

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій  
(повна назва факультету)  
Будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Дослідження напружено-деформівного стану сталевих  
балок з синусоїдальною перфорацією»

Виконав: студент VI курсу, групи МБнм-61  
спеціальності 192

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Биків Д.З.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Підгурський І.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мещерякова О.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Ясній В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Чубик В.Ф.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Биківу Денису Зіновійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження напружено-деформівного стану сталевих балок з синусоїдальною перфорацією

Керівник роботи Підгурський Іван Миколайович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 10 » квітня 2023 року № 4/7-364

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Сортамент сталевих гарячекатаних двотаврових балок, спосіб дослідження напружено-деформівного стану методом скінчених елементів, розрахункові комплекси ЛІРА-САПР, SolidWorks та ANSYS

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Огляд літературних джерел пов'язаних із створенням і оптимізацією сталевих балок з перфорованою стінкою. Встановлення задач для проведення власних досліджень. Методика дослідження напружено-деформівного стану сталевих балок з перфорованою стінкою. Виконання встановлених досліджень. Аналіз отриманих результатів досліджень. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)  
Мультимедійна презентація відповідно до кваліфікаційної роботи, що включає: приклади використання сталевих балок з перфорованою стінкою, результати розробки методології аналізу НДС перфорованих балок в програмних комплексах ЛІРА-САПР, SolidWorks та ANSYS; результати дослідження сталевих балок з перфорованою стінкою круглих, шестикутних та похідних отворів в ANSYS; аналіз отриманих результатів; заходи для охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; висновки

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний розділ	Підгурський І.М., к.т.н., доцент		
Охорона праці	Каспрук В.Б., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., старший викладач		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання 10.04.2023 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел відповідно до кваліфікаційної роботи	13.04.2023	
2	Аналіз робіт зв'язаних з дослідженням НДС сталевих балок з перфорованою стінкою	17.04.2023	
3	Постановка мети і задач досліджень	20.04.2023	
4	Опис методики дослідження НДС сталевих перфорованих балок, методом скінчених елементів	24.04.2023	
5	Опис даних отриманих під час дослідження НДС сталевих перфорованих балок	02.05.2023	
6	Аналіз отриманих результатів	05.05.2023	
7	Розроблення заходів по охороні праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	12.05.2023	
8	Оформлення висновків	18.05.2023	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Биків Д.З.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Підгурський І.М.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ, ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН ТА ВИКОРИСТАННЯ У БУДІВНИЦТВІ.....	8
1.1 Характеристики сталевих перфорованих балок .....	8
1.2 Особливості виготовлення сталевих перфорованих балок.....	9
1.3 Застосування сталевих перфорованих балок у конструкціях будівель та споруд .....	12
1.5 Висновки до розділу 1 .....	15
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ.....	16
2.1 Загальні характеристики методів дослідження.....	16
2.2 Дослідження НДС сталеві перфорованої балки в програмному комплексі ЛІРА-САПР .....	17
2.3 Дослідження НДС сталеві перфорованої балки в програмному комплексі SolidWorks .....	21
2.4 Дослідження НДС сталеві перфорованої балки в програмному комплексі ANSYS .....	23
2.5 Аналіз результатів дослідження, отриманих в різних розрахункових комплексах .....	26
2.6 Висновки до розділу 2 .....	28
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ ПРИ ЗМІНІ ФОРМИ І РОЗМІРІВ ОТВОРІВ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	29
3.1 Загальні характеристики дослідження.....	29
3.2 Дослідження форм перфорації в стінці балки.....	30
3.3 Дослідження підсилюючих накладок біля місця перфорації .....	44

3.3 Дослідження первісного сортаментного прокату двотаврів для виготовлення сталевих перфорованих балок .....	47
3.4 Дослідження розмірів синусоїдних отворів перфорації .....	57
3.5 Рекомендації щодо збільшення несучої здатності перекриття з перфорованих балок .....	65
3.6 Висновки до розділу 3 .....	66
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	68
4.1 Загальні положення.....	68
4.2 Безпека при виконанні зварювальних робіт.....	70
4.3 Стійкість конструкції при дії вибухових та сейсмічних навантажень .....	72
4.4 Стійкість конструкції в умовах пожежі .....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	77
БІБЛІОГРАФІЯ.....	78

## ВСТУП

Сталеві балки з перфорованою стінкою є важливим елементом в будівництві та реконструкції споруд. В основному ці конструкції використовують при зведенні торговельних центрів, багатоповерхових паркінгів, стадіонів і просторих виробничих приміщень. Використання таких балок дозволяє зекономити на матеріалах і при дотриманні вимог міцності та жорсткості – бути надійною будівельною конструкцією з меншою вагою ніж аналоги [1].

**Актуальність теми** кваліфікаційної роботи зумовлена потребою створення великих конструкцій перекриття з прокатних двотаврів, що значно збільшать ефективний простір приміщень і замінять собою решітчасті ригелі, висота яких може бути в 1,5-2 рази більшою від перфорованих балок [2].

Для створення більш легких і надійних конструкцій потрібно дослідити в поєднанні поперечні перерізи балок, форму і розміри перфорації стінки, крок отворів, можливі підсилюючі накладки, оскільки в залежності від цього, по-різному розподіляються напруження і змінюється жорсткість ригеля. Над даною проблемою працювало багато іноземних і вітчизняних науковців: P.R. Knowles, K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello, M.U. Hosain, W.G. Speirs, Підгурський М.І., Pritykin A.I., Сташків М.Я., Гезенцевей Ю.І., Сенчишин В.С., Олевський В.І., Підгурський І.М., Волчок Д.Л. та інші [1, 3, 4, 5, 6].

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконане відповідно до тематичних наукових досліджень кафедри будівельної механіки ТНТУ ім. І. Пулюя та державних програм надійності та економічності будівельних конструкцій і виробів.

**Метою кваліфікаційної роботи** є визначення ефективних форм і розмірів отворів перфорації стінки балки і її поперечного перерізу, що мінімізують значення прогинів і напружень в балках.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **задачі**:

– проаналізувати перспективні форми та розміри перфорації сталевих балок;

- розробити методику оцінки напружено-деформівного стану (НДС) перфорованих балок;
- дослідити вплив перфорації на напружено-деформівний стан конструкції;
- провести аналіз результатів отриманих при моделюванні перфорованих сталевих балок;
- запропонувати спосіб зменшення напружень на контурі отвору;
- розробити рекомендації щодо використання перфорованих балок.

**Об'єктом дослідження** є сталеві прокатні балки з різною формою і розмірами перфорації стінки.

**Предметом дослідження** є взаємозв'язки між розмірами і формою перфорації стінки балки та її напружено-деформівним станом.

**Методи дослідження.** У роботі використано моделювання напружено-деформівного стану перфорованої сталеві балки методом скінчених елементів у програмному комплексі ANSYS, а також порівняльний аналіз результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у вдосконаленні форм перфорації в стінці балки на основі порівняння їх напружено-деформівного стану, отриманого при моделюванні методом скінчених елементів, а саме досліджений перспективний метод синусоїдної перфорації стінки.

**Практичне значення отриманих результатів** – це можливість проектування великих і просторих приміщень з допомогою прокатного сортаменту балок, після їх перфорації.

**Апробація результатів магістерської роботи** виконана на:

- Scientific Journal of the Ternopil National Technical University 2021, № 3 (103) [5];
- XII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2022» (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) [7];
- Міжнародна науково-технічна конференція «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій», 10-11 листопада 2022 року [6];

– VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 27-28 квітня 2023 року) [8].

*Публікації результатів магістерської роботи* виконані на вищезгаданих конференціях і журналах.

**Ключові слова:** сталеві балки, кругла перфорація, шестикутна перфорація, синусоїдна перфорація, напружено-деформівний стан, скінчені елементи.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ, ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН ТА ВИКОРИСТАННЯ У БУДІВНИЦТВІ

#### 1.1 Характеристики сталевих перфорованих балок

Перфоровані сталеві балки – це вид полегшених металевих конструкцій, що мають в своїй конструкції наскрізні отвори стінки, які розміщені вздовж всього ригеля і можуть мати різну форму та розміри, такі як: круглі, квадратні, багатокутні і первісні від них [2, 8].

Вперше даний вид сталевих балок був розроблений в 1910 році Горацієм Хортоном в компанії “Chicago Bridge and Iron Works” [9]. Набули широкого використання під час Другої світової війни. На сьогоднішній день ці балки є затребуваними в будівництві, через свою низьку вагу, добрі міцнісні характеристики та архітектурну виразність.

Основною ідеєю перфорованих балок є зменшення їх власної ваги при збільшенні несучої здатності і інших конструктивних характеристик. Це здійснюється за рахунок збільшення висоти перерізу, в результаті чого зростає їх момент опору [10]. Такий вид балок є особливо корисним в проектах, де потрібно мінімізувати вагу перекриття без застосування суцільних балок або решітчастих ферм.

Найчастіше сталеві перфоровані балки використовують в виробничих приміщеннях, паркінгах або складах, але дану конструкцію можна використовувати також в громадських будівлях, мостах і інших інженерних спорудах [11].

Основними перевагами таких балок є:

- зменшення ваги. Завдяки виконанню перфорації, вага самої балки залишається такою ж самою як була, але зменшується загальне навантаження на конструкцію споруди, що призводить до менших економічних витрат;

- покращена естетика. Перфоровані балки мають привабливіший вигляд у порівнянні з іншими металевими ригелями. Отворам можна надати унікального вигляду для кожної окремої споруди, що покращує дизайн інтер'єру;
- гнучкість в проектуванні. Дані балки можна змінювати залежно від цільового призначення будівлі, надаючи їм ефективний простір і візуальні якості;
- покращення вентиляції. Окрім того, що через отвори можна проводити вентиляційні комунікації, додатково через отвори вільно проходить потік повітря, що регулює температуру і аераційні характеристики приміщення.

Також є і недоліки:

- зниження міцності. Перфорація може збільшити локальні напруження, і тим самим зменшити несучу здатність балки, особливо при концентрованих точкових навантаженнях;
- збільшення трудовитрат. Перфоровані балки є складнішими та трудомісткішими у виготовленні, ніж суцільні. Це призводить до використання більш кваліфікованих робітників. Технологія виготовлення стає дорожчою;
- обмежені розміри отворів. Якщо використовувати балку з найбільшою несучою здатністю то приймають стандартні отвори, але для збільшення архітектурної виразності необхідно застосовувати збільшені розміри отворів, а це призведе до економічної неефективності або недостатньої надійності.

Загалом, сталеві балки з перфорованою стінкою є універсальним і економічно-ефективним рішенням для будівництва новітніх металевих будівель та споруд.

## **1.2 Особливості виготовлення сталевих перфорованих балок**

Сталеві балки з перфорованою стінкою, в більшості, виготовляються з прокатних двотаврових сортаментів, рідше зі складених балок. Вони розробляються індивідуально для кожного об'єкта будівництва [2].

Існує два види перфорованих балок: складні і нескладні. Складні – це такий тип в яких виконується лінія розрізу, далі ці дві частини зміщуються після чого

зварюються, так отримується балки з більшим поперечним перерізом і майже без втрат матеріалу. Нескладні – це такий тип де в прокатних балках виконується перфорація певного розміру, це зменшує витрати на виготовленні, конструкція не піддається тепловим деформаціям від зварювання, але залишається багато невикористаного матеріалу, і сама балка стає менш міцнішою від суцільної, хоча в той же час і набагато легшою.

Отже, і перший і другий метод має свої плюси і мінуси, але будівництво спрямоване до більш економічних конструкцій, тому найдоцільніше використовувати перший варіант.

Найпопулярніші види перфорованих сталевих балок це зубчасті (з шестикутними отворами, з англ. «castellated beam») і комірчасті (з круглими отворами, з англ. «cellular beam»), їх отвори мають різну геометрію, тому способи виготовлення можуть відрізнятися. Так для створення ригеля з шестикутними отворами можна використовувати ручні та електро-ріжучі інструменти для металу, а для круглих вже не обійтись без сучасних різальних апаратів (газо- та плазморізи, комп'ютерні лазерні різачки).

В розвинутих країнах найчастіше використовують лазерні комп'ютерні різачки (рис. 1.1), оскільки вони є більш надійними і менше впливають на структуру матеріалу [2, 10, 11, 12], а для здешевлення процесу різання можна користуватись газовими та плазмовими різачками, зрідка для таких робіт беруть електричні або ручні інструменти, але якість такої роботи є меншою.

Весь процес виготовлення даних ригелів є подібний для зубчастих і комірчастих перфорованих балок, так і для первісних від них, та виглядає наступним чином. Насамперед береться стандартна балка гарячого прокату (рис. 1.2 (а)), для шестикутної виконується одна лінія розрізу, а для круглої – дві (рис. 1.2 (б)), далі виступи складають одне на одного (рис. 1.2 (в)), відрізають все зайве і зварюють (рис. 1.2 (г)) [2, 10, 11].

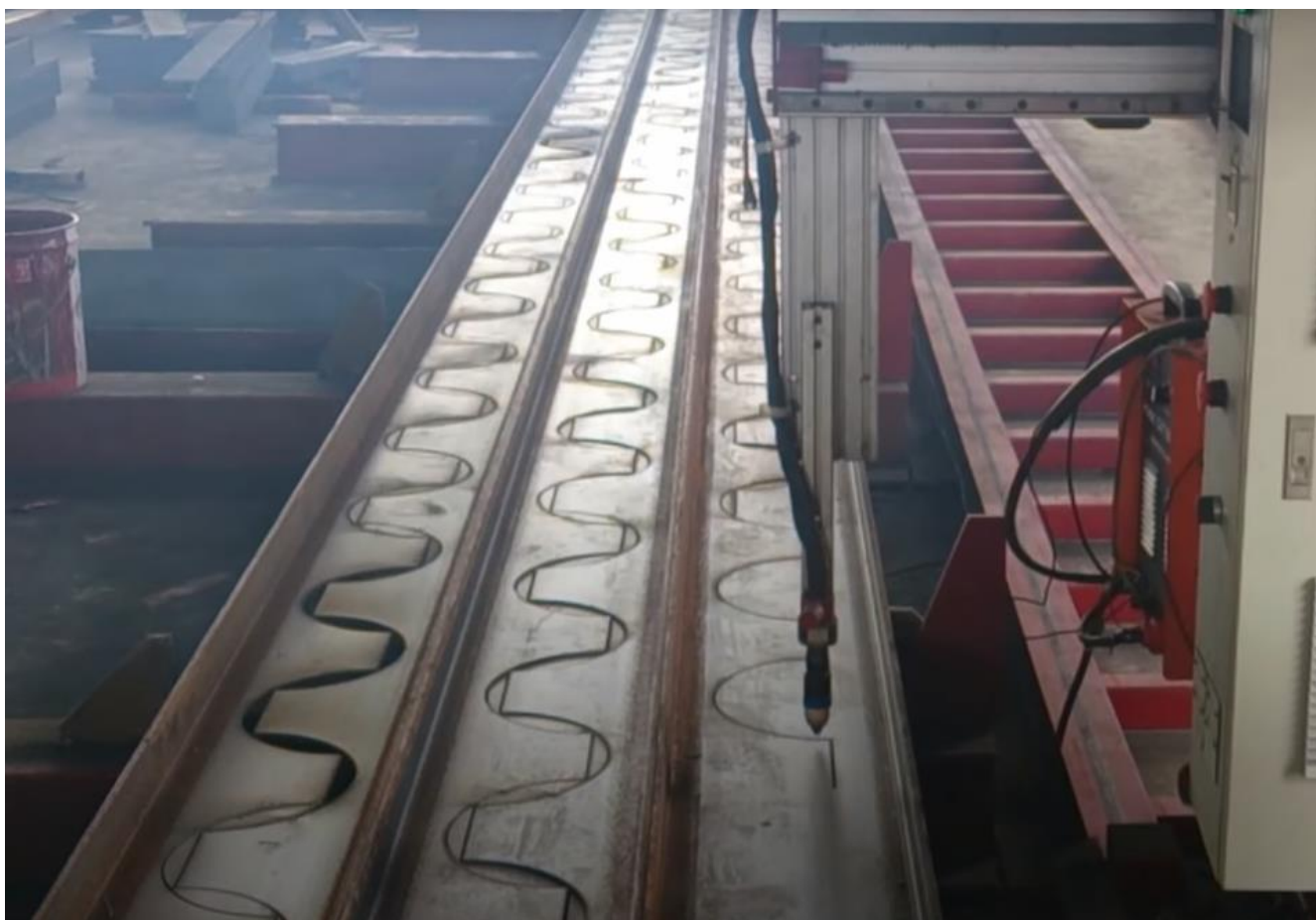


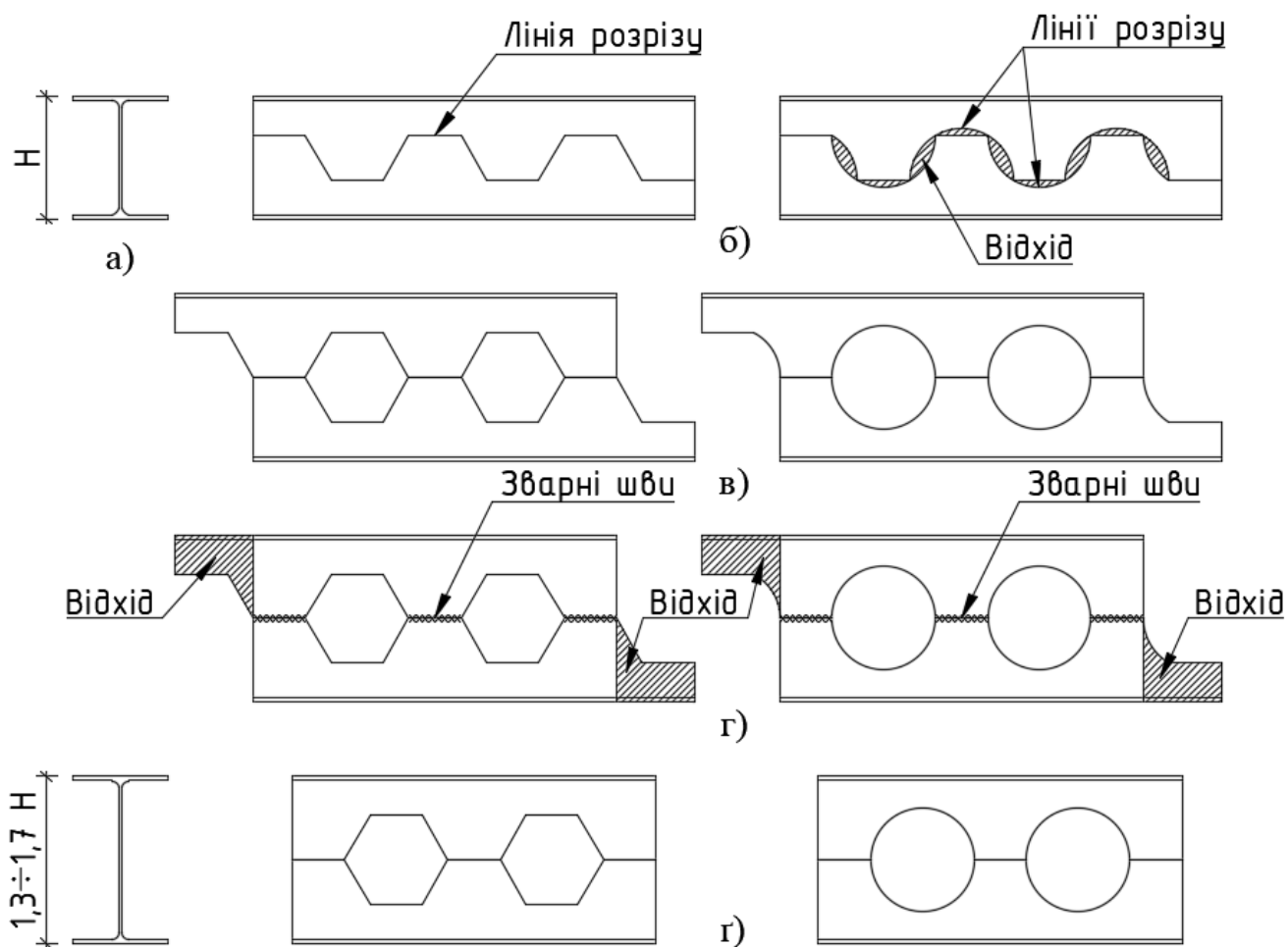
Рисунок 1.1 – Процес виконання лінії розрізу для двотаврової перфорованої балки, що утворюється з прокатної, на лазерному комп'ютерному різачку [10]

Після даних процесів – отримуємо балку, яка має висоту в  $1,3 \div 1,7$  разів більшу від первісної (рис. 1.2 (г)). У такий спосіб збільшуються моменти опору та інерції, тим самим конструкція зазнає менших прогинів і напружень в полицях без додаткового використання матеріалу [2, 4, 9], але локальні напруження в стінці та на гранях отворів перфорації значно зростають.

Змінюючи розміри, форму і крок отворів можна легко надавати балці різних властивостей, тобто в залежності від потреб збільшувати несучу здатність ригеля або зменшувати його прогин, таким чином можна покращити міцність до 50% а жорсткість – до 125% без використання додаткового матеріалу [11].

На відміну від західних країн, де зараз ці конструкції стали досить популярними, в силу складності їх виготовлення, в Україні мало компаній які

продукують ці балки, одна з таких знаходиться в місті Дніпро – «ЦентрРезервуарСервіс».



а) первісний прокатний двотавровий переріз; б) лінія розрізу; в) накладання двох частин; г) зайвий матеріал і зварний шов; г) сталева перфорована балка в готовому вигляді.

Рисунок 1.2 – Виготовлення сталевих балок з перфорованою стінкою, шестикутної та круглої форми отворів

### 1.3 Застосування сталевих перфорованих балок у конструкціях будівель та споруд

Сталеві балки з перфорованою стінкою мають багато переваг над суцільними прокатними, як конструктивних так і дизайнерських. Завдяки збільшенню висоти поперечного перерізу, відповідно зростає статичний момент, момент опору і момент інерції, а ці величини безпосередньо впливають на параметри міцності та

жорсткості ригелів. Такі конструкції дозволяють проектувати споруди із більшими прольотами без значного збільшення висоти конструкції перекриття, що дозволяє їм бути економічно доцільною конструкцією, щодо розмірів, ваги і інших параметрів. Але водночас ці переваги досягаються складнішою розрахунковою моделлю і є складними в проектуванні [2].

Завдяки своїм властивостям збільшується довжина перфорованих балок, при цьому збільшується корисний об'єм будівлі, оскільки при більших прольотах потрібно використовувати менше колон, і, як наслідок, менше фундаментів, що робить їх ще економічнішими. Зважаючи на те, що такі конструкції можуть мати довжину від 20 до 40 метрів і більше [10], вони ідеально підходять для будівництва великих промислових приміщень, складів, офісних центрів, багатоповерхових паркінгів, шкіл, лікарень і подібних споруд.

Перекриття і покрівлі створенні з використанням перфорованих балок мають товщину на 250 – 400 мм меншу ніж аналоги [10], це дозволяє зробити додатковий ярус в багатоповерхових спорудах або вдало використовувати їх в обмежених по висоті будівлях, під час їх спорудження чи реконструкції.

Часто таке рішення можна зустріти при реконструкції існуючих каркасних металевих споруд (рис. 1.3), це дозволяє надати приміщенню елегантного вигляду, забезпечити архітектурну виразність, підсилити чи замінити неефективні ригелі а також збільшити їх корисну площу.

Також особливістю перфорованих балок є їх наскрізна структура, через отвори можна монтувати різні елементи тепло- та електрокомунікацій і вентиляції, що значно зекономить місце для них, і збільшить корисну висоту приміщення (рис. 1.4).

В настановах з проектування AISC Design Guide 11, «Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity» зазначається, що через збільшення геометричних характеристик, при незмінній вазі, перфоровані балки краще чинять опір вібраціям, тому є хорошим рішенням при проектуванні виробничих цехів і багатоповерхових паркінгів (рис. 1.5) [2].



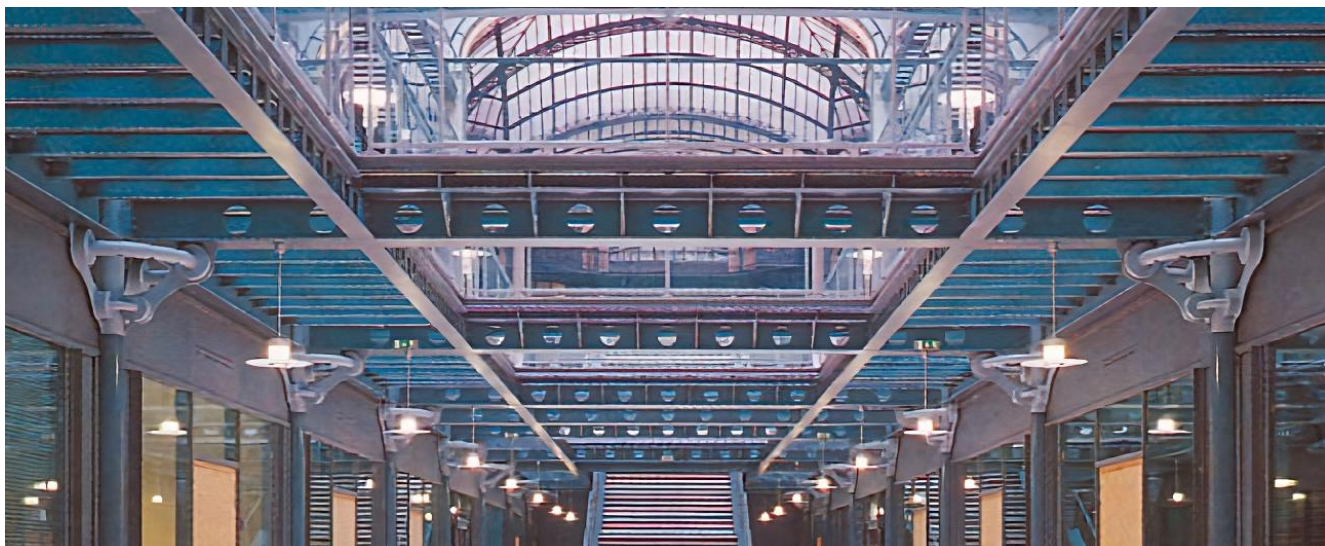


Рисунок 1.3 – Реконструкція будівлі з використанням перфорованих балок в штаб-квартирі Credit Lyonnais, Париж [10]



Рисунок 1.4 – Проведення комунікацій через отвори в стінці балки [2]



Рисунок 1.5 – Застосування перфорованих сталевих балок в багаторівневих паркінгах [10]

### 1.5 Висновки до розділу 1

1. Металеві перфоровані балки є перспективними будівельними конструкціями. Вони мають багато переваг над своїми аналогами, можуть перекривати більші прольоти, ніж первісні балки і мають велику архітектурну виразність. Суть проблеми полягає в тому, що змінюючи розміри та форму отворів можна досягнути меншого прогину балки, але при цьому збільшуються локальні напруження, і навпаки. Тому необхідно дослідити, яка форма отворів буде найефективніша для зменшення прогинів балки і напружень в місцях перфорації.



## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ

#### 2.1 Загальні характеристики методів дослідження

Для вирішення поставлених задач необхідно розробити методику дослідження. Найпоширенішим методом дослідження напружено-деформівного стану перфорованих балок є метод скінчених елементів. На початковому етапі створювалась скінчено-елементна модель. Для розрахунку НДС застосовувались програмні пакети ЛІРА-САПР, SolidWorks та ANSYS.

Також важливою задачею було визначення мінімального розміру скінченого елемента для отримання достовірних результатів, але при незначному збільшенні розрахункового часу.

Дослідження НДС, для отримання подальшої методології розрахунку, проведено на сталевій перфорованій балки з круглими отворами. Довжину балки взято 4 м, задля економії часу на моделювання і розрахунок, балка шарнірно обперта з точковим навантаженням посередині  $P = 2$  кН (рис. 2.1).

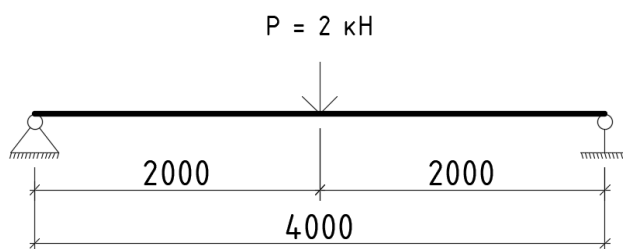


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема вільно обпертої перфорованої балки

Висота поперечного перерізу готової балки становить 400 мм, ширина 100 мм, товщина поясів і стінки 3 і 4 мм відповідно, діаметр перфорації 266,8 мм, крок отворів 400,2 мм (рис. 2.2).

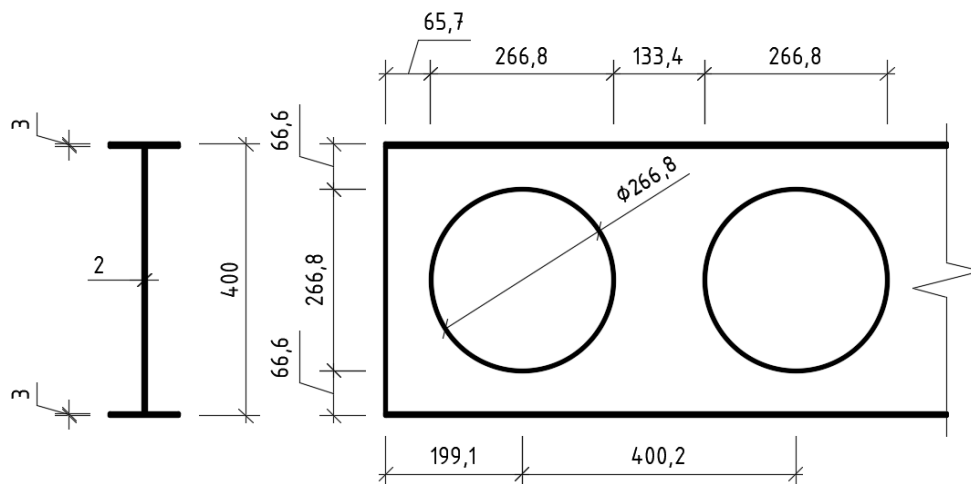


Рисунок 2.2 – Геометричні характеристики досліджуваної перфорованої балки

Для моделювання беремо низьколеговану сталь марки 09Г2С класу міцності С345 з наступними характеристиками: модуль пружності  $E = 210$  ГПа; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,3$ ; границя плинності  $\sigma_T = 345$  Н/мм<sup>2</sup>; тимчасовий опір  $\sigma_B = 480$  Н/мм<sup>2</sup> [12, 13].

У кожному програмному комплексі вибрано дві розрахункових моделі: перша – середній розмір скінчених елементів становить 20 мм, без згущень на кромці отворів перфорації; друга – середній розмір скінчених елементів 20 мм, зі згущенням на кромках перфорації до 2 мм.

Прогин балки визначали як її переміщення по вертикальній осі Z, і еквівалентні напруження за енергетичною теорією Губера-Мізеса (von Mises) [14].

## 2.2 Дослідження НДС сталеві перфорованої балки в програмному комплексі ЛРА-САПР

Створюємо розрахункову модель в ЛРА-САПР відповідно до рисунків 2.1 і 2.2. Задаємо відповідні характеристики для сталі і граничні умови, перелічені в пункті 2.1. Виконуємо повний розрахунок скінчено-елементної моделі, отримуємо результати прогину (рис. 2.3) і еквівалентних напружень в балці (рис. 2.4). Також, для кращого розуміння отриманих даних, пронумеруємо отвори зліва направо (рис. 2.4).

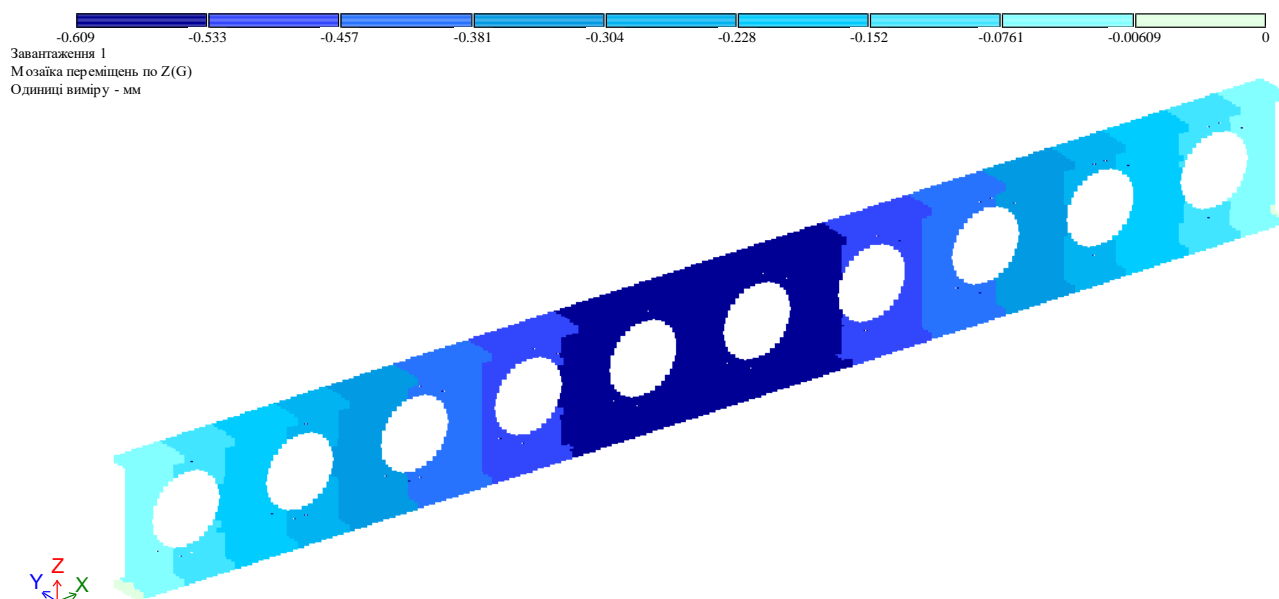


Рисунок 2.3 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

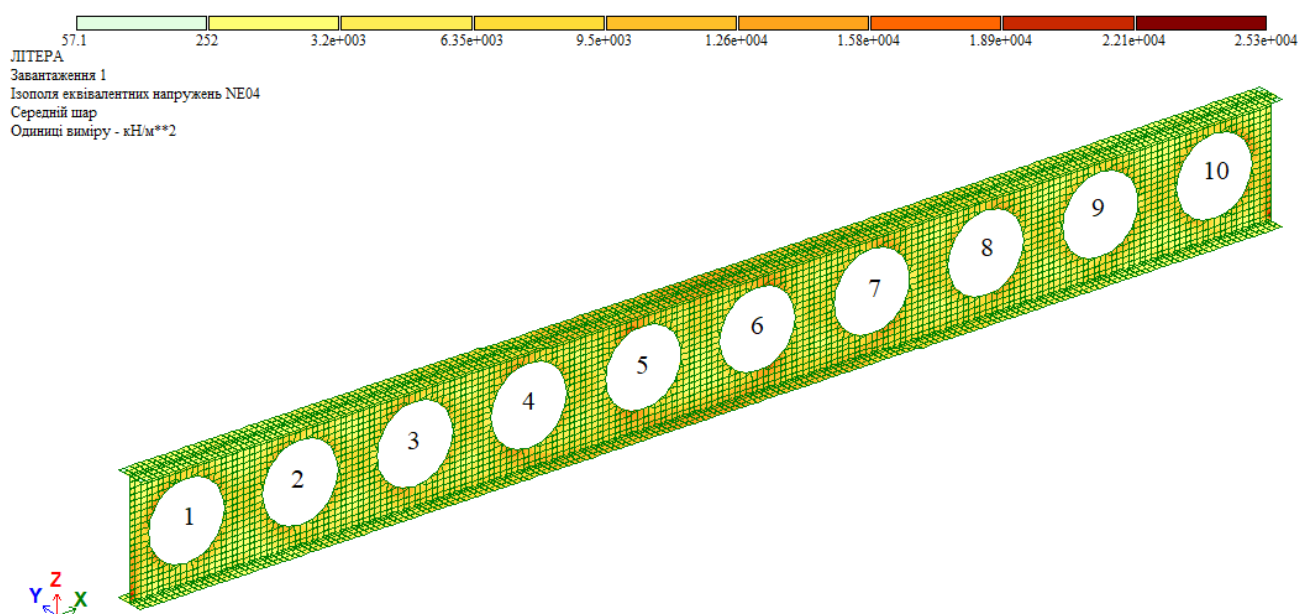


Рисунок 2.4 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці, кПа

Найбільший прогин отримано посередині балки, він становить 0,609 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.5): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 19,344$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 18,17$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.6): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 19,249$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 18,753$  МПа.

Отримані результати занесено в таблицю 2.1 (див. пункт 2.5).

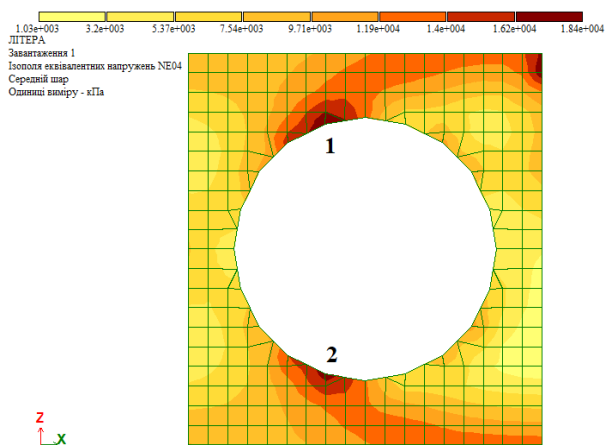


Рисунок 2.5 – Еквівалентні напруження навколо отвору №5, кПа

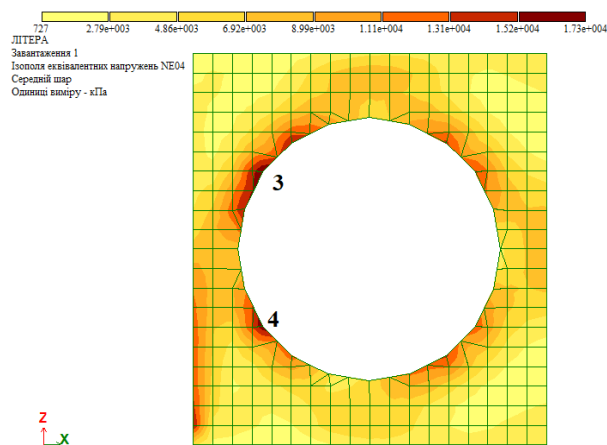


Рисунок 2.6 – Еквівалентні напруження навколо отвору №1, кПа

Тепер змінимо розмір сітки скінчених елементів на краях перфорації до 2 мм (рис. 2.7) і визначимо, як зміниться напружено-деформівний стан.

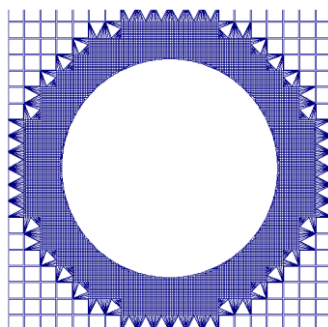


Рисунок 2.7 – Згущення сітки скінчених елементів на контурі отворів перфорації

Зазначимо, що таке фрагментарне згущення сітки у порівнянні з тим, якщо б ми повністю згустили її по всій балці, дозволяє зекономити час розрахунку, а в багатьох випадках є єдиним можливим методом, враховуючи технічні можливості персональних комп'ютерів.

Виконуємо повний розрахунок і отримуємо значення максимального прогину (рис. 2.8), а також еквівалентних напружень навколо 5-го і 1-го отвору (рис. 2.9, 2.10).

Значення максимального прогину становить 0,62 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.9): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 20,687$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 19,466$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.10): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 19,883$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 19,857$  МПа.

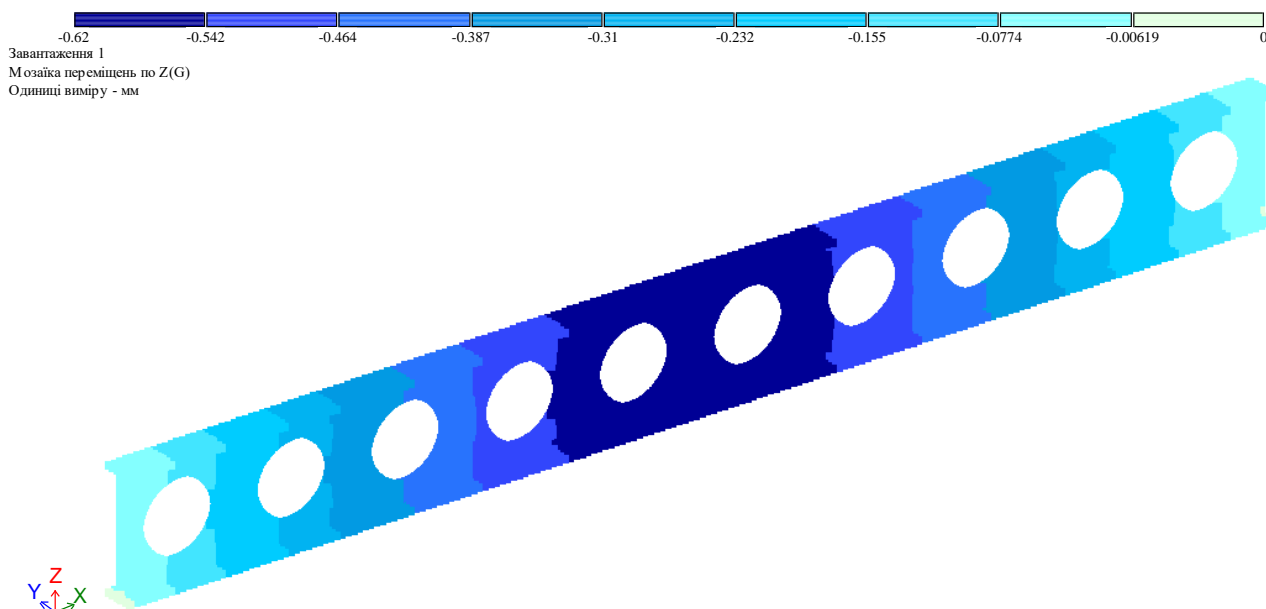


Рисунок 2.8 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

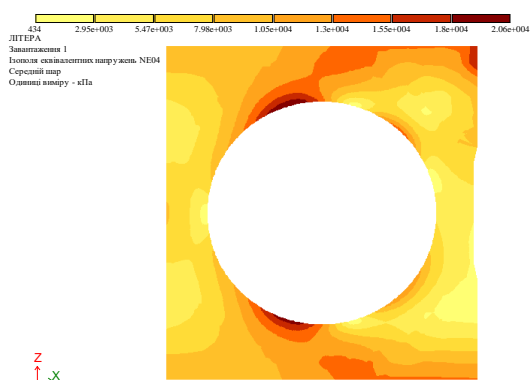


Рисунок 2.9 – Еквівалентні напруження навколо отвору №5, кПа

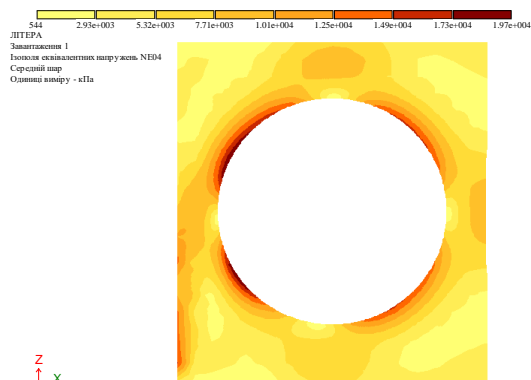


Рисунок 2.10 – Еквівалентні напруження навколо отвору №1, кПа

Зазначимо, що отримані результати при згущенні сітки відрізняються від попередніх. Заносимо їх в таблицю 2.1 (див. пункт 2.5) для подальшого порівняння.

### 2.3 Дослідження НДС сталеві перфорованої балки в програмному комплексі SolidWorks

За аналогією, як і в попередньому пункті, в розрахунковому комплексі SolidWorks створюємо таку ж саму балку з перфорованою стінкою. Перший варіант виконуємо зі сіткою скінчених елементів 20 мм, а другий – зі згущенням на кромках отвору до 2 мм. Задаємо граничні умови і повторюємо алгоритм розрахунку.

Отримуємо значення прогину (рис. 2.11) і еквівалентні напруження на гранях отворів перфорації (рис. 2.12, 2.13).

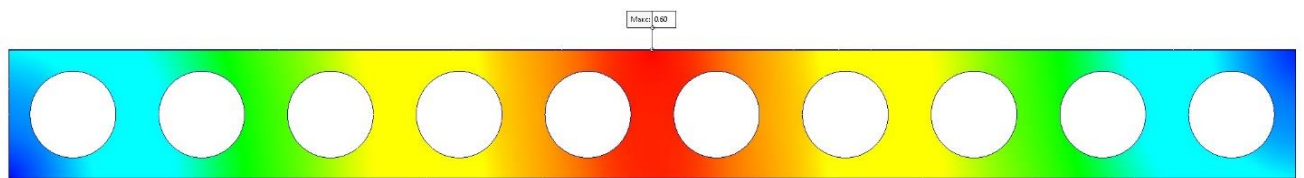


Рисунок 2.11 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

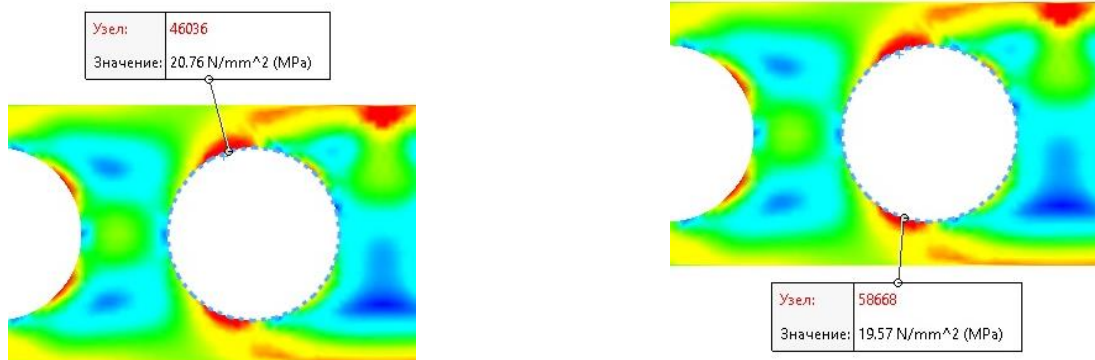


Рисунок 2.12 – Еквівалентні напруження навколо отвору №5, МПа

Максимальний прогин становить 0,6 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.11): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 20,76$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 19,57$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.12): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 19,79$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 19,25$  МПа.

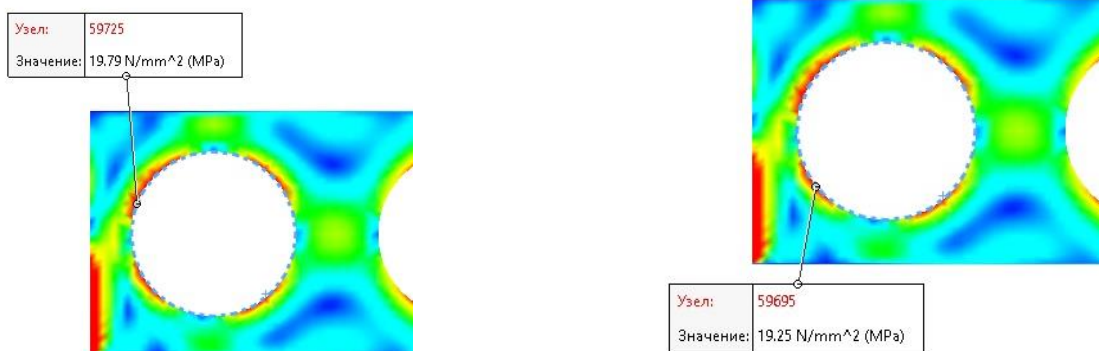


Рисунок 2.13 – Еквівалентні напруження навколо отвору №1, МПа

Аналогічно створюємо балку зі згущенням сітки до 2 мм по контуру отворів перфорації (рис. 2.14). Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину (рис. 2.15) і еквівалентних напружень (рис. 2.16, 2.17).

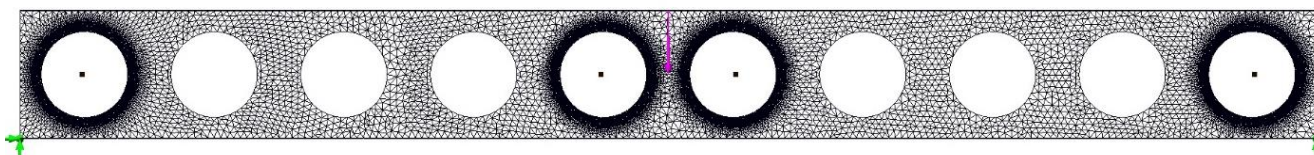


Рисунок 2.14 – Розрахункова модель балки зі згущенням СЕ біля кромки отворів

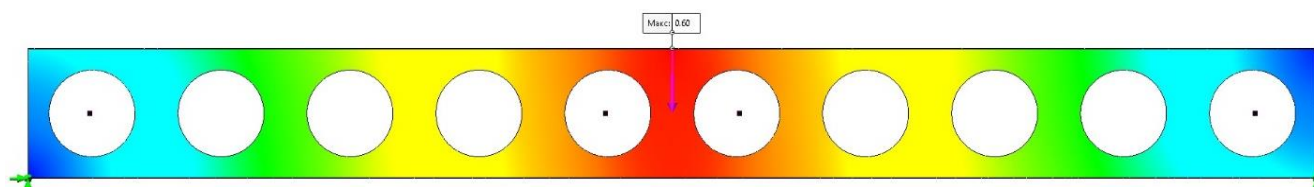


Рисунок 2.15 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

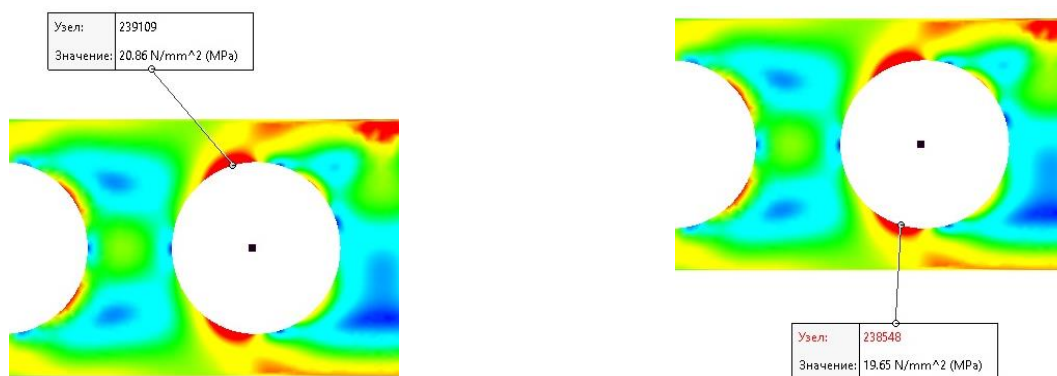


Рисунок 2.16 – Еквівалентні напруження навколо отвору №5, МПа

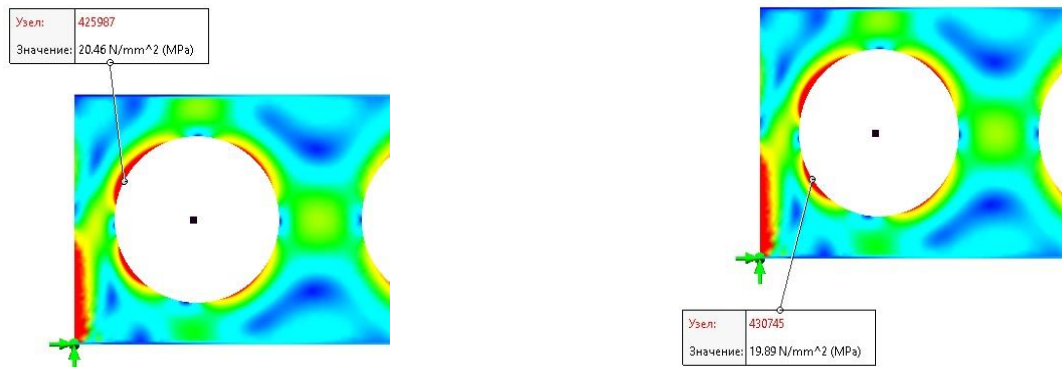


Рисунок 2.17 – Еквівалентні напруження навколо отвору №1, МПа

Значення прогину становить 0,6 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.11): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 20,86$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 19,65$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.12): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 20,46$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 19,89$  МПа.

Результати отримані в розрахунковому комплексі SolidWorks є близькими до тих, що одержані в ЛІРА-САПР. Заносимо отримані значення в таблицю 2.1 (див. пункт 2.5).

## 2.4 Дослідження НДС сталевій перфорованій балки в програмному комплексі ANSYS

Відповідно до попередніх пунктів даного розділу, створюємо розрахункову модель в програмному комплексі ANSYS. Характеристику матеріалу задаємо в середовищі Workbench, геометрія балки виконання в підсистемі SpaceClaim, задання граничних умов і розрахунок твердотільної розрахункової моделі відбувається в модулі Mechanical.

Створюємо першу модель із розміром скінчених елементів 20 мм. Виконуємо розрахунок і отримуємо значення прогинів (рис. 2.18) і еквівалентних напружень навколо 5-го і 1-го отвору (рис. 2.19, 2.20).



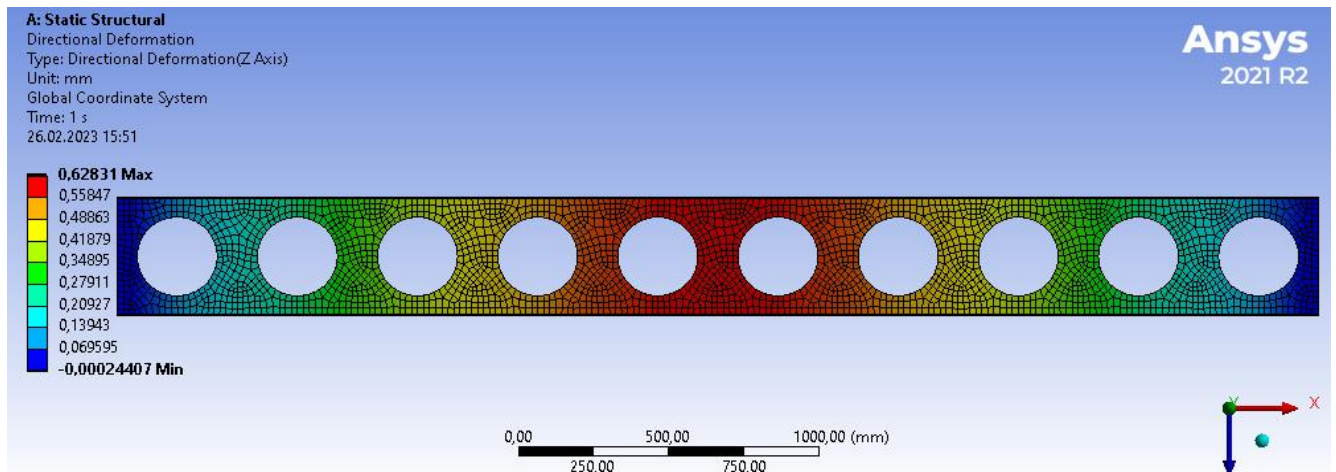


Рисунок 2.18 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

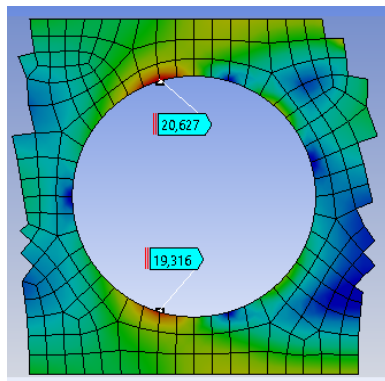


Рисунок 2.19 – Еквівалентні  
напруження навколо отвору №5, МПа

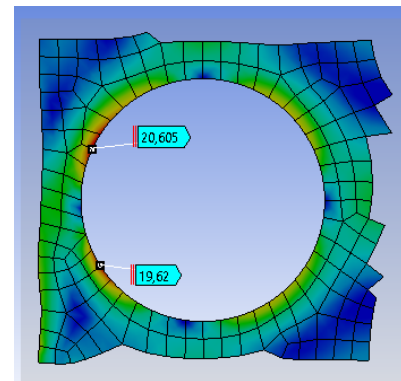


Рисунок 2.20 – Еквівалентні  
напруження навколо отвору №1, МПа

Значення максимального прогину становить 0,628 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.19): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 20,627$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 19,316$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.20): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 20,605$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 19,62$  МПа.

Аналогічно, як і для попередніх варіантів, згущуємо сітку скінчених елементів на гранях отворів перфорації до 2 мм (рис. 2.21). Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину (рис. 2.22) і еквівалентних напружень (рис. 2.23, 2.24).

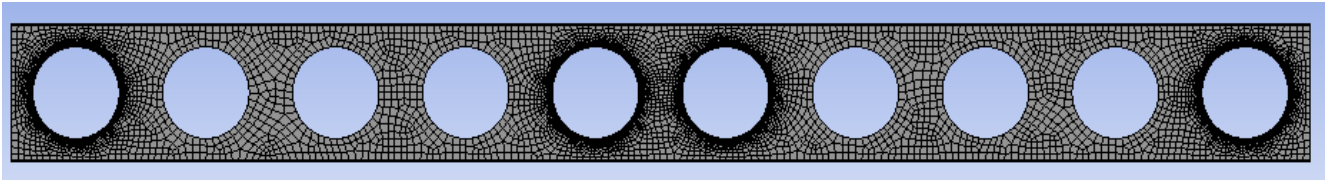


Рисунок 2.21 – Розрахункова модель балки зі згущенням СЕ біля крамок отворів

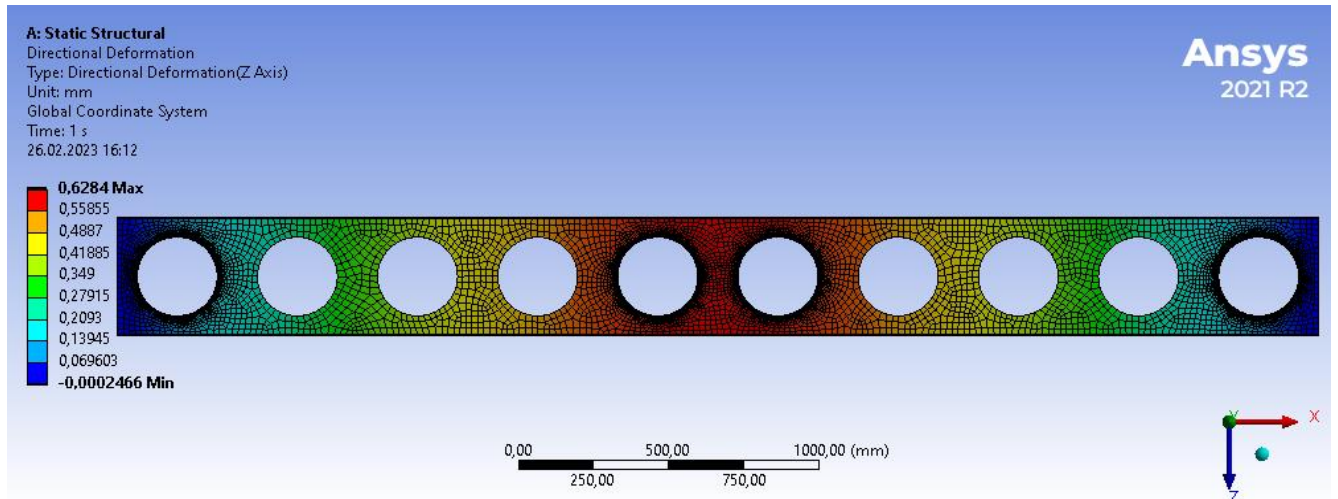


Рисунок 2.22 – Оцінка прогину перфорованої балки, мм

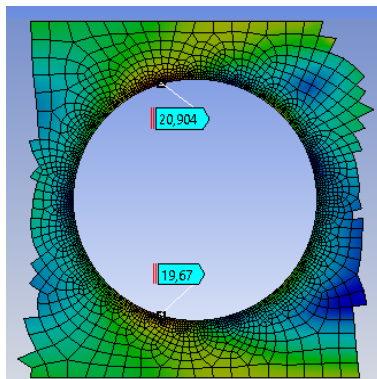


Рисунок 2.23 – Еквівалентні  
напруження навколо отвору №5, МПа

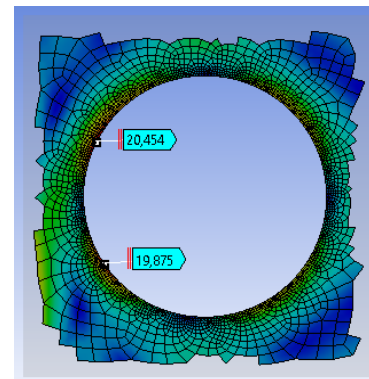


Рисунок 2.24 – Еквівалентні  
напруження навколо отвору №1, МПа

Значення максимального прогину становить 0,628 мм.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 1 і 2 (рис. 2.23): напруження в точці №1 становить  $\sigma_{\text{екв.1}} = 20,904$  МПа, а в точці №2 –  $\sigma_{\text{екв.2}} = 19,67$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження в точках 3 і 4 (рис. 2.24): напруження в точці №3 становить  $\sigma_{\text{екв.3}} = 20,454$  МПа, а в точці №4 –  $\sigma_{\text{екв.4}} = 19,875$  МПа.

Звернемо увагу, що всі результати отримані за допомогою вказаних розрахункових комплексів деякою мірою відрізняються, тому для порівняння вносимо дані в узагальнену таблицю 2.1 (див. пункт 2.5).

## 2.5 Аналіз результатів дослідження, отриманих в різних розрахункових комплексах

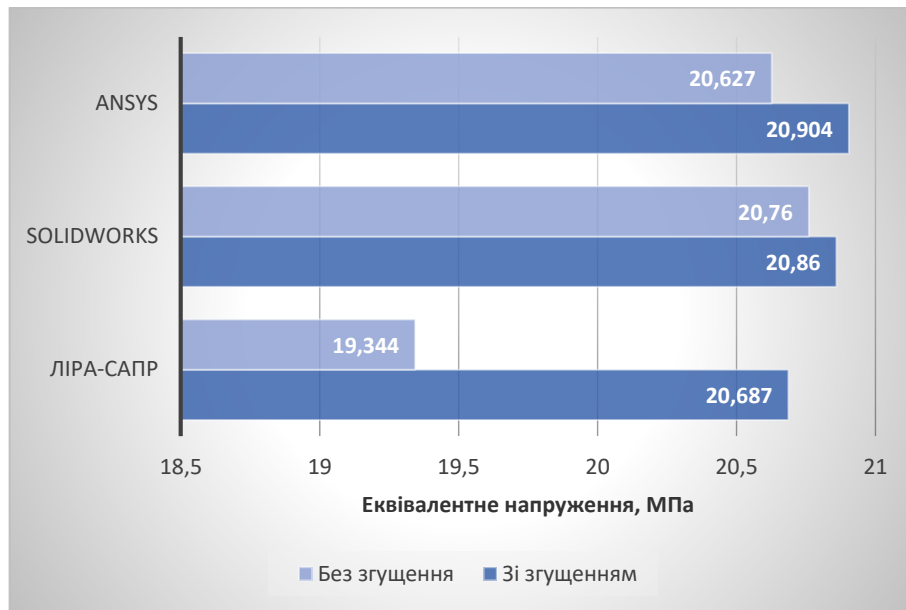
Задля порівняння отриманих результатів, зводимо одержані дані в попередніх пунктах даного розділу в таблицю 2.1, а також для наочності представляємо на діаграмах 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 – Результати дослідження НДС сталеві балки з перфорованою стінкою в різних програмних розрахункових комплексах

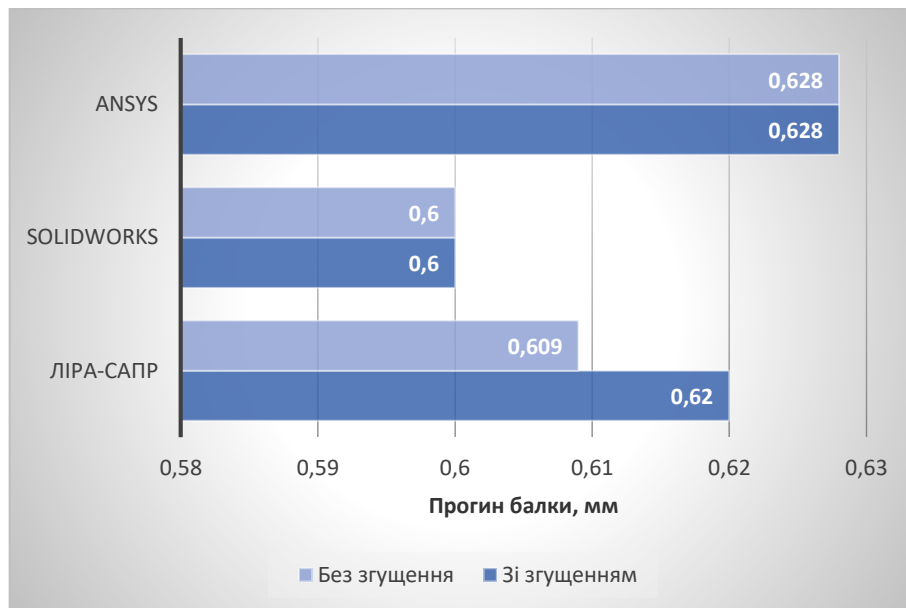
Програмний комплекс		ЛІРА-САПР		SolidWorks		ANSYS	
Розмір СЕ, мм		20	20 (на кромці 2)	20	20 (на кромці 2)	20	20 (на кромці 2)
Прогин, мм		0,609	0,620	0,600	0,600	0,628	0,628
Еквівалентне напруження в точках*, МПа	1	19,344	20,687	20,760	20,860	20,627	20,904
	2	18,170	19,466	19,570	19,650	19,316	19,670
	3	19,249	19,883	19,790	20,460	20,605	20,454
	4	18,753	19,857	19,250	19,890	19,620	19,875

\*Примітка: точки в яких визначаються еквівалентні напруження, відповідають тим, що зображені на рисунках 2.5, 2.6 (див. пункт 2.2).

Аналізуючи прогини балки можна зробити наступні висновки: ANSYS і ЛІРА-САПР дають схожі значення, причому, на відмінно від ЛІРА-САПР, в першій з них і SolidWorks ці результати не залежать від розміру сітки СЕ.



Діаграма 2.1 – Максимальні еквівалентні напруження, навколо отворів перфорації, для різних програмних комплексів і змінній сітці скінчених елементів



Діаграма 2.2 – Максимальні прогини балки, для різних програмних комплексів і змінній сітці скінчених елементів

Аналізуючи напруження, можна зазначити наступне: розрахункова модель в ЛІРА-САПР створена з пластинчастих скінчених елементів, тому бачимо, що її точність при визначенні напружень є меншою, ніж в інших програмах, а результати отримані в ANSYS та SolidWorks є подібними, а при зменшенні сітки СЕ –

ідентичними. Можна вважати, що методика розрахунку сталевих балок з перфорованою стінкою в даних програмних комплексах є правильною.

При сітці скінчених елементів 20 мм, зі згущенням до 2 мм на кромці отвору перфорації, відхилення результатів у інших програмних комплексах від ANSYS становлять:

- за прогинами:
  - ЛПА-САПР – 1,27%;
  - SolidWorks – 4,45%.
- за напруженнями:
  - ЛПА-САПР – від 0,09% до 2,79%;
  - SolidWorks – від 0,03% до 0,21%.

## **2.6 Висновки до розділу 2**

1. Зменшивши розмір скінченого елемента в 10 разів, отримане відхилення напруження в тих самих точках становить близько 1-2%, це дозволяє зробити висновок, що розмір SE в 2 мм, на контурі перфорації, є достатнім і отримані напруження є достовірними.

2. Враховуючи результати порівняльного аналізу, подальші дослідження напружено-деформівного стану сталевих балок з перфорованою стінкою будуть виконуватись в програмному комплексі ANSYS.

## РОЗДІЛ 3

# ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ ПРИ ЗМІНІ ФОРМИ І РОЗМІРІВ ОТВОРІВ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 3.1 Загальні характеристики дослідження

Виходячи з результатів наведених в другому розділі даної роботи, вибираємо програмний комплекс ANSYS, як достовірний, для дослідження напружено-деформівного стану сталевих перфорованих балок, методом скінчених елементів [17].

Основною метою дослідження є визначення оптимальної форми і розміру отворів перфорації стінки, а також поперечного перерізу первісної балки, задля мінімізації прогинів і напружень в конструкції.

Для встановлення закономірностей, які впливають на характеристики міцності і жорсткості балки, потрібно провести наступні експерименти: дослідження форми отворів перфорації; дослідження підсилюючих накладок на кромках отворів перфорації; дослідження поперечних перерізів первісних двотаврів; дослідження розмірів отворів перфорації.

Для дослідження форми отворів прийняті перфоровані балки довжиною 6 м, первісна балка – двотавр 40Ш1 [15], в подальшому ці дані можна екстраполювати, оскільки несуча здатність ригеля зменшується майже прямо пропорційно до його довжини [10].

Всі інші дослідження будуть проведені на перфорованих балках довжиною 24 м з сортаментів європейського і британського прокату гарячекатаних двотаврів [10, 11, 12, 16].

Сталь приймаємо як в попередньому розділі – високоміцну низьколеговану марки 09Г2С класу міцності С345, її характеристики наведені в пункті 2.1 цієї роботи.

Геометричні розміри отворів перфорації обираємо відповідно рекомендаціям наведених в наступних каталогах та нормах: “ACB and Angelina beams. A new generation of beams with large web openings” [10]; “The Westok Cellural Beam Pocket Guide” [11]; “AISC design guide 31. Castellated and cellular beam design” [2]; “Eurocode 3. Rules for beams with large web openings” [18].

### **3.2 Дослідження форм перфорації в стінці балки**

На сьогоднішній день найпопулярнішими формами для перфорованих сталевих балок є шестикутник і коло, оскільки вони є простими у виробництві і достатньо дослідженими [2]. Основною задачею для покращення властивостей балки є оптимізації її отворів [19], тому спочатку визначимо як форма отвору впливає на напружено-деформівний стан сталеві балки. Деякі з досліджень були опубліковані в науковому журналі ТНТУ [5] і результати, що наведені там, у даній роботі не будуть повторюватись.

Запропоновано дослідити лише інноваційні варіанти форми отворів, що є утвореними від кола і шестикутника, оскільки прямокутні і квадратні виявились не оптимальними для великих прогонів споруд, вони погано перерозподіляють навантаження і мають великі локальні перенапруження в кутах [20].

Моделювати балки будемо з круглою, шестикутною і утвореними від них формами перфорації. Для кращого їх розуміння зробимо їм маркування, воно почнеться з букви «А», наступна цифра означає первинну форму отвору, а друга цифра – це вид оптимізації.

Первісним перерізом буде двотавр 40Ш1 (рис. 3.1) довжиною 6 м, на краях виконані опорні ребра для мінімізації локальних напружень в місці обпирання. Навантаження прикладено рівномірно розподілене по всій довжині з амплітудою 30 кН/м, балка вільно обперта на двох кінцях (рис. 3.2).

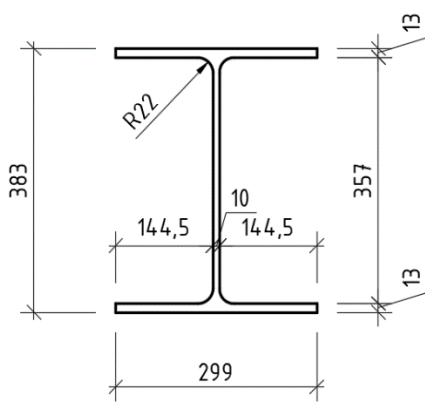


Рисунок 3.1 – Поперечний переріз первісної балки 40Ш1

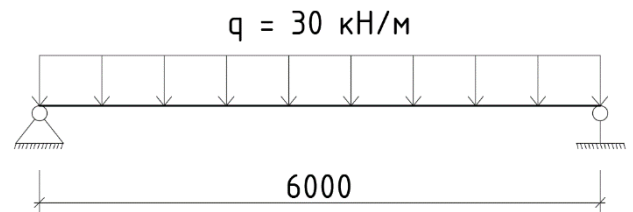


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема балок, що досліджуються

Для порівняння виконаємо розрахунок первісної балки, з опорним ребром 15 мм (рис. 3.3). Маркування такої балки буде «А.1». Визначаємо прогин (рис. 3.4) і еквівалентні напруження в перерізі балки (рис. 3.5).

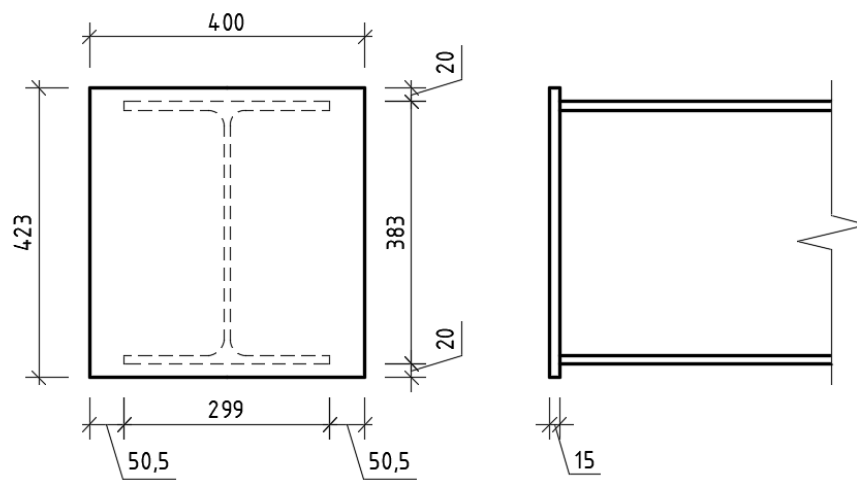


Рисунок 3.3 – Опорний вузол балки

Прогин суцільної балки А.1 становить 8,4871 мм, а найбільші еквівалентні напруження виникають в опорному ребрі, оскільки воно змодельоване для кращого розподілу напруження по балці, то їх не будемо враховувати, а лише в самому перерізі, тому напруження становить 81,047 МПа в центрі нижнього поясу. Вага балки – 593,71 кг.



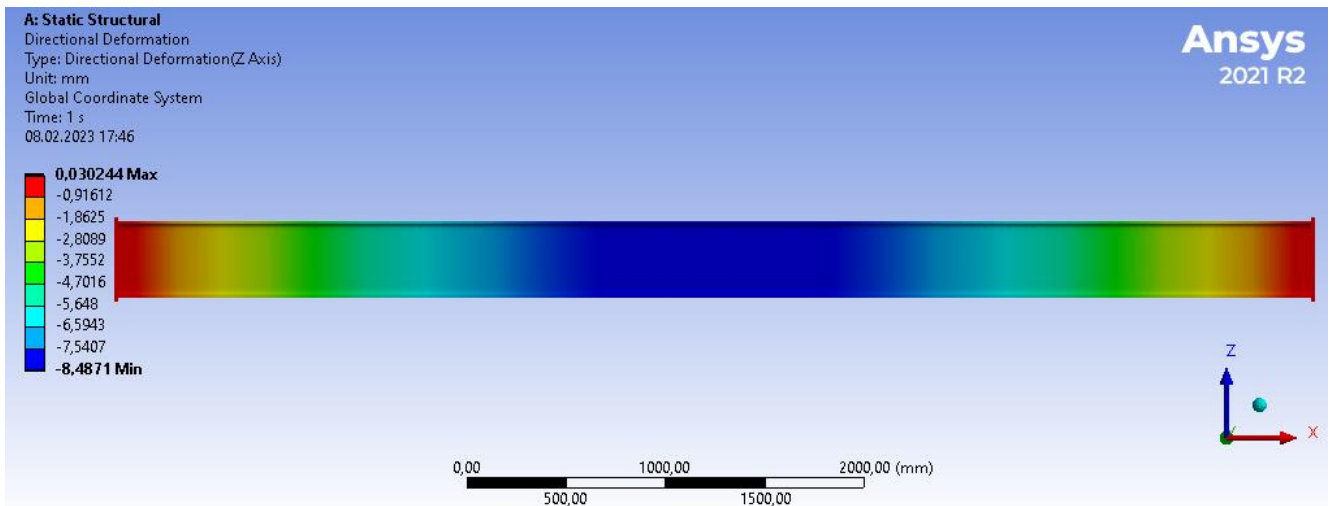


Рисунок 3.4 – Оцінка прогину суцільної балки А.1, мм

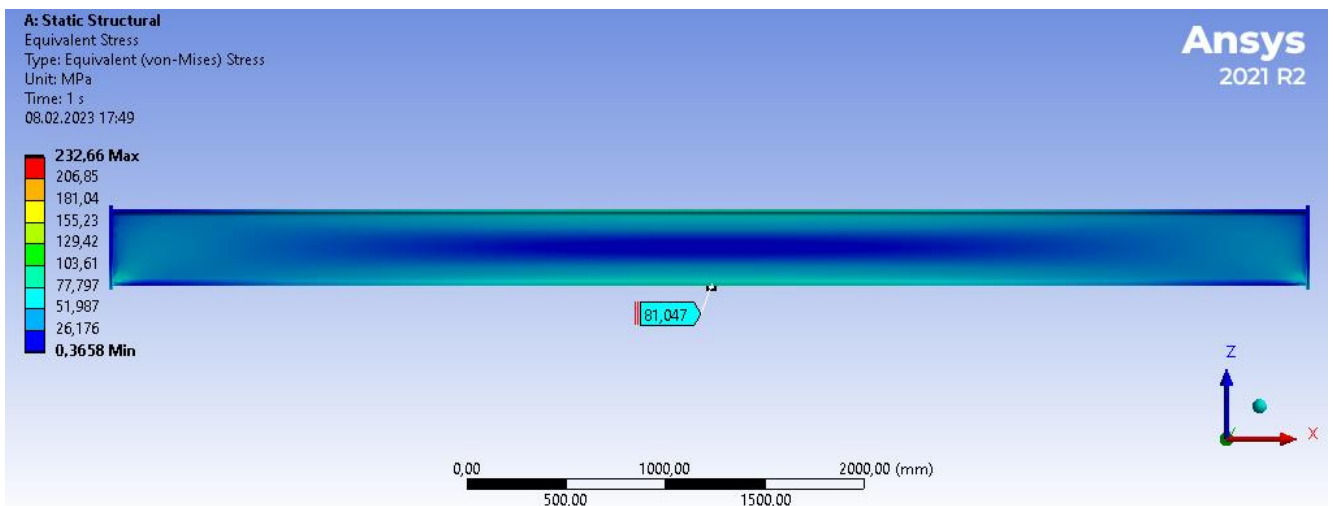


Рисунок 3.5 – Значення еквівалентних напружень в суцільній балці А.1, МПа

Створюємо перфоровану балку з круглими отворами А.2, лінія розрізу показана на рисунку 3.6, а геометричні характеристики – на рисунку 3.7.

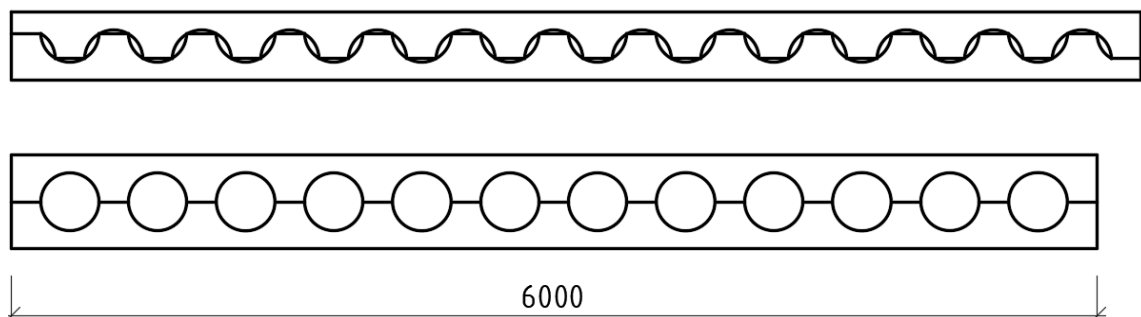


Рисунок 3.6 – Розріз первісної балки А.1 і перфорована А.2

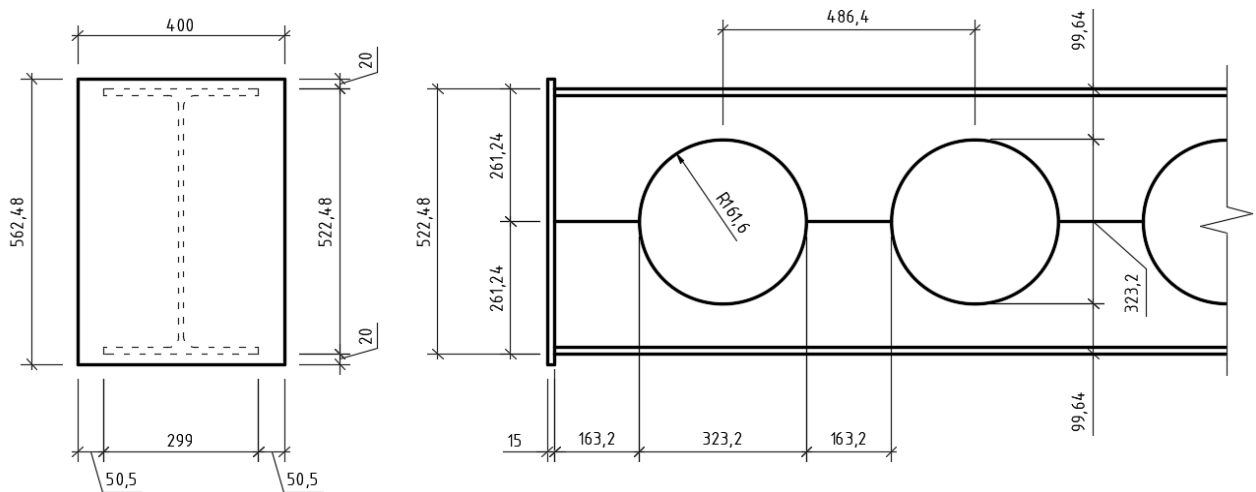


Рисунок 3.7 – Геометричні характеристики перфорованої балки з круглими отворами А.2

Виконуємо розрахунок і отримуємо результати максимального прогину (рис. 3.8) і еквівалентних напружень навколо крйнього отвору (рис. 3.9), оскільки там виникають найбільші напруження.

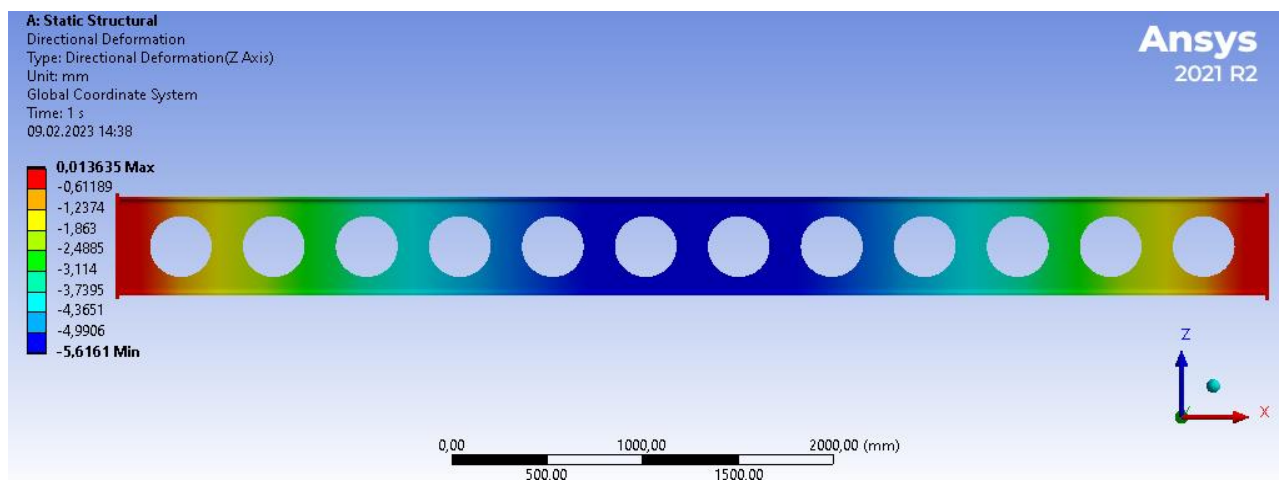


Рисунок 3.8 – Оцінка прогину перфорованої балки А.2, мм

Отримали наступні дані: прогин балки становить 5,6161 мм, що значно менше ніж в суцільній А.1; еквівалентні напруження в поясі стали меншими і становлять 63,635 МПа, але оскільки первісна балка не оптимізована до великої поперечної сили, то напруження в стінці вирости до 153,17 МПа, при вазі – 595,36 кг. Оскільки напруження навколо отвору більші в 2-3 рази, ніж в нижньому поясі, то будемо аналізувати лише їх.

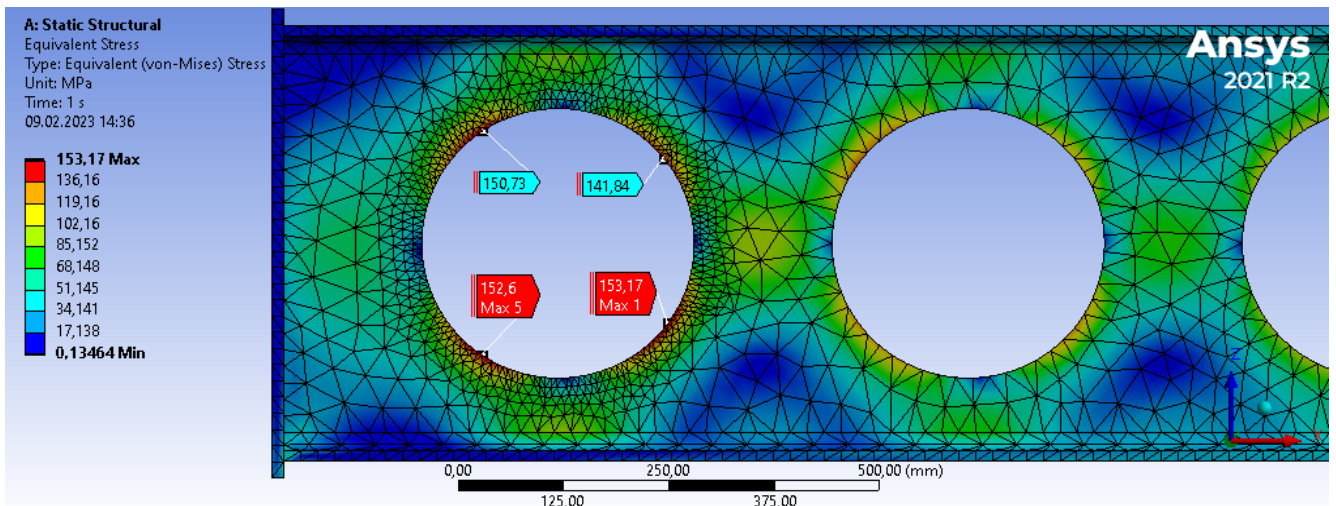


Рисунок 3.9 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.2, МПа

Аналізуючи результати еквівалентних напружень балки А.2, на рисунку 3.9 помітно, що напруження зліва і справа отвору є меншими від інших, забравши ці ділянки, можна поспробувати зекономити на матеріалі де він майже не використовується. Також на даний момент великої популярності набули балки з синусоїдними отворами, використаємо певні геометричні аспекти для нової балки з круглою перфорацією. Виходячи з цього, заокруглимо отвір, радіусом 60 мм, в місці стику двох частин (рис. 3.10).

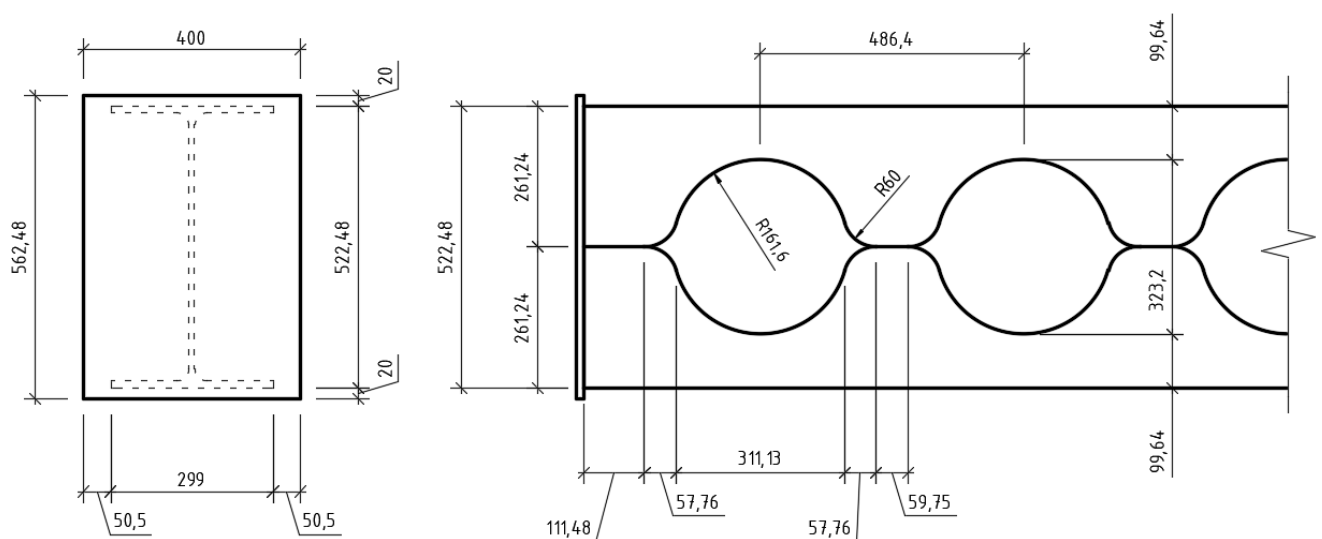


Рисунок 3.10 – Геометричні характеристики перфорованої балки А.2.1

Отримуємо результати прогину (рис. 3.11) і еквівалентних напружень навколо отвору перфорації (рис. 3.12).

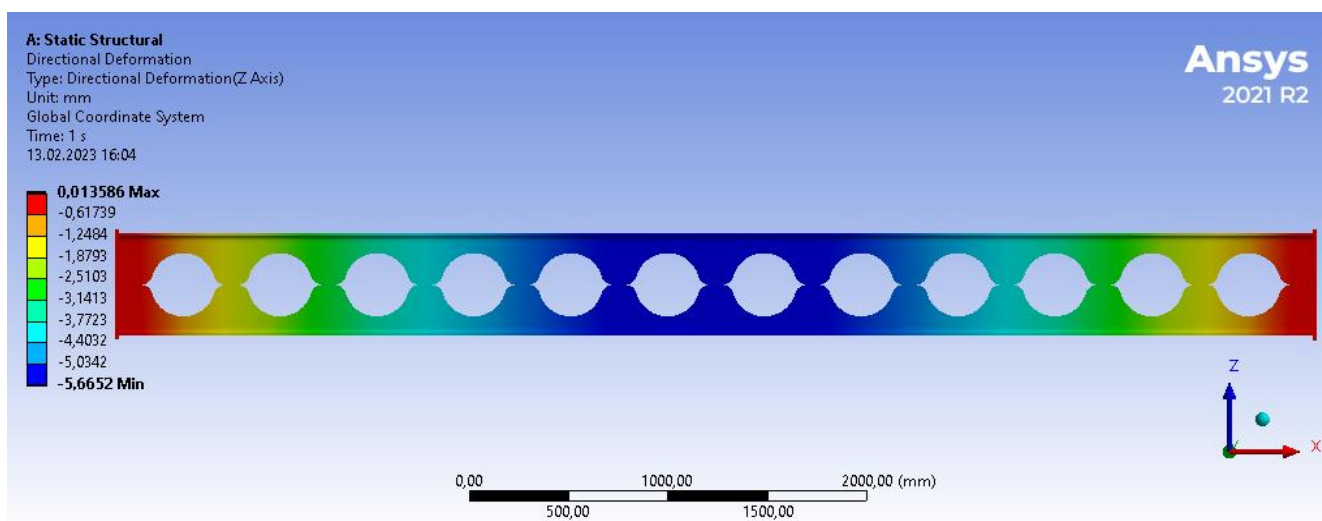


Рисунок 3.11 – Оцінка прогину перфорованої балки А.2.1, мм

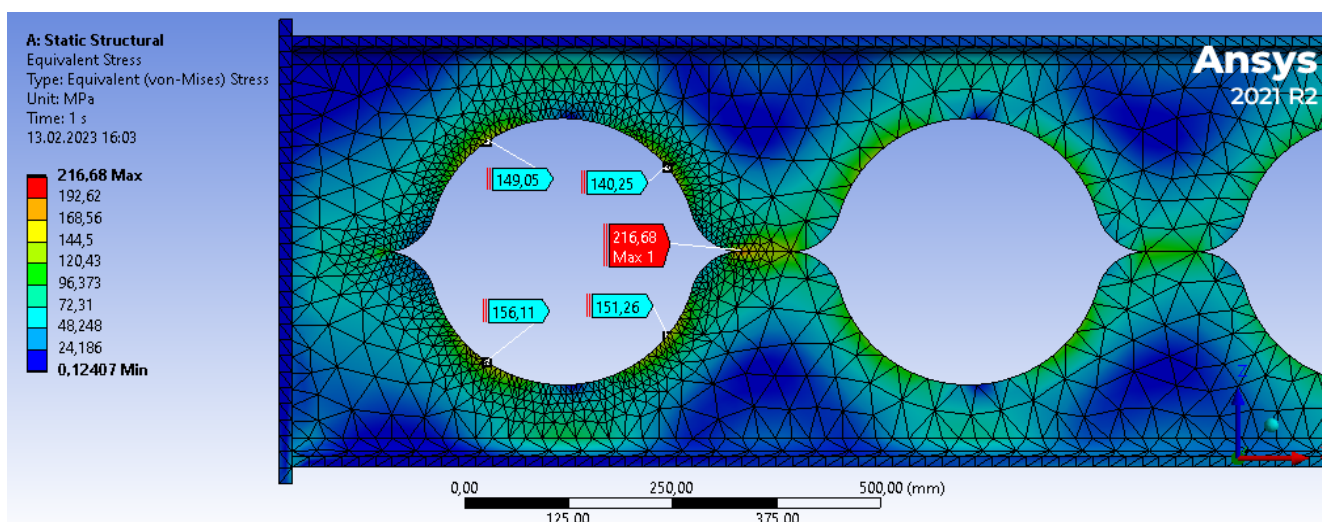


Рисунок 3.12 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.2.1, МПа

Відповідно до попередньої версії А.2 прогин і напруження навколо отвору збільшились до 5,6652 мм і 216,68 МПа відповідно. За попереднім аналізом вважаємо цей варіант неефективний. Вага балки становить 593,52 кг.

Оскільки при варіанті А.2.1 висота перерізу не змінилася, а вага стала меншою, то очевидно що результати стануть гіршими, тому на основі А.2 і А.2.1

зробимо нову версію, кути отворів не будуть зрізатись а стануть продовженням з заокругленням, лінія розрізу буде проходити максимально близько одна до одної, це дозволить збільшити висоту балки (рис. 3.13).

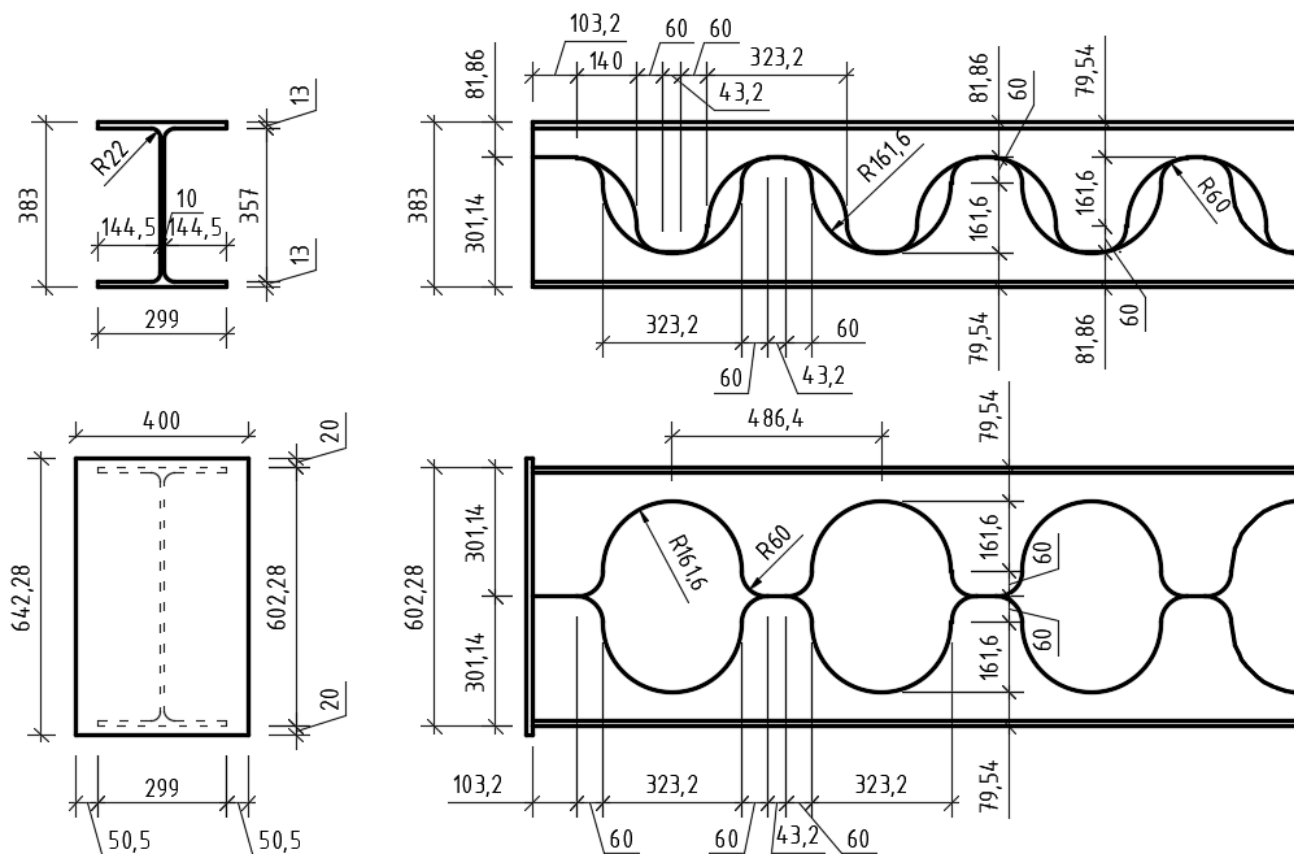


Рисунок 3.13 – Лінія розрізу первісної балки і геометричні характеристики перфорованої А.2.2

Виконуємо розрахунок і отримуємо значення прогину (рис. 3.14) і еквівалентні напруження навколо крайнього отвору (рис. 3.15).

Оскільки в новій версії А.2.2 більший поперечний переріз, то значення прогину зменшились відносно двох попередніх аналогів до 5,3782 мм, але при цьому максимальне еквівалентне напруження зросло більше ніж в 2 рази, і становить 394,42 МПа, хоча напруження в інших точках контуру зросли лише в 1,3 рази (до 199,76 МПа). Вага балки становить 600,92 кг.

Дана форма є перспективнішою від А.2.1, але через великі перенапруження в місці з'єднання двох частин, простий овал буде вигіднішим.



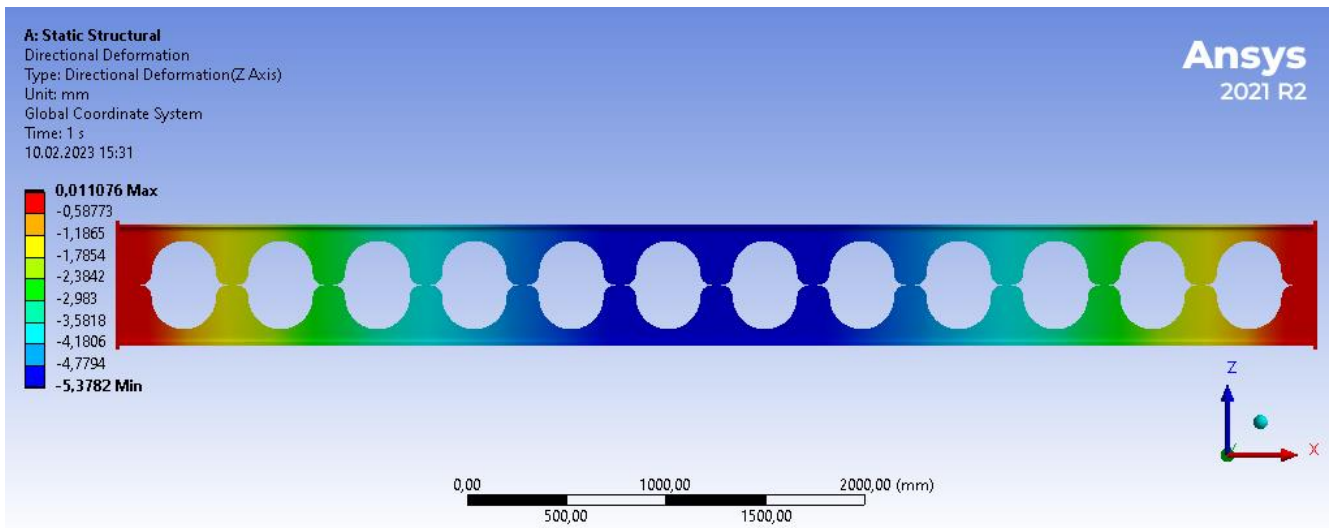


Рисунок 3.14 – Оцінка прогину перфорованої балки А.2.2, мм

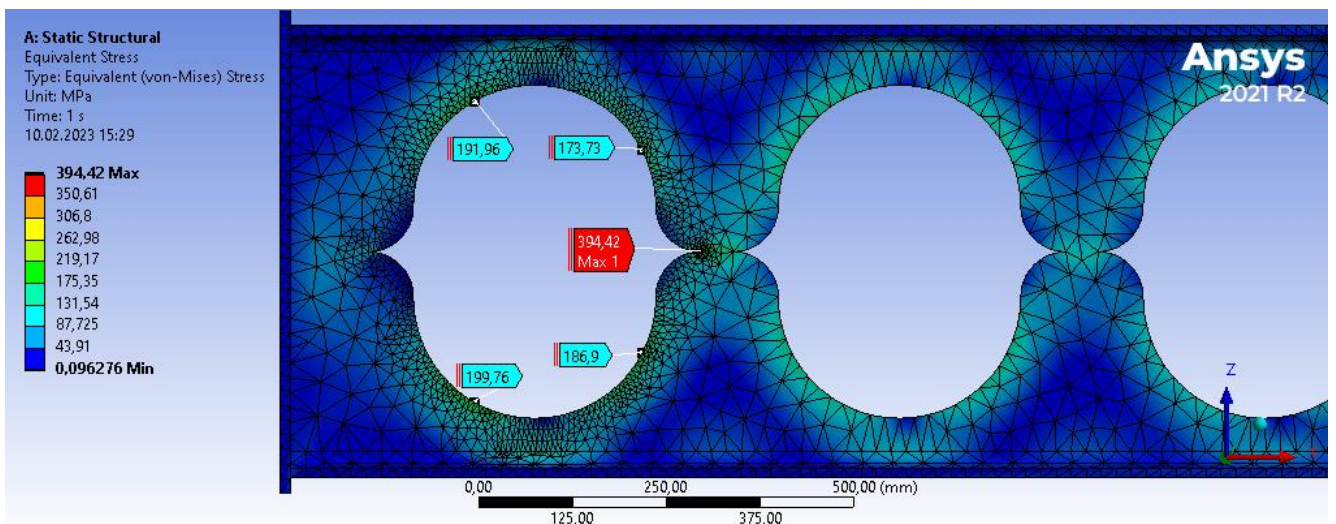


Рисунок 3.15 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.2.2, МПа

Далі дослідимо другу за популярністю форму отвору перфорації, а саме – шестикутник. Для отримання об'єктивних даних які можна буде зіставити, висоту отвору і ширину отвору приймаємо як і для круглої перфорації А.2 (рис. 3.16).

Виконуємо розрахунок і отримуємо результати прогину (рис. 3.17) і еквівалентних напружень навколо крайнього отвору (рис. 3.18).

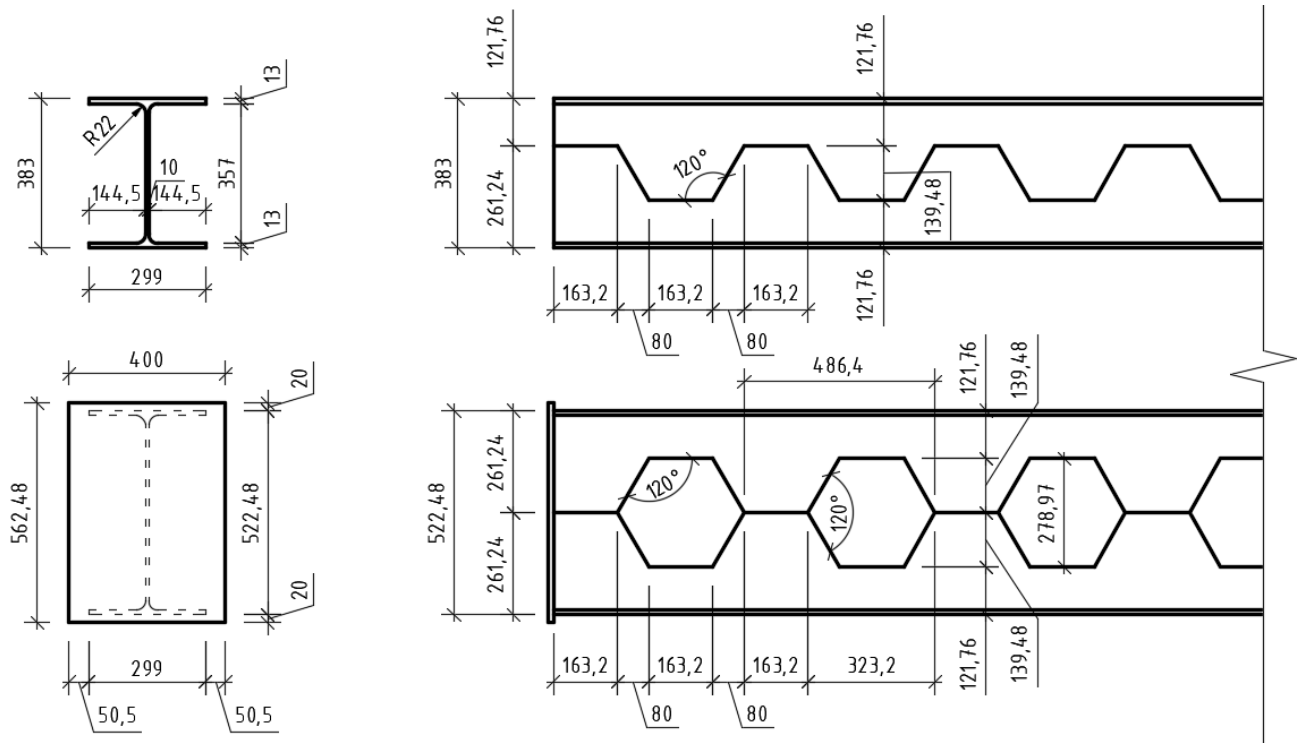


Рисунок 3.16 – Лінія розрізу первісної балки і геометричні характеристики перфорованої А.3

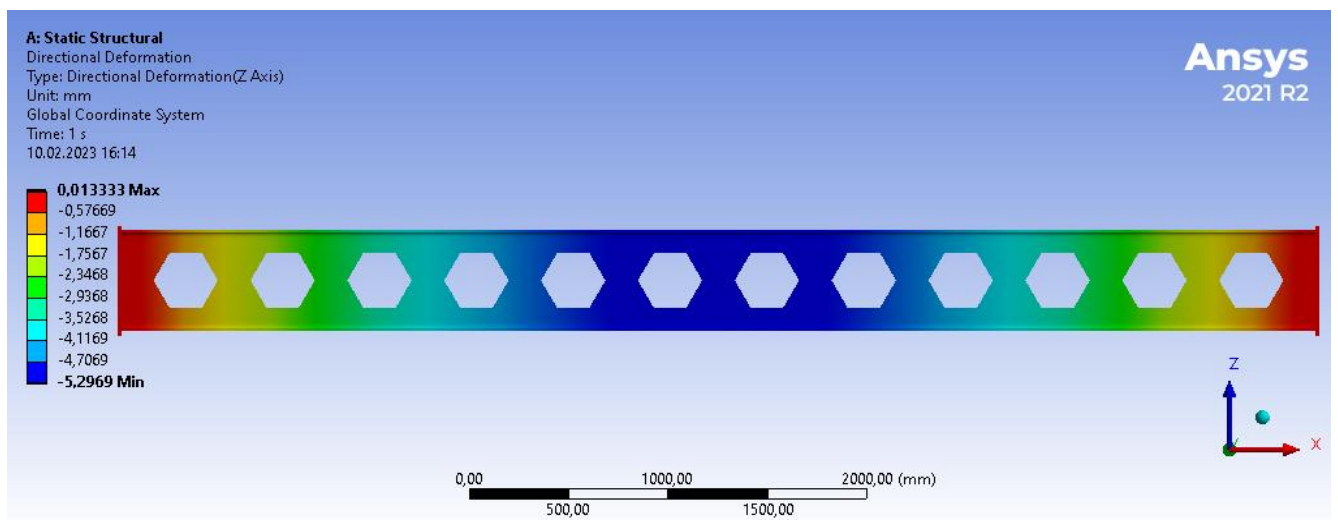


Рисунок 3.17 – Оцінка прогину перфорованої балки А.3, мм

Прогин балки становить 5,2969 мм, а максимальне еквівалентне напруження навколо отвору перфорації – 323,91 МПа. Власна вага балки – 608,62 кг.

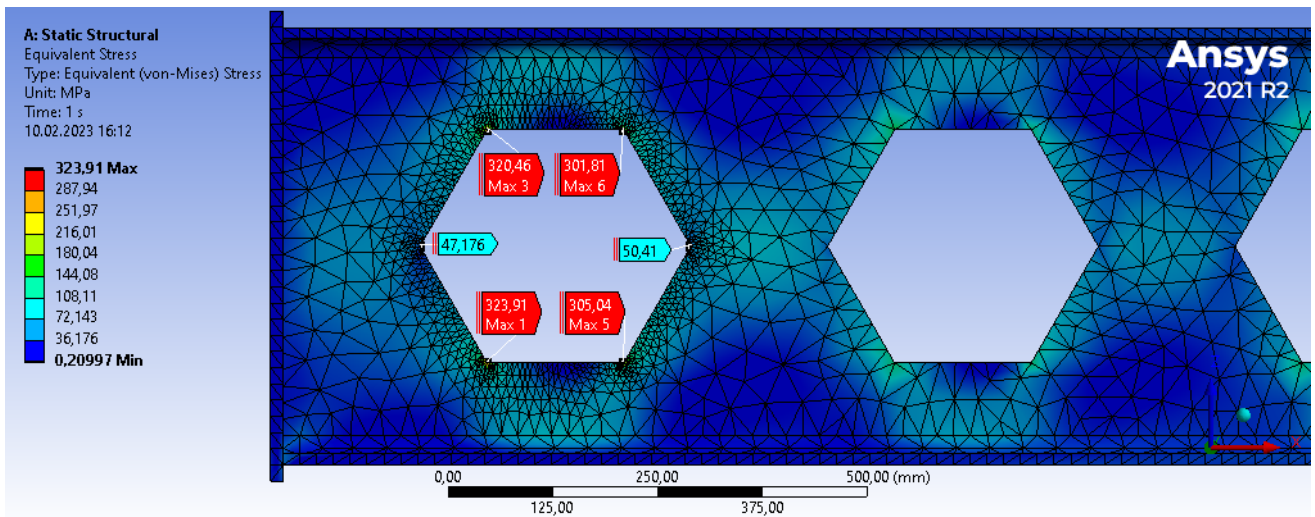


Рисунок 3.18 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.3, МПа

Як можна помітити з рисунка 3.18, найбільші напруження виникають в кутах багатокутника, отже для наступного дослідження заокруглимо їх з радіусом 60 мм, створивши нову версію А.3.1 (рис. 3.19).

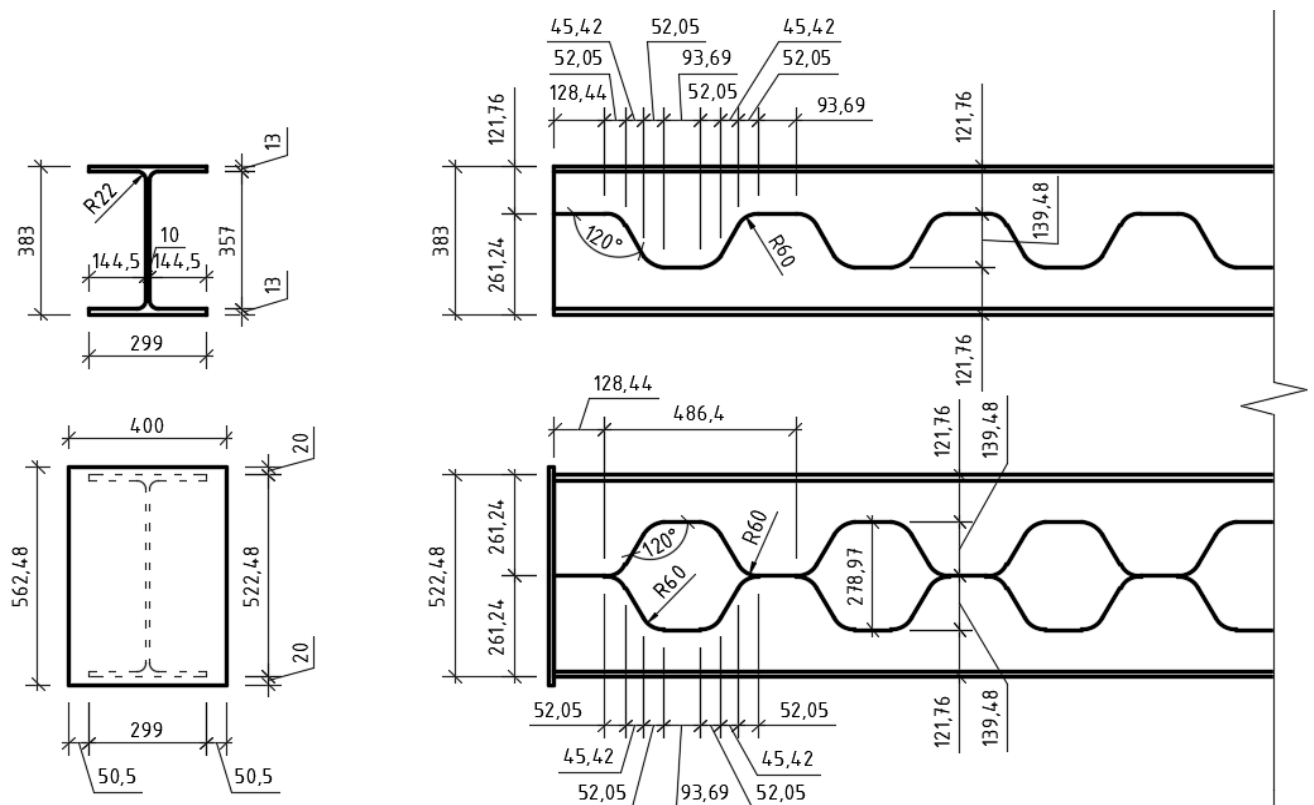


Рисунок 3.19 – Лінія розрізу первісної балки і геометричні характеристики перфорованої А.3.1



Виконуємо розрахунок і отримуємо результати прогину (рис. 3.20) і еквівалентних напружень навколо крайнього отвору (рис. 3.21).

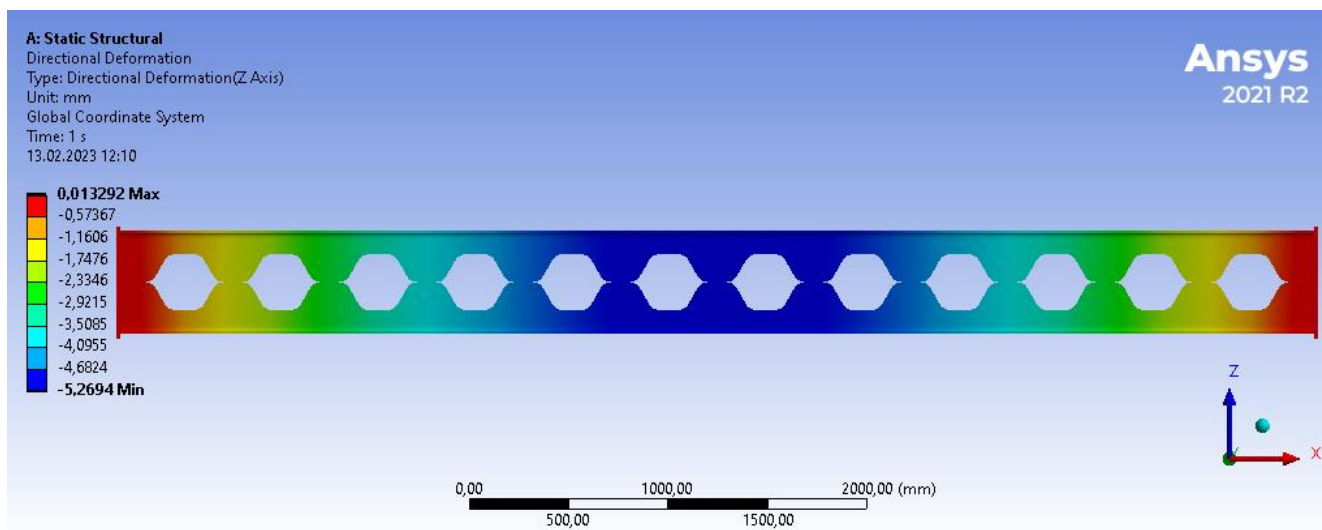


Рисунок 3.20 – Оцінка прогину перфорованої балки А.3.1, мм

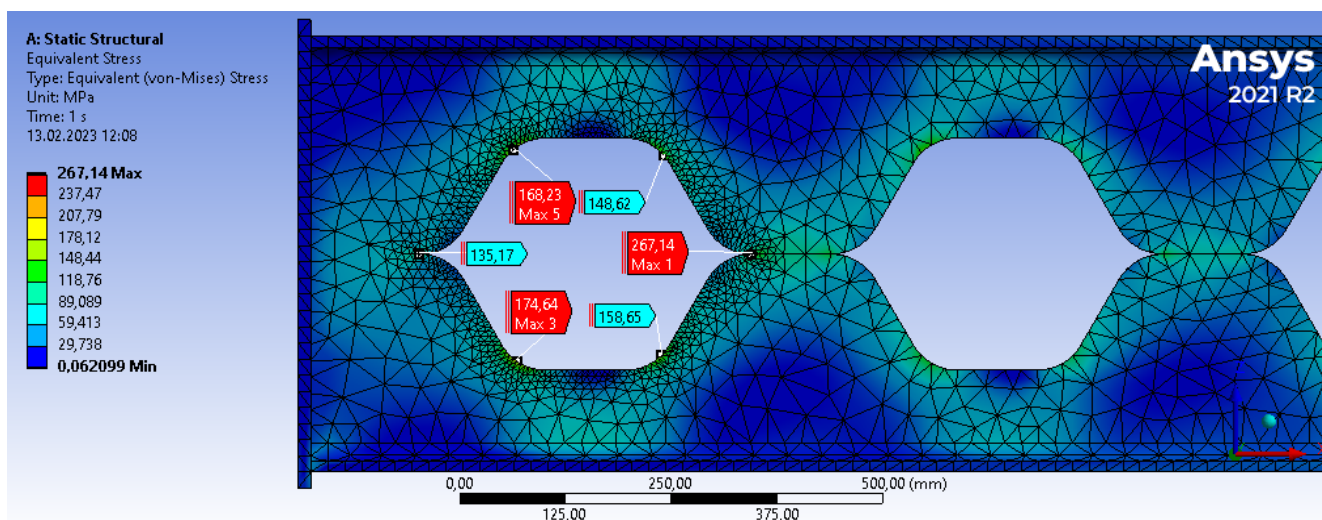


Рисунок 3.21 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.3.1, МПа

Отримали наступні дані: прогин становить 5,2694 мм, а максимальне еквівалентне напруження в місці стику двох частин – 267,14 МПа. Вага балки становить – 608,62 кг.

Отже, отримана форма є перспективною. Замінімо заокруглення з А.3.1 на пів період лінії синусоїди (рис. 3.22).

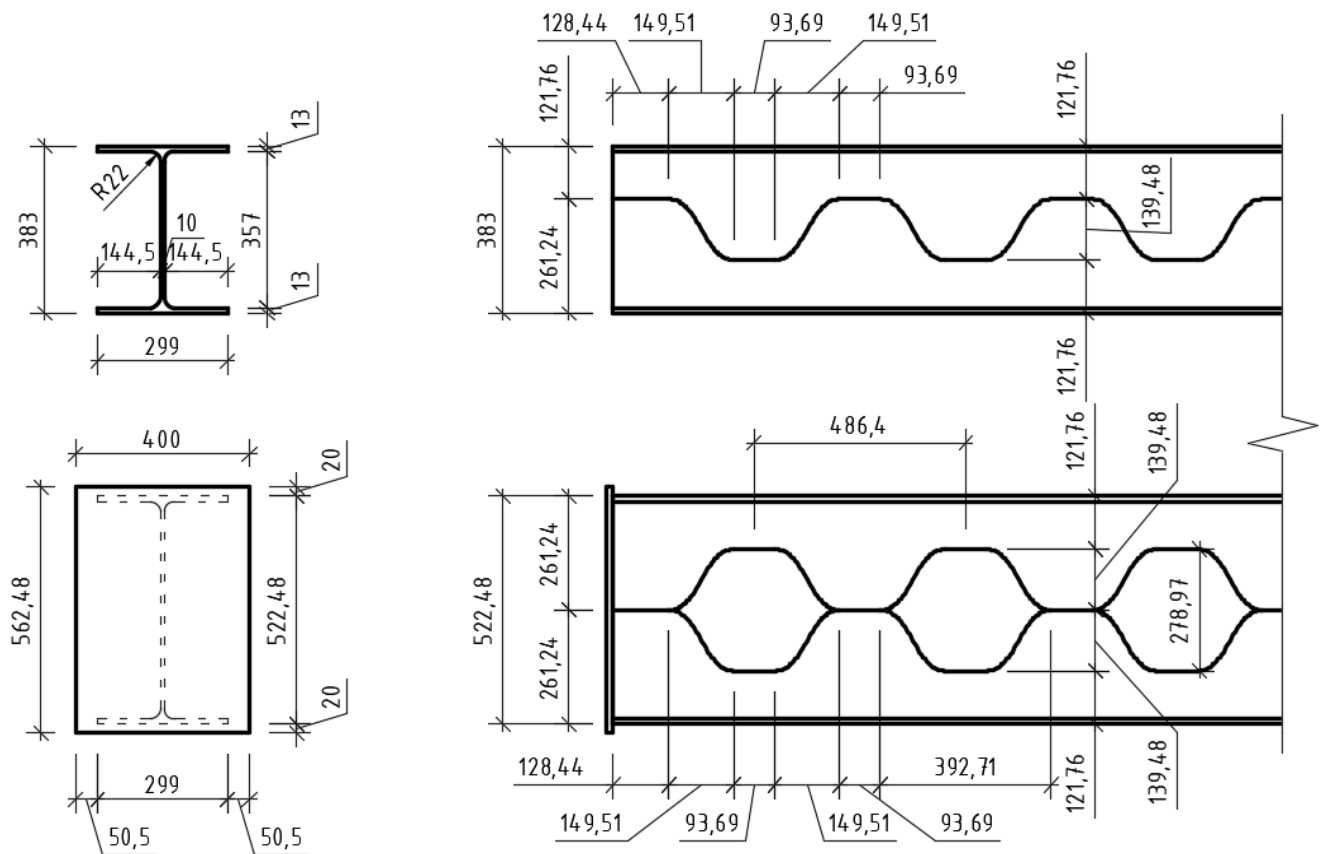


Рисунок 3.22 – Лінія розрізу первісної балки і геометричні характеристики перфорованої А.3.2

Виконуємо розрахунок і отримуємо результати прогину (рис. 3.23) і еквівалентних напружень навколо крайнього отвору (рис. 3.24).

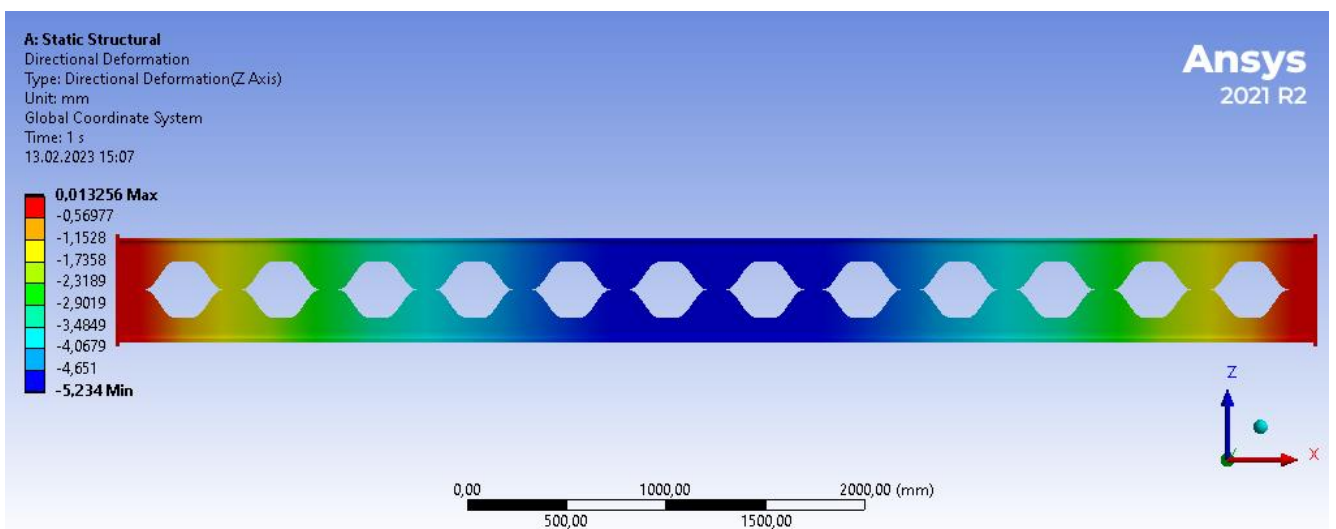


Рисунок 3.23 – Оцінка прогину перфорованої балки А.3.2, мм

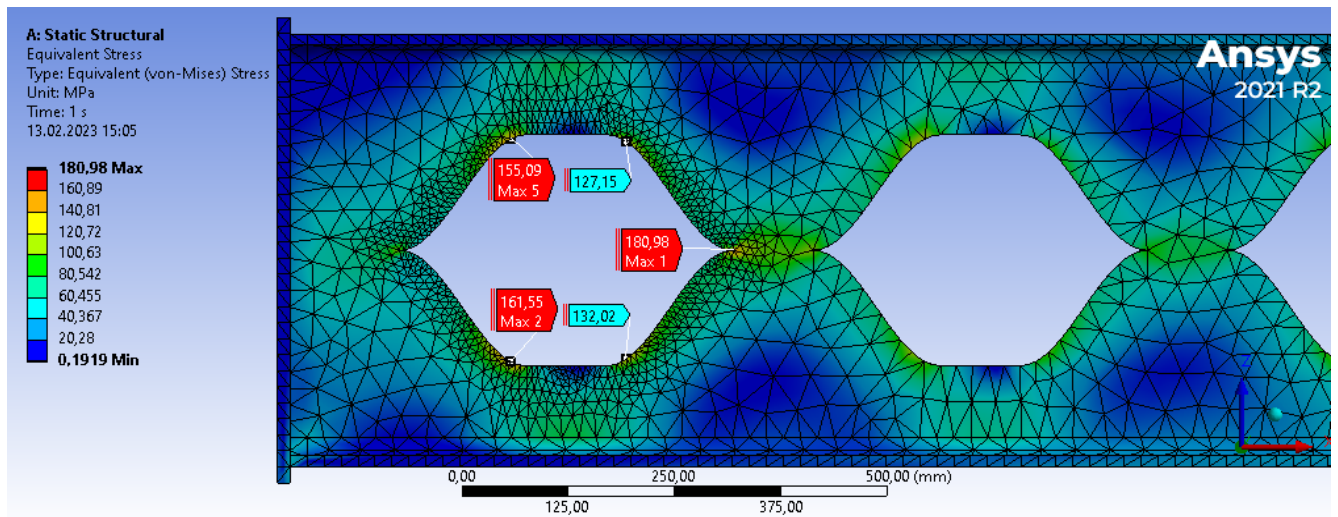


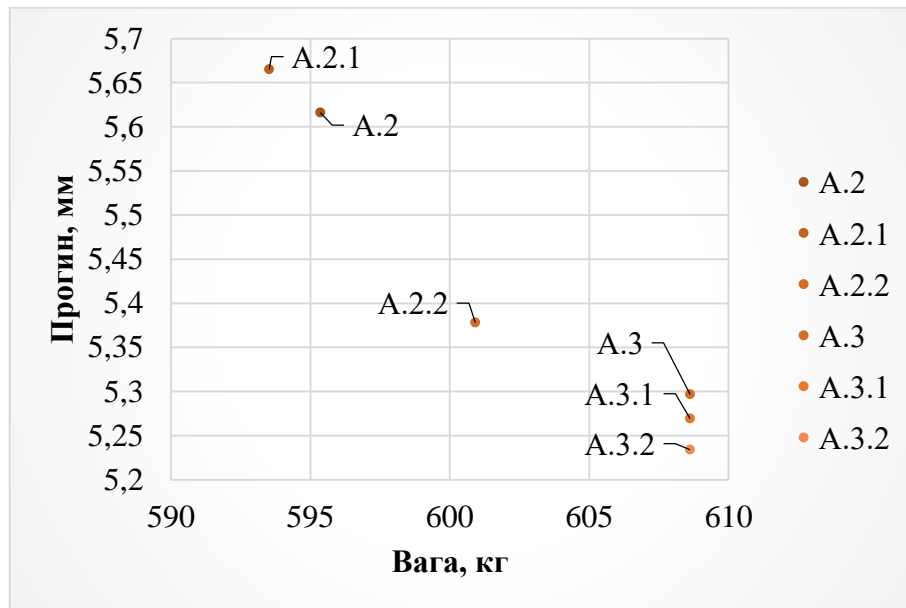
Рисунок 3.24 – Значення еквівалентних напружень навколо крайнього отвору в перфорованій балці А.3.2, МПа

Після розрахунку отримуємо наступні дані: прогин становить 5,234 мм, а максимальне еквівалентне напруження 180,98 МПа, при вазі балки 608,62 кг.

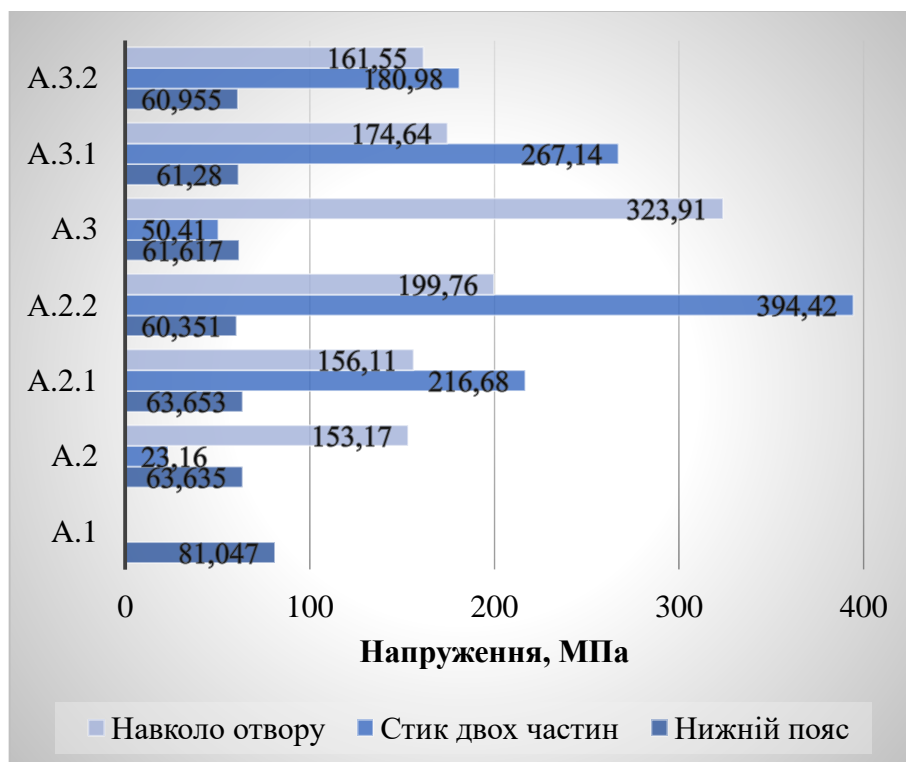
Всі отримані результати в даному пункту вводимо в таблицю 3.1 для їх порівняння, на основі цих даних будемо діаграми 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження НДС сталевих балок з перфорованою стінкою різних форм отворів

Марка балки	Прогин, мм	Максимальне еквівалентне напруження, МПа			Вага, кг
		Нижній пояс	Стик двох частин	Навколо отвору	
A.1	8,4871	81,047	-	-	593,71
A.2	5,6161	63,635	23,16	153,17	595,36
A.2.1	5,6652	63,653	216,68	156,11	593,52
A.2.2	5,3782	60,351	394,42	199,76	600,92
A.3	5,2969	61,617	50,41	323,91	608,62
A.3.1	5,2694	61,280	267,14	174,64	608,62
A.3.2	5,2340	60,955	180,98	161,55	608,62



Діаграма 3.1 – Відношення прогину до ваги, для досліджених видів балок



Діаграма 3.2 – Максимальні еквівалентні напруження у визначених місцях балок з різними видами отворів

Отже, проаналізувавши таблицю 3.1, і побудовані діаграми 3.1 і 3.2, можна констатувати, що найменший прогин має балка А.3.2 з синусоїдними отворами ( $Z = 5,234$  мм). Також менші значення, у порівнянні з іншими, мають балки з

шестикутною перфорацією А.3 і первісна від неї з заокругленням А.3.1. Балки з круглими отворами зазнають більшого прогину приблизно на 7%, окрім варіанту А.2.2, але напруження в цьому варіанті є найбільшими з-поміж усіх представлених.

Напруження у нижній полиці балки для всіх видів отворів перфорації майже не відрізняються (зміни не перевищують 4,2%). Проте на контурах різних видів перфорації відрізняються суттєво, приблизно в 17 раз (від 23,16 МПа до 394,42 МПа). Балка з круглими отворами має найменші напруження навколо перфорації.

З-поміж представлених видів перфорації визначено 2 найефективніших – це балка з круглими отворами та синусоїдними, перша краще сприймає і перерозподіляє навантаження, а друга зазнає менших прогинів. Для економії ресурсів, наступні дослідження будуть проводитись лише з цими двома формами перфорації.

### 3.3 Дослідження підсилюючих накладок біля місця перфорації

Виходячи з досліджень в попередньому пункті, зрозуміло що найуразливіше місце даного типу конструкцій – це кромки отворів перфорації і місця їх стику. Для зменшення цих значень використовують різного виду накладки [21], які суттєво можуть знизити локальні напруження, але для синусоїдних отворів, накладки, представлені в вищезгаданій літературі, є важкими у виготовленні і закріпленні, тому запропонований інший варіант такого підсилення (рис. 3.25, 3.26).

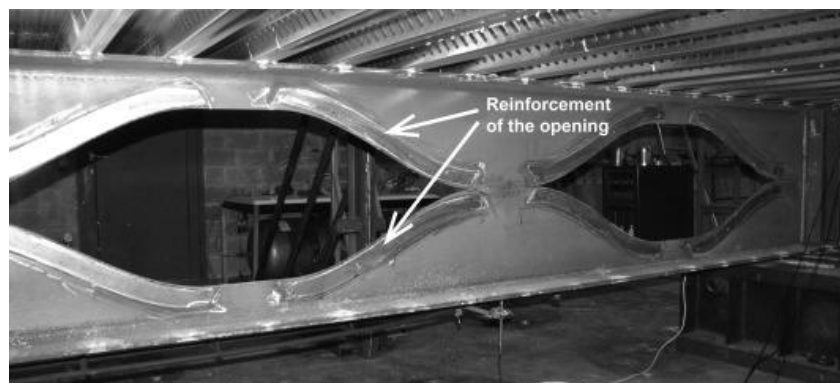


Рисунок 3.25 – Виконання накладок на реальній моделі перфорованої балки

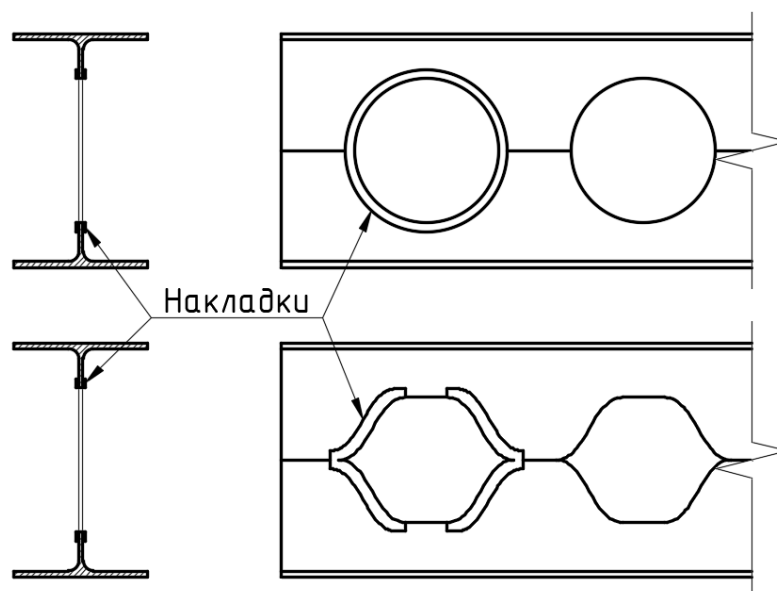


Рисунок 3.26 – Схематичне зображення підсилюючих накладок навколо отворів перфорації

Створюємо розрахункові моделі з даними підсилюючими накладками товщиною 5 мм і шириною 20 мм, виконуємо розрахунок і отримуємо значення еквівалентних напружень навколо круглого (рис. 3.27) і синусоїдного (рис. 3.28) отвору перфорації. Для розуміння додатково маркуємо підсилені балки знаком «+».

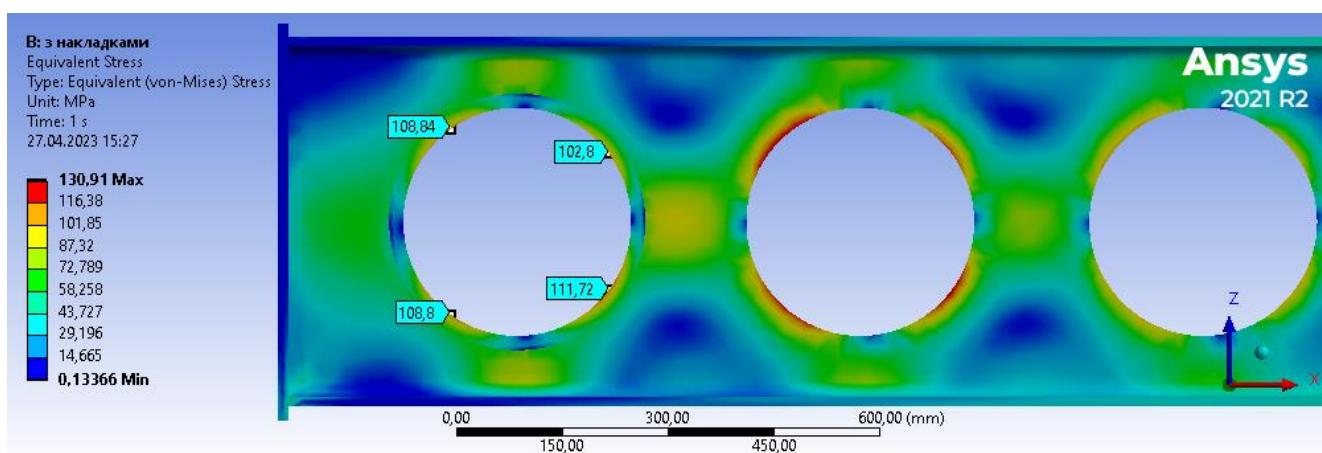


Рисунок 3.27 - Значення еквівалентних напружень навколо крайнього підсиленого отвору в перфорованій балці А.2+, МПа

Отримано наступні результати для круглої перфорації: значення прогинів в балці з накладками зменшились до 5,5392 мм, а максимальне еквівалентне



напруження знизилось до 111,72 МПа, вага збільшилась до 598,74 кг. Для балки з синусоїдними отворами значення прогину становлять 5,1813 мм, а максимальне еквівалентне напруження – 169,88 МПа, при вазі 611,35 кг.

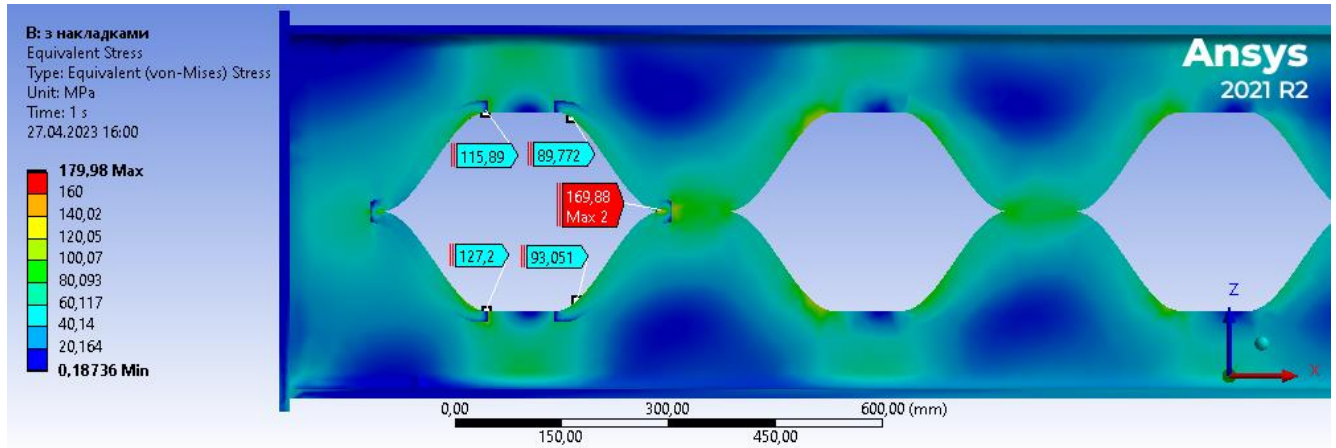


Рисунок 3.28 - Значення еквівалентних напружень навколо крайнього підсиленого отвору в перфорованій балці А.3.2+, МПа

З отриманих результатів створимо порівняльну таблицю 3.2, місця визначення еквівалентних напружень приймаємо за годинниковою стрілкою.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження НДС перфорованих балок з підсилюючими накладками в зонах отворів

Марка балки	Прогин, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа (по циферблату за год. стрілкою)					Вага, кг
		1,5	3	4,5	7,5	10,5	
А.2	5,6161	141,84	-	153,17	152,6	150,73	595,36
А.2+	5,5392	102,80	-	111,72	108,8	108,84	598,74
А.3.2	5,2340	127,15	180,98	132,02	161,55	155,09	608,62
А.3.2+	5,1813	89,77	169,88	93,05	127,2	115,89	611,35

Для обох типів балок, підсилюючі накладки на крайніх отворах перфорації знизили прогин більше ніж на 1%, при тому вага ригеля з круглою формою збільшилась всього на 0,6%, а з синусоїдною – на 0,5%.

Для круглої балки максимальне еквівалентне напруження зменшилось на 37%, а середнє навколо отвору на 38%, а ось для синусоїдної перфорації максимальні напруження змінились лише на 6%, хоча середнє значення навколо отвору загалом знизилась на 27%.

Отже, підсилюючі накладки є ефективним методом зниження напружень навколо отворів перфорації, при незначній зміні ваги балки, але для синусоїдної форми все одно виникають локальні перенапруження, які накладку не в змозі зменшити.

### **3.3 Дослідження первісного сортаментного прокату двотаврів для виготовлення сталевих перфорованих балок**

На даний момент в Україні виготовляють гарячекатані двотаври за сортаментами Європи, США і пострадянських держав. Оскільки за останні роки стандарти нашої країни приближаються до ЄС, то будемо використовувати розміри наведених саме у цих нормах.

Країни Європейського Союзу мають як національні, так і загальнодержавні сортаменти, деякі з них не відрізняються від European Standards (EN) а інші повністю не відповідають їм, наприклад British Standard (BS). В 2017 році ці два сортаменту були з'єднані в один під назву EN 10365:2017 [22] де було об'єднано багато типів профілів двотаврів гарячекатаних з паралельними гранями полиць по типу IPE, HE, HL, HD, HP, UBP, UB і UC.

З попередніх досліджень виявлено, що найперспективнішими типами прокату для перфорованих балок є IPE (з паралельними вузькими полицями) і UB (універсальні балки), оскільки ї перерізи вищі від інших, а полиці менші, що сприяє кращому розподіленні напружень в перфорованій балці.

Для порівняння цих типів перерізів беремо по два перерізи з приблизно однаковою вагою, для перших досліджуємо IPE 500, IPE A 550; і для других – UB 533×210×92, UB 610×178×92.



Для дослідження візьмемо балки з круглими і синусоїдними отворами, для кращої оцінки розміри перфорації беремо однаковими. Розрахункова схема балки 24 м, з рівномірно розподіленим навантаженням 5,5 кН/м до якого додається власна вага конструкції (рис. 3.29).

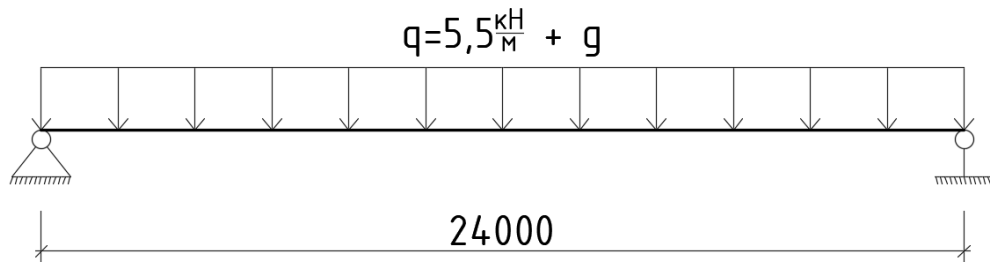


Рисунок 3.29 – Розрахункова схема досліджуваних перфорованих балок

Для подальшого розуміння зробимо маркування балкам: перше позначення відповідає формі отвору перфорації «SIN» і «CIR», синусоїдні і круглі отвори відповідно; подальше позначення відповідає первісному перерізу і його номеру IPE 500 / A 500, UB 533 / 610. Всі характеристики матеріалу вибрані як і в попередніх розділах і пунктах (09Г2С, С345). Розміри отворів беремо відповідно до рекомендацій, наведених в каталозі ArcelorMittal [10].

Спершу досліджуємо балки з круглими отворами CIR.IPE.500, первісного перерізу IPE 500, діаметр отворів 645 мм, крок 795 мм, кількість отворів 30 штук, ширина стінки між отворами становить 150 мм, ширина крайньої перетинки 150 мм (рис. 3.30).

Виконуємо розрахунок перфорованої балки і отримуємо результати прогину, еквівалентних напружень і стійкості. Для зменшення візуального матеріалу будемо виводити тільки результати еквівалентних напружень (рис. 3.31) інші результати будемо вносити в зведену таблицю 3.3 (див. кінець пункту 3.3, арк. 55).

Прогин даної балки становить 115,06 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо центральних отворів 230,81 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 83,91 МПа, критичне навантаження 1,08 кН/м. Вага балки становить 1 994,3 кг.

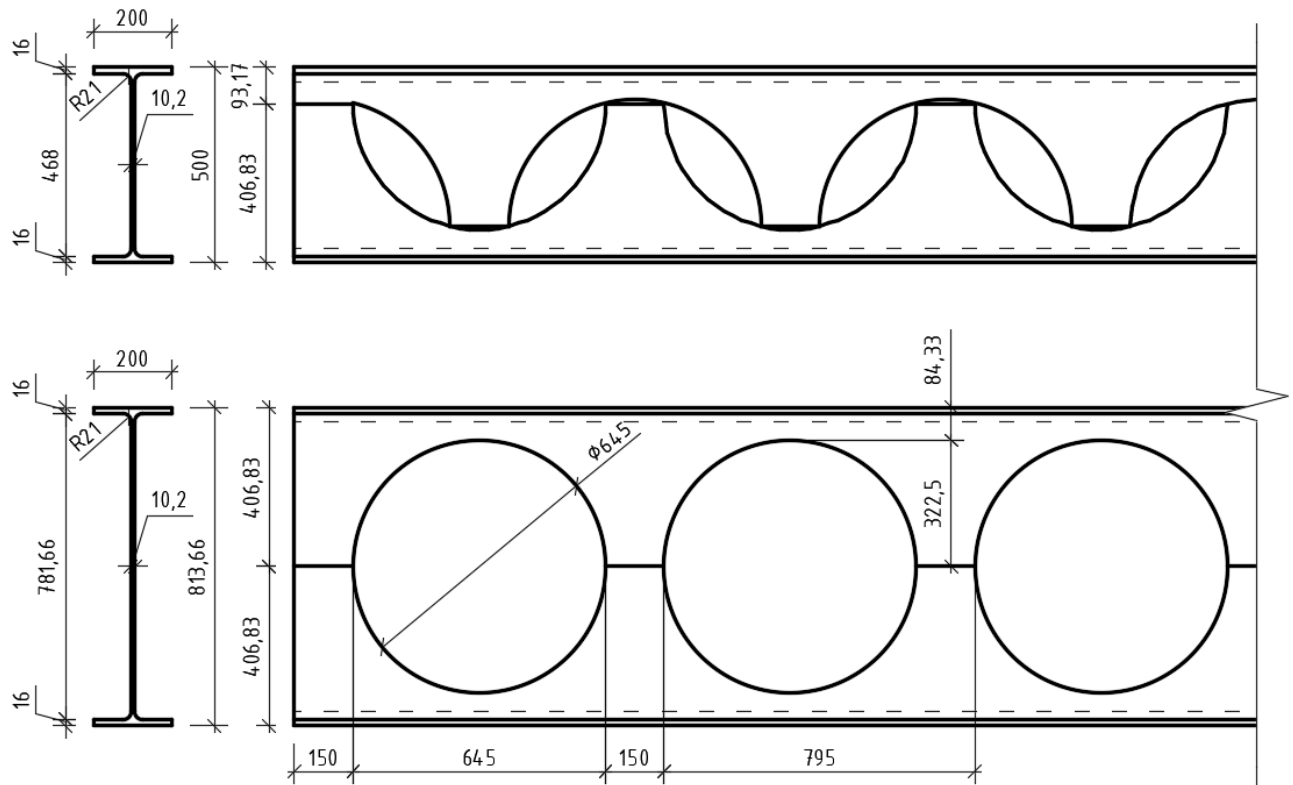


Рисунок 3.30 – Геометричні характеристики перфорованої балки CIR.IPE.500

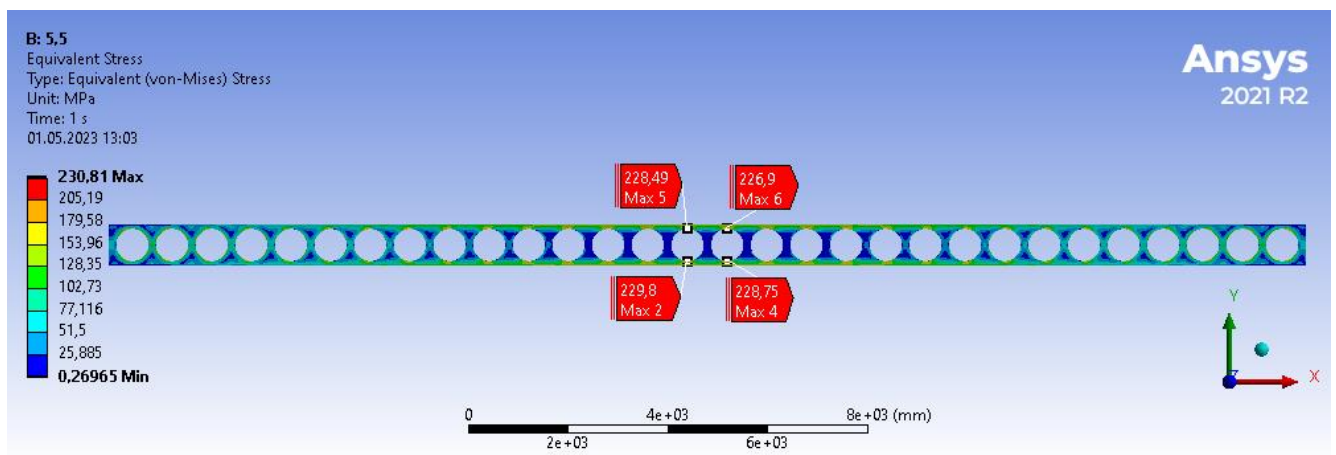


Рисунок 3.31 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці CIR.IPE.500, МПа

Створюємо аналогічну перфоровану балку CIR.UB.533, з прокатного профілю UB 533×210×92, розміри і форма отворів відповідають попередній (рис. 3.32).

Виконуємо розрахунок і отримуємо результати прогину, еквівалентних напружень (рис. 3.33) і стійкості.

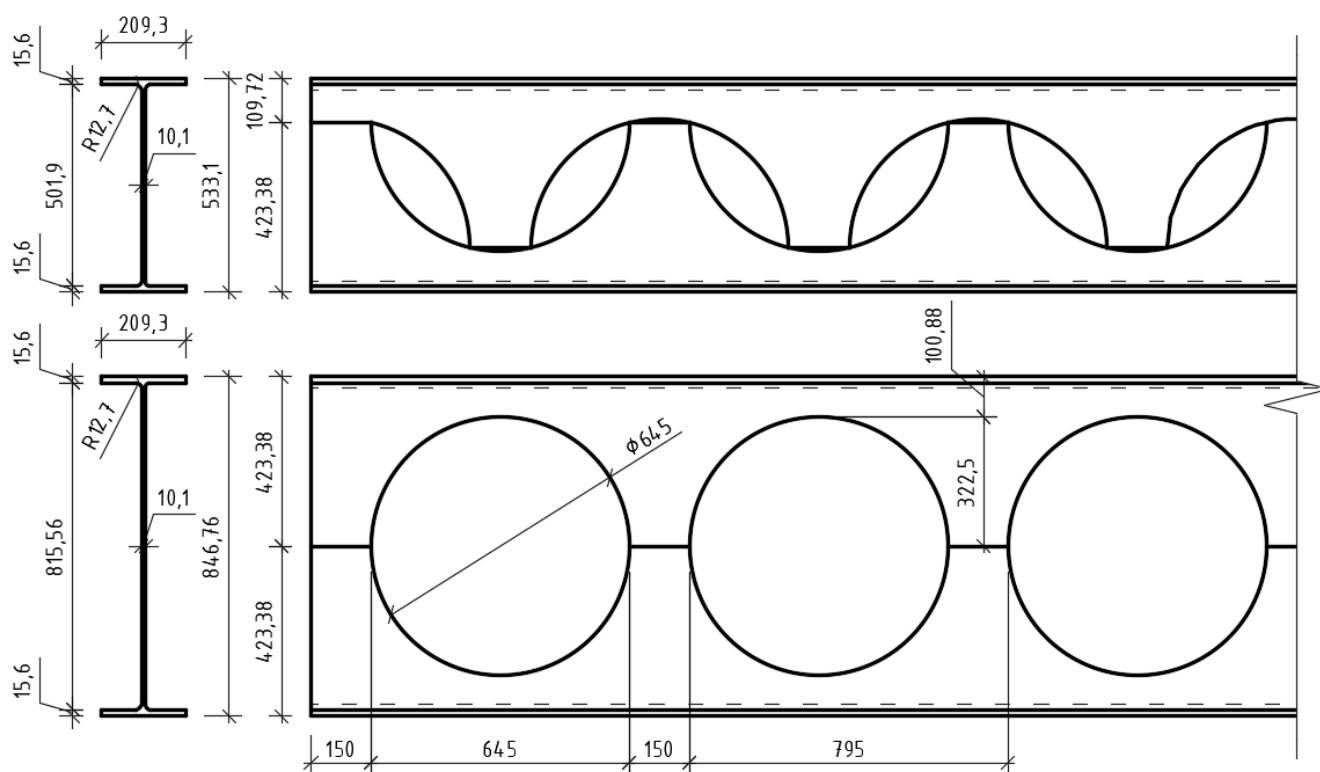


Рисунок 3.32 – Геометричні характеристики перфорованої балки CIR.UB.533

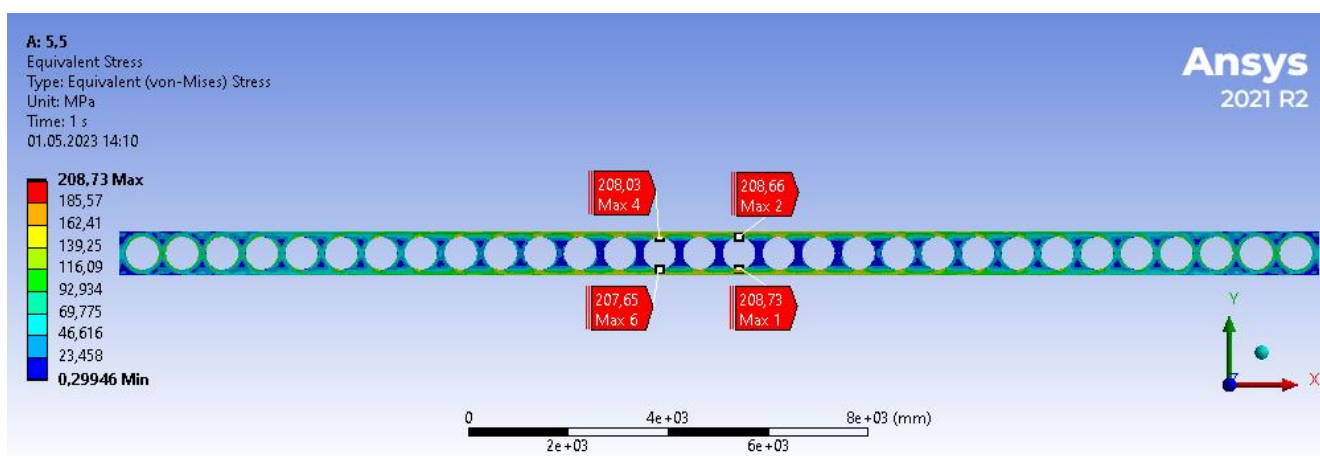


Рисунок 3.33 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці CIR.UB.533, МПа

Прогин даної балки становить 104,13 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо центральних отворів 208,73 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 78,40 МПа, критичне навантаження 1,06 кН/м. Вага балки становить 2 031,1 кг.

Ще створюємо дві балки з аналогічною перфорацією CIR.IPE.550 з профілю IPE A 550 і CIR.UV.610 з профілю 610×178×92, вони мають таку ж саму форму отворів, лише відрізняються геометричними параметрами поперечного перерізу.

Виконуємо розрахунок цих балок і отримуємо значення прогинів, еквівалентних напружень (рис. 3.34, 3.35) і стійкості.

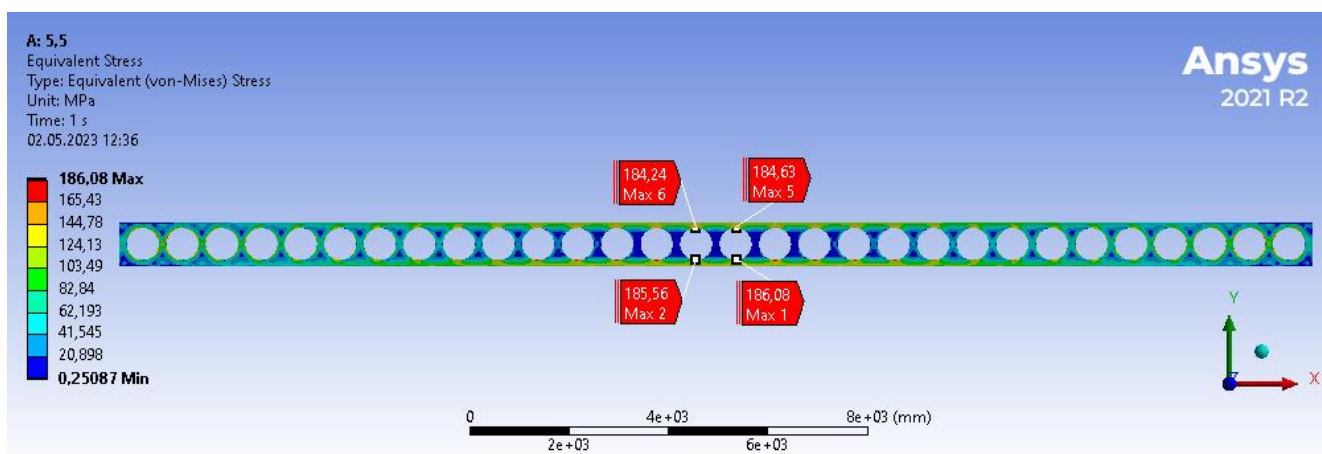


Рисунок 3.34 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці CIR.IPE.550, МПа

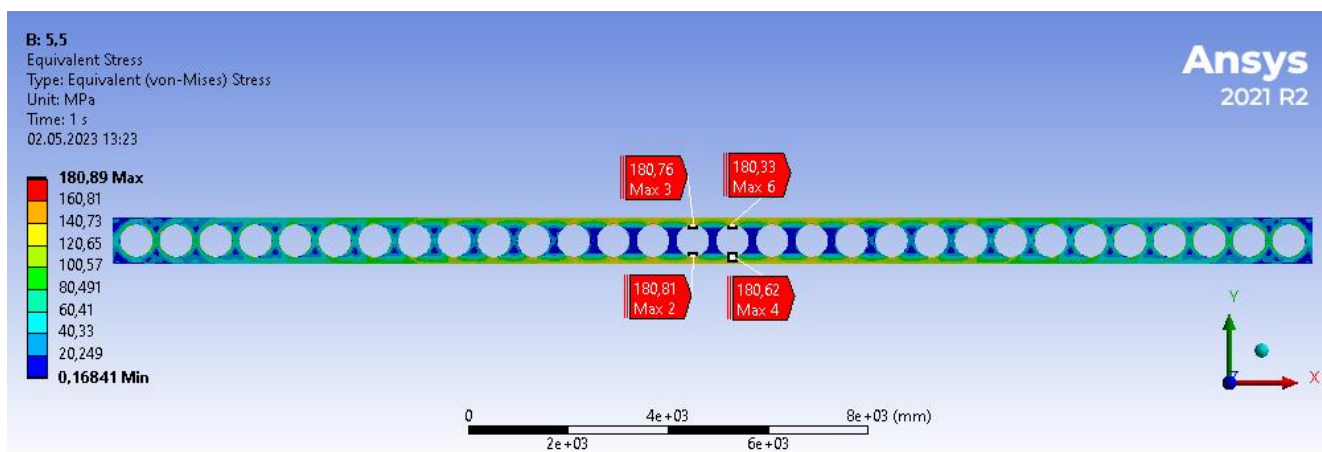


Рисунок 3.35 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці CIR.UV.610, МПа

Прогин балки CIR.IPE.550 становить 95,82 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо центральних отворів 186,08 МПа, значення середніх

еквівалентних напружень 74,65 МПа, критичне навантаження 1,14 кН/м. Вага балки становить 2 064,0 кг.

Прогин балки CIR.UB.610 становить 93,82 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо центральних отворів 180,89 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 75,49 МПа, критичне навантаження 0,79 кН/м. Вага балки становить 2 018,7 кг.

На основі досліджених первісних профілів створюємо 4 моделі сталевих балок з перфорованою стінкою і синусоїдною формою отвору. Створюємо модель SIN.IPE.500 з первісного перерізу IPE 500 висота отвору  $a_0 = 645$  мм, крок 850 мм, ширина перегородки  $w = 150$  мм, довжина синусоїдної ділянки  $s = 275$  мм (рис. 3.36).

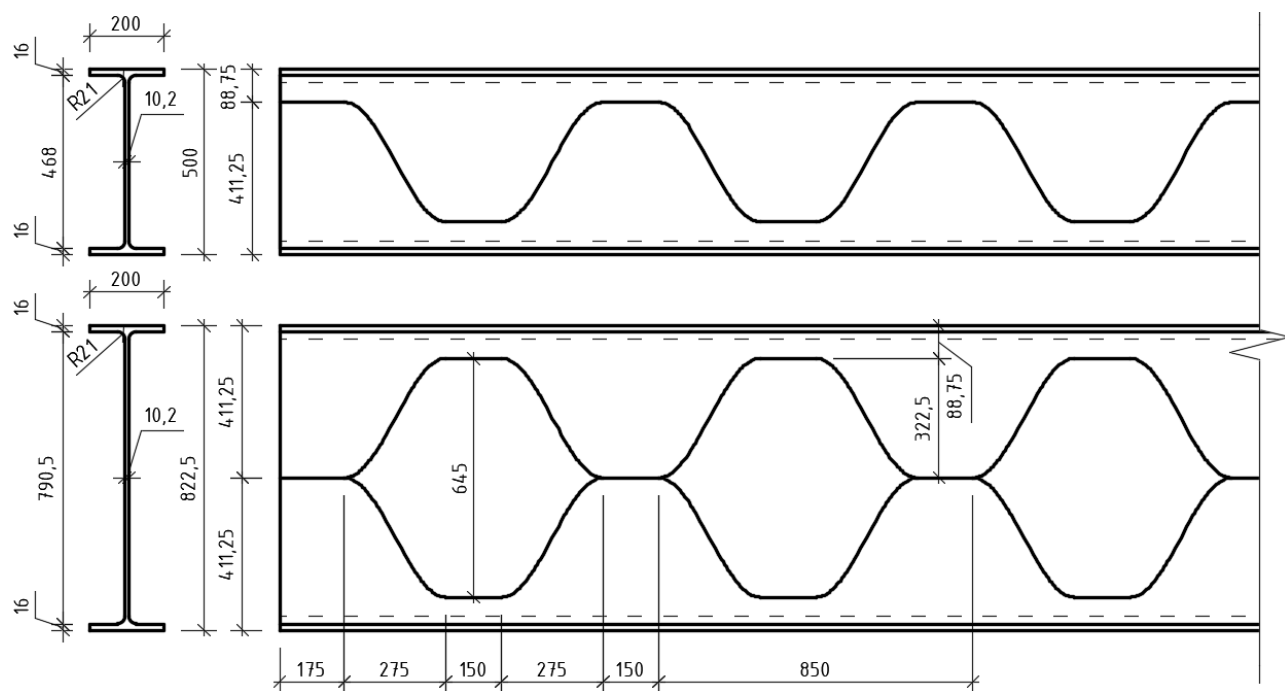


Рисунок 3.36 – Геометричні характеристики перфорованої балки SIN.IPE.500

Виконуємо розрахунок і отримуємо результати прогину, еквівалентних напружень в перерізі балки (рис. 3.37) а також стійкості.

Прогин балки SIN.IPE.500 становить 108,84 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо отворів 286,78 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 74,89 МПа, критичне навантаження 1,1 кН/м. Вага становить 2 181,9 кг.

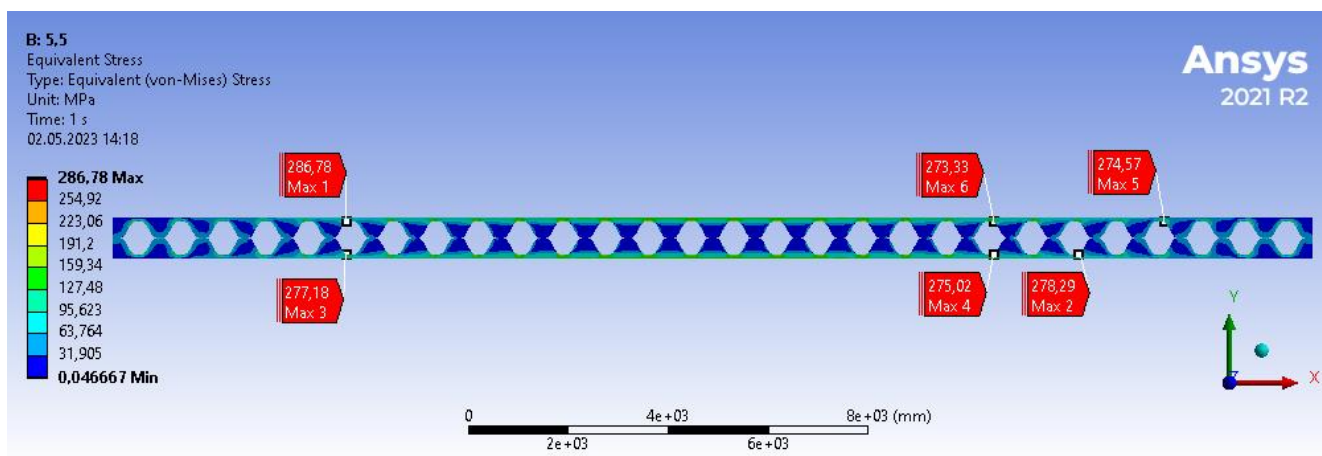


Рисунок 3.37 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці  
SIN.IPE.500, МПа

Далі створюємо балки аналоги SIN.UB.533, SIN.IPE.550 і SIN.UB.610, з балок UB 533×210×92, IPE A 550 і UB 610×178×92 відповідно. Форма, розміри і кількість отворів така ж сама як на рисунку 3.35.

Виконуємо розрахунок балок і отримуємо значення прогинів, еквівалентних напружень (рис. 3.38, 3.39, 3.40), а також стійкість.

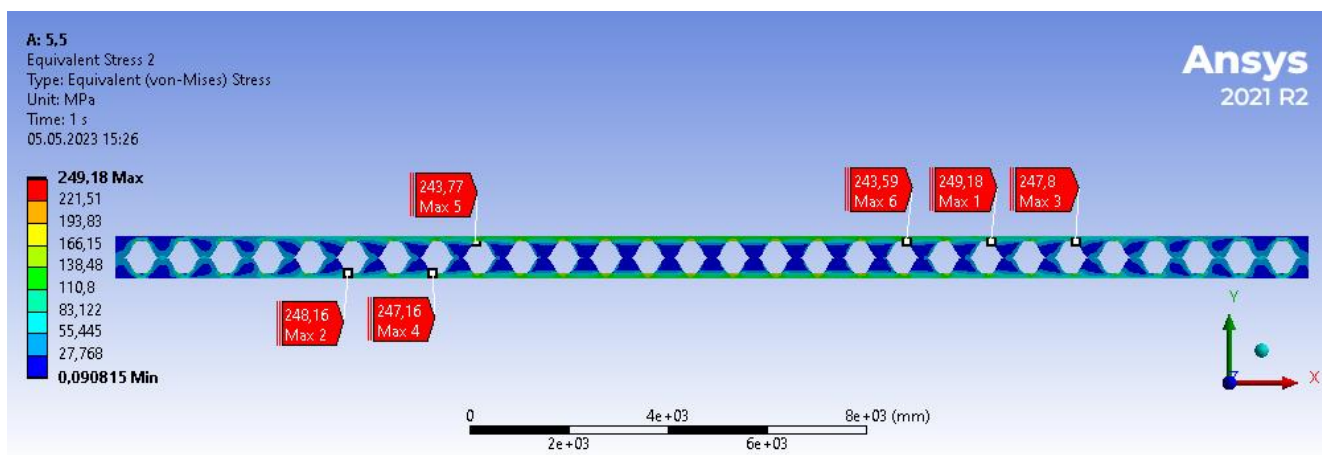


Рисунок 3.38 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці  
SIN.UB.533, МПа

Прогин балки SIN.UB.533 становить 98,77 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо отворів 249,18 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 70,47 МПа, критичне навантаження 1,08 кН/м. Вага балки 2 216,8 кг.

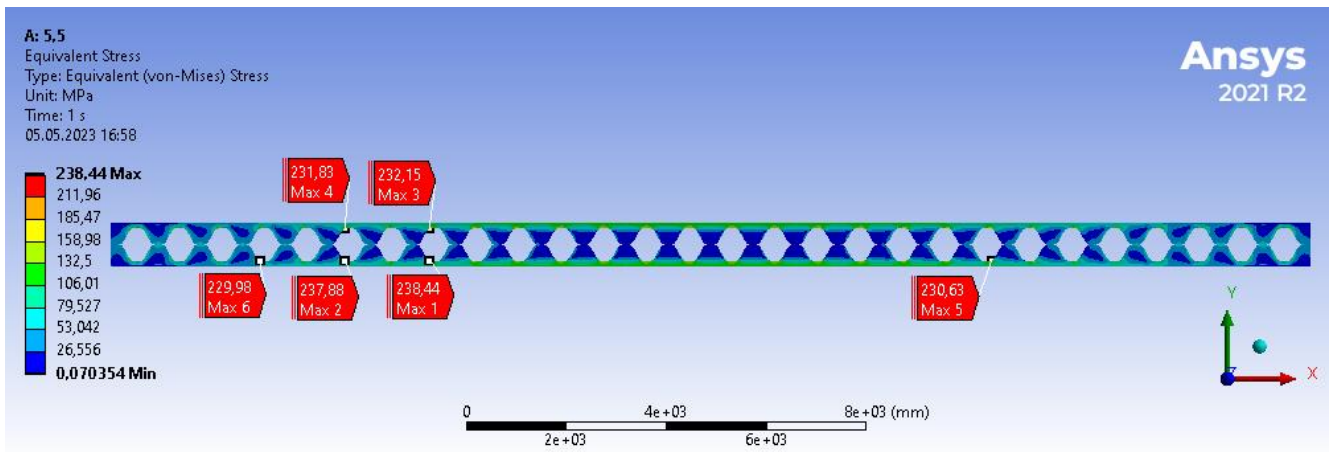


Рисунок 3.39 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці  
SIN.IPE.550, МПа

Прогин балки SIN.IPE.550 становить 92,93 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо отворів 238,44 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 67,89 МПа, критичне навантаження 1,16 кН/м. Вага балки 2 214,5 кг.

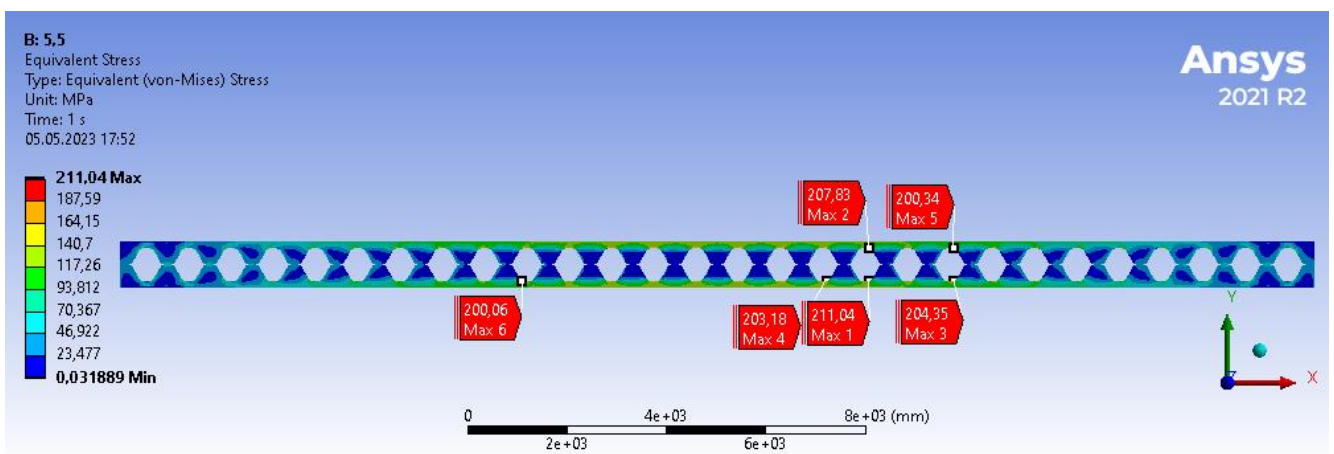


Рисунок 3.9 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці  
40SIN.UB.610, МПа

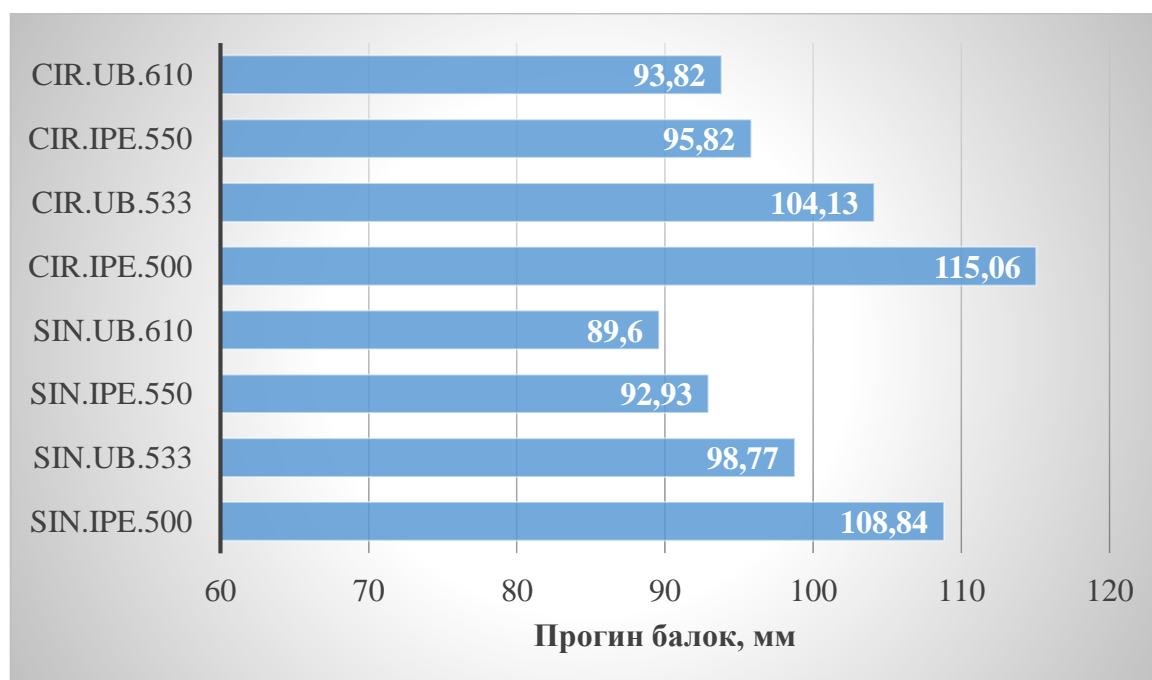
Прогин балки SIN.UB.610 становить 89,60 мм, максимальні еквівалентні напруження навколо отворів 211,04 МПа, значення середніх еквівалентних напружень 68,39 МПа, критичне навантаження 0,82 кН/м. Вага балки 2 219,2 кг.

Отримані дані вносимо в таблицю 3.3. На її основі створюємо діаграму 3.3 і 3.4 (прогину балок і максимальних еквівалентних напружень відповідно).



Таблиця 3.3 – Результати дослідження НДС перфорованих балок різних типів первісних сортаментів

Марка балки	Прогин, мм	Еквівалентні напруження, МПа		Критичне навантаження, кН/м	Вага, кг
		Максимальні	Середні		
Балки з круглими отворами					
CIR.IPE.500	115,06	230,81	83,91	1,08	1 994,3
CIR.UB.533	104,13	208,73	78,40	1,06	2 031,1
CIR.IPE.550	95,82	186,08	74,65	1,14	2 064,0
CIR.UB.610	93,82	180,89	75,49	0,79	2 018,7
Балки з синусоїдними отворами					
SIN.IPE.500	108,84	286,78	74,89	1,10	2 181,9
SIN.UB.533	98,77	249,18	70,47	1,08	2 216,8
SIN.IPE.550	92,93	238,44	67,89	1,16	2 214,5
SIN.UB.610	89,60	211,04	68,39	0,82	2 219,2



Діаграма 3.3 – Значення прогинів перфорованих балок з однаковими круглими (CIR) і синусоїдними (SIN) отворами, для різних типів первісних балок при схожій вазі





Діаграма 3.4 – Значення максимальних еквівалентних напружень в перфорованих балках з однаковими круглими (CIR) і синусоїдними (SIN) отворами, для різних типів первісних балок при схожій вазі

Виходячи з результатів дослідження, які наведені в таблиця 3.3 і діаграмах 3.3 і 3.4, можна зробити наступні висновки.

Прогин балок зменшується при збільшенні поперечного перерізу, як для круглих отворів так і для синусоїдних, при тій же самій вазі. Найменшого прогину зазнають балки з первісного сортаменту UB, а різниця між видами отворів становить 4,5%, що є суттєвим при використанні однакових сортamentів.

Максимальні напруження теж зменшуються при збільшенні поперечного перерізу. Зазначимо що для більших поперечних перерізів можна зробити більші отвори, що трохи зменшать максимальний прогин.

Стійкість балок навпаки зменшується при більших перерізах (для UB.610 це суттєво для обох форм перфорації), тому дані балки потрібно додатково розкріплювати в'язями по верхніх полицях, що забезпечить їх стійкість.

### 3.4 Дослідження розмірів синусоїдних отворів перфорації

Виходячи з попередніх досліджень, одними з перспективних отворів перфорації сталевих балок є синусоїдні. Ригелі з такими формами мають менші прогини у порівнянні з іншими, а також локальні напруження не перевищують 20% від круглих отворів. Оскільки ці балки є менш трудомісткими, то доцільно буде дослідити детальніше вплив розмірів перфорації на НДС конструкції.

Для подальшого розуміння введемо геометричні характеристики для отворів перфорації:  $a$  – висота отворів,  $w$  – довжина перегородки,  $s$  – довжина синусоїдної частини,  $e$  – крок перфорації,  $n$  – кількість отворів перфорації (рис. 3.41).

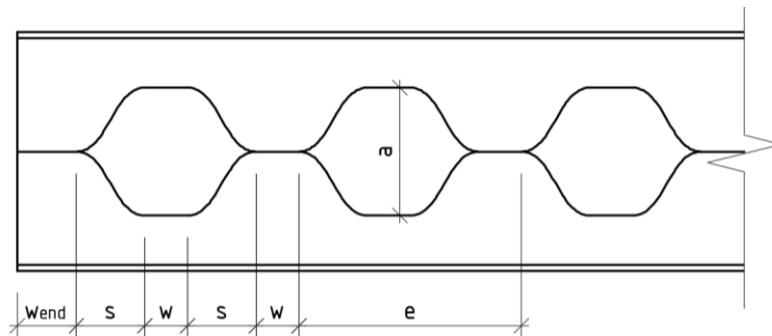


Рисунок 3.41 – Геометричні параметри отворів перфорації балки

Основними параметрами дослідження стане висота отвору перфорації  $a$  відносно висоти первісного перерізу  $h$  і відношення перегородки  $w$  до синусоїдної частини  $s$ . У дослідженнях висоту отвору візьмемо з наступними параметрами  $a = 0,8h / 1,1h / 1,4h$ , а довжину синусоїдної частини –  $s = 1w / 2w / 3w$ .

Всі характеристики матеріалів беремо як і в попередніх дослідженнях, первісну балку обираємо UB 610×178×92. Ригелі будуть маркуватись наступним чином – UB.( $a$ ).( $s$ ), де  $a$  – висота отвору відносно первісного перерізу,  $s$  – довжина синусоїдної частини відносно перегородки  $w$ .

Перше створюємо балку UB.08.1, де висота отвору становить  $a = 482$  мм, крок отворів  $e = 530,4$  мм,  $s = w = 132,6$  мм, кількість отворів  $n = 45$  (рис. 3.42).

Виконуємо розрахунок балки і отримуємо результати прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.43).

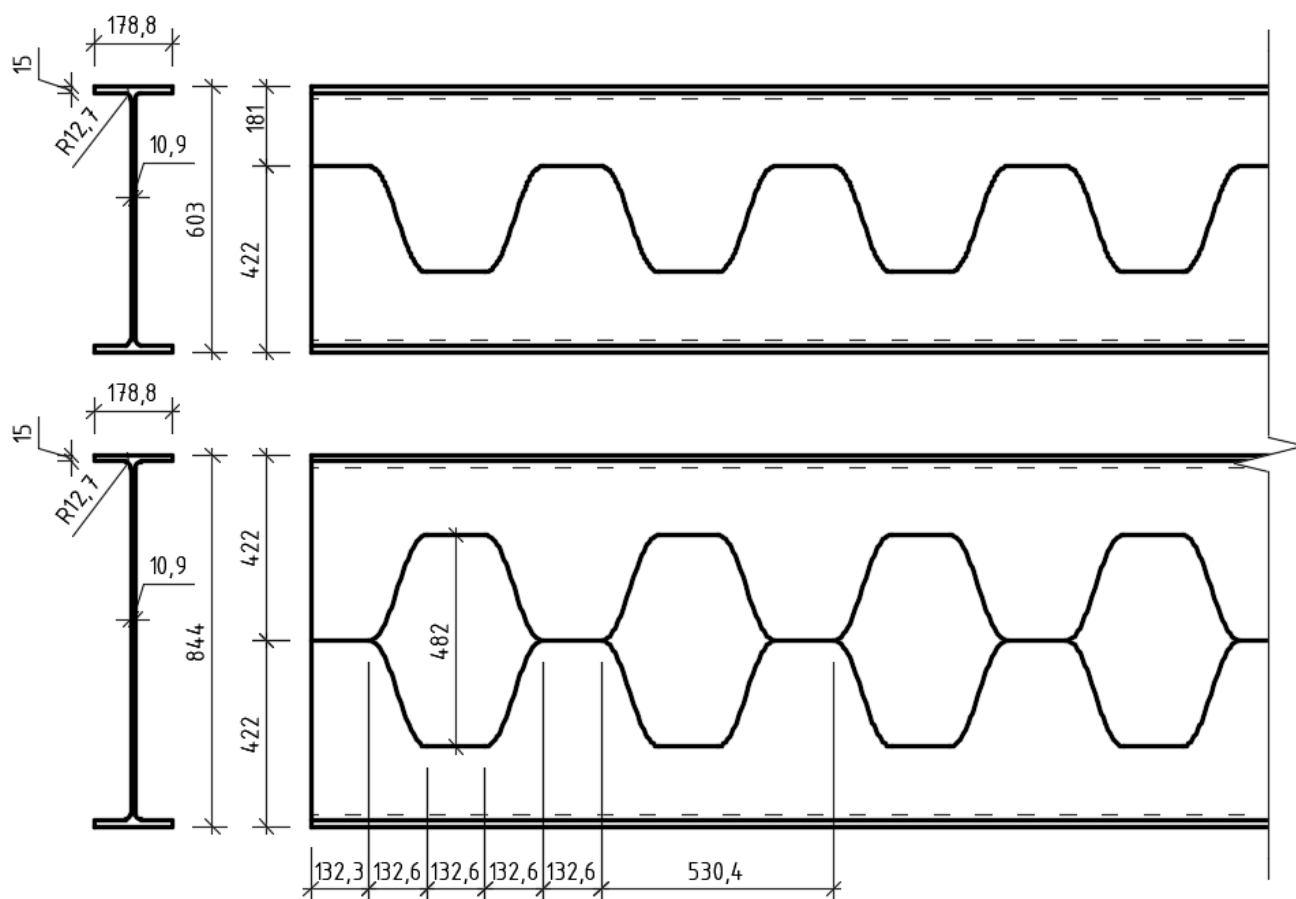


Рисунок 3.42 – Геометричні характеристики перфорованої балки UB.08.1

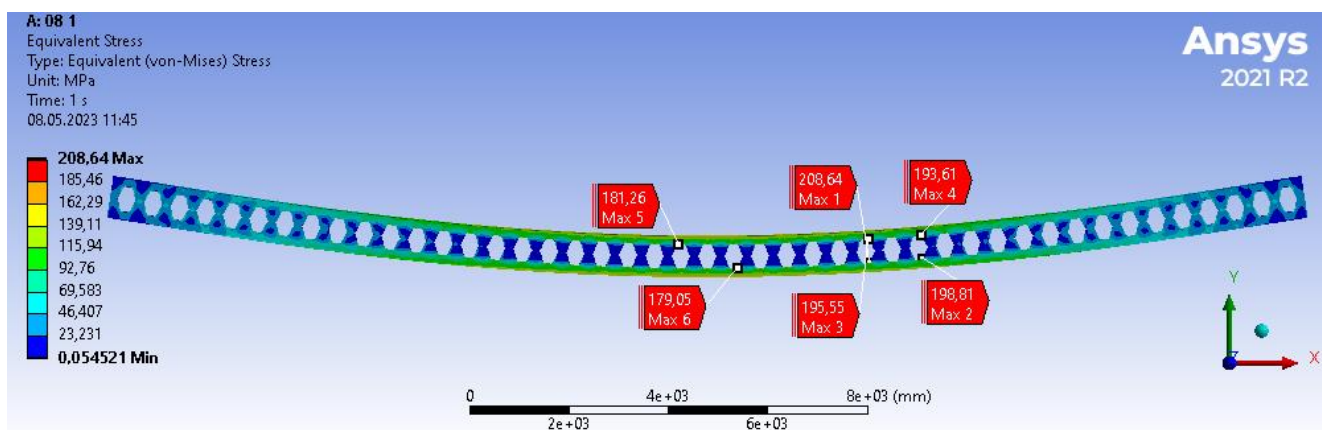


Рисунок 3.43 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.08.1, МПа

Прогин перфорованої балки UB.08.1 становить 105,16 мм, максимальні еквівалентне напруження в околі отвору становить 208,64 МПа, середні еквівалентні напруження 71,67 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

На основі попередньої балки створюємо дві нових з відношенням  $s/w = 2$  і  $3$ , UB.08.2 і UB.08.3 відповідно. Для першої з них наступні геометричні параметри будуть такими:  $a = 482$  мм, крок отворів  $e = 795,6$  мм,  $s = 2w = 265,2$  мм, кількість отворів  $n = 30$ . Виконуємо розрахунок балки і отримуємо результати прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.44).

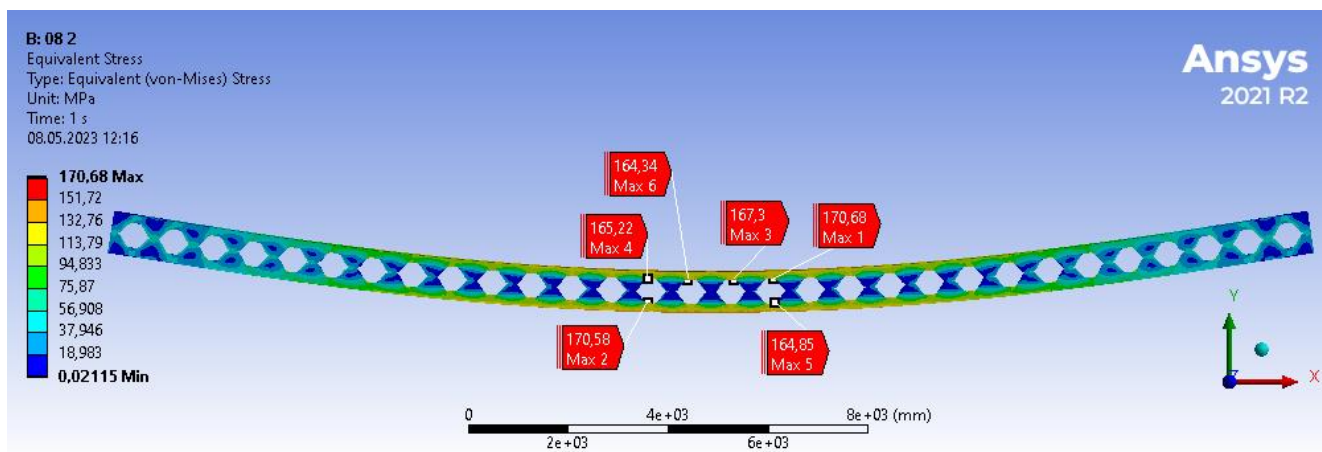


Рисунок 3.44 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.08.2, МПа

Прогин перфорованої балки UB.08.2 становить 104,22 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 170,68 МПа, середні еквівалентні напруження 72,89 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Для балки UB.08.3 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 482$  мм, крок отворів  $e = 1 084,8$  мм,  $s = 3w = 406,8$  мм, кількість отворів  $n = 22$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.45).

Прогин перфорованої балки UB.08.3 становить 104,17 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 163,52 МПа, середні еквівалентні напруження 73,34 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Для наступного дослідження збільшуємо висоту отвору перфорації до  $1,1h$  від початкової висоти перерізу, вона становитиме  $a = 662$  мм.

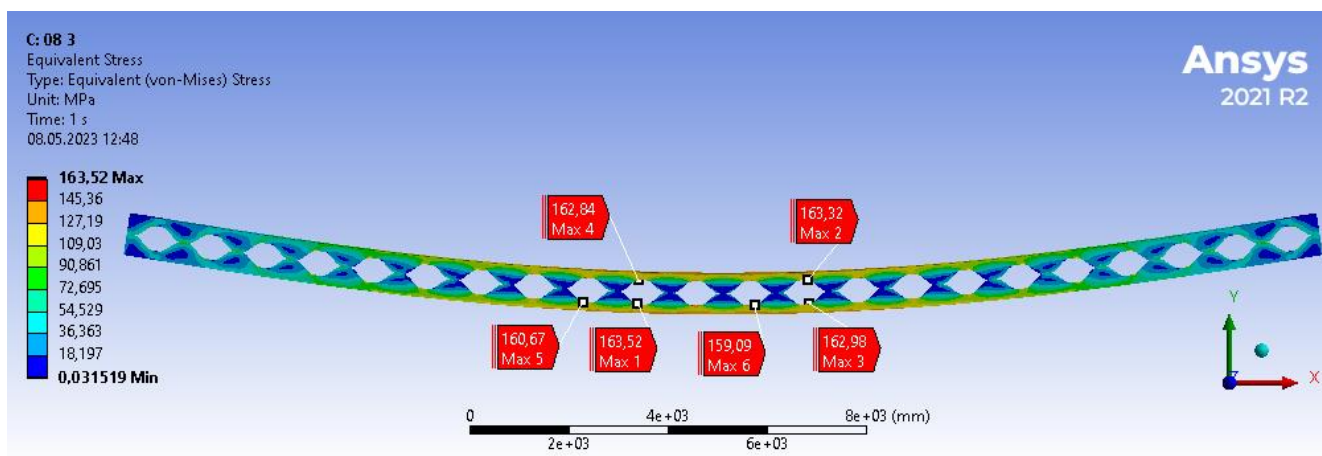


Рисунок 3.45 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.08.3, МПа

Для балки UB.11.1 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 662$  мм, крок отворів  $e = 530,4$  мм,  $s = w = 132,6$  мм, кількість отворів  $n = 45$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.46).

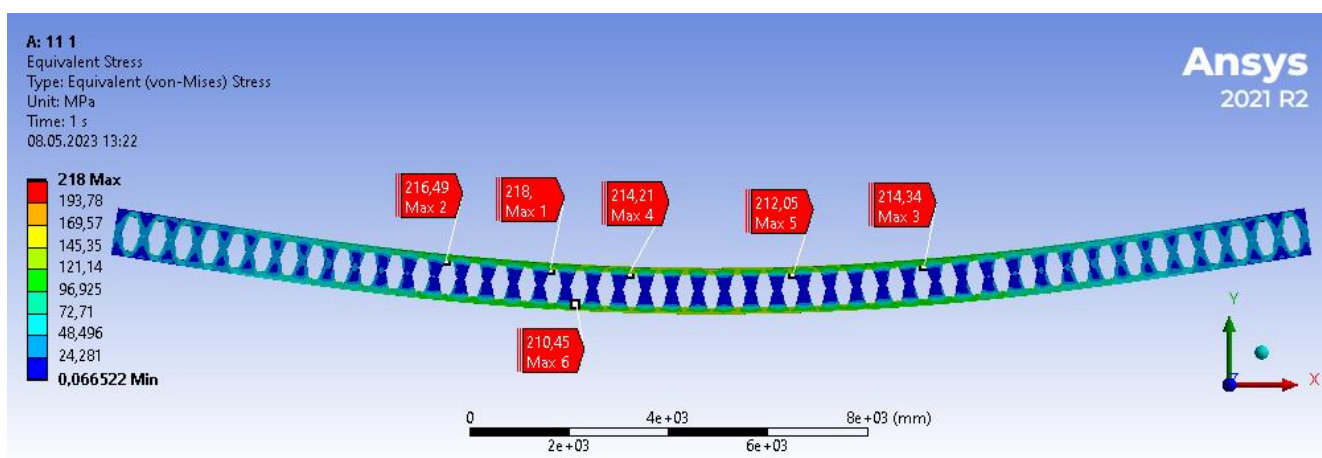


Рисунок 3.46 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.11.1, МПа

Прогин перфорованої балки UB.11.1 становить 90,19 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 218,00 МПа, середні еквівалентні напруження 66,63 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Для балки UB.11.2 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 662$  мм, крок отворів  $e = 795,6$  мм,  $s = 2w = 265,2$  мм, кількість отворів  $n = 30$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.47).

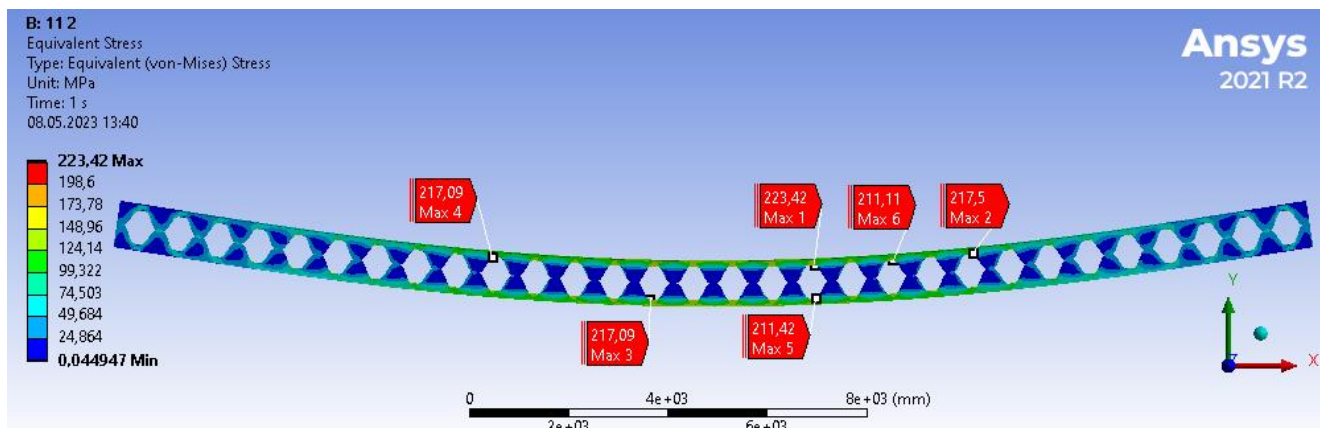


Рисунок 3.47 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.11.2, МПа

Прогин перфорованої балки UB.11.2 становить 88,46 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 223,42 МПа, середні еквівалентні напруження 67,34 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Для балки UB.11.3 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 662$  мм, крок отворів  $e = 1\,084,8$  мм,  $s = 3w = 406,8$  мм, кількість отворів  $n = 22$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.48).

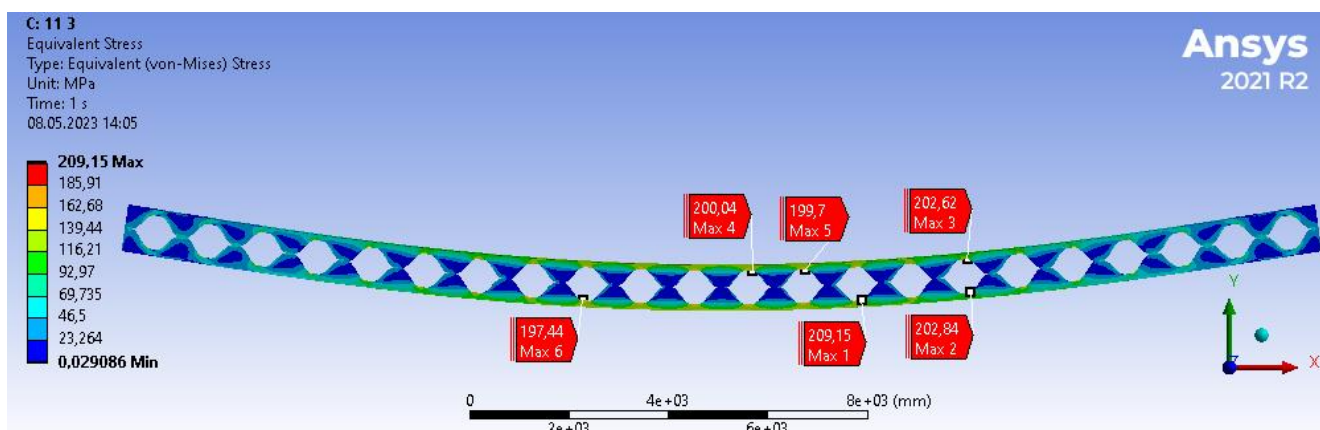


Рисунок 3.48 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.11.3, МПа



Прогин перфорованої балки UB.11.3 становить 87,96 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 209,15 МПа, середні еквівалентні напруження 67,15 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Збільшуємо розмір отвору до 1,4h від висоти перерізу ( $a = 844$  мм).

Для балки UB.14.1 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 844$  мм, крок отворів  $e = 530,4$  мм,  $s = w = 132,6$  мм, кількість отворів  $n = 45$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо Оцінка прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.49).

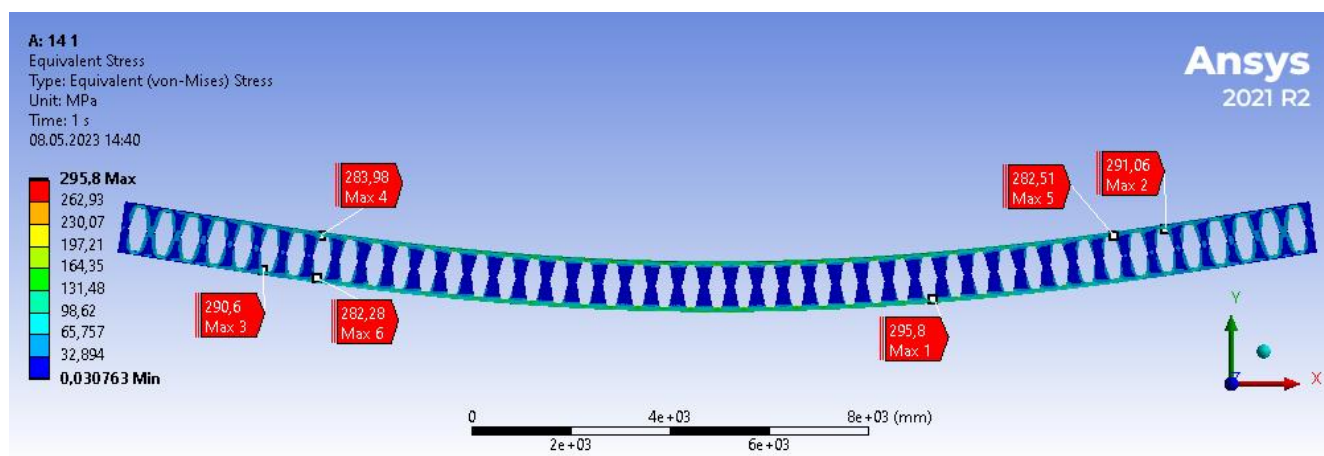


Рисунок 3.49 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.14.1, МПа

Прогин перфорованої балки UB.14.1 становить 82,62 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 295,80 МПа, середні еквівалентні напруження 63,68 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

Для балки UB.14.2 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 844$  мм, крок отворів  $e = 795,6$  мм,  $s = 2w = 265,2$  мм, кількість отворів  $n = 30$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.50).

Прогин перфорованої балки UB.14.2 становить 80,00 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 273,29 МПа, середні еквівалентні напруження 63,29 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

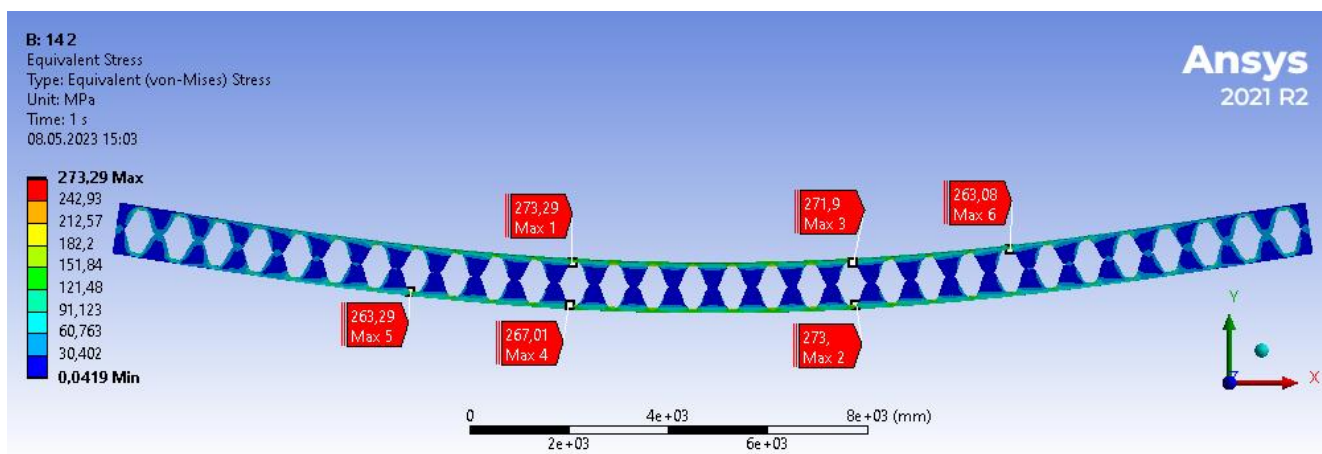


Рисунок 3.50 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.14.2, МПа

Для балки UB.14.3 геометричні параметри отвору наступні:  $a = 844$  мм, крок отворів  $e = 1\,084,8$  мм,  $s = 3w = 406,8$  мм, кількість отворів  $n = 22$ . Виконуємо розрахунок, отримуємо значення прогину і еквівалентних напружень (рис. 3.51).

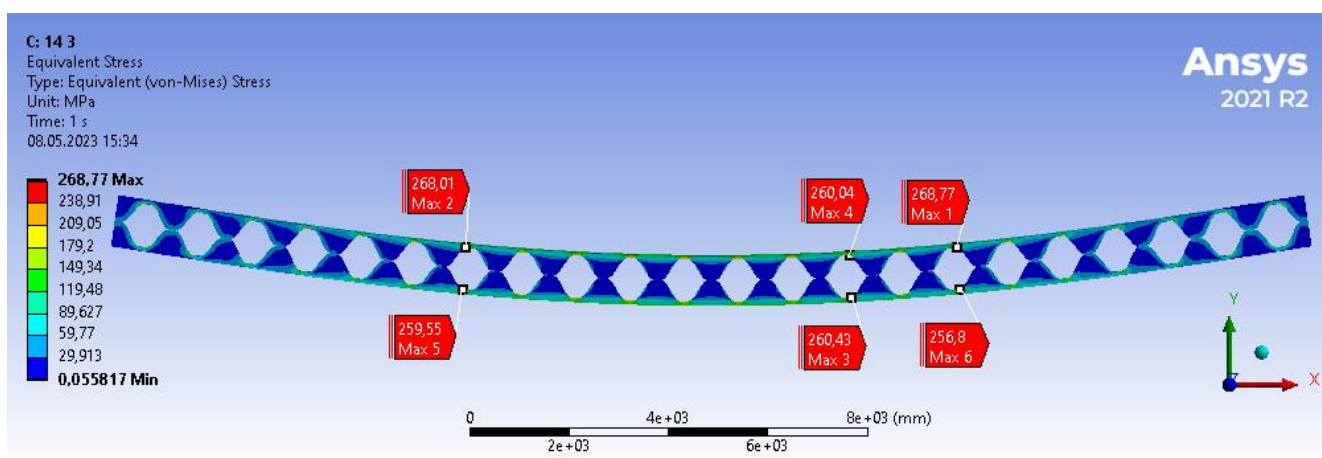


Рисунок 3.51 – Значення еквівалентних напружень в перфорованій балці UB.14.3, МПа

Прогин перфорованої балки UB.14.3 становить 79,06 мм, максимальні еквівалентне напруження навколо отвору становить 268,77 МПа, середні еквівалентні напруження 63,10 МПа. Вага ригеля становить 2 216,2 кг.

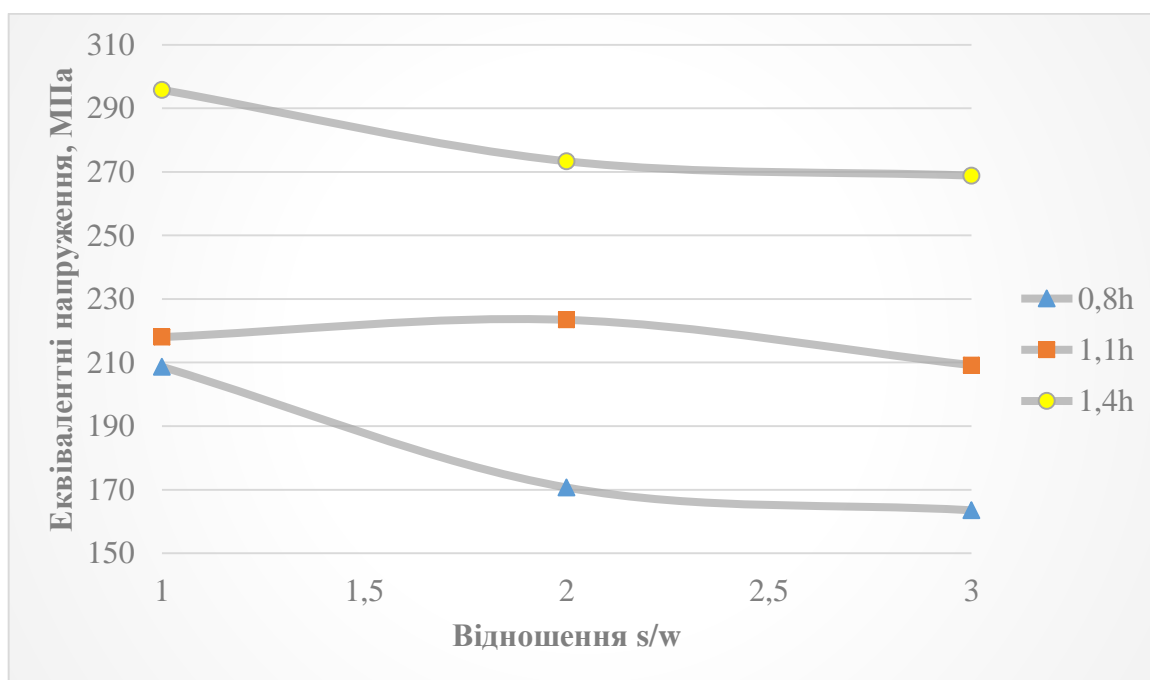
Для аналізу результатів зазначимо, що навантаження і вага балок є однаковою. Отримані дані вносимо в заключну таблицю 3.4.



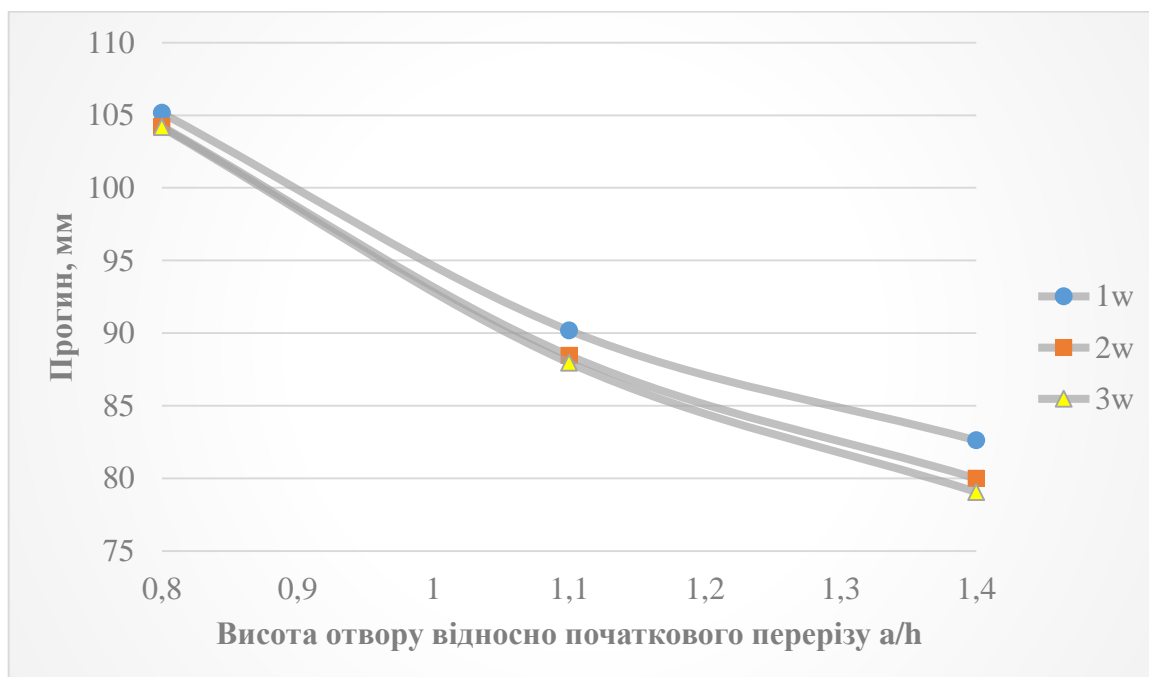
Таблиця 3.4 – Результати дослідження розмірів синусоїдних отворів на НДС перфорованої сталеві балки

Марка балки	$a$ , мм	$s$ , мм	$w$ , мм	$e$ , мм	$s/w$	$e/a$	Прогин мм	Еквів. напруж. МПа	
								Макс.	Сер.
UB.08.1	482,0	132,6	132,6	530,4	1	1,1	105,16	208,64	71,67
UB.08.2	482,0	265,2	132,6	795,6	2	1,6	104,22	170,68	72,89
UB.08.3	482,0	406,8	135,6	1 084,8	3	2,2	104,17	163,52	73,34
UB.11.1	662,0	132,6	132,6	530,4	1	0,8	90,19	218,00	66,63
UB.11.2	662,0	265,2	132,6	795,6	2	1,2	88,46	223,42	67,34
UB.11.3	662,0	406,8	135,6	1 084,8	3	1,6	87,96	209,15	67,15
UB.14.1	844,0	132,6	132,6	530,4	1	0,6	82,62	295,80	63,68
UB.14.2	844,0	265,2	132,6	795,6	2	0,9	80,00	273,29	63,29
UB.14.3	844,0	406,8	135,6	1 084,8	3	1,3	79,06	268,77	63,10

На основі даних таблиці 3.4 створюємо дві діаграми 3.5 і 3.6.



Діаграма 3.5 – Зміна еквівалентних напружень від розміру синусоїдної частини



Діаграма 3.6 – Зміна прогину балки від висоти отвору

Отже, для зменшення напружень навколо отвору перфорації, можна збільшити синусоїдну частину, таким чином можливо зменшити максимальні напруження від 10% до 20%. Для мінімізації прогинів балки на 20-30%, потрібно збільшувати розмір отвору відносно початкового поперечного перерізу балки.

### 3.5 Рекомендації щодо збільшення несучої здатності перекриття з перфорованих балок

Перфоровані балки часто використовуються в складі балкових кліток чи як одиночні прогони, на які спираються наступні елементи перекриття. Таке нагромадження конструкцій збільшує товщину перекриття і не впливає на характеристики міцності, жорсткості і стійкості головних балок.

Для вирішення такої проблеми був розглянутий метод композитного перекриття [10], в якому перфорована балка включається в структуру монолітної залізобетонної плити (рис. 3.52).

До стінки перфорованої балки приварюються U-подібні профілі, поверх яких виставляється елемент незнімної опалубки (профільований сталевий лист). Далі в

пази встановлюється арматура, а зверху – арматурний каркас, який разом з верхнім поясом балки заливається бетоном. Таким чином створюється композитна структура [10, 23].

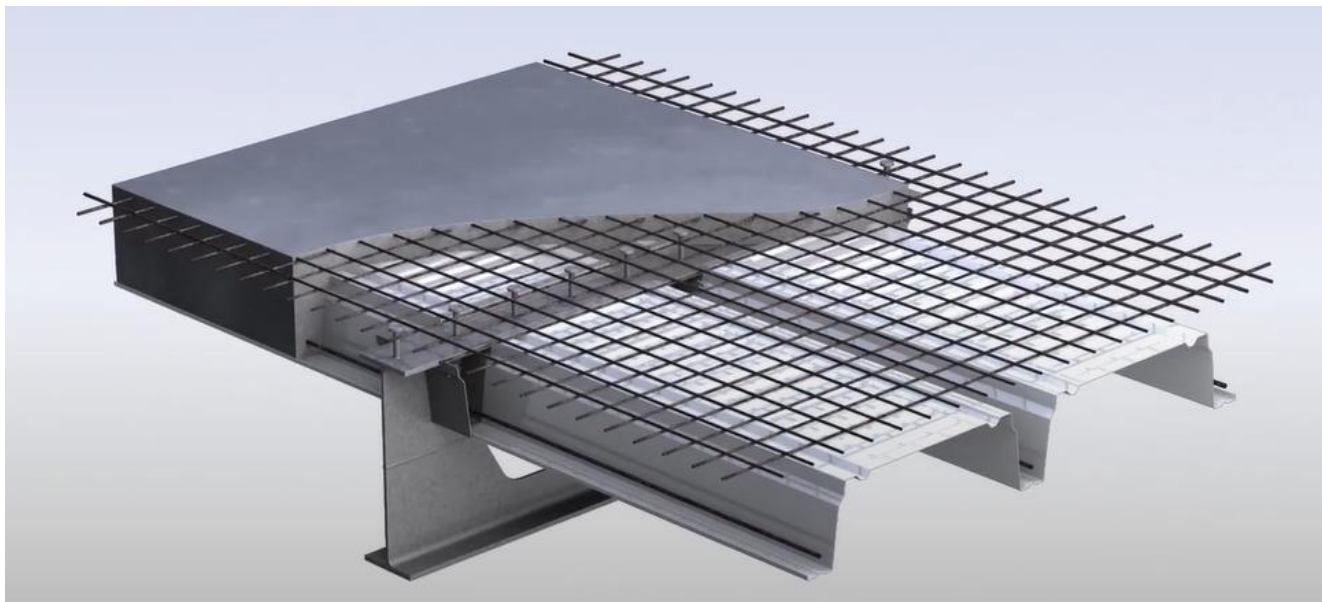


Рисунок 3.52 – Композитна конструкція з використанням перфорованої сталевій балки [23]

Дана конструкція збільшує несучу здатність перекриття на 60-80% від некомпозитної. Зникає потреба в додаткових розпірках, оскільки стійкість балки в складі композитної структури в рази більша [10].

### **3.6 Висновки до розділу 3**

1. Перфоровані сталеві балки є вигіднішими за міцністю, жорсткістю та стійкістю на 40-60% від суцільних прокатних того ж початкового перерізу. Проте необхідно врахувати небезпеку локальних напружень в зоні перфорації.

2. Перфоровані сталеві балки з круглими отворами мають на 18% менші напруження на кромках, у порівнянні з іншими дослідженими балками. При тому балки з синусоїдальними отворами зазнають на 7% менших прогинів ніж з круглими.

3. Похідні форми від круглої є менш вдалими ніж початковий варіант.

4. Перфоровані сталеві балки з шестикутними отворами зазнають меншого прогину ніж круглі на 6%, але напруження на кромках можуть збільшитись у 2,1 рази. Для зменшити таких локальні напруження у балках з шестикутною перфорацією виконуються заокруглення кутів отворів. Дослідження показали перспективність застосування синусоїдних форм перфорації, серед досліджених.

5. Застосування підсилюючих накладок зменшають максимальні напруження на 37% для балок з круглими отворами і на 6% з синусоїдними.

6. Первісні перерізи відіграють велику роль при створенні перфорованих балок. Так при схожій вазі балка типу UB має на 2-10% менший максимальний прогин і менші максимальні напруження ніж аналог IPE, але стійкість таких перерізів зменшується.

7. Для балок з синусоїдною перфорацією стінки, виготовленими з однієї і тієї ж самої первісної балки, збільшення амплітуди синусоїди – мінімізує прогин на 20-30%. Збільшення періоду синусоїдної частини призводить до зменшення напружень на 10-20%.

8. Розглянутий метод збільшення несучої здатності перекриття в якому використовуються перфоровані балки, в складі композитної структури.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Загальні положення

Будівельне виробництво є однією з найнебезпечнішою галуззю економіки в Україні та світі. Для зменшення ризику життю та здоров'ю працюючих і оточуючих людей розроблені різні нормативні документи, які запобігають створенню небезпечних і критичних ситуацій [24].

В нас громадяни мають конституційне право на збереження свого життя та здоров'я в процесі трудової діяльності, це визначено в Законі України «Про охорону праці», де враховано відповідні акти і вимоги, що рекомендуються Міжнародною організацією праці.

Законодавство в сфері охорони праці складається з наступних актів:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс законів про працю;
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві і професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності»;
- прийняті відповідно попередніх нормативно-правові акти.

Відповідно до статі 43 і 44 Закону України «Про охорону праці», за невиконання і порушення порядків цього закону для фізичних і юридичних осіб настає адміністративна чи кримінальна відповідальність [25].

При створенні перфорованих балок використовуються багато різних інструментів та пристроїв, відповідно до наказу Міненергосугілля України «Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» [26] є наступні правила які мають виконуватись на таких виробництвах:

- роботодавець повинний створити безпечні та нешкідливі умови праці відповідно до наказу МНС України «Про затвердження Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» від 25 січня 2012 року № 67;

– роботодавець повинен організувати проходження медичного огляду для персоналу відповідно до наказу МОЗ України «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій» від 21 травня 2007 року № 246;

– навчання з питань охорони праці повинні проходити відповідно до наказу Держнаглядохоронпраці України «Про затвердження Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» від 26 січня 2005 року № 15 (НПАОП 0.00-4.12-05);

– роботодавець повинен забезпечити працівників ЗІЗ відповідно до наказу Держгірпромнагляду «Про затвердження Положення про порядок забезпечення працівників спеціальними одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» від 24 березня 2008 року №53 (НПАОП 0.00-4.01-08);

– ЗІЗ повинні відповідати вимогам постанови КМУ «Про затвердження Технічного регламенту засобів індивідуального захисту» від 27 серпня 2008 року № 761;

– рівні небезпечних та шкідливих чинників не повинні перевищувати нормам встановленим наказом МОЗ України «Про затвердження Державних санітарних норм та правил при роботі з джерелами електромагнітних полів» від 18 грудня 2002 року № 476 (ДСанНіП 3.3.6.096-2002); постановою МОЗ України «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» від 1 грудня 1999 року № 37 (ДСН 3.3.6.037-99); постановою МОЗ України «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» від 1 грудня 1999 року № 42 (ДСН 3.3.6.042-99);

– Металообробні верстати повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.2.009-80 ДСТУ EN 13788:2008 «Металообробчі верстати. Безпека. Верстати токарні багатошпиндельні автоматичні»; ДСТУ EN 13898:2010 «Верстати. Металообробчі верстати для пиляння холодного металу. Вимоги щодо безпеки»

## 4.2 Безпека при виконанні зварювальних робіт

Виконання сталеві перфорованої балки зв'язане із зварювальними роботами, тому необхідно знати правила роботи з такими приладами для збереження здоров'я та життя працівника та навколишніх [27].

До виконання зварювальних робіт допускається тільки кваліфікований працівник, який має навички, знання і розряд, що дозволяє користуватись зазначеним пристроєм.

Перш за все, працівник повинен пройти вступний інструктаж по техніці безпеки і діях в надзвичайних ситуаціях, ознайомитись з інструкцією устаткування на якому буде працювати, її можливості та можливі форс-мажорні ситуації.

Працівник повинен не тільки вміти користуватись зварювальним обладнанням, але оцінювати його стан. Також він має мати знання по наданню першої медичної допомоги собі і навколишнім, в разі нещасного випадку при використанні апарату. Перед вступом на посаду зв'язану зі зварними роботами, всі працівники повинні пройти медичний огляд, оскільки це місце підвищеної небезпеки.

Щоб захистити себе і бути впевненим під час роботи потрібно використовувати засоби індивідуального захисту, наприклад вогнетривкі плащі, рукавички та взуття, а під час самих робіт носити захисні окуляри зі шлемом, щоб захистити органи бачення та обличчя від дії зварювального апарату.

У випадку поганого самопочуття, працівник не має права приступати до роботи зі зварювальним устаткуванням, а якщо це відбулось під час самого процесу, потрібно неодмінно зупинити цю роботу, якщо немає нікого поруч, то виключити обладнання і завітати в медпункт за допомогою. Також при виявленні невідповідної поведінки у колег, які знаходяться чи обслуговують апарат, потрібно зупинити всі роботи і повідомити про це медиків і керівництво. Ні в якому разі не залишати пристрій включеним чи в робочому положенні без нагляду.

Апарат для зварки повинен проходити технічне обслуговування за встановленими на заводі виробника регламентами, повний огляд проводиться не рідше ніж раз у 30 днів.

Приміщення для зварювання має бути обладнане автоматичними засобами гасіння, бути відгородженим від інших цехів, а сама площадка для зварювання огорожена вогнетривкими екранами. Також при вході мають стояти відповідно попереджуючі знаки, про місце проведення зварних робіт. Робочий цех повинен бути чистим і добре вентильованим, при не дотриманні цих умов, виникає ризик отруєння речовинами згорання.

Оскільки зварювальні апарати працюють на змінному тоці, то перед кожним використанням потрібно перевірити якість підключення до електромережі та заземлення приладу.

Всі змінні матеріали і ті що підключаються, повинні зберігатись подальше від робочої зони, щоб запобігти самозайманню цих речовин, також транспортувати ці речовини і обладнання потрібно на спеціальних візках з фіксаторами, не виконуючи різких поштовхів.

Також потрібно уточнити небезпеки які можуть бути на ділянці для зварювання [28]:

- бризки розплавленого металу можуть потрапити на відкриті ділянки тіла чи органи чуття, а також в незахищені місця рукавів, манжетів штанів або робочого взуття;
- при висотних зварювальних роботах діаметр ураження від іскор чи розплавленого металу значно зростає;
- зварювальні аерозолі містять різні хімічні речовини, які можуть викликати отруєння, найшкідливіші з них – це цинк, хром, кремній, оксид азоту;
- світло в різних спектрах (від ультрафіолету до інфрачервоного) при виконанні робіт може травмувати шкіру чи органи бачення;
- розплавлені частинки можуть попасти на легкозаймисті матеріали;
- зразки з нерівною чи загостреною поверхнею можуть травмувати при необачній роботі з ними;



- напруга що використовується для роботи апарату є небезпечною для життя робітників та оточуючих, при надмірній вологості можуть виникати непередбачувані електричні розряди;
- велике скупчення газів і токсичного пилу можуть викликати ураження вестибулярної та нервової системи, а також хімічне отруєння;
- шум під час даних робіт може бути шкідливий для органів слуху;
- при необережній взаємодії з технікою можна отримати травми;
- недостатня або надмірна освітленість може вплинути на здоров'я працівника.

#### **4.3 Стійкість конструкції при дії вибухових та сейсмічних навантажень**

Сталеві балки з перфорованою стінкою є складовою полегшених металевих конструкцій. Основним недоліком таких споруд є низька стійкість до динамічних навантажень, а саме вибухів, вібрацій та землетрусів.

Оскільки місто Тернопіль знаходиться в сейсмічно небезпечній зоні та під час воєнних дій є можливість ураження ракетними боєприпасами чи ударною хвилею від їх вибуху, потрібно запропонувати методи зменшення пошкоджень від динамічних навантажень.

Від прямого попадання ракети чи іншого масивного боєприпасу ні одна будівля не зможе забезпечити міцність та стійкість, тому для уникнення великих жертв під час такої надзвичайної ситуації потрібно добре спланувати приміщення, а саме розміщення робочих зон, достатню кількість евакуаційних виходів, пасивні методи зменшення задимлення приміщення та гасіння пожеж.

Такі навантаження неможливо попередньо оцінити і створити якісь підсилюючі конструкції, тому потрібно покладатись на швидку реакцію працівників та виконання ними правил під час надзвичайних ситуацій.

При непрямому попаданні залишається чинник вибухової хвилі, який є більш передбачуваним явищем ніж пряме ураження. Такий вид навантаження є схожим до сейсмічного, оскільки воно є миттєвим і відбувається в горизонтальній площині.

Для підсилення сталевих конструкцій на дію такого навантаження застосовують наступні методи підсилення: встановлення вертикальних в'язів по колонах, вони допомагають перевести горизонтальні навантаження з фасадів на горизонтальні де їх прийме фундамент; горизонтальні в'язі ригелів, вони влаштовуються для погашення коливань та передачі навантажень з одного краю в інший, що дозволяє краще перерозподілити їх; вертикальні в'язі ригелів, ці елементи конструкції забезпечують стійкість перекриття при збільшенні локальних чи розподілених навантажень.

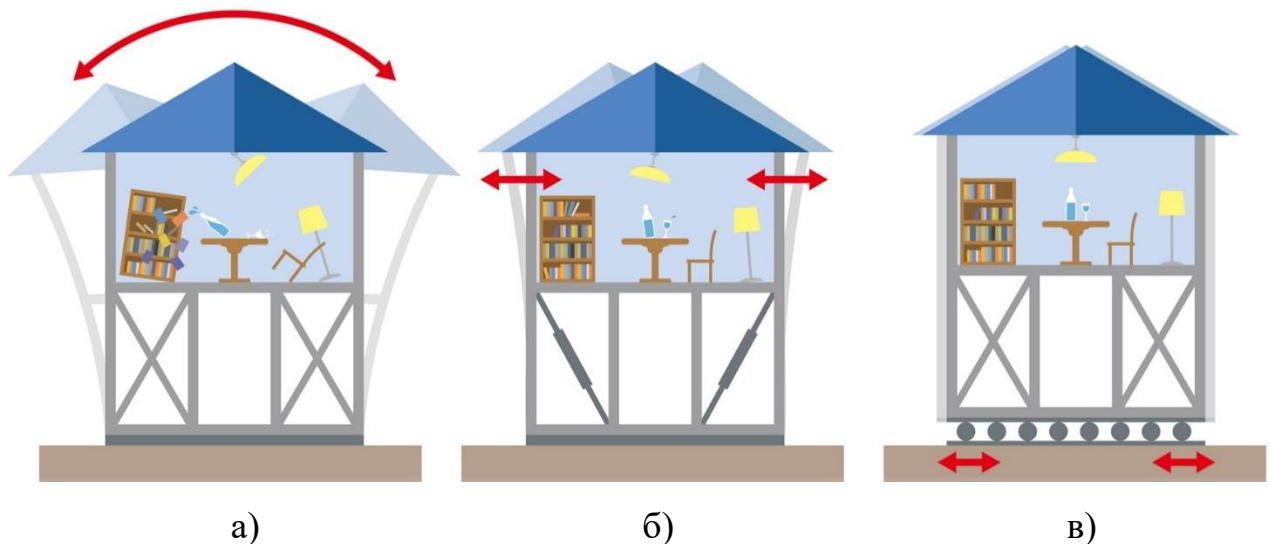
Дія сейсмічного навантаження теж перебуває в горизонтальній площині, тому більшість рекомендацій, що запропоновано в попередньому абзаці підходять сюди теж. Але оскільки хвилі від сейсмічної активності поширюються в ґрунті, то важливим місцем підсилення буде саме підземна частина будівлі.

Перш за все під час проектування споруди потрібно добре дослідити основу, щоб виявити можливі слабкі прошарки ґрунтів. Наявність таких елементів не дозволяє будівництва без попереднього зміцнення. Якщо споруда знаходиться в сейсмічній зоні, але під нею наявні слабкі ґрунти, потрібно неодмінно провести заходи по підсиленню таких геологічних одиниць.

Під час ударних навантажень найбільше страждають вузли з'єднання, їх потрібно проектувати достатньо міцними і жорсткими, для зменшення коливань самої конструкції і запобіганню локальних критичних ситуацій.

Також для зменшення резонансу, який виникає коли власні коливання будівлі співпадають з коливаннями сейсмічної активності, застосовують різні методи підсилення, найпопулярнішими з них є використання амортизаційних систем (рис. 4.1 (б)), ізолювання фундаменту (рис. 4.1 (в)) або встановлення маятників.

Конструкція з амортизаторами використовуються для гасіння коливань, які виникають під час сейсмічної активності, найчастіше це пружинні елементи, гідравлічні конструкції чи метали які можуть змінювати свою форму (сплави з пам'яттю форми).



а) конструкція з розп'ярками; б) конструкція з амортизаційними системами; в) конструкція з ізольованим фундаментом.

Рисунок 4.1 – Захист споруд від дії сейсмічного навантаження [29]

Ізолювання фундаментів приводить до майже повного ігнорування конструкцією будівлі сейсмічної активності. Під час землетрусів основа рухається окремо від споруди, тим самим на неї не передаються коливання і ефекту резонансу не виникає.

Маятникова система реалізується встановленням великого масивного шару, на верхніх поверхах будівлі, який розкріплений спеціальними тросами. Він збільшує момент інерції самої будівлі, а під час сейсмічної активності датчики визначають нахил будівлі і з допомогою спеціальних канатів переставляють кулю в протилежний бік, тим самим стабілізують конструкцію.

Дані методи підсилення конструкцій допоможуть мінімізувати втрати під час виникнення надзвичайних ситуацій пов'язаних з військовими діями чи сейсмічною активністю.

#### 4.4 Стійкість конструкції в умовах пожежі

Властива вогнестійкість сталевих балок з перфорованою стінкою, під впливом вогню, за стандартом ISO зазвичай становить від 15 до 20 хвилин. Вимога R30 може бути досягнута шляхом помірною перепроектування, наприклад, з

використанням більш високої марки сталі. У більш складних випадках вогнестійкість може бути досягнута шляхом нанесення вогнезахисного (інтумесцентного) покриття. У випадку композитних перекриттів з другорядними балками можна активувати мембранну дію перекриття на розтягнення, а пасивний захист обмежити сталевими елементами, з'єднаними з колонами. Ця стратегія призводить до значно меншої кількості балок для захисту, але вимагає спеціального розрахунку [10].

Для балок з перфорованою стінкою площа поверхні, яку необхідно захистити від впливу вогню, по суті така ж сама як і для первісної прокатної. Значення поверхні фарбування на одиницю довжини (AL, м<sup>2</sup>/м) і поверхні фарбування на одиницю маси (AG, м<sup>2</sup>/т) вказані для окремих профілів у таблицях програми продажів ArcelorMittal Europe Sections and Merchant bars [10].

Для цих балок може знадобитися збільшення відповідної товщини вогнестійкого покриття на 2-3 см навколо отвору, щоб забезпечити захист гострого контуру.

При розміщенні повітропроводів у отворах рекомендується різниця в 3-5 см між ними. Цей допуск допоможе запобігти пошкодженню протипожежного захисту навколо отворів під час монтажу комунікацій. У деяких випадках додаткова антикорозійна обробка не потрібна, якщо продукт наноситься на необроблену сталеву поверхню.

У випадку видимих балок перекриття або покрівлі вогнезахисна (інтумесцентна) фарба забезпечує вогнестійкість, не впливаючи на естетичний вигляд конструкції.

Також для збільшення вогнестійкості можна застосувати «Концепцію природної протипожежної безпеки» – це метод проектування, який наголошує на використанні природних матеріалів, створення вентиляції та плану приміщень для зменшення ризику виникнення пожежі та мінімізації її наслідків.

Ця концепція передбачає використання негорючих або вогнестійких матеріалів у будівництві та мінімізацію використання легкозаймистих матеріалів, таких як синтетична ізоляція, пластмаси та інші продукти на основі нафти. Вона

також передбачає проектування будівель з відкритими просторами та належною вентиляцією для запобігання накопиченню тепла і диму у випадку пожежі.

Також дана концепція рекомендує використання пасивних засобів протипожежного захисту, таких як вогнестійкі двері, стіни та підлога, а також активних засобів захисту, таких як спринклерні системи та димові сигналізації

Загалом, «Концепція природної протипожежної безпеки» спрямована на створення будівель, які є безпечнішими та стійкішими до пожежі, а також мінімізують вплив будівництва на навколишнє середовище та зменшують ризик токсичних викидів у разі пожежі.

Дотримуючись наведених рекомендацій можна зменшити ризики завдання шкоди працівникам, майну та навколишньому середовищі, де їх будуть застосовувати

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що балки з перфорованою стінкою (а саме з круглими, шестикутними і синусоїдальними отворами) є перспективними будівельними конструкціями, які мають достатню міцність, жорсткість та високу архітектурну виразність.

2. Запропоновано методику аналізу НДС перфорованих балок, що полягає в згущенні скінчених елементів навколо отвору перфорації, який дозволяє суттєво зменшити час розрахунку моделі без втрати точності результатів.

3. Проаналізовано балки з різними видами отворів. За цими даними виявлено, що в балках з синусоїдними отворами виникають на 7% менші прогини ніж з круглими, але в той же час, значення максимальних еквівалентних напружень більші на 18%.

4. Рекомендовано підсилення спеціальними накладками біля перфорації, які зменшили максимальні напруження в круглих отворах на 37%, а в синусоїдних лише на 6%.

5. Досліджено первісний сортамент з якого виконуються перфоровані балки. Виявлено, що тип балок UB зазнає максимальних напружень і прогину на 2-10% меншого, аніж типу IPE, хоча стійкість такого ригеля менша.

6. Для балок з синусоїдними отворами встановлено, що збільшуючи амплітуду синусоїди можна зменшити прогин на 20-30%, а збільшуючи її період можна зменшити максимальні напруження на 10-20%.

7. Розглянуто метод використання перфорованих балок в складі композитної структури перекриття, що збільшить характеристики міцності та жорсткості такої конструкції.

8. Розроблені заходи по безпечному виконанню зварювальних робіт під час виготовлення сталевих балок з перфорованою стінкою. Також рекомендовані заходи для збільшення стійкості конструкції при дії вибухових та сейсмічних навантажень і впливу вогню.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Knowles P.R. Castellated beams // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Scotland, 1991. Vol. 90, no. 3. P. 521–536.
2. Sameer S. Fares P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D Castellated and cellular beam design // AISC design guide 31. American institute of steel construction, Chicago, Illinois. 2016. 110 p.
3. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Optimisation of novel elliptically-based web opening shapes of perforated steel beams // Journal of Constructional Steel Research. Elsevier Science, 2012. Vol. 76. P. 39–53.
4. Hosain M.U., Speirs W.G. Experiments on Castellated Steel Beams // Welding research. New York, 1973. P. 329-342.
5. Pidgurskyi I., Slobodian V., Bykiv D., Pidgurskyi M. Investigation of the stress-strain state of beams with different types of web perforation // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2021. — Vol 103. — No 3. — P. 63–71.
6. Підгурський М., Сташків М., Підгурський І., Сенчишин В., Підлужний О., Биків Д., Слободян В., Підвисоцький О., Гоголюк В. Дослідження міцності перфорованих балок з однорядним та дворядним розташуванням отворів // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“, 10-11 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 87–88.
7. Підгурський І.М., Слободян В.В., Підлужний О.М., Биків Д.З., Підгурський М.І. Моделювання напружено-деформівного стану балок з різною перфорацією стінки / Збірник матеріалів тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2022» (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 2. – С. 105.
8. Биків Д., Підгурський І. Дослідження напружено-деформівного стану сталевих перфорованих балок з різними видами отворів // Матеріали VI

Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 27-28 квітня 2023 року. – С. 35.

9. Das P.K. Handbook for the design of castellated beams // Rotterdam: A.A. Balkema, 1984. 86 p.

10. ACB and Angelina beams. A new generation of beams with large web openings // ArcelorMittal Europe - Long products. ArcelorMittal, Luxembourg, 2020. 64 p.

11. The Westok Cellular Beam Pocket Guide // Kloeckner Metals UK | Westok, London, 2020. 36 p.

12. ДБН В.2.6–198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010. Чинний від 01.01.2015]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 209 с.

13. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови. [На заміну ГОСТ 19281-89. Чинний від 01.07.2016]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 18 с.

14. Von Mises, R. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse. Göttingen. 1913: 582–592.

15. Нілов О.О. Металеві конструкції. Загальний курс / О.О. Нілов, В.О. Пермяков, О.В. Шимановський, С.І. Білик, Л.І. Лавриненко, І.Д. Белов, В.О. Володимирський // підручник – К.: Видавництво «Сталь», 2010. – 869 с.

16. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings // CEN, Brussels. 2005. 91 p.

17. Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 180 с.

18. EN 1993-1-13:2022 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-13: Rules for beams with large web openings // European committee for standardization, Brussels. 2022. 43 p.



19. Rohit K., Amruta P., Optimization of Various Parameters of Castellated Beam Containing Sinusoidal Openings, IJERT. India. Vol. 10. June 2021. P. 120–123.
20. Morkhade S. G., Gupta L. M. Analysis of steel I-beams with rectangular web openings: experimental and finite element investigation // Engineering Structures and Technologies. Vilnius. 2015. Vol. 7, no. 1. P. 13–23.
21. Підгурський М. І., Підгурський І. М., Слободян В. В. Дослідження методом скінчених елементів напружено-деформівного стану перфорованих сталевих балок з круглими непідсиленими та підсиленими вирізами // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. НУВГП Рівне, 2022. № 40. С. 159–165.
22. BS EN 10365:2017 Hot rolled steel channels, I and H sections — Dimensions and masses // European committee for standardization, Brussels. 2017. 33 p.
23. ArcelorMittal. Cofraplus® 220 – Angelina. Website. URL: [https://constructalia.arcelormittal.com/en/products/cofraplus\\_220](https://constructalia.arcelormittal.com/en/products/cofraplus_220)
24. ДБН А.3.2-2-2009 Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12) [Чинний від 01.04.2012]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. 122 с.
25. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-ХІІ. Вид. офіц. Голос України 1992. 24 лист. № 49, ст.669.
26. Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : Наказ Міненерговугілля України від 19.12.2013 р. № 966. Вид. офіц. Офіційний вісник України 2014. 28 бер. № 24, ст. 59.
27. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навч. посіб. для практ. робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей / Укл. Левченко О. Г. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 – 181 с.
28. Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th Ed., ILO, Geneva, 1998, Vol. 2, p. 49.6, 49.17.
29. Earthquake Resistance of Buildings in Japan - Structure types (seismic isolation and damping). Website. URL: <https://www.realestate-tokyo.com/news/earthquake-resistance-of-buildings-in-japan/>