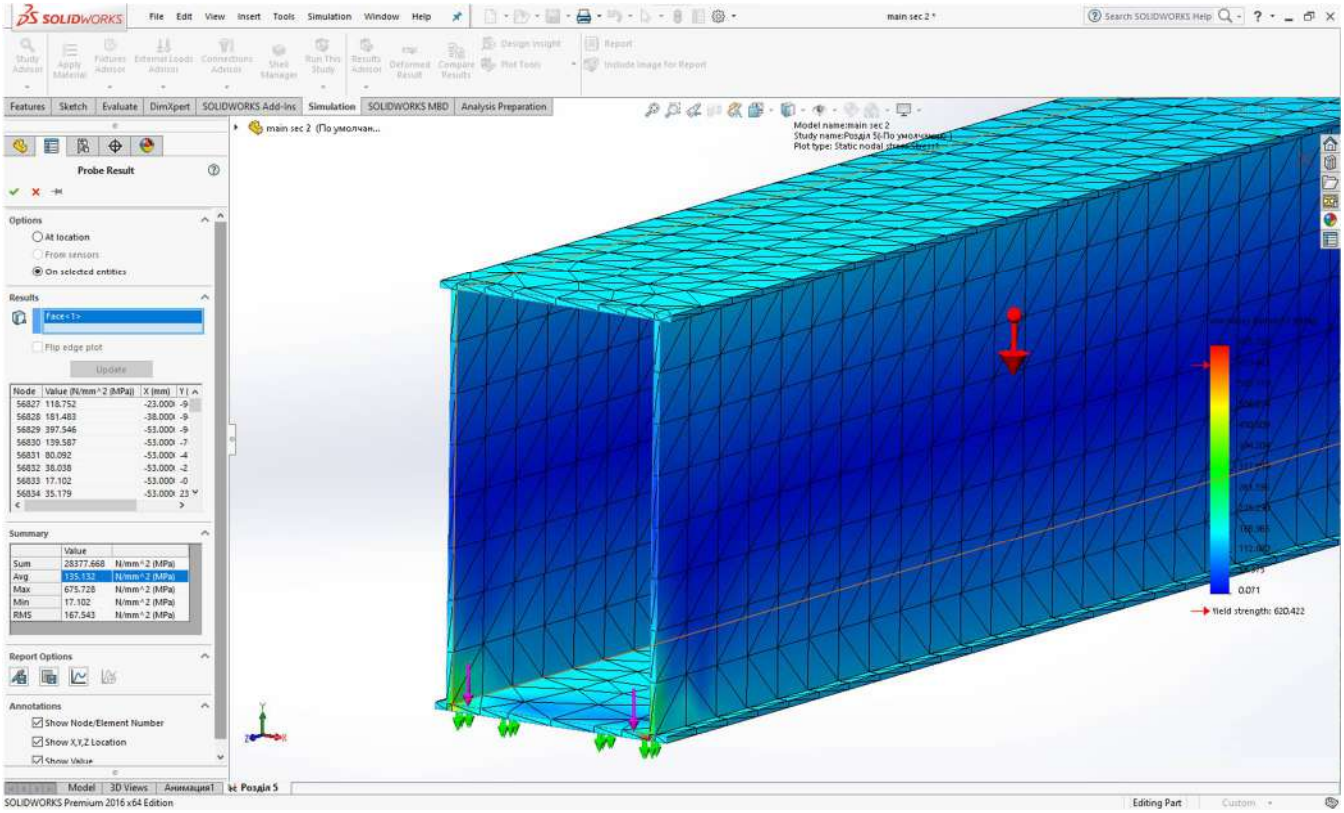


Рисунок 5.6 – Середні напруження в розрахунковому перетині головної секції

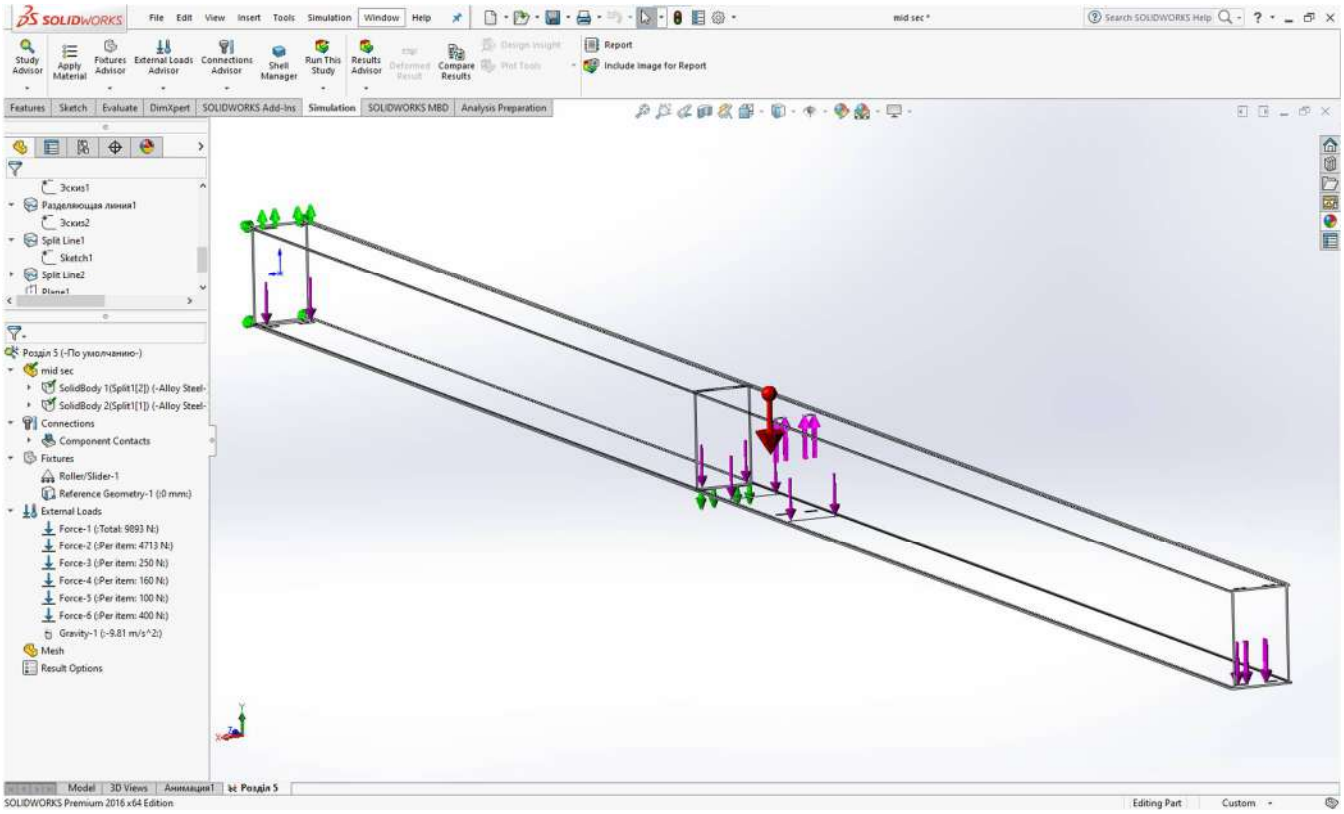


Рисунок 5.7 – В’язі середньої секції

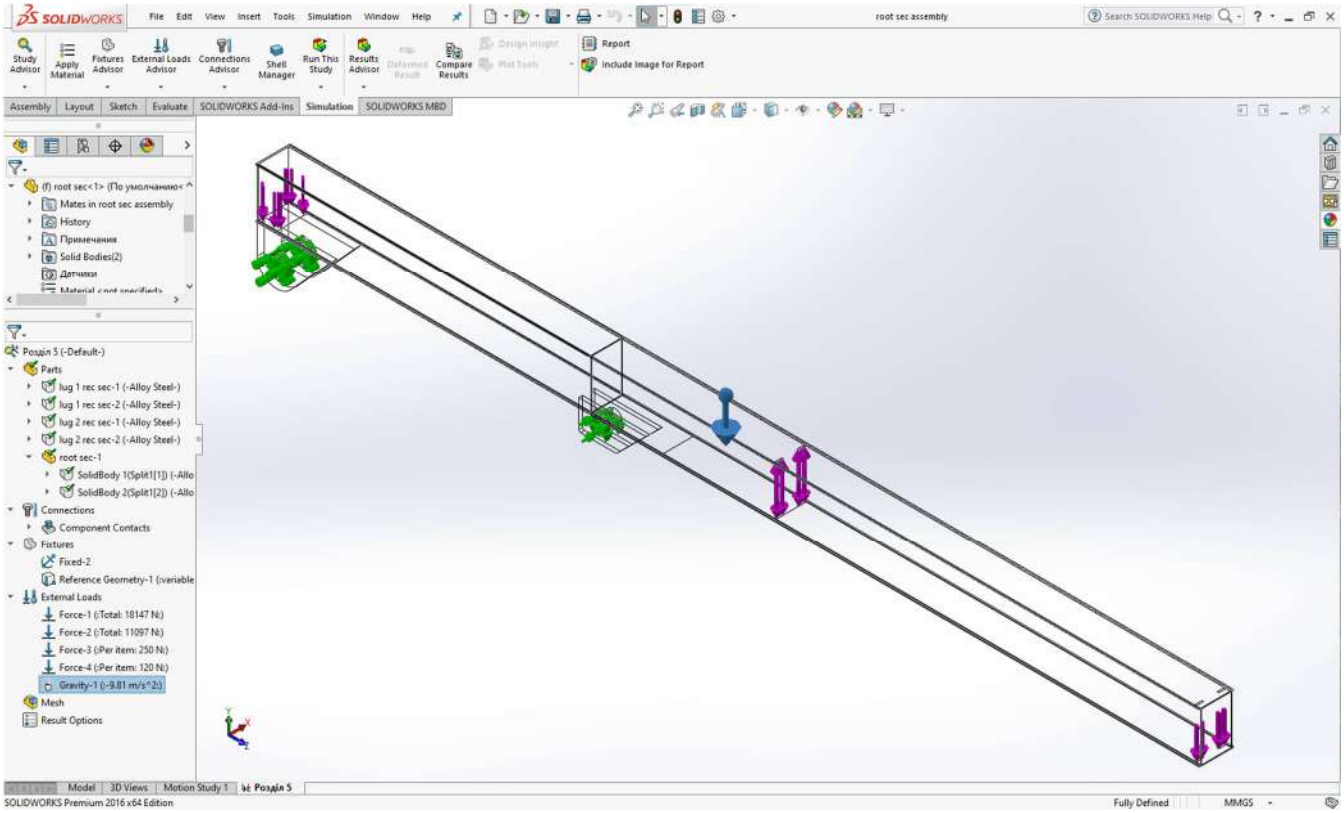


Рисунок 5.8 – В’язі кореневої секції

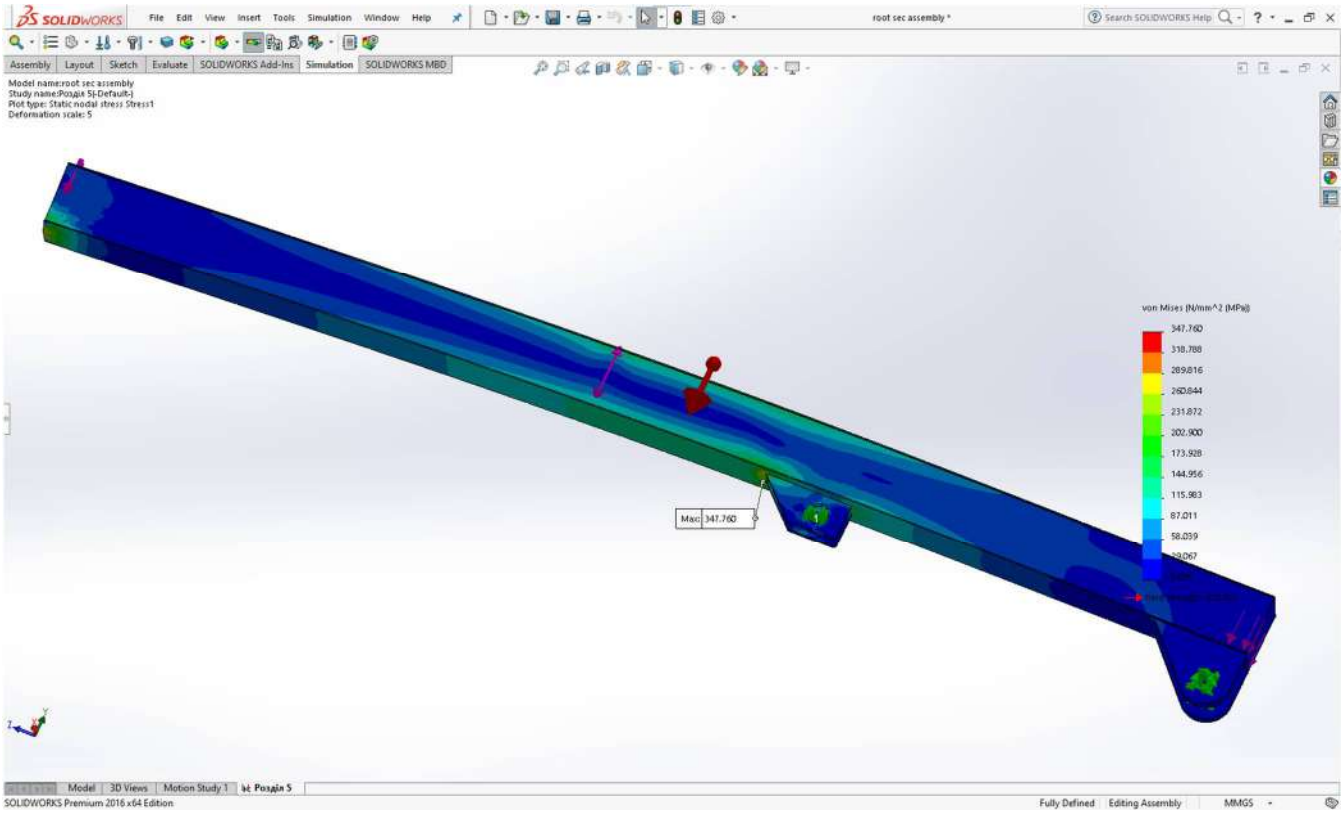


Рисунок 5.9 – Розподіл напружень в кореневій секції

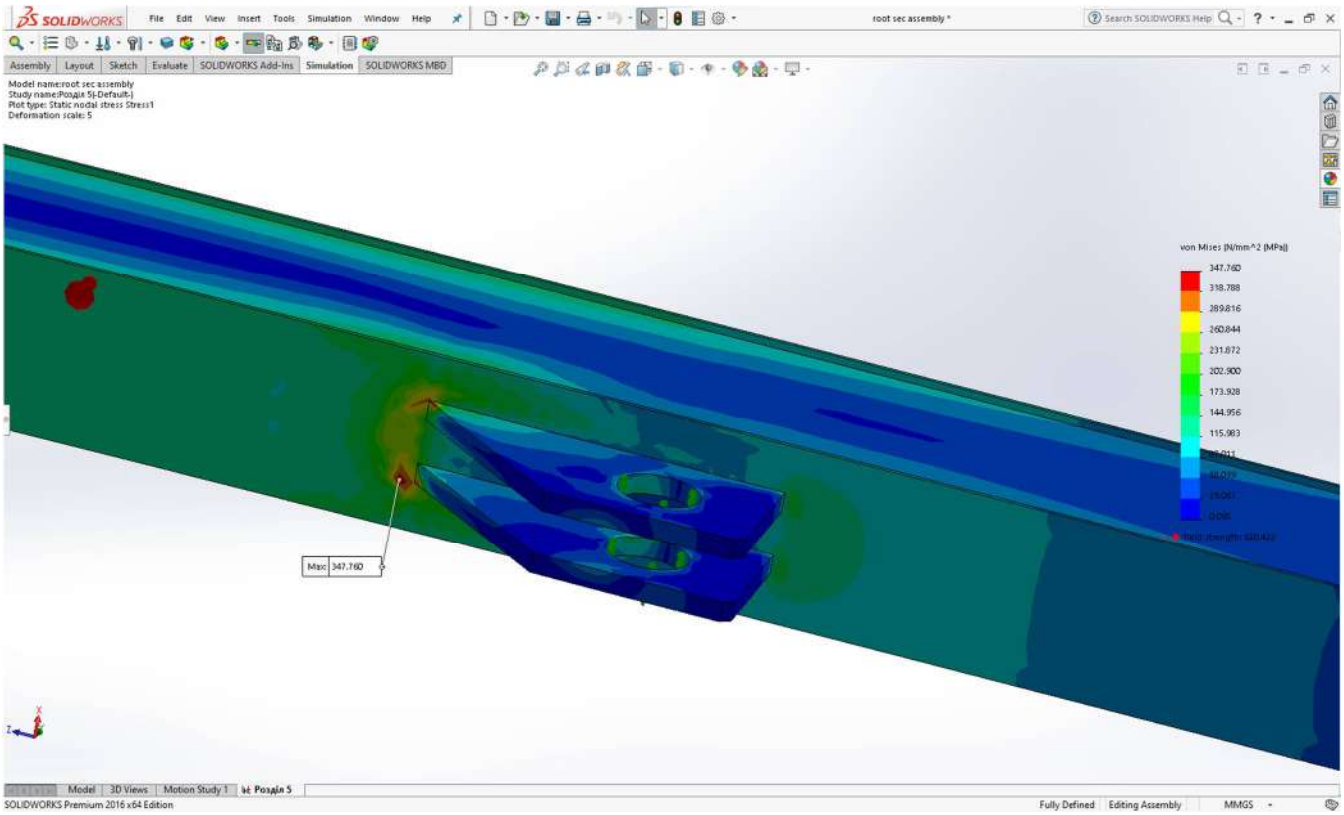


Рисунок 5.10 – Пікові напруження в кореневій секції (347 МПа)

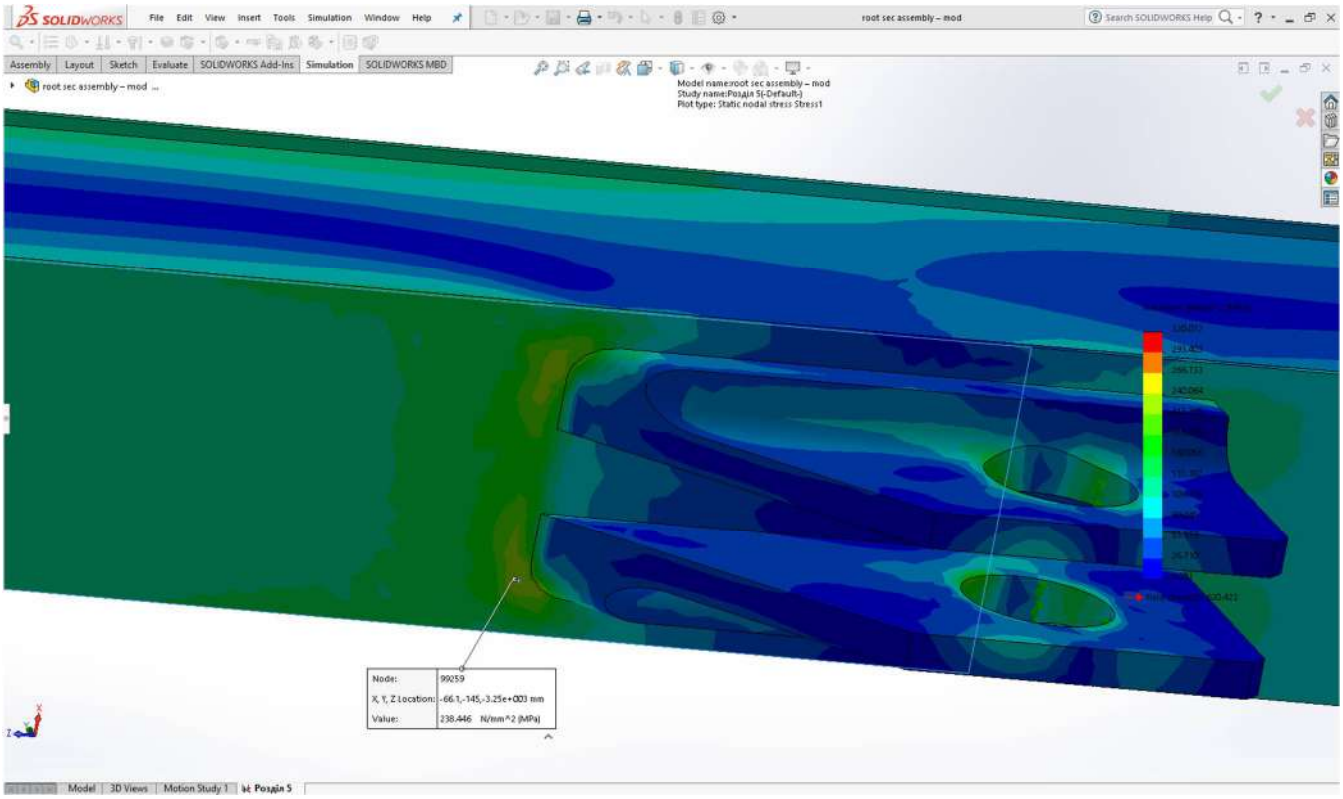


Рисунок 5.11 – Напруження в концентраторі в кореневій секції з видозміненою провушиною (238 МПа)

Порівняння напружень проводимо за IV енергетичною теорією міцності (von Mises).

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку напружень від дії опорних елементів МКЕ

Секція (точка)	Нормальні напруження σ, МПа, визначені методами:			Похибка, %	Прогин консолі max, мм
	опору матеріалів (аналітично)	кінцевих елементів (Solidworks)	допустимі $[\sigma_{зг}]$		
Головна (т. 5)	139,16	135	260	3	13,368
Середня (т. 9)	158,53	171		8	17,202
Коренева (т. 12)	137,97	147		6,5	11,891

Як видно з рисунку 5.9, коренева секція біля провушин має помітне підвищення напружень, чому причиною є концентратор напружень – з'єднання поясу секції та провушини. Від такого з'єднання не позбавитись з огляду на високу

технологічність зварних з’єднань, але ось ряд рішень, що дозволяють знизити напруження в цій області:

- збільшення товщини листа провушини, але лише в місці прилягання до поясу з 22 до 51 мм
- одночасне введення радіусу переходу 30 мм для утвореної сходинки для уникнення концентрації напружень в місці переходу.

Це показало вирівнювання напружень в області, що розглядається, але пікові напруження перемістилися на гостру похилу грань провушини, то ж було зроблене заокруглення для цієї грані. Отримані епюри навантажень продемонстровані на рисунку 5.10 видно, що пікові напруження в 347 МПа було зменшено до 238 МПа. Порівняння двох варіацій провушин показано на рисунку 5.12.

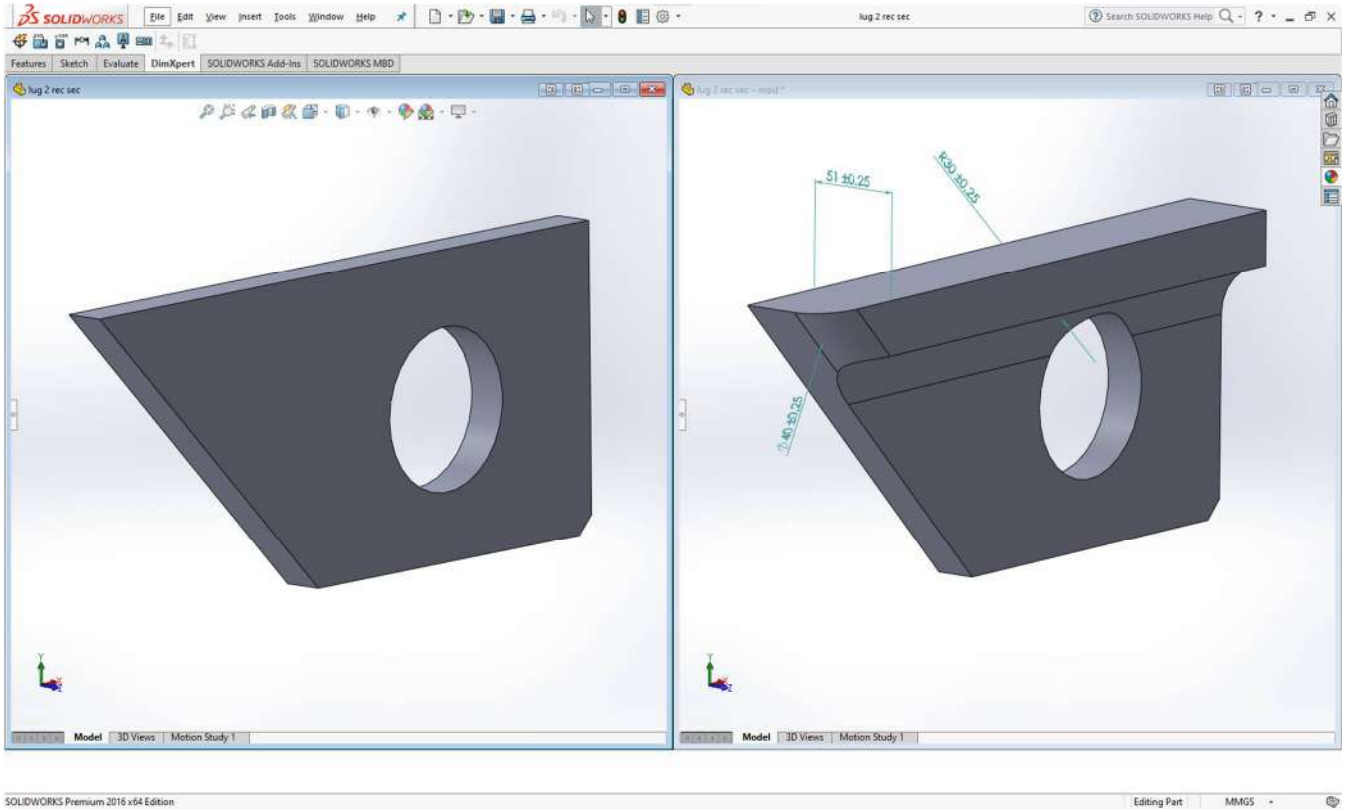


Рисунок 5.12 – Порівняння двох версій провушин

Середня похибка по таблиці 5.2 складає 5,8%. Отже, можна зробити висновок, що розрахунки як методом опору матеріалів, так і методом кінцевих елементів досить достовірні, оскільки значення відрізняються не суттєво. Аналізуючи розподіл епюр напружень, можна зробити деякі висновки:

- в кореневій секцій виявлена концентрація напружень в місті з'єднання провушини гідроциліндру підіймання стріли та нижнього поясу. Саме перехід провушини до поясу слугує концентратором. Це явище підтверджується також при визначенні напружень за III енергетичною теорією міцності (3rd principal *S3*) та інтенсивністю напружень (Intensity *SINT*). Тому необхідно приділити особливу увагу при контролі якості зварного з'єднання провушини із поясом. Недовари та прожоги не допускаються. В провушині (кронштейні) кріплення стріли значні напруження не виникають.
- альтернативою вищезазначеним мірами може стати заміна провушини на запропоновану у рисунку 5.12, наприклад під час капітального ремонту.
- в середній секції особливих концентраторів напружень не має. Максимальні напруження природно виникають в нижньому поясі.
- в головній секції спостерігається концентрація напружень в зварному з'єднанні вертикальної стінки та нижнього поясу. Необхідно уникати можливості кріплення внутрішнього гідрообладнання в цьому перерізі (перехідна зона стискаючих напружень до розтягуючих), щоб не викликати додаткових концентрацій напружень.

В якості нематеріального експерименту з математичними моделями стріл було розглянуто потенційну заміну прямокутного перетину А на овоїдний перетин К, на прикладі кореневої стріли з характерними для неї провушини кріплення гідроциліндра із розрахунковою схемою застосованою раніше по цьому підрозділу.

Для наочності порівняння в результатах Solidworks Simulation саме стріл, без провушин, було створено видозмінену епюру IV енергетичної теорії міцності (von Mises). Видозмінення полягає у тому, що напруження менше 100 МПа було пофарбовано в один колір (рожевий), а також встановлено для епюр обох стріл верхню межу в 350 МПа (максимальне точкове напруження прямокутної стріли), хоча у овоїдної стріли (не враховуючи провушин) максимальні напруження сягли

лише 172 МПа. Такі заходи дали змогу візуально інтуїтивно порівняти дві стріли, епюри відображені на рисунках 5.13 – 5.18.

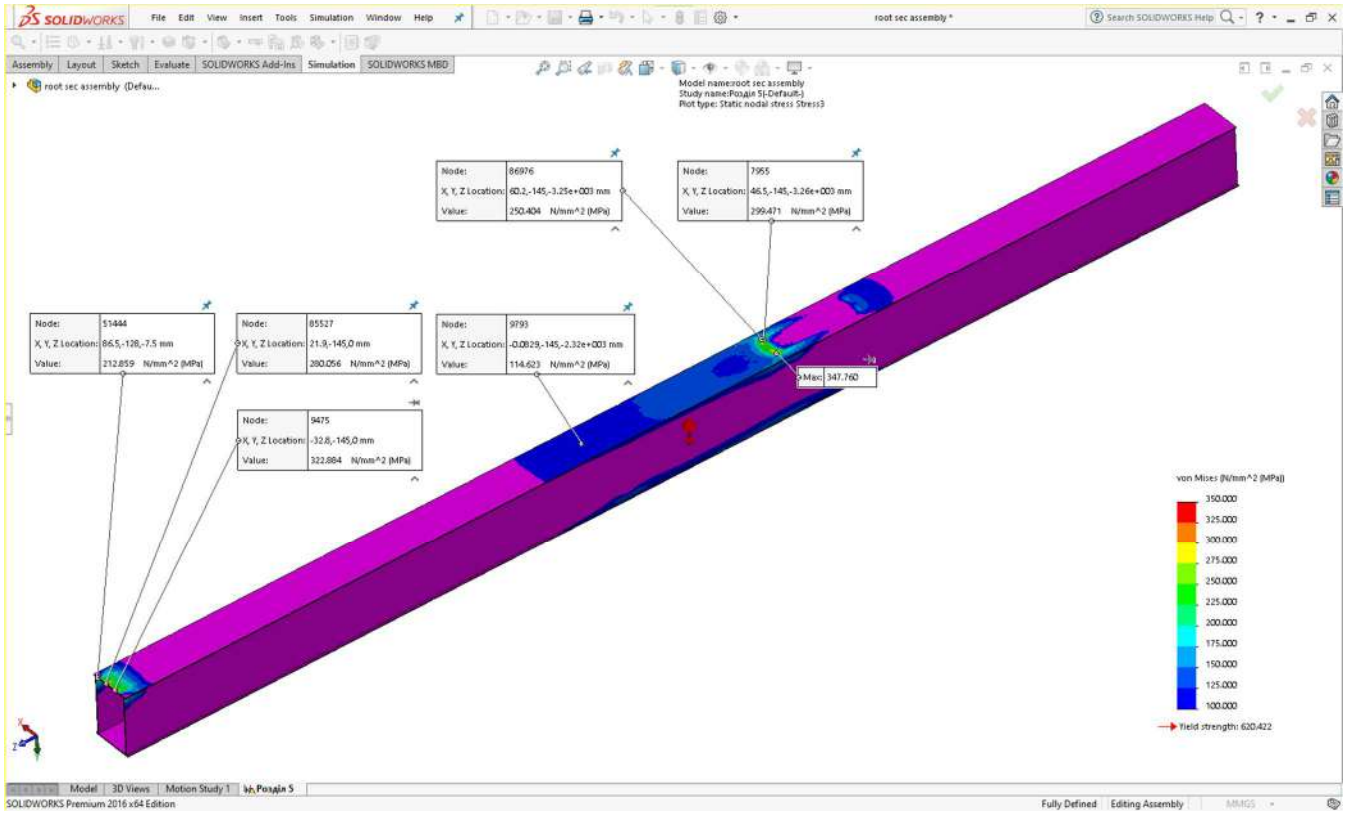


Рисунок 5.13 – Напруження кореневої секції стріли прямокутного перетину в діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх).

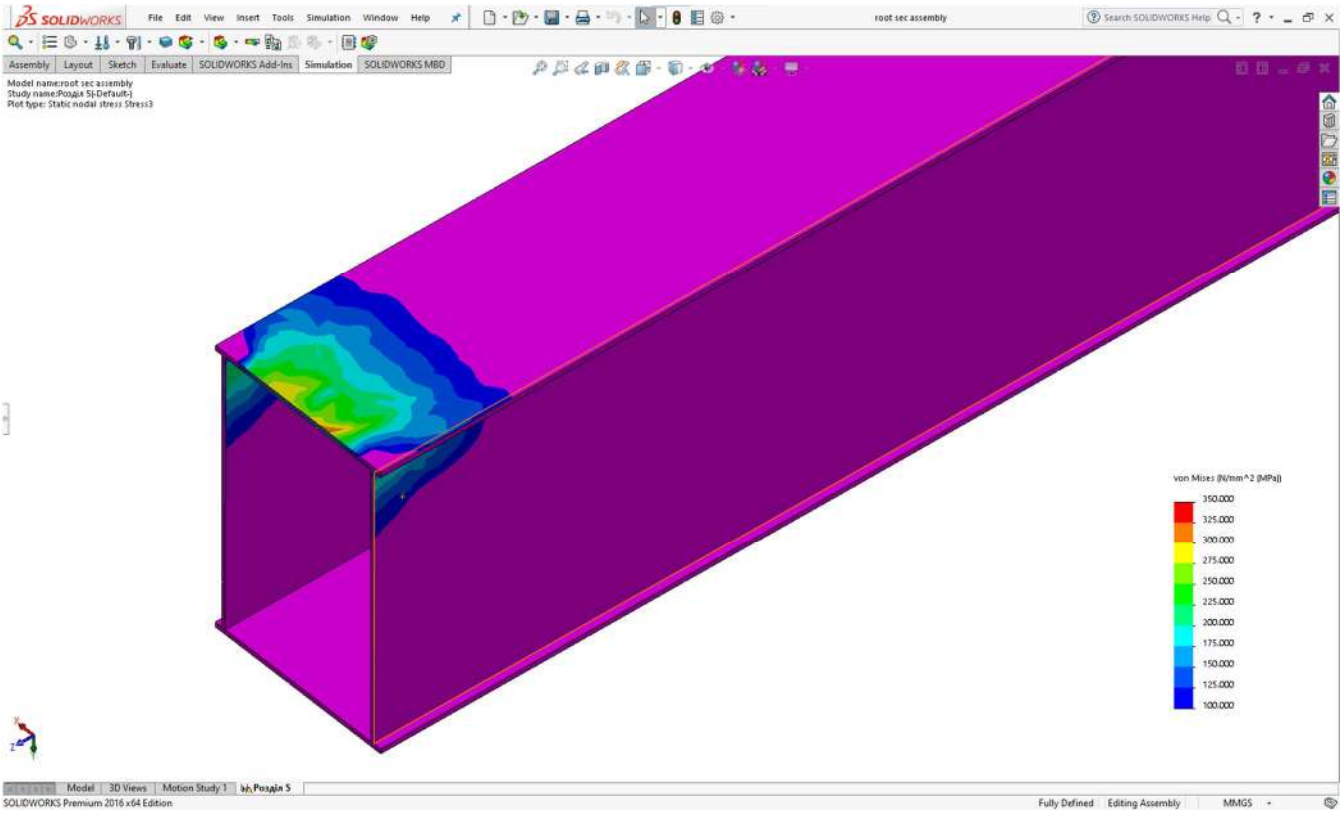


Рисунок 5.14 – Напруження кореневої секції стріли прямокутного перетину в діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх), край біля висування середньої секції.

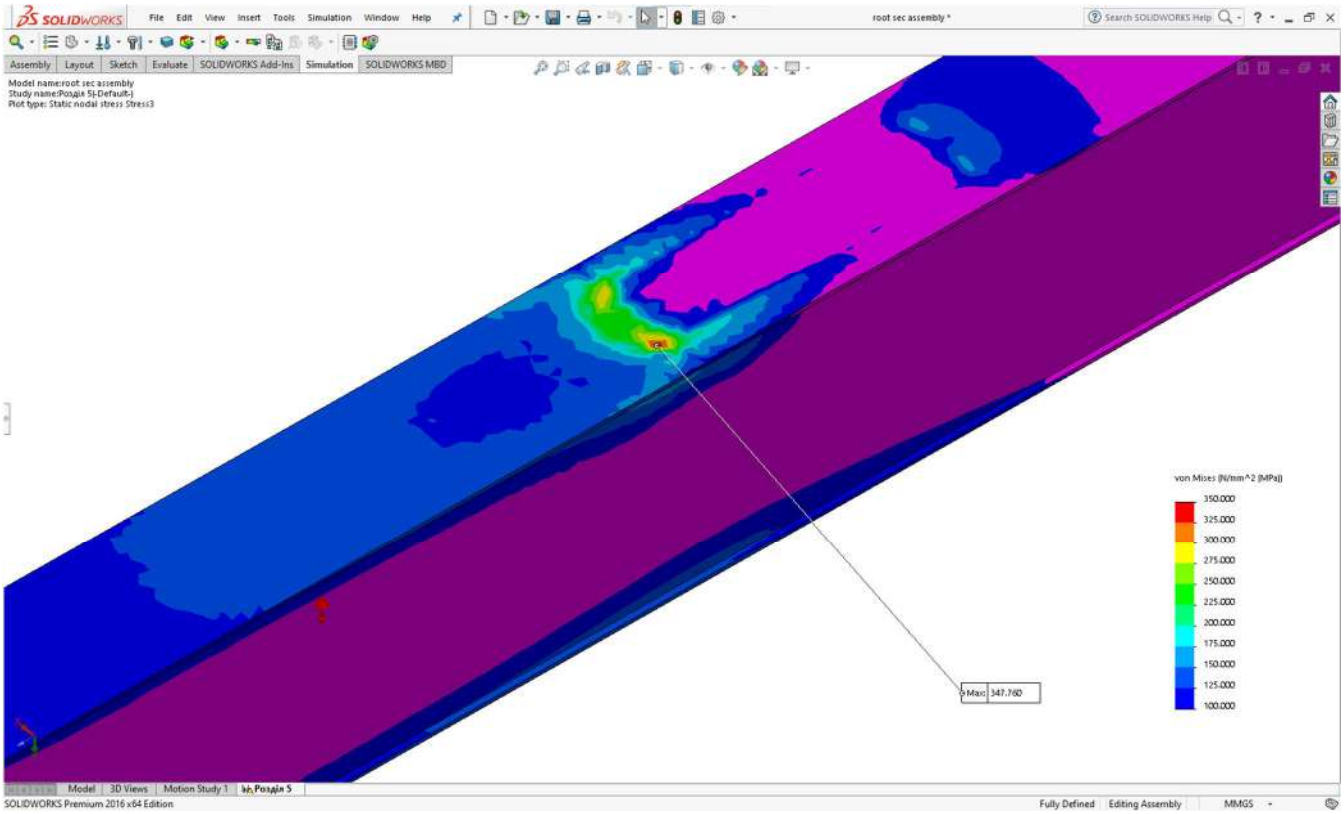


Рисунок 5.15 – Напруження кореневої секції стріли прямокутного перетину в

діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх), біля центральної провушини.

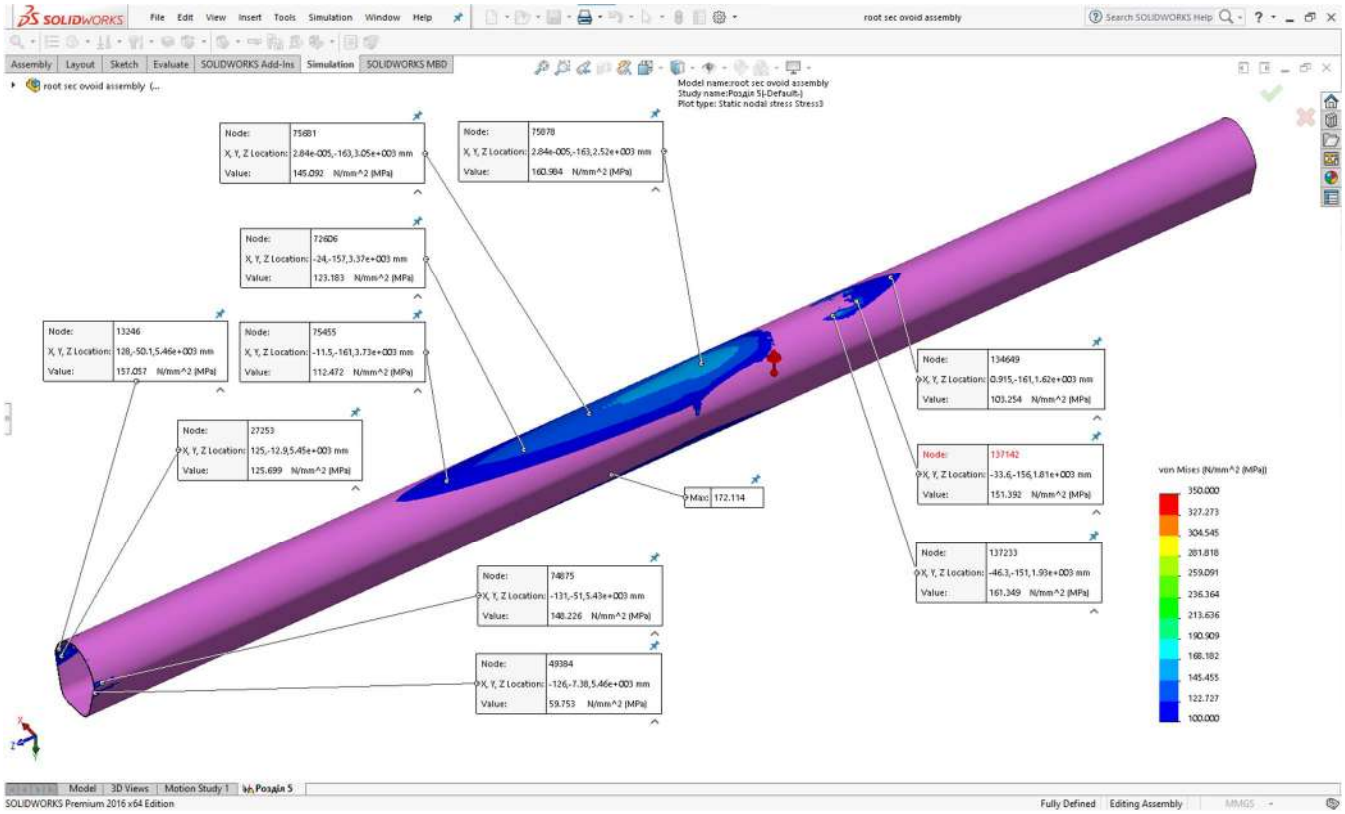


Рисунок 5.16 – Напруження кореневої секції стріли овоїдного перетину в діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх).

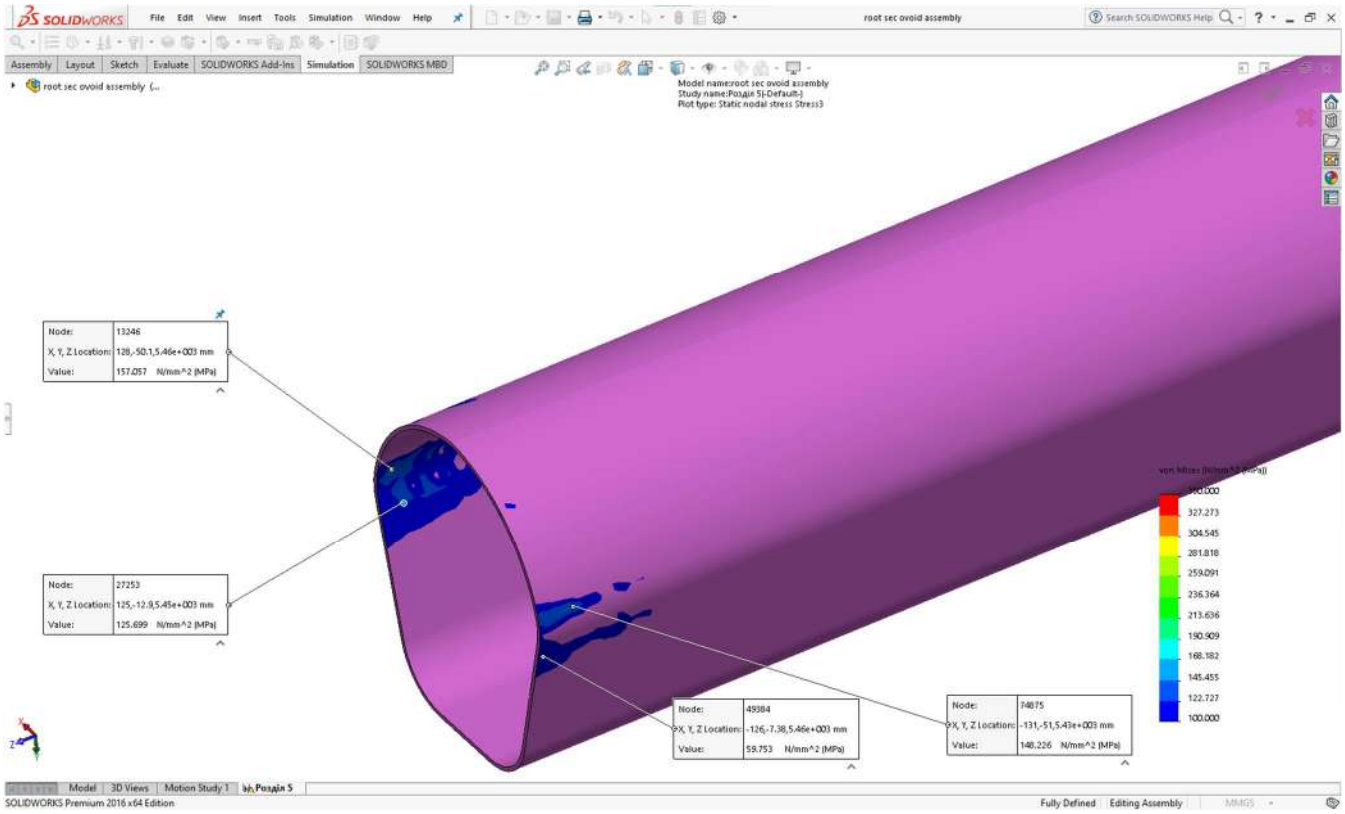


Рисунок 5.17 – Напруження кореневої секції стріли овоїдного перетину в діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх), край біля висування середньої секції.

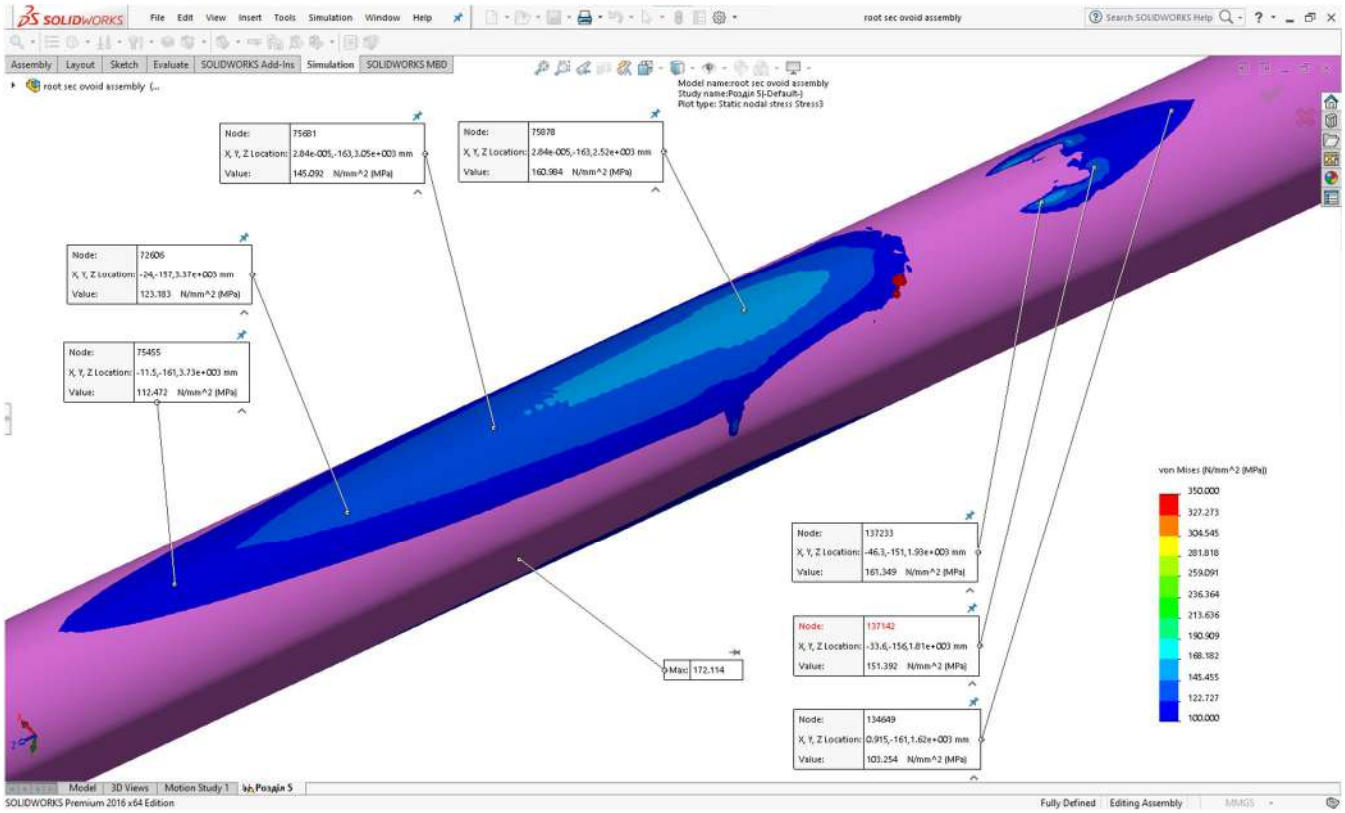


Рисунок 5.18 – Напруження кореневої секції стріли прямокутного перетину в діапазоні 100-350 МПа. Перегорнутий вид (знизу-вверх), біля центральної провушини.

Як видно на рисунках 5.13 – 5.18, порівнюючи два перетини, площа областей менше 100 МПа майже однакова, проте напруження на овоїдному профілі не підіймаються вище 172 МПа, корім рожевої менше 100 МПа, усі епюри вийшли від синього до темно-блакитного. При розгляді прямокутних перегинів видно, що присутні багато ділянок від 200 до 350 МПа.

Частково напружені зони, насправді, будуть підсилені комірами країв секцій, які не зображені на прямокутній та овоїдний стрілі та не були враховані розрахункам, проте, очевидно, порівнюючи проби напружень, овоїдний профіль потребує менше такого підсилення аніж прямокутний – 125-157 МПа проти 200-322 МПа. Отже при овоїдному профілі можливо застосувати легший комір.

Але по областям біля центральної провушини видно, що овоїдний профіль краще сприйняв навантаження – де у нього вийшла область приблизно в 160 МПа з піком у 172, у прямокутного профіля вийшло 225-300 з піком у 350 МПа.

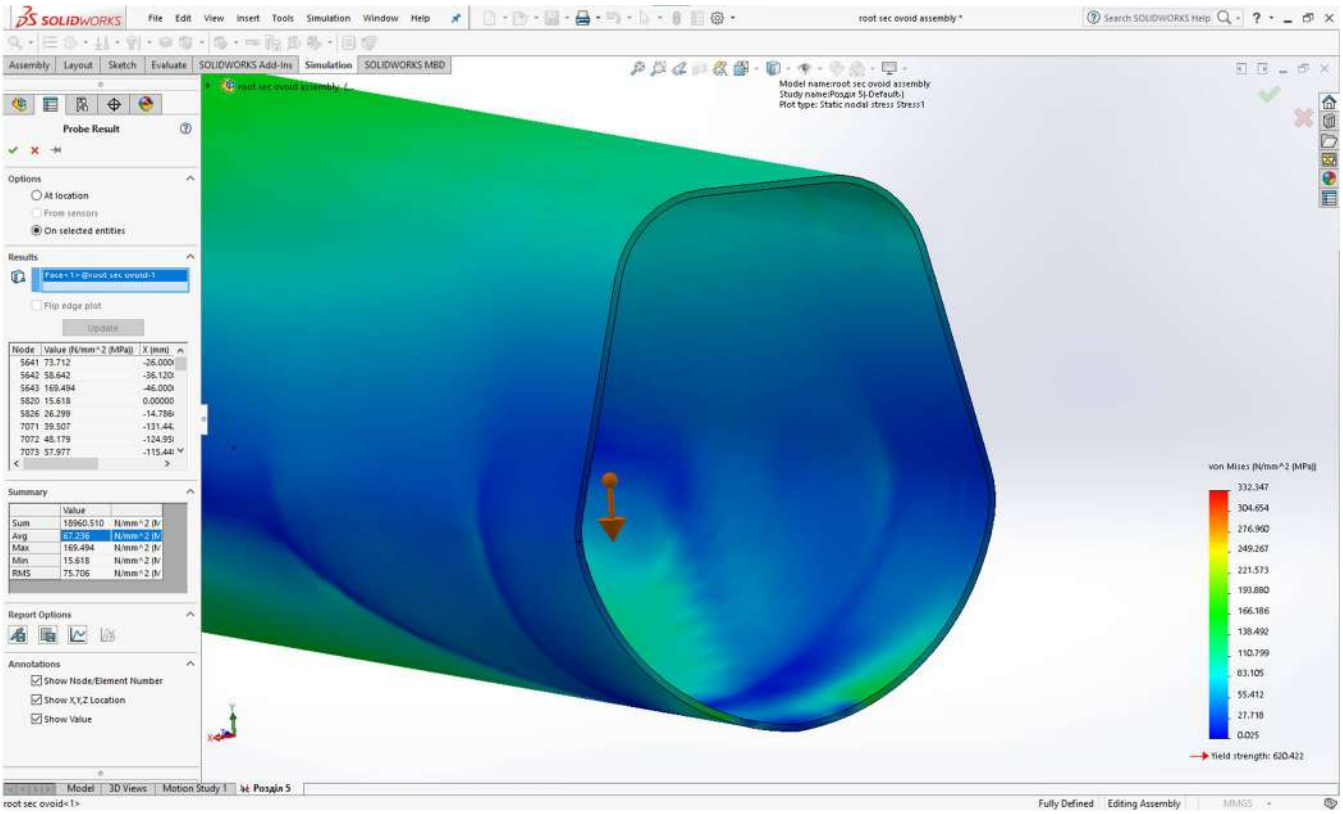


Рисунок 5.19 – Середні напруження в небезпечному перетині кореневої секції овоїдного профілю

Порівнюючи середні напруження в двох однакових місцях для обох профілях, небезпечних перетинах зафіксовано зниження середніх напружень в 10% на користь овоїдного профілю. Небезпечний перетин, місце напроти кріплення гідроциліндра, показане у вигляді розсіченої стріли представлене на рисунку 5.19.

Такі результати в сукупності із вказаним у таблиці 5.2 максимальним середнім напруженням наштовхують на думки про можливість зниження маси стріли за рахунок зменшення її товщини стінки.

Порівнюючи епюри напружень не стріл, а їх провушин встановлено перевищення пікових напружень для провушини овоїдного профілю порівняно з прямокутним – дивись рисунки 5.20 та 5.21. Видно, що для кронштейнів обох профілів в основному напруження не перевищують 135 МПа, проте кронштейн овоїдної секції має різке підвищення до 322 МПа, що є суттєвим концентратором який може посприяти деформації отвору чи навіть появи тріщин та руйнуванню. Але той факт, що кронштейн другорядний відносно стріли та його відносно тієї ж стріли невеликий розмір надає варіативності в розв’язанні такої проблеми – сам кронштейн можливо виконати із іншої, міцнішої сталі, для якої такі напруження не стануть критичними чи піддати отвір цементації, але самим технологічним буде застосування в отворі запресованих гільз із легованої сталі.

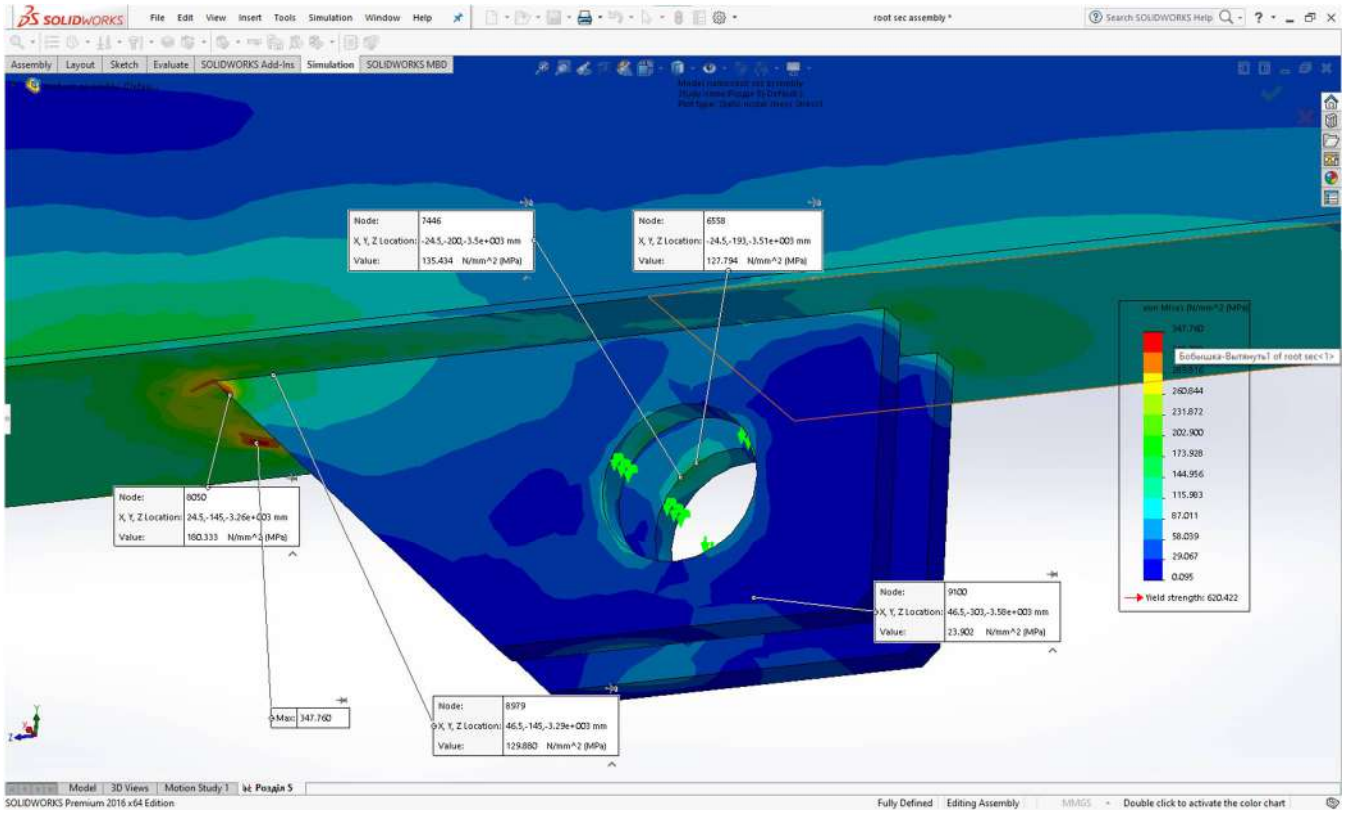


Рисунок 5.20 – Напруження в кронштейні кореневої секції прямокутного профілю

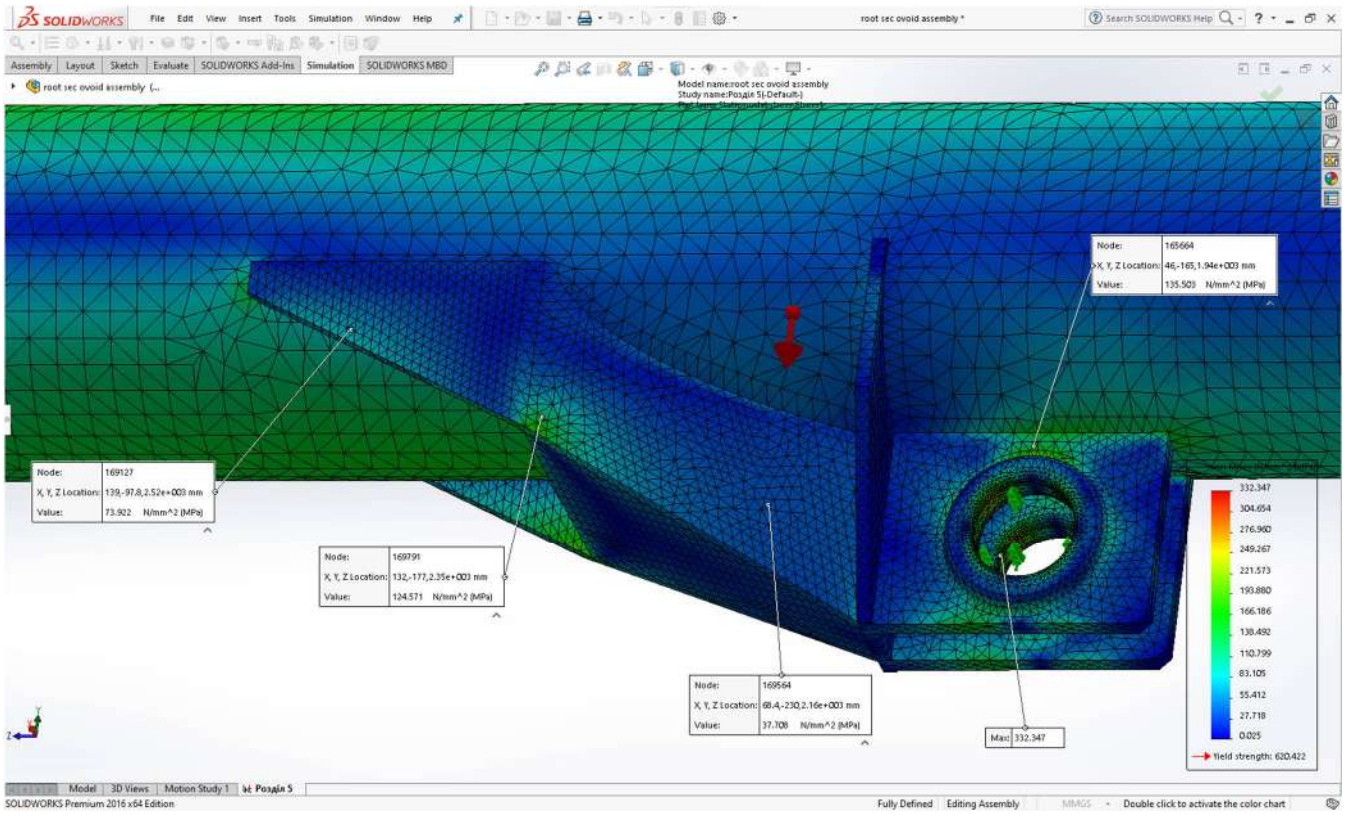


Рисунок 5.21 – Напруження в кронштейні кореневої секції овоїдного профілю

5.5. Визначення напружень в опорних елементах секцій стріли

Згідно дослідження [3], напруження в опорних елементах секцій стріли можуть перевищувати напруження від балкового вигину стріли, а також доходити до границі текучості. Отже, існує ймовірність пластичних деформацій в вищезазначених зонах. Розрахунок за дослідження підтвердив факт виникнення напружень, що дорівнюють або більше напружень від балкового вигину стріли.

Метою досліджень є визначення напружень в опорних елементах та порівняння з результатами, отриманими при аналітичному розрахунку (розділ 4), тобто, виявити, чи можна використовувати формули для визначення напружень в опорних зонах секцій, запропонованих авторами [3].

Для розрахунку з кожної секції виділяємо відсік довжиною (3,2...3,5)·В, так як прогини та напруження від навантаження Рр на великій довжині практично дорівнюють нулю (це підтвердиться при розрахунку). При такій довжині моделі напруження від її загального згину як балки, навантаженої силами $\mathbf{P_p}$ не перевищують 3% від найбільших напружень, що викликані місцевою завантаженістю, що дозволяє отримати практично чистий напружено-деформований стан.

На відміну від досліджень [3] розрахунковий відсік за причиною симетрії не розділяється на 4 частини, а розраховується в цілому. це обумовлюється наявністю порівняно потужної комп’ютерної техніки.

Приклад розрахункового відсіку на рис. 5.22. На розрахунок відсіків розповсюджуються ті ж дані та методика, що й для секцій в цілому. Приклад в’язів показано на рисунку 5.23.

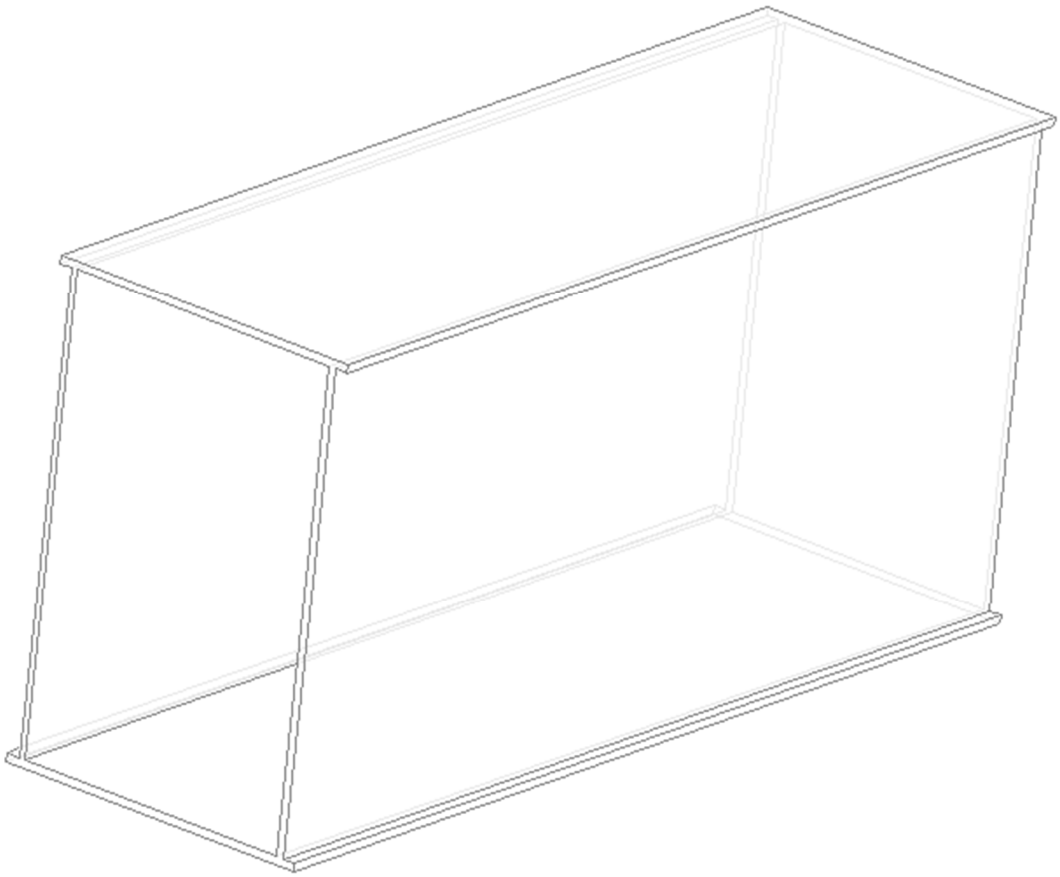


Рисунок 5.22 – Дослідна модель відсіку

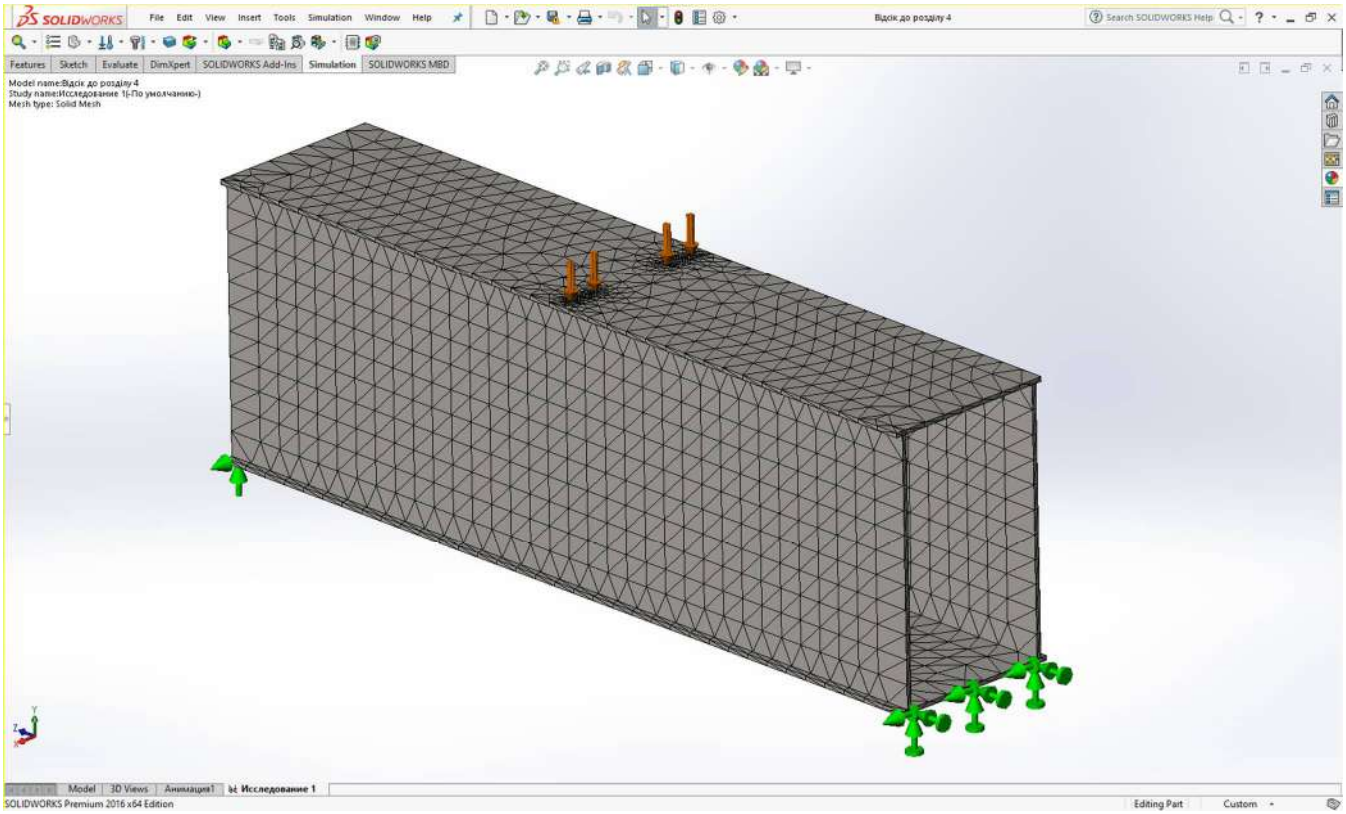


Рисунок 5.23 – Сітка та схема в'язів середньої секції, т.9

Вихідні дані до розрахунку, характер в'язів та навантажень, деякі статистичні дані процесів розрахунку зводимо в табл. 5.3, результати розрахунку напружень та деформацій в табл. 5.4, порівняльна характеристика результатів розрахунку в табл. 5.5.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані до розрахунку напружень від дії опорних елементів МКЕ

Ділянка та дослідна точка	Тип КЕ, його розмір та рівень розміру (SmartSize)	Кількість		Характеристика в'язів	Характер дії та величина навантаження
		вузлів	елементів		
Коренева 600mm т.10	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	70800	210164	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на верхній пояс зсередини F=11097 Н
Коренева 600mm т.9	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	70800	210164	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на нижній пояс зсередини F=18147 Н
Середня 500mm т.10	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	58544	173419	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на верхній пояс ззовні F=11097 Н
Середня 500mm т.9	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	58544	173419	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не	Навантаження на нижній пояс ззовні F=18147 Н

				дозволяються)	
Середня 500mm т.7	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	58544	173419	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на верхній пояс зсередини F=4713 Н
Середня 500mm т.5	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	58544	173419	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на нижній пояс зсередини F=9893 Н
Головна 400mm т.7	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	38006	113042	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на верхній пояс ззовні F=4713 Н
Головна 400mm т.5	Standard mesh Element size 24 мм Tolerance 1,2 мм	38006	113042	• Закріплення торця зліва (дозволяється лише повздовжнє переміщення) • Закріплення торця справа (переміщення не дозволяються)	Навантаження на нижній пояс ззовні F=9893 Н

Таблиця 5.4 – Результати розрахунку напружень від дії опорних елементів МКЕ

Модель ділянки та дослідний переріз		Напруження, МПа								Дефор-мація, мм
		von Mises	Intensity SINT	σ_x SX	σ_y SY	σ_z SZ	1st principal S1	2nd principal S2	3rd principal S3	
Коренева 600mm т.10	min	0,154	0,165	-32,5	-13,7	-107	-115	-106	-116	0,371
	max	175	170	58,2	15,3	38,8	118	112	53,2	
Коренева 600mm	min	0,166	0,191	-79	-42,7	-59,3	-17,6	-53,7	-25	0,436

т.9	max	86,1	93,5	79	44,9	98,5	101	54,2	131	
Середня 500mm	min	0,086	0,093	-70,8	-20,7	-97,7	-55	-96,1	-122	0,381
т.10	max	134	144	73,3	54,9	83,6	91,2	72,1	19,2	
Середня 500mm	min	0,330	0,381	-147	-55,3	-180	-61,3	-138	-189	0,186
т.9	max	139	152	95,3	41,9	133	133	96,9	118	
Середня 500mm	min	0,071	0,082	-36,6	-13,3	-52,8	-22,2	-45,6	-63,7	0,0458
т.7	max	80,5	83,4	28,3	12,1	34,2	36	28	33,7	
Середня 500mm	min	0,302	0,348	-108	-11,3	-110	-36,5	-91,3	-69,9	0,603
т.5	max	166	198	95,9	19,9	113	172	89	88,7	
Головна 400mm	min	0,027	0,032	-31,2	-73,4	-34,6	-13,6	-30,5	-73,7	0,118
т.7	max	60,6	63,2	24,3	12,9	34,3	36	22,6	10,5	
Головна 400mm	min	0,180	0,208	-65,5	-14,8	-78	-41,3	-64,8	-151	0,0676
т.5	max	112	119	50,3	19,6	48	52,7	46,5	10,7	

Для порівняння отриманих результатів розрахунку необхідно виконати співставлення їх до напружень, визначених аналітично. Для співставлення необхідно проаналізувати характер розподілу ізоліній напружень в зонах концентрації напружень відповідно для поясів та вертикальних стінок. Поперечні та поздовжні напруження згину в поясах та вертикальних стінках - за відповідними напрямками вісей (*X, Y, Z*). Приведені напруження порівнюємо з III механічною теорією міцності, оскільки максимальне співпадання результатів розрахунку сталося саме з нею. Результати співставлення зводимо в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Співставлення результатів розрахунку місцевих напружень

Переріз та спосіб навантаження		Напруження, ***МПа***					
		$\sigma^{n}_{имх}$	$\sigma^{c}_{имz}$	$\sigma^{n}_{иму}$	$\sigma^{c}_{иму}$	$\sigma^{n}_{пр}$	$\sigma^{c}_{пр}$
		SX	***SZ***	***SY***	***SY***	***S3***	***S3***
		Поперечні напруження згину в поясі	Поперечні напруження згину вертикальної стінки	Поздовжні напруження згину в поясі	Поздовжні напруження згину в вертикальній стінці	Приведені напруження для поясів	Приведені напруження для вертикальної стінки
Г-Г при навантаженні	Коренева 600mm	53	69	20	16	46,4	90

зсередини:	т.10	58,2	81,9	10,4	15,3	53,2	116
В-В при навантаженні зсередини:	Коренева 600mm т.9	100	134	40	31	87,2	162
		79	92,3	44,9	27	65,7	131
Г-Г при навантаженні ззовні:	Середня 500mm т.10	67,5	118	24	32	59,3	139,5
		70,8	77,6	20,7	54,9	57,7	122
В-В при навантаженні ззовні:	Середня 500mm т.9	135,5	181	51	49	118,5	207,5
		147	180	41,9	55,3	95,2	189
Б-Б при навантаженні зсередини:	Середня 500mm т.7	26,6	41	10	10	23,3	52,1
		36,6	43,2	12,1	13,3	33,7	63,7
А-А при навантаженні зсередини:	Середня 500mm т.5	87,6	98	35	23	76,4	118
		95,9	88	31,3	19,9	69,9	88,7
Б-Б при навантаженні ззовні:	Головна 400mm т.7	35	52	12	14	30,8	70,3
		31,2	27	12,9	23,4	36,3	73,7
А-А при навантаженні ззовні:	Головна 400mm т.5	94	103	34	28	82,4	136,4
		75,5	78	19,6	19,8	79,2	151

Для оцінки достовірності результатів визначимо похибку розрахунку (мається на увазі різниці отриманих значень напружень) відповідно для кожної моделі. Значення відносних похибок зводимо в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Відносні похибки розрахунків

Переріз та спосіб навантаження		Відносна похибка, %						
		$\sigma^{n}_{имx}$	$\sigma^{c}_{имz}$	$\sigma^{n}_{имy}$	$\sigma^{c}_{имy}$	$\sigma^{n}_{пр}$	$\sigma^{c}_{пр}$	Середнє значення для перерізу
		SX	***SZ***	***SY***	***SY***	***S3***	***S3***	
		Поперечні напруження згину в поясі	Поперечні напруження згину вертикальної стінки	Поздовжні напруження згину в поясі	Поздовжні напруження згину в вертикальній стінці	Приведені напруження для поясів	Приведені напруження для вертикальної стінки	
Г-Г при навантаженні зсередини:	Коренева 600mm т.10	9,8	18,6	48	4,3	14,6	28,8	20,7
В-В при навантаженні зсередини:	Коренева 600mm т.9	21	31	12	13	24,6	19	22,9
Г-Г при навантаженні ззовні:	Середня 500mm т.10	4,8	34,2	13,7	71,5	3,0	12,5	23,3

В-В при навантаженні ззовні:	Середня 500mm т.9	8,5	0,5	17,8	12,8	10,5	8,9	9,8
Б-Б при навантаженні зсередини:	Середня 500mm т.7	37,6	5,3	21	33	44,6	22,2	27,2
А-А при навантаженні зсередини:	Середня 500mm т.5	9,5	10,2	10,5	13,5	1,4	24,8	11,6
Б-Б при навантаженні ззовні:	Головна 400mm т.7	10,8	48	7,5	67,1	17,8	4,8	24,8
А-А при навантаженні ззовні:	Головна 400mm т.5	19,6	24,3	42,3	29,2	3,8	10,7	21,6
Середнє значення по напруженням		14,7	22,5	21,6	34	14,8	14,8	20

Порівняння результатів розрахунку напружень від дій опорних елементів в секціях стріли виявило відносно достовірне співпадання результатів розрахунку за методикою [3], реалізованою в кінцево-елементній програмі "Solidworks 2016", та в кінцево-елементній програмі Solidworks 2016. Середня різниця значень складає 20%. Найбільш повно напружений стан в зонах дії опорних елементів характеризують приведені напруження. Середня різниця значень по приведеним напруженням складає 15% (14,8%). Отже, аналізуючи напружено-деформований стан по ізолініям, зробимо висновок:

- в усіх секціях незалежно від напрямку дії навантаження напруження концентруються в зоні розташування опорних елементів в місці з'єднання вертикальної стінки з поясом, тому рекомендується приділити особливу увагу при контролі зварних з'єднань.

РОЗДІЛ 6
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Результати розрахунку напружень від балкового вигину стріли свідчать про те, що металоконструкція спроектована з достатнім коефіцієнтом запасу міцності. Для усіх секцій коефіцієнт запасу не нижче допустимого 1,4, та перевищує його на 17-34%. Така різниця в напруженнях свідчить про раціональне використання матеріалу. При розрахунку овоїдного перетину замість прямокутного було виявлено, що він теж задовольняє коефіцієнту запасу, перевищує його на 18%. Застосування такого дозволяє знизити масу стріли за рахунок зменшення маси обладнання що знаходиться всередині стріли.
2. Розрахунки як методом опору матеріалів, так і методом кінцевих елементів чисельно співставляються, різниця результатів розрахунку складає ≈8%, що дозволяє стверджувати про достовірність розрахунку обома методами.
3. Потребує детального опрацювання на предмет достовірності результатів аналітичний розрахунок напружень в зварних з'єднаннях [9]. Розрахунок передбачає визначення дотичних напружень. Розрахунок в Solidworks стверджує, що в головній секції концентрація напружень відбувається саме в зварному з'єднанні. Напрям напружень – нормальний.
4. В кореневій секцій виявлена концентрація напружень в місті з'єднання провушини гідроциліндру підіймання стріли та нижнього поясу. Саме місце переходу провушини до поясу слугує концентратором. Це явище підтверджується також при визначенні напружень за III енергетичною теорією міцності (3rd principal *S3*) та інтенсивністю напружень (Intensity *SINT*). Виникнення такого роду концентрації напружень може супроводжуватися місцевою пружною деформацією в цій зоні, тобто місцевій втраті стійкості. На працездатність секції це особливо не вплине, але необхідно приділити особливу увагу при контролі якості зварного з'єднання провушини із поясом. Недовари та прожоги не допускаються. В провушині (кронштейні) кріплення стріли значні напруження не виникають.

При капітальному ремонті можливо застосувати провушину альтернативної форми замість стандартної.

В середній секції особливих концентраторів напружень не має. Максимальні напруження стиску природно виникають в нижньому поясі.

В головній секції спостерігається концентрація напружень в зварному з'єднанні вертикальної стінки та нижнього поясу. Необхідно уникати можливості кріплення внутрішнього гідравлічного обладнання в цьому перерізі (перехідна зона стискаючих напружень до розтягуючих), щоб не викликати додаткових концентрацій напружень.

5. На прикладі кореневої секції розглянута потенційна заміна прямокутного профілю А на овоїдний профіль К для майбутнього застосування його у автопідйомниках такої вантажопідйомності. Аналіз епюр свідчить, що у стрілі овоїдного перетину краще розподіляються напруження, та і в цілому вони менше. При аналізі небезпечного перетину встановлено зниження середніх напружень на 10% при тому, що овоїдний профіль тонше і легше за рахунок рівномірної товщини в 4 мм, проти 4 мм стінки та 5 мм пояса для прямокутного, що дало зниження маси на 12%, а сили що прикладаються на овоїдний профіль повинні бути дещо менше. Окремо слід зазначити розташування зварних швів на нейтральній лінії для овоїдного контуру, знаючи що зварні шви це концентратор напружень, виходить поліпшення конструкції – в прямокутному профілі зварні шви біля поясу сприймають набагато більші напруження. При подальших дослідженнях доцільно провести такі розрахунки для усіх секцій та розглянути можливість використати більш тонкий лист, та слід урахувати додаткове зменшення маси секції та внутрішнього обладнання, бо для такого профілю відсутня необхідність в ребрах жорсткості, що перешкоджають короблению або здвоюванню поперечного перерізу в межах зони основного тиску та використовується легший гідроциліндр з одним штоком, а не двома.
6. З технологічної точки зору, виготовлення секцій прямокутного профілю простіше за виготовлення овоїдного, бо відсутні операції точного згинання

листів металу на спеціальних штампах для формування зігнутого профілю верхньої частини, тому овоїдний профіль зараз застосовується в високовантажопідйомних кранах, де зниження маси буде особливо відчутне. Аналіз ринку підтверджує, що автокрани з овоїдним профілем починаються з'являтися для 8 тон вантажопідйомністю (XCMG XCT8L4 на шасі FAW або Dongfeng) і вище, та з тенденціями розвитку машинобудівного обладнання, в умовах конкуренції, для серійного виробництва настане день доцільного застосування овоїдного профілю для стріл вантажопідйомністю 2т.

7. Аналітичним розрахунком визначені нормальні напруження в місцях дії опорних елементів. В деяких розрахункових відсіках напруження більші, ніж нормальні напруження від балкового вигину стріли. Ці напруження також не перевищують допустимих.
8. Розрахунком в Solidworks підтверджений факт виникнення в місцях дії опорних елементів нормальних напружень більших, ніж нормальних напружень від балкового вигину стріли. Значення результатів розрахунку напружень співставляються з визначеними аналітично, різниця складає 20%, що також дозволяє стверджувати про достовірність розрахунків.
9. В усіх секціях незалежно від напрямку дії навантаження напруження концентруються в зоні розташування опорних елементів в місці з'єднання вертикальної стінки з поясом, тому рекомендується приділити особливу увагу при контролі зварних з'єднань.
10. Розрахунком в Solidworks визначені місцеві деформації зон розташування опорних елементів, значення деформацій від 0,0458 мм до 0,603 мм. Також визначені прогини секцій при розрахунку окремо кожної секції як двохопорної балки. Прогин консолі головної секції - 13,368 мм, середньої секції – 17,202 мм, кореневої секції – 11,891 мм.
11. Використані в роботі математичні залежності для визначення максимальних напружень у поясах і стінках секцій телескопічних стріл, засновані на теоретичних і експериментальних дослідженнях, проведених [3]. Як підтвердили дослідження, ці залежності дозволяють без використання

розрахунку ЕОМ досить просто і точно визначати напружений стан в екстремальних ділянках перерізу.

12. Знайдені плями контактів опорних елементів і поясів секцій на реальних моделях відсіків секцій відповідають характеру розподілу ізоліній напружень, отриманих за допомогою комплексу програм Solidworks.
13. Збільшення товщини пояса за рахунок зменшення товщини бічної стінки забезпечує зниження напружень; обмеженням товщини стінки повинне бути забезпечення місцевої стійкості від напружень загального вигину стріли (балкового вигину) і напружень, викликуваних навантаженням в опорних елементах. Тобто має сенс перевірка доцільності зменшення товщини вертикальних стінок , так як розрахунок напружень від загального (балкового) вигину стріли виявив великі коефіцієнти запасу міцності, та збільшення товщини пояса (особлива увага на нижній пояс) з ціллю недопущення втрати місцевої стійкості. Найбільшу економію металу можна було досягти при зосередженні металу у вузлах перетину секцій на довжині впливу опорних навантажень при одночасному зниженні товщини середньої частини полиць і стінок.
14. При сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки і програмування метод кінцевих елементів, реалізований в комплексі програм Solidworks може служити ефективним засобом для дослідження і розрахунків телескопічних стріл кранів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. Державна наукова установа «Книжкова палата України імені Івана Федорова», 2016. 37с.
2. ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила.
3. Cui, Z. & Jiang, W. & Cheng, L.. (2016). Analysis and Experimental Verification of the Strength of Telescopic Booms for Construction Machinery. International Journal of Simulation Systems, Science and Technology. 17. 33.1-33.10. 10.5013/IJSSST.a.17.27.33.
4. Дослідження напруженого стану елементів телескопічних кранових стріл різного поперечного перерізу в стикових зонах. Херсон: 1985. 115 с.
5. Теоретичне та експериментальне дослідження елементів телескопічних кранових стріл зі сталей різних марок. Звіт про науково-дослідну роботу. Херсон: 1975. 158 с.
6. О.В. Григоров, Н.О. Петренко. Вантажопідйомні машини: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ» ,2005. 304с.
7. Л. М. Мартовицький, В. І. Глушко, Г. В. Клименко. Атлас металоконструкцій ПТМ: навчальний посібник. Запоріжжя: Нац. ун-т "Запорізька політехніка", 2019. 222 с.
8. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. Комп’ютерна графіка: SolidWorks. Олді-Плюс. Україна, 2018. 252 с.
9. Любін М.В., Токарчук О.А., Єленіч М.П. Розрахунки підіймальних механізмів та машин. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНАУ, 2013. 208 с.
10. Багєєв В. В., Горобець В. Г. Металеві конструкції підйомно-транспортних машин: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2015. 216 с.
11. Підйомно-транспортні машини: підручник / за ред. проф. О. В. Григорова. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 360 с.

12. Панасенко О. І., Кириченко В. М. Проєктування та розрахунок елементів підйомно-транспортних і будівельних машин: навчальний посібник. Дніпро: УДУНТ, 2021. 195 с.