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 та несучої здатності сталевих гофрованих балок з різною конфігурацією стінок**

Виконав: студент VI курсу, групи МБнм-61
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

Когут П.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Нормоконтроль Данильченко С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Ковальчук Я.О
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Лупійчук С. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

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
_____ Ковальчук Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

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

студенту *Когуту Павлу Володимировичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Дослідження напружено-деформівного стану та несучої здатності сталевих гофрованих балок з різною конфігурацією стінок*

Керівник роботи *Підгурський Микола Іванович, д.т.н., проф.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «____» _____ 20___ року № _____

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ; Огляд літературних джерел; Методика дослідження НДС та несучої здатності сталевих гофрованих балок; Результати дослідження сталевої балки з гофрованою стінкою та їх аналіз; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуація; Загальний висновок; Бібліографія.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Покрокова візуалізація методики комп'ютерного моделюючого експерименту;
Візуалізація отриманих результатів моделювання балок з гофрованою стінкою;
Діаграми нормальних напружень, дотичних напружень, коефіцієнта запасу стійкості, власної ваги та прогинів при зміні довжини гофрування.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б. к.т.н., доц.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С. ст. викл.		
Нормоконтроль	Данильченко С.М. ст. викл.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел		
2	Методика дослідження НДС та несучої здатності сталевих гофрованих балок		
3	Результати дослідження сталевої балки з гофрованою стінкою та їх аналіз		
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
5	Загальні висновки		

Студент _____ *Когут П.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Підгурський М.І.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ЗМІСТ 3

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 8

1.1 Типи металевих балок та їх особливості 8

1.2. Виготовлення і використання гофрованих профілів в будівельних конструкціях 10

1.3. Аналіз останніх досліджень та публікацій 13

1.4. Висновки за розділом 1 17

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ БАЛОК 18

2.1 Вибір та опис математичних моделей балок з гофрованою стінкою для дослідження 18

2.2 Огляд методів розрахунку балок з гофрованою стінкою 20

2.3 Методика комп’ютерного моделюючого експерименту для дослідження балки з гофрованою стінкою 24

2.4 Верифікація результатів комп’ютерного моделюючого експерименту 33

2.5 Висновки за розділом 2 37

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ГОФРОВАНОЮ СТІНКОЮ ТА ЇХ АНАЛІЗ 38

3.1 Дослідження напружено-деформівного стану (НДС) та несучої здатності фізичної моделі балки з гофрованою стінкою різних конфігурацій при дії рівномірно розподілених навантажень за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) 38

3.2 Співставлення та аналіз нормальних напружень балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів 39

3.3 Співставлення та аналіз дотичних напружень балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів 42

3.4 Співставлення та аналіз прогинів балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів 45

3.5 Співставлення та аналіз стійкості балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів 47

3.6 Співставлення та аналіз залежності власної ваги балок з гофрованою стінкою від конфігурації гофрів 50

3.7 Висновки за розділом 3 54

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 56

4.1 Охорона праці 56

4.1.1 Законодавство України з охорони праці 56

4.1.2 Правила охорони праці під час виготовлення балок з гофрованою стінкою 57

4.1.3 Висновки за пунктом 4.1 59

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях 59

4.2.1 Стійкість будівель та споруд при виникненні надзвичайної ситуації 59

4.2.2 Оцінка стійкості будівель та споруд при виникненні надзвичайної ситуації 60

4.2.3 Способи підвищення стійкості роботи будівель та споруд 60

4.2.4 Висновки за пунктом 4.2 61

ВИСНОВКИ 62

БІБЛІОГРАФІЯ: 63

ВСТУП

Використання балкових конструкцій в будівництві відоме з давніх часів, на сьогоднішньому етапі розвитку людства балки також знаходять широке застосування при виготовленні різноманітних будівель та інженерних споруд. Їх переважно використовують при виконанні покриттів та перекрить. Тому, що при не великих прольотах витрати на їх виготовлення та монтаж є меншими ніж для інших конструкцій.

Актуальність теми зумовлена тим, що в сучасному світі гостро стоїть питання збільшення ефективності та економічності будівельних споруд. Бажаного результату можна досягти використанням сучасних технологій, дешевших профілі та створення нових, раціональніших конструкцій, що дозволить звичайним конструктивним формам набути нового змісту.

Науковці, що працюють в галузі будівництва націлені на вдосконалення та оптимізацію конструкцій. У пріоритеті конструкторів завжди стояло завдання зробити конструкцію більш економічною за рахунок зменшення матеріалоємності та трудомісткості її виготовлення і монтажу. Одночасно з цим актуальними залишаються задачі підвищення надійності конструкцій.

В Європі балки з гофрованою стінкою, як елементи металевих каркасів застосовуються з початку 60-х років, а в конструкціях автомобільних мостів (у Європі та Японії) з 80-х років XX ст.

Останнім часом в Україні, почали впроваджувати сталеві двотаври з гофрованою стінкою. Використовують гофрований профіль в якості стінки зварного двотавра. Це дозволяє значно підвищити стійкість балки, в свою чергу знижуючи власну вагу і вартість монтажу. Для того щоб реалізувати всі можливості балок з гофрованою стінкою необхідно обрати оптимальні параметри гофрування.

У створення і розвиток методів розрахунку і проектування балок з гофрованої стінкою великий внесок українські вчені, а також зарубіжні дослідники: О.О. Нілов, М.В Лазнюк, Нілова Т.О., Пічугін С. Ф. Лавріненко Л.І. та інші.

Мета й задачі роботи **–** моделювання напружено-деформівного стану та оцінка несучої здатності сталевих гофрованих балок.

Для досягнення мети вирішуються наступні завдання:

– дослідження НДС та стійкості балок з гофрованими стінками з різними параметрами їх гофрів з допомогою МСЕ;

– визначення оптимальної форми та параметри гофрування;

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є балки з гофрованими стінками з різними конфігураціями гофрів.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є НДС (напружено-деформований стан) балок з гофрованою стінкою, їх несуча здатність та стійкість при статичному навантаженні.

Методи дослідження – числові методи математичного моделювання із використанням методу скінченних елементів, що реалізується у програмному комплексі ЛІРА, огляд і аналіз результатів досліджень, виконаних іншими авторами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано за напрямом наукових досліджень кафедри будівельної механіки ТНТУ.

Наукова новизна отриманих результатів:

– розвиток методики комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження напружено деформівного стану та несучої здатності балок з гофрованою стінкою при дії статичного навантаження;

– визначено раціональні параметри гофрування стінки для балок довжиною 12 м.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи можна використовувати для подальших досліджень балок з гофрованою стінкою та при їх проектуванні.

Апробація результатів здобувача. Результати роботи оприлюднені на III Міжнародній студентській науково-технічній конференції ТНТУ «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 23-24 квітня 2020 р., м. Тернопіль.

Публікації. Результати роботи опубліковано в збірнику тез доповідей III Міжнародної студентської науково-технічної конференції ТНТУ «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 23-24 квітня 2020 р., м. Тернопіль,

П. Когут, «Моделювання НДС та дослідження тримкості балок з гофрованою стінкою»(сторінки).

Ключові слова: балка, гофрована стінка, несуча здатність, стійкість.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Типи металевих балок та їх особливості

Балками називають такі елементи, в яких довжина значно перевищує інші розміри, яка сприймає вертикальні поперечні навантаження. Їх можуть використовувати, як несучі елементи при влаштуванні перекрить і покриттів будівель та споруд тощо [1].

В сучасних будівлях переважно використовують двотавровий тип поперечного січення, але також застосовують таврові профілі, швелери, труби, кутники. Балки можуть бути, як прокатні так і зварні. Виготовляють їх з пресованих, гнутих, та прокатних профілів (рисунок 1.1, а, б, в) чи складеного перерізу (рисунок 1.1, г, д) [1].

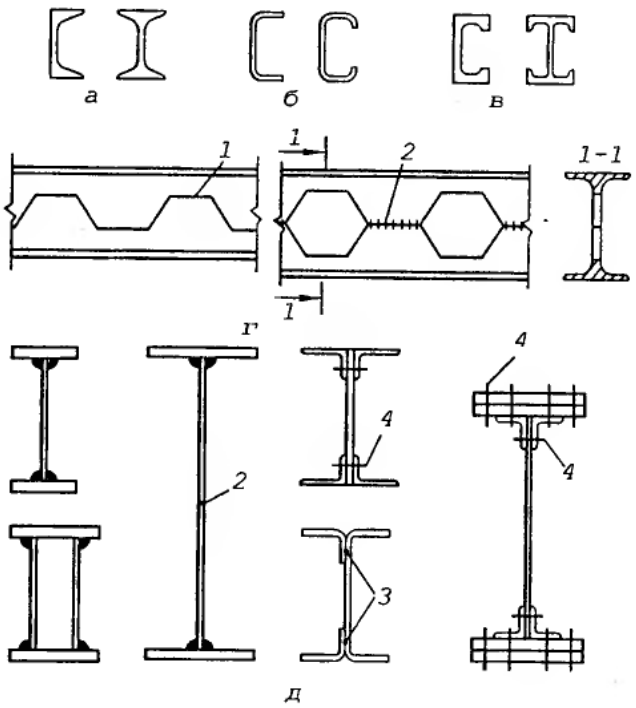


Рисунок 1.1 – Приклади поперечних перерізів сталевих балок:
а – прокатні; б – гнуті; в – пресовані; г – з перфорованою стінкою;
д – складеного перерізу; 1 – лінія розрізу; 2 – зварний шов; 3 – точкове зварювання; 4 – болтове або заклепкове з’єднання.

Балки менш трудомісткі у виготовленні у порівнянні з фермами, але в свою чергу вони більш матеріаломісткі. Класичні балки доцільніше застосовувати, при малих прольотах до 8-9 метрів [2].

Також для економії металу балки виконують змінного перерізу, з перфорованими або гофрованими стінками.

Металеві балки класифікують за такими критеріями:

а) за способом виготовлення – прокатні, складені;

в) в залежності від способу закріплення – однопролітні розрізні, багатопролітні нерозрізні, консольні;

г) за формами поперечних перерізів – таврові, двотаврові, прямокутні, швелери, коробчасті.

Балка з гофрованої стінкою – це конструкція, що складається з поясів довільного перетину і тонкої металевої стінки, яка в поперечному напрямку вигнута (гофрована). Види гофрування стінки можуть бути різні: трикутні, трапецеїдальні, прямокутні, хвилясті або інший, повторюваної форми (рисунок 1.2).

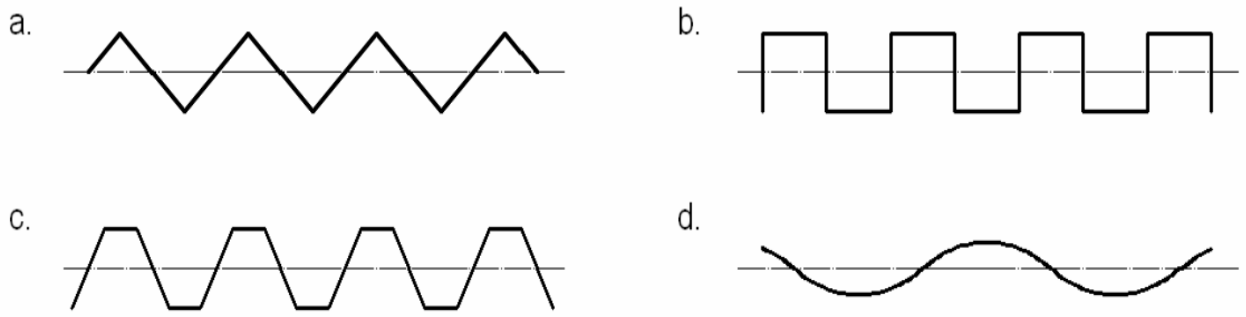


Рисунок 1.2 – Види гофрування стінки:

a – трикутна; b – прямокутна; c – трапецеїдальна; d – синусоїдальна.

Стінка виготовляється з рулонної чорної сталі і профілюється пресом, її товщина складає 1,5 - 4 мм, а висота 200 - 1500 мм. Такі параметри викликані стандартними розмірами рулонної сталі, з метою мінімізації відходів. В залежності від конкретних вимог ці параметри можуть бути змінені. Технології виготовлення таких балок дозволяють позбавитись від недоліків звичайних зварних двотаврів, а саме масивної стінки товщина якої прокатного двотавра при висоті балки 1500 мм

становить 20 – 25 мм, для зварних товщина стінки коливається в межах 6 – 16 мм, тоді як для балки з гофрованою стінкою (рисунок 1.3) вона становитиме 1,5-4 мм.

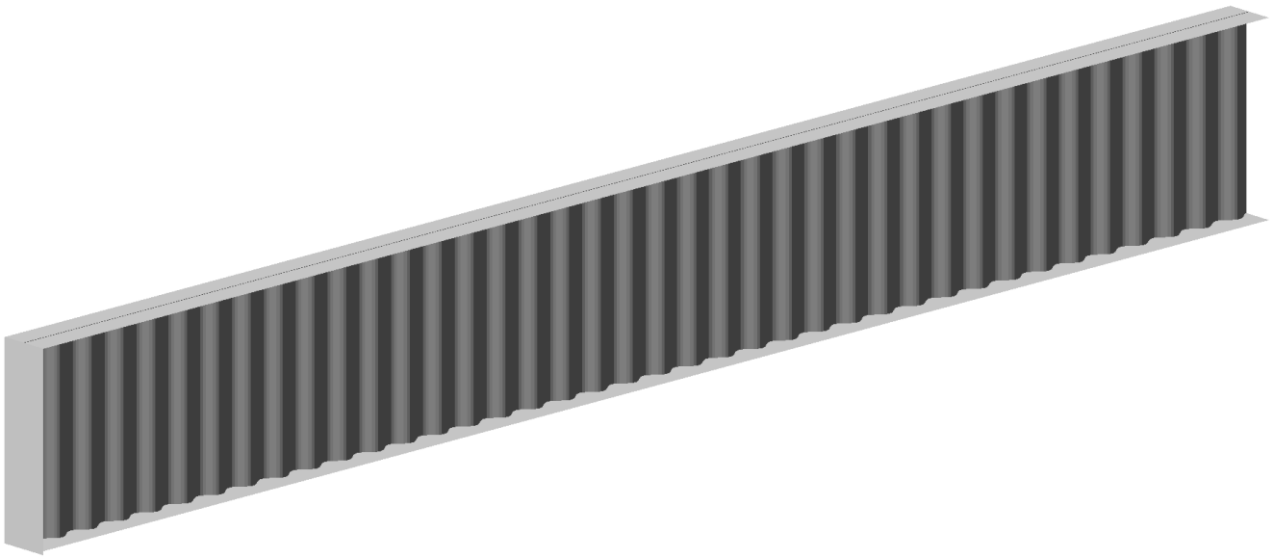


Рисунок 1.3 – Балка з гофрованою стінкою синусоїдального профілю.

1.2. Виготовлення і використання гофрованих профілів в будівельних конструкціях

Гофрований профіль знайшов своє застосування в будівельній галузі, наприклад в шпунтових конструкціях, в якості стінки балки, також використовується для влаштування покрить та перекрить. Протягом останніх двадцяти років гофрований профіль все частіше використовується в якості стінки балки. Поширення така конструкція набула в мостобудуванні, у вигляді сталезалізобетонних мостів у якому пояси були виконані з залізобетону а стінка з профільованої гофрованої сталі.

Завдяки особливостям гофрування у порівнянні із звичайними балками спостерігається більша жорсткість і стійкість, це призводить до зменшення металоємності конструкції. З використанням новітніх технологій можна виготовляти балки з синусоїдальною формою гофрування на повністю автоматизованій лінії. Крім того такі балки можуть бути виготовлені: змінного перерізу; змінної висоти; чи навіть з отворами для прокладання внутрішніх мереж.

У 1988 році з'явилася перша лінія для виробництва балок з гофрованою стінкою синусоїдальної форми розроблена Zeman & Co Gesellschaft mbH, Австрія. Лінії останнього покоління здатні виготовляти синусоїдальні балки повністю автоматизованим способом. Виготовлення балок починається на складальній лінії, де з великого рулону розмотувач (рисунок 1.4, а) подає тонку листову сталь в розрівнювач (рисунок 1.4, б) для зменшення напруження, перед профілюванням (рисунок 1.4, в). Після того, як гофрована стінка була сформована і отримана потрібна довжина стінки вона обрізається гільйотиною. Паралельно з процесом виготовлення стінки нарізають пояси. Транспортують далі по лінії, ставляться на місця і прикріплюють за допомогою гідравлічного преса (рисунок 1.4, г).

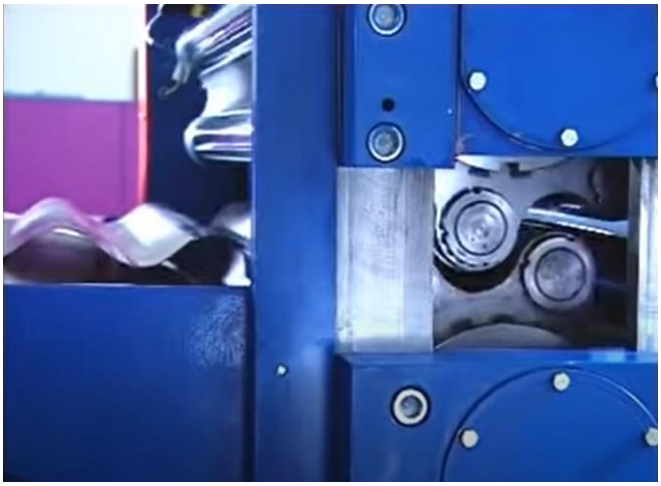
Пояси до стінок приварюють повністю автоматизовані роботи. Швидкість і кут зварювального пістолета автоматично контролюються для того, щоб досягти високої якості одностороннього зварного шва. Весь виробничий процес проходить зі швидкістю 2 м / хв. Після цього до балки приварюються фасонні деталі, та покривають стінку захисним антикорозійним покриттям.

На сьогоднішній день в Україні більшого поширення знаходять сталеві конструкції з застосуванням балок з гофрованою стінкою .

В Україні виробництво балок з гофрованою стінкою було розпочато у 2011 році на сучасному українському підприємстві ООО «БФ Завод». Завод розташований в Київській обл., Бориспільський р-н., с. Мартусівка. Виробництво здійснюється на роботизованій лінії австрійської фірми "ZEMAN BAUELEMENTE Produktionsgesellschaft mbH.". Запропонована технологія дозволила дешево і швидко (швидкість виходу готового виробу близько 2 м / хв.) виробляти SIN-балки висотою від 0,3 до 1,5 м., в тому числі і SIN-балки змінного перерізу. Продуктивність заводу складає 14 000 тон балок на рік.

За період з 2011 по сьогодення в Україні було розроблено велику кількість різноманітних проектів з використанням конструкцій з гофрованими стінками, серед яких:

а) б)



в) г)

Рисунок 1.4 – Технологічний процес виготовлення сталевих балок з гофрованою стінкою на автоматичній лінії Zeman: а – розмотувач рулонної сталі стінки; б – вирівнювання листа перед профілюванням; в – профілювання сталі; г – готова до приварювання балка

- критий тенісний корт в м. Кременчуку Полтавської області (рисунок 1.5)
- стадіон «Чорноморець» м. Одеса (рисунок 1.6) та інші.

Рисунок 1.5 – Критий тенісний корт аркового типу (м. Кременчук)

Рисунок 1.6 – Стадіон «Чорноморець» (м. Одеса)

1.3. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Велика кількість, як вітчизняних так і зарубіжних науковців [15, 16, 19] досліджували балки з гофрованими стінками, зокрема великий вклад внесли Пічугін С. Ф [14, 17, 26], Нілов О. О. [7, 12, 20, 21], Лазнюк М. В. [3, 5, 22], та Нілова Т. О. [23, 24, 25]. Лазнюк М. В. розробив інженерну методику для розрахунку на

міцність та стійкість гофрованих балок із різними профілями і параметрами гофрів. У своїй праці він. підтвердив, що: навіть незначне пологе гофрування значно підвищує критичні біфуркаційні дотичні напруження тонкої стінки у порівнянні із плоскою стінкою, що в цілому доводить ефективність гофрування стінок зварних двотаврових балок [3]; визначив найбільш стійкий профіль гофрування; визначив ефективний параметр гофрування; сформулював обмеження за початковими недосконалостями. Провів та розробив методику проведення експерименту. Розробив інженерний метод розрахунку та рекомендації для проектування балки з гофрованою стінкою

Нілов О. О. Запропонував методику розрахунку для балок з гофрованими стінками різного профілю і параметрів [12].Дослідив НДС поперечно гофрованих стінок сталевих балок при дії зосередженого навантаження, також дослідив й вплив початкових недосконалостей, і запропонував ввести нормативні вимоги по їх обмеженню [20]. Також працює над тим, щоб використовувати балки з гофрованою стінкою не тільки як ригелі а й як колони [21], тобто досліджує їх роботу не тільки на дію згину від розподіленого навантаження в балках, також на дію стиску та згину (рисунок 1.7).

Рисунок 1.7 – Експериментальне дослідження стержнів з поперечно гофрованою стінкою синусоїдального профілю, під дією стиску та згину [21].

Нілова Т. О. досліджувала місцеву стійкість стиснутих поясів [23, 24, 25], розробила методику визначення відношення ширини звису полиці до її товщини, що дозволяє використовувати меншу товщину полиць в елементах з гофрованими стінками і таким чином підвищувати ефективність, встановила основний параметр, який визначає критичну величину напруження втрати стійкості.

Пічугін С. Ф. на основі провідних досліджень в країнах Європи запропонував методику розрахунку для балок з гофрованою стінкою з метою імплементації в вітчизняні норми [26].

Лавріненко Л. І в дослідженні [27] для зменшення металоємності та трудовитрат пропонує використовувати балку з гофрованою стінкою в якості верхнього поясу шпренгельної ферми.

У Казахстані ширше впроваджені сталеві конструкції з гофрованими стінками, так з досліду [4] відомо, що гофрована стінка сприймає нормальні напруження від дії згинального моменту, лише в невеликій області $\mathbf{ch_w}$ біля поясів (рисунок 1.8 а, б), це зумовлено стисненням чи розтягом її поясів. При віддалені від поясів до осі балки вплив поясі на стінку зменшується і зовсім зникає. В свій час дотичні напруження рівномірно розподіляються по всій висоті гофрування за лінійним законом.

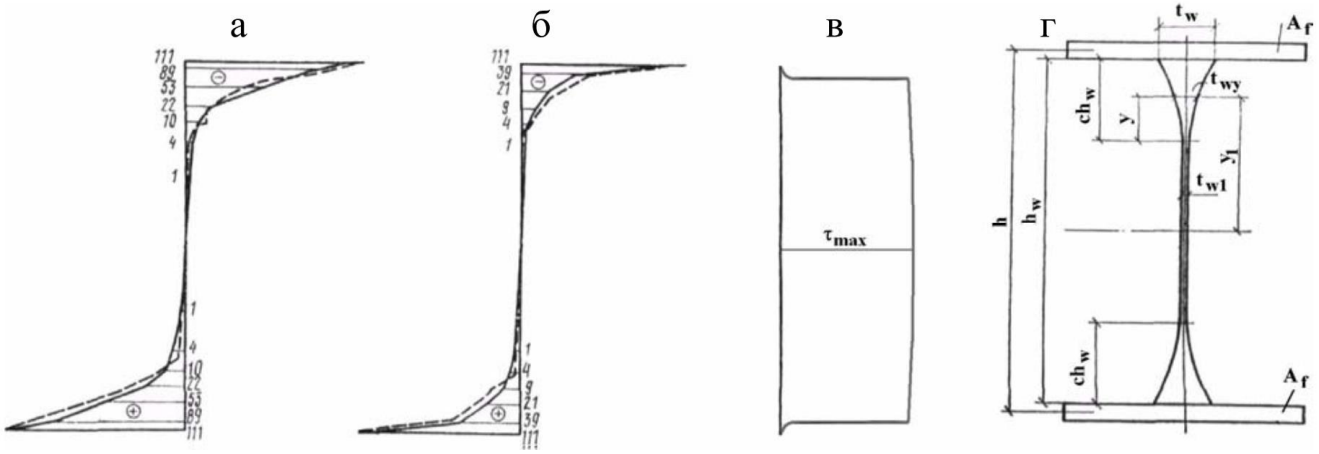


Рисунок 1.8 – До розрахунку на міцність балок з вертикально гофрованими стінками: а, б – епюри нормальних напружень в поперечних перерізах моделей балок з параметрами гофрів 20 × та 60 80 × відповідно; в – епюра дотичних напружень в перерізі балок з гофрованою стінкою; г – переріз балки з плоскою стінкою змінної товщини еквівалентної по роботі гофрованій стінці [4]

Для визначення участі гофрованої стінки балки в роботі на згин в Казахському відділенні ЦНДІпроектстальконструкції ім. М. П. Мельникова були виконані чисельні (за допомогою МСЕ) та експериментальні дослідження [4] шести моделей консольних зварних балок двотаврового перерізу довжиною **1200 мм**. Розміри поясів складали **160** × **10 мм**, стінки **240** × **3 мм**. Гофри мали трикутну форму з параметрами гофрів: **a** × **2f** = **80** × **15** ; **80** × **30**; **80** × **60**; **120** × **20** ; **120** × **40** ; **120** × **80 мм**.

На рисунку 1.8, а, б суцільними лініями показано епюри нормальних напружень в перерізах моделей, що досліджувались, за результатами чисельних досліджень, переривчастими — за результатами експериментальних.

Запропонована ними методика визначення міцності жорсткості балок з вертикально-гофрованими стінками була перевірено експериментально [4].

Так за результатами дослідження [4]

несуча здатність поперечно гофрованої стінки при роботі її на згин може складати 25 … 55 % несучої здатності плоскої стінки такої ж товщини, що дозволяє, при підборі перерізів балок з гофрованими стінками за даною методикою, знизити витрати сталі на **5 ... 7 %**

В роботі [31] для дослідження напружено-деформівного стану балок з гофрованими стінками пропонується заміна гофрованої стінки плоскою анізотропною пластиною з різною жорсткість на розтяг (стиск) у вертикальному та горизонтальному напрямках, при цьому пружні характеристики визначаються із рівності жорсткості на розтяг і зріз гофрованої і плоскої ортотропних пластин.

З огляду на це завданнями дипломної роботи є:

– розробити методику дослідження НДС та оцінки несучої здатності;

– провести верифікацію методу дослідження;

– провести дослідження НДС для трикутного, синусоїдального та трапецієвидного профілів;

– проаналізувати результати виявити раціональні геометричні параметри гофрування.

1.4. Висновки за розділом 1

1. Проведено аналіз літературних джерел з дослідження напружено-деформівного стану та стійкості балок з гофрованою стінкою.

2. Проаналізовано методи розрахунку стійкості стінки, стійкості поясів та несучої здатності балки в цілому.

3. Поставлено завдання:

– розробити методику дослідження НДС та оцінки несучої здатності;

– провести верифікацію методу дослідження;

– провести дослідження НДС для трикутного, синусоїдального та трапецієвидного профілів;

– проаналізувати результати виявити раціональні геометричні параметри гофрування.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ БАЛОК

2.1 Вибір та опис математичних моделей балок з гофрованою стінкою для дослідження

Існуючі практичні методи розрахунку напружено-деформівного стану та стійкості елементів тонкостінних конструкцій, а саме балок з гофрованою стінкою, в деяких випадках не забезпечують потрібної точності [6]. Це пов'язано з тим, що вони не дають можливості оцінити дійсний рівень напружень при сполученні стінки з поясами [7, 8, 19].

Існують лише рекомендації [13] по проектуванню.

Тому в даній роботі для достовірності дослідження напружено-деформівного стану (НДС) та форм втрат стійкості балок з гофрованою стінкою застосований метод скінченних елементів (МСЕ) [32].

Особливостям застосування МСЕ для розрахунку тонких пластин та оболонок присвячено роботу [9]. МСЕ застосовується для вирішення задач пов'язаних з чисельним дослідженням НДС і стійкості сталевих двотаврових балок при різних видах навантажень і впливів [10].

Балки з гофрованою стінкою класифікують за наступними ознаками: за параметрами гофрування; за формою гофри – синусоїдальна, трапецеїдальна, трикутна, прямокутна.

Для визначення впливу конфігурації гофрування на дотичні напруження та форми втрат стійкості гофрованих стінок і виявлення ефективного формоутворення гофрів із умов економії матеріалу та опору втрати стійкості стінки, розроблялися математичні моделі балок з гофрованою стінкою за однаковою схемою.

Для цього нами була прийнята шарнірно-оперта сталева балка (рисунок 2.1) двотаврового перерізу прольотом **L = 12000 мм**, висотою **H = 770 мм**, розміри нижнього і верхнього поясів складають:

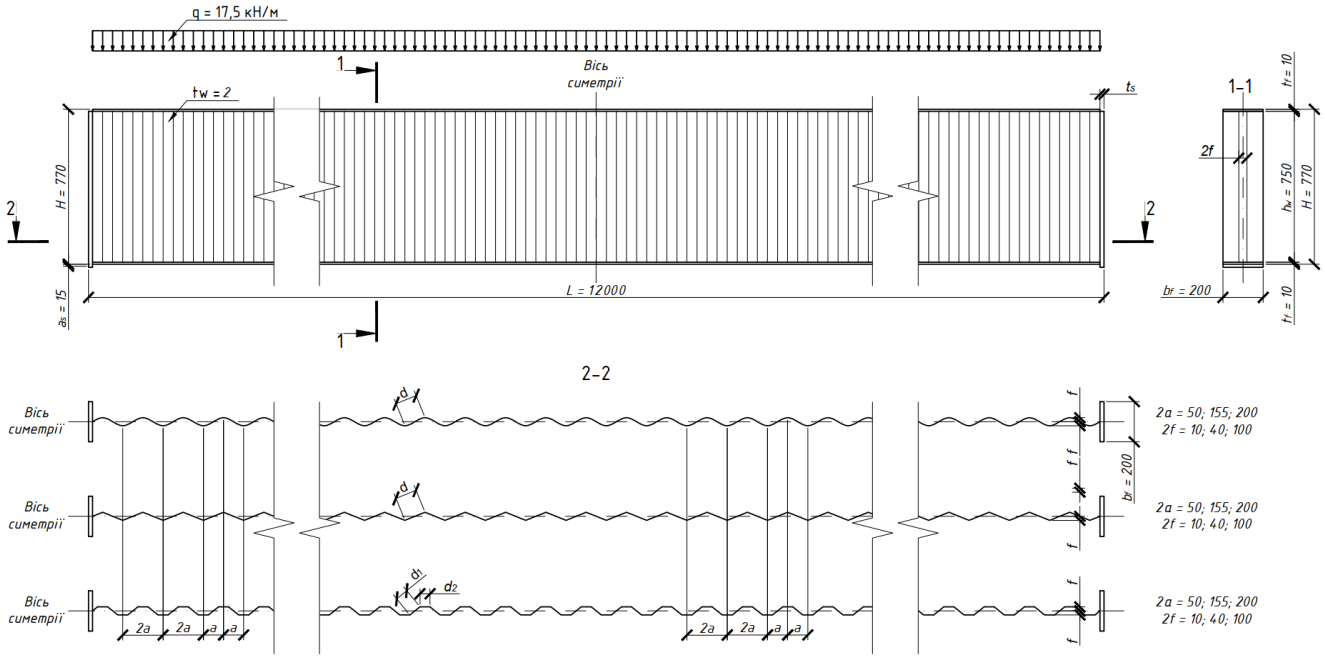


Рисунок 2.1 – Схема сталевої балки з гофрованою стінкою та її геометричні характеристики

$$\mathbf{b_f \times t_f = 200 \times 10\ (мм)},$$

розміри гофрованої стінки якої:

$$\mathbf{h_w \times t_w = 750 \times 2\ (мм)};$$

типи і параметри гофрування 2f та 2a якої:

$$\mathbf{2f \times 2a = 10…100 \times 50…200\ (мм).}$$

Форми гофрів вибиралися за схемою (рисунок 2.1). Прийняті для дослідження параметри гофрування складають: 2a = 50; 155; 200 мм, при цьому висота гофрів варіювалась для кожного кроку 2f = 10; 40; 100 мм. Всього розраховувалося 27 математичних моделей.

При формоутворенні стінки з трапецієвидною формою гофрів прийнято розмір d2 = 0.5a [3] (рисунок 2.1).

Для виключення можливої втрати стійкості в опорній зоні від місцевих напружень стиску від опорної реакції, встановлені опорні ребра балки розмірами:

$$\mathbf{b_s \times t_s = 200 \times 20\ (мм)},$$

з виступаючою нижче нижнього поясу частиною, яку приймаємо $\mathbf{a_s = 15}$ **мм**:

$$\mathbf{a_s \leq 1.5\ t_s = 1.5 \times 20 = 30\ (мм)}$$

Жорсткісні характеристики: балка моделюється із ізотропного матеріалу з модулем пружності **E = 2 × 10^5 МПа**, коефіцієнт Пуассона **ν = 0.3**. Для врахування власної ваги конструкції задавалась питома вага сталі **ρ = 7.85 т/м^3**.

Для моделювання стінки, опорних ребер та поясів використовувалися плоскі чотиривузлові прямокутні скінченні елементи (СЕ) оболонки; в місцях перетину стінки з поясами використовувалися плоскі тривузлові та чотиривузлові скінченні елементи (СЕ) оболонок.

Балка завантажена розподіленим навантаженням **q = 17,5 кН/м** (рисунок 2.1).

Оскільки передбачається, що загальна стійкість балки забезпечена, то закріплена вона була таким чином щоб відповідала шарнірно-обпертому закріпленні: на двох опорах накладені зв'язки які перешкоджають переміщенню у вертикальні площині; на лівій опорі заборонене переміщення в горизонтальній площині; верхній пояс для забезпечення загальної стійкості в площині були накладені в’язі, які перешкоджали повороту балки .

Розбивка на СЕ визначалася із умови точності та становила **5%**. Тобто крок СЕ сітки назначався виходячи із розміру – один СЕ має бути не більшим ніж 1/20 відповідного розміру досліджуваного елементу конструкції [8] (поясу, грані, тощо).

2.2 Огляд методів розрахунку балок з гофрованою стінкою

Для вирішення поставленої мети дослідження необхідним є визначення критичних напружень та форм стійкості балки з гофрованою стінкою. Це відбувається за допомогою класичної теорії стійкості рівноваги, яке зводиться до дослідження стійкості недеформованої схеми [11].

Розрахунок балок з гофрованою стінкою зводиться до розрахунку за I та II групами граничних станів.

Для гофрованих пластин і оболонок не має розробленої спеціальної теорії розрахунку, тому для дослідження напружено-деформівного стану та стійкості гофрів, використовують теорії оболонок та чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів [5, 12, 28], та інженерні методики [3].

Для проектування балок з гофрованою стінкою за I групою граничних станів повинні виконуватися умови [19]:

– перевірка міцності перерізу балки з гофрованою стінкою за нормальними напруженням за формулою:

$$\sigma_x = \frac{M}{W_x \cdot h_f} \leq R_y \cdot \gamma_c \; ;$$

– перевірка міцності балки за дотичними напруженнями за формулою :

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{0{,}9 \cdot h_w \cdot t_w} \leq R_s \cdot \gamma_c \; ;$$

– перевірка місцевої стійкості панелі гофри за відсутності місцевих напружень виконується за формулою:

$$\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}} \leq \gamma_c \, ,$$

де $\tau_{p,cr}$ – критичне дотичне напруження місцевої втрати стійкості гофрованої стінки;

– перевірка загальної стійкості панелі гофри за відсутності місцевих напружень виконується за формулою:

$$\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{o,cr}} \leq \gamma_c \, ,$$

де $\tau_{o,cr}$ – критичне дотичне напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки.

– перевірка стійкості поясів виконують за формулою:

$$\overline{\lambda_f} = \frac{b_{ef}}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{\mathrm{E}}} \leq \overline{\lambda_{uf}}\ ,$$

де $\overline{\lambda_f}$ – умовна гнучкість звису поясу;

$\overline{\lambda_{uf}}$ – гранична умовна гнучкість.

Для проектування за II групою граничних станів, для балки з гофрованою стінкою повинна [19] виконуватись наступна умова:

$$\frac{f}{L} = \left(\frac{5}{48} \cdot \frac{M_n \cdot L}{E \cdot I_x} + \frac{1}{G \cdot A_w} \cdot \frac{Q_n}{4}\right) \leq \left[\frac{f}{L}\right]$$

де $\left[\frac{f}{L}\right]$ – граничний відносний вертикальний прогин балки (береться з таблиці 1 ДСТУ Б В.1.2-3:2006 [29]).

На сьогоднішній день в чинних державних будівельних нормах України не має представленої методики розрахунків елементів з тонкою гофрованою стінкою. Натомість в Європейських стандартах Eurocode [30], представлена методика розрахунку елементів з поперечно гофрованою стінкою трапецієвидного профілю, при дії згинального моменту від статичного навантаження.

Також в нормативних документах Республіки Казахстан [33-35] представлені вказівки щодо розрахунку та проектування сталевих конструкцій, двотаврового перерізу із гофрованою стінкою трикутного профілю.

У сучасній науці широко використовують різні розрахункові програмні комплекси, кожен з яких має, як переваги так і недоліки.

Розрахунок металевих конструкцій, а саме балок з гофрованою стінкою можна зустріти у роботі Лазнюка М. В. (ЛІРА) [3], Нілова О. О. (ЛІРА) [20], Нілової Т. О. (ЛІРА) [25, 23].

У дипломній роботі проектний розрахунок напружено-деформівного стану та несучої здатності балки з гофрованою стінкою під дією статичного навантаження, буде виконано з використанням багатофункціонального програмного комплексу ЛІРА. У цьому комплексі є велика бібліотека скінченних елементів, набір

різноманітних багатофункціональних процесорів, велика база сталевих сортаментів. Все це дозволяє нам проводити розрахунки конструкцій будь-якої складності для різних типів статичних і динамічних навантажень. Конструювання та підбір перерізів залізобетонних та сталевих елементів проводиться відповідно до чинних норм країн Європи, США і СНД (у програмі є підтримка англійської мови, а також міжнародна система одиниць вимірювань). Взаємодія з системами автоматизованого проєктування і розрахунку (САПР) та прикладними програмами (ArchiCAD, AutoCAD, Microsoft Office, Revit, AdvanceSteel) відбувається з допомогою файлів з форматами *.DXF, *.MDB та ін. [36] .

Також цей програмний комплекс володіє рядом потрібних нам функціональних можливостей:

- перевірка міцності;
- фізична нелінійність;
- геометрична нелінійність.

Програмні комплекси сім’ї ЛІРА мають понад 40-річну історію створення, розвитку і застосування в різноманітних наукових дослідженнях і практиці проектування будівельних конструкцій. Розробники ПК ЛІРА безперервно удосконалюють і адаптують свій продукт до нових операційних систем і графічних середовищ.

Крім розрахунку моделі об'єкта на всі можливі типи статичних навантажень (силових, температурних, деформаційних) і динамічних дій (вітер з урахуванням пульсації, сейсмічні впливи, гармонійні коливання і т.п.) ПК ЛІРА автоматизує частину процесу проектування: визначення розрахункових сполучень навантажень і зусиль; призначення конструктивних елементів; підбір і перевірка перерізів сталевих та залізобетонних конструкцій з формуванням ескізів робочих креслень колон і балок.

ПК ЛІРА візуалізує й дозволяє досліджувати загальну стійкість розрахункових моделей, перевірку міцності перерізів елементів з різних теорій руйнування. ПК ЛІРА-САПР дає можливість проводити розрахунки об'єктів з урахуванням фізичної, геометричної, фізико-геометричної і конструктивної

нелінійностей, моделювати процес зведення будівлі з урахуванням монтажу-демонтажу елементів з відстеженням змін фізичних властивостей матеріалів.

2.3 Методика комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження балки з гофрованою стінкою

Для того, щоб виконати моделюючий експеримент за допомого програмного комплексу ЛІРА (рисунок 2.3) необхідно:

1. Створити нову задачу і вибрати ознаку схеми;
2. Створити геометричну (скінченно-елементну) модель балки;
3. Задати граничні умови;
4. Задати жорсткості і жорсткісні параметри елементам балки;
5. Задати навантаження;
6. Задати виконання розрахунку на стійкість;
7. Виконати розрахунок;
8. Переглянути і проаналізувати результати розрахунку.

Отже розглянемо процес виконання комп'ютерного моделюючого експерименту математичної моделі (рисунок 2.1) балки з гофрованою стінкою синусоїдального профілю з параметром гофри **2f × 2a = 40 × 155** мм.

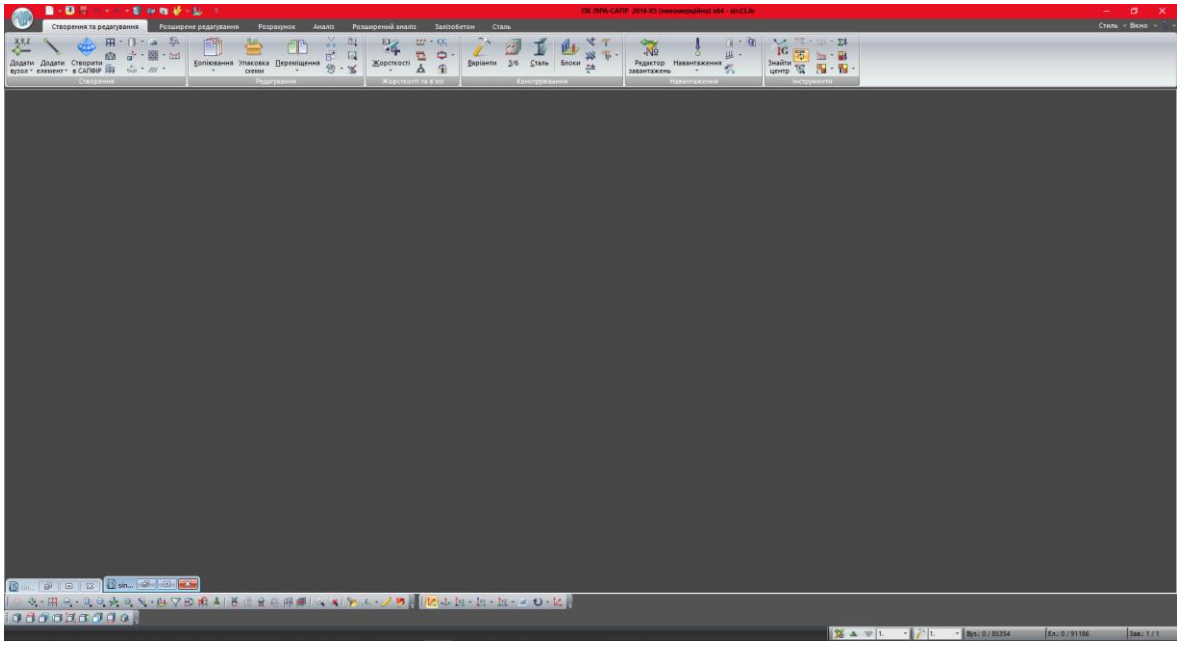


Рисунок 2.3 – Користувацький інтерфейс ПК ЛІРА-САПР 2016

1. Створення задачі. В меню **Файл** вибрати пункт **Новий**. У вікні **Опис схеми** (рисунок 2.4). Вписуємо **ім'я задачі** та вибираємо ознаку схеми **5 – Шість степенів вільності у вузлі (X, Y, Z, Ux, Uy, Uz)**.

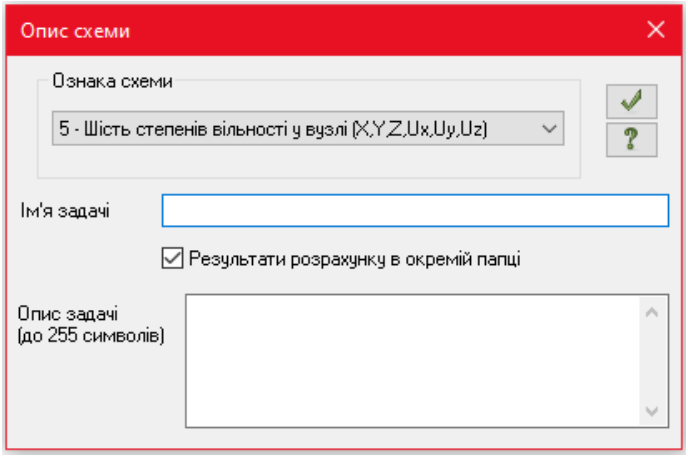
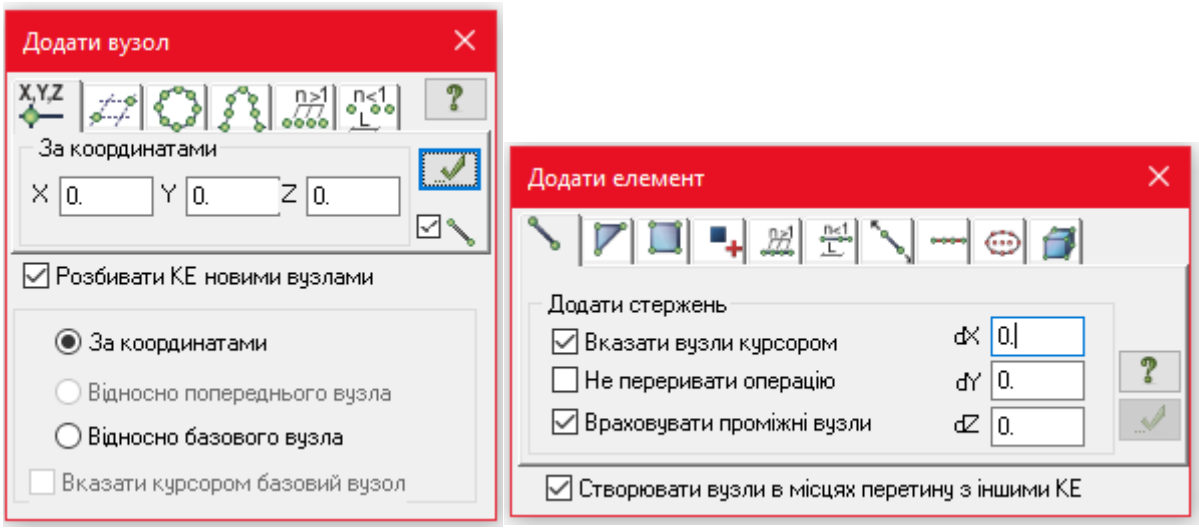


Рисунок 2.4 – Діалогове вікно **Опис схеми**

2. Створення геометричної моделі балки. Оскільки в балки буде геометрично складна стінка, то її виконання буде за допомогою інструментів панелі створення – створення вузлів за координатами (рисунок 2.5, а) та створення між цими вузлами стержнів (рисунок 2.5, б).



а) б)

Рисунок 2.5 – Інструменти панелі створення: а – додати вузол; б – додати елемент.

Далі користуючись інструментами панелі редагування – **копіювання** (рисунок 2.6, а) та **переміщення** (рисунок 2.6, б), повністю формуємо форму гофрів стінки (рисунок 2.7) даної моделі.

а) б)

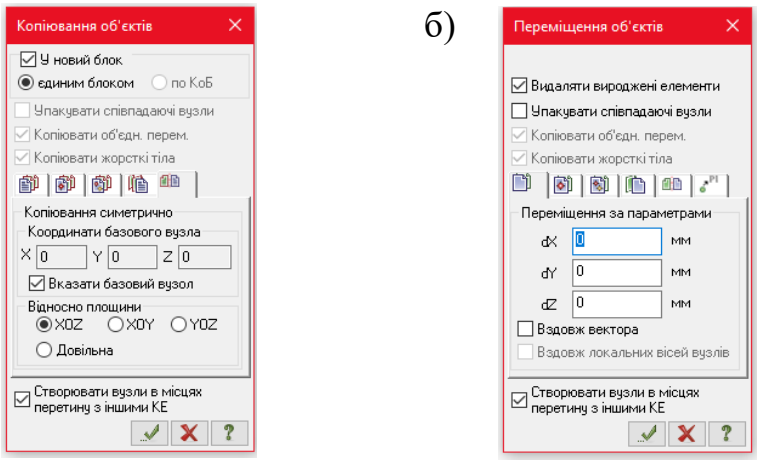


Рисунок 2.6 – Інструменти панелі редагування: а – копіювання; б – переміщення

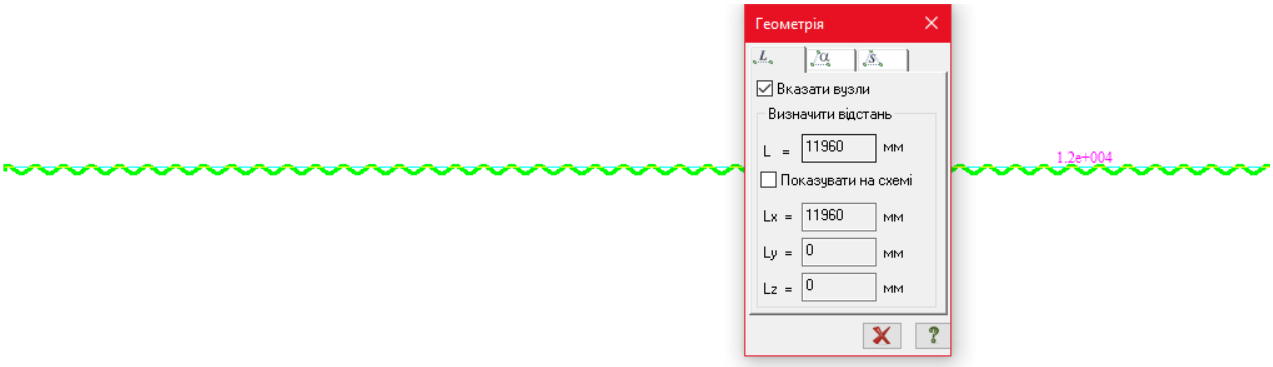


Рисунок 2.7 – Форма гофрів

Після чого за допомогою інструменту панелі створення – **Переміщення твірної** витягуємо стінку (рисунок 2.6).

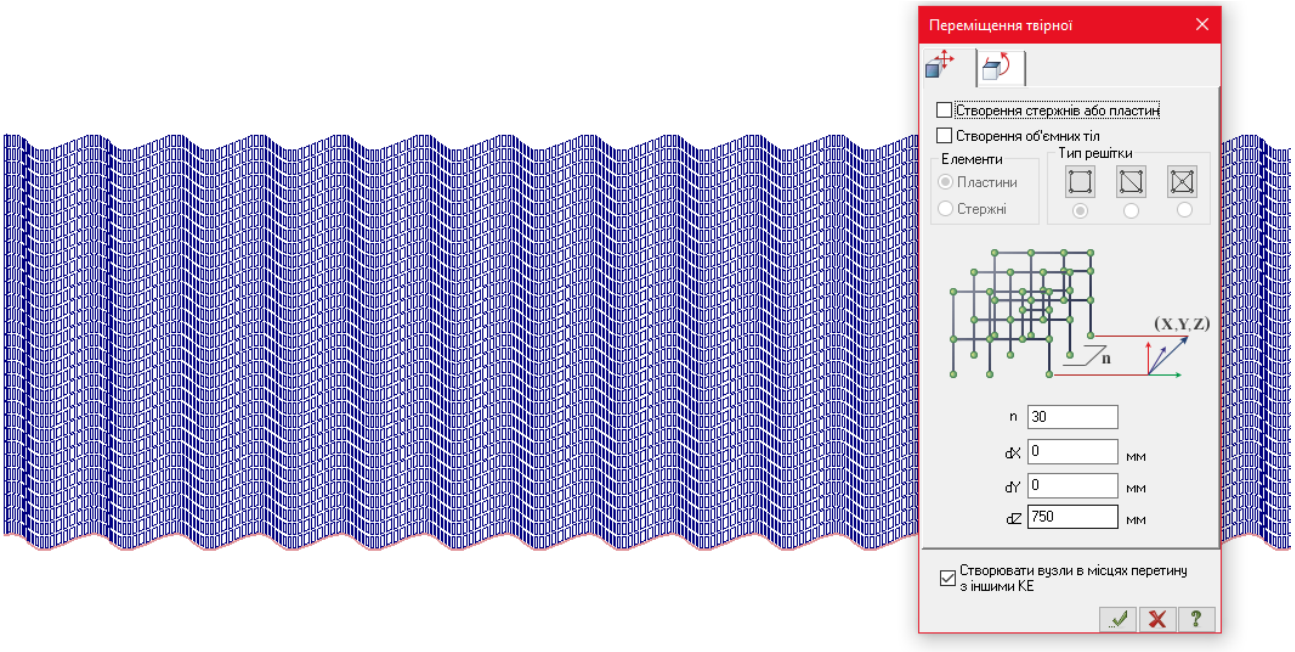


Рисунок 2.8 – Скінченно-елементна модель стінки

Тоді використовуючи інструменти панелі Створення – **копіювання** (рисунок 2.6, а), **переміщення** (рисунок 2.6, б) та **переміщення твірної** створюємо пояси та опорні ребра після чого отримуємо готову скінченно-елементну модель (рисунок 2.8).

3. Задання граничних умов. Для закріплення шарнірно-обпертої балки потрібно використати інструменти вкладки Створення та редагування – **В'язі**. З однієї сторони заборонити переміщення вздовж осей X, Y, Z (рисунок 2.9, а) з іншої заборонити переміщення вздовж осей Y, Z (рисунок 2.9, б), а також для збереження загальної стійкості у верхньому поясі потрібно заборонити переміщення вздовж осі Y (рисунок 2.9, в).

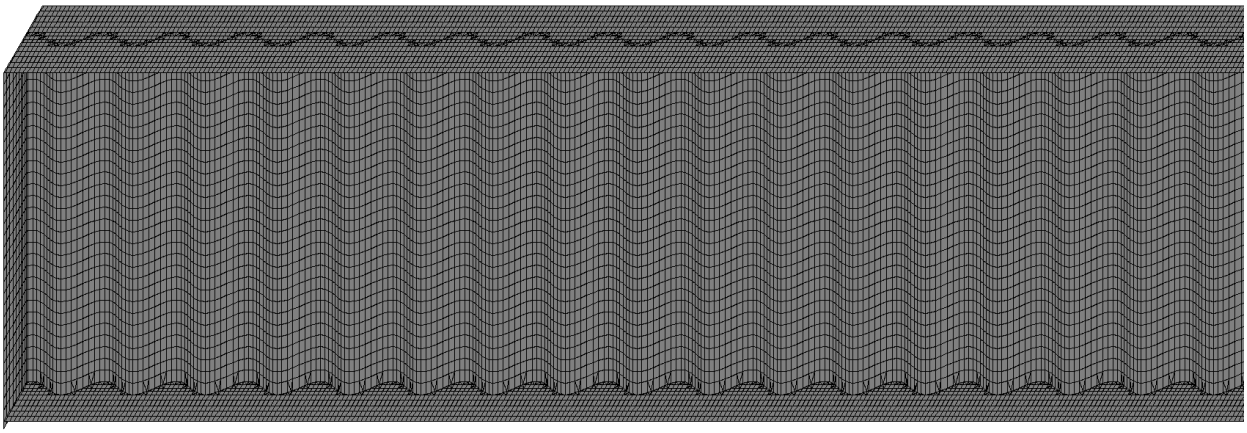
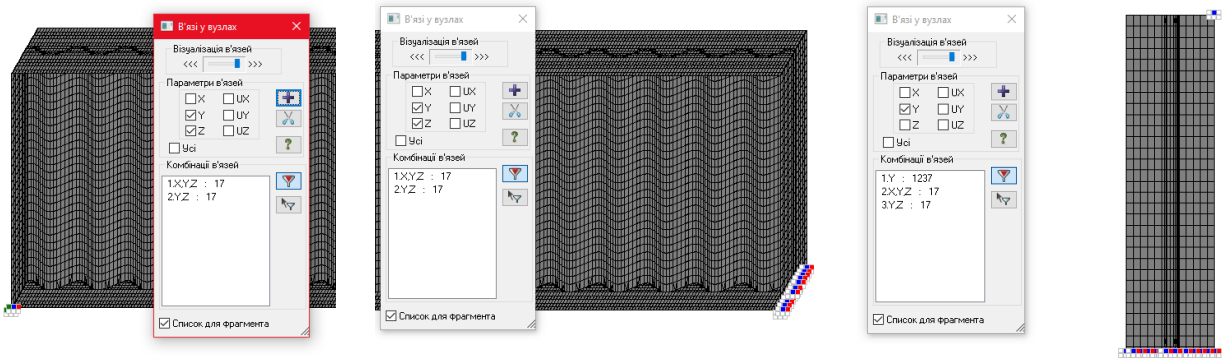


Рисунок 2.8 – Фрагмент скінченно-елементної моделі балки з гофрованою стінкою

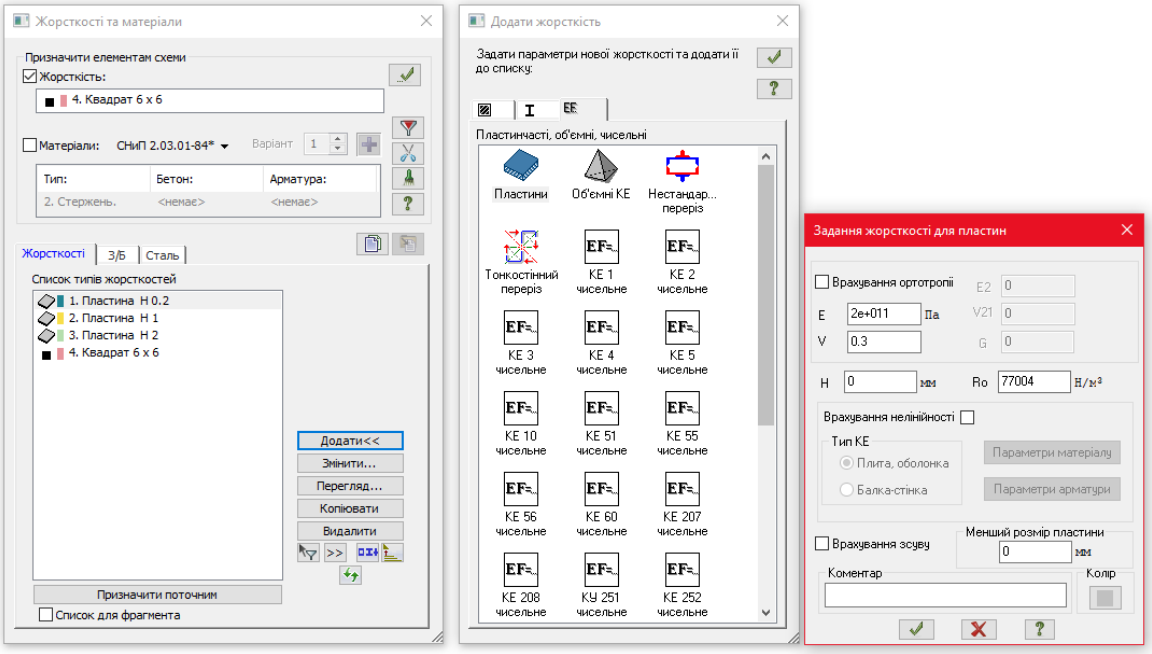


а) б) в)

Рисунок 2.9 – Закріплення скінченно-елементної моделі

4. Задання жорсткостей і жорсткісних параметрів елементам балки. Для того щоб призначити відповідні перерізи елементам схеми потрібно використати інструменти вкладки Створення та редагування – **Жорсткості** (рисунок 2.10). У діалоговому вікні Жорсткості та матеріали (рисунок 2.10, а) натиснути кнопку додати, після чого у відкрившомуся вікні Додати жорсткість вибираємо пластини (рисунок 2.10, б) у вікні Задання жорсткості для пластин вводимо товщину та жорсткістні характеристики (рисунок 2.10, в): Модуль пружності **E = 2 × 10^5 МПа**, коефіцієнт Пуассона **ν = 0.3**. Для врахування власної ваги конструкції задавалась питома вага сталі **ρ = 7.85 т/м^3**. Повторюємо цю операцію необхідну кількість разів

та присвоюємо їх відповідним елементам скінченно-елементної моделі (рисунок 2.11).



а) б) в)

Рисунок 2.10 – Інтерфейс інструменту Жорсткості: а – Основне вікно; б – вікно вибору поперечного перерізу; в – вікно задання жорсткісних характеристик.

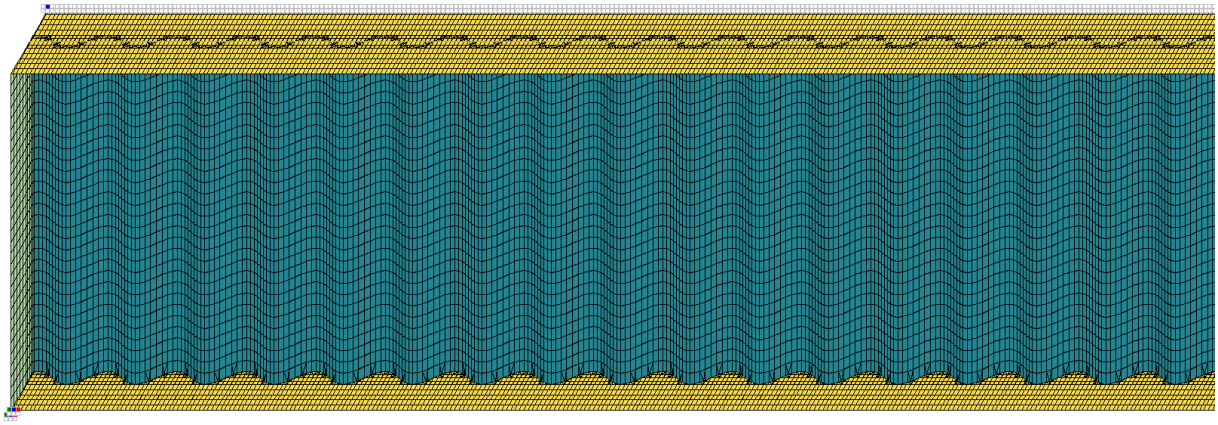


Рисунок 2.11 – Скінченно-елементна модель з відповідно присвоєними жорсткостями

5. Задання навантажень. Розроблена модель буде завантажена двома типами завантажень: перший це власна вага; другий рівномірно розподілене навантаження **q = 17,5 кН/м** (рисунок 2.1). Для цього нам потрібно виділити всі

елементи нашої моделі та використати інструмент вкладки Створення та редагування панелі навантаження – **Додати власну вагу** (рисунок 2.12). Щоб задати корисне навантаження потрібно, або окремо задавати навантаження на кожен вузол, або по осі верхнього поясу накреслити стержень призначити йому жорсткість та задати рівномірно розподілене навантаження на стержні (рисунок 2.13)

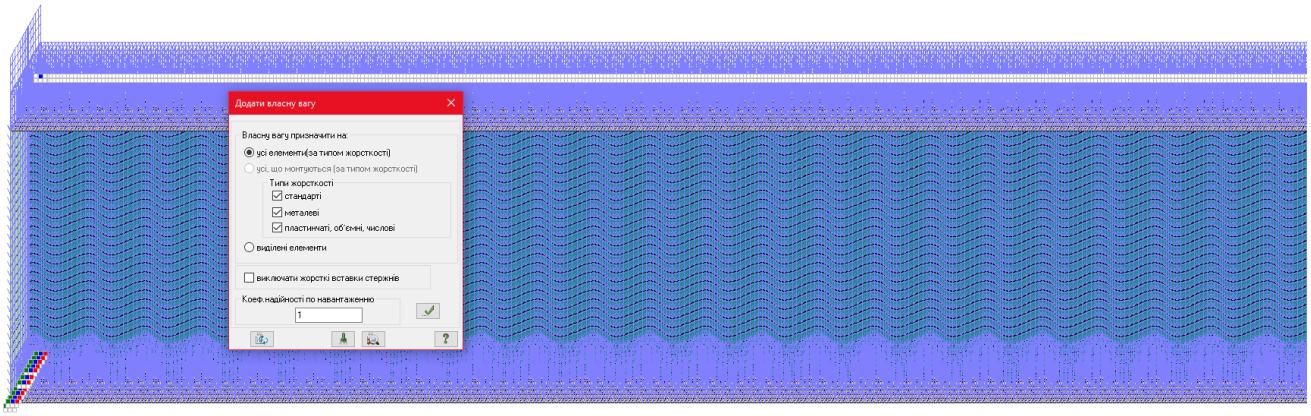


Рисунок 2.12 – Скінченно-елементна модель завантажена власною вагою

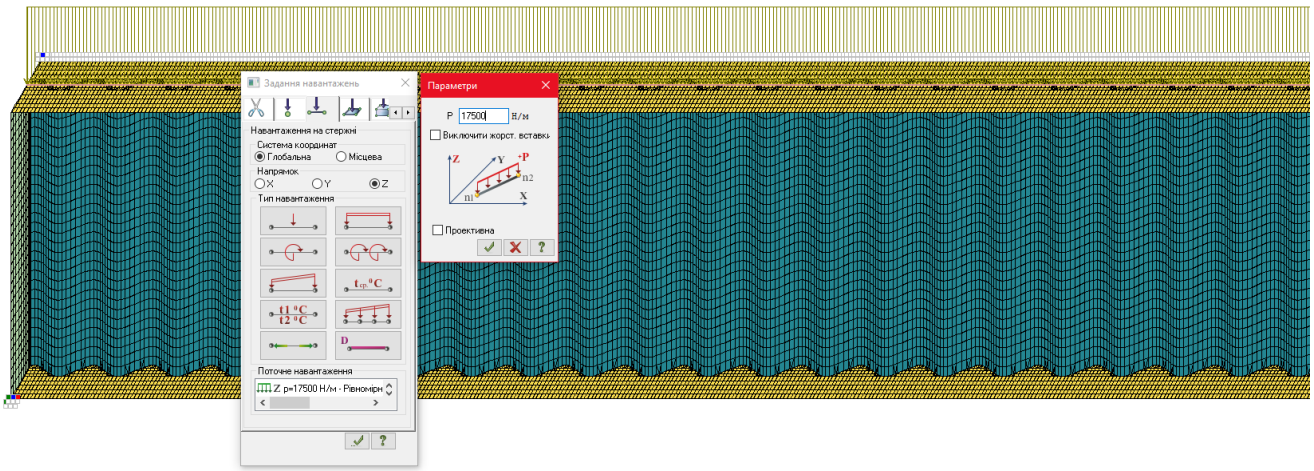


Рисунок 2.13 – Скінченно-елементна модель завантажена розподіленим навантаженням **q = 17,5 кН/м**.

6. Задання виконання розрахунку на стійкість. Для цього нам потрібно перейти у вкладку розрахунок та використати інструмент панелі додаткові розрахунки – **Стійкість.**

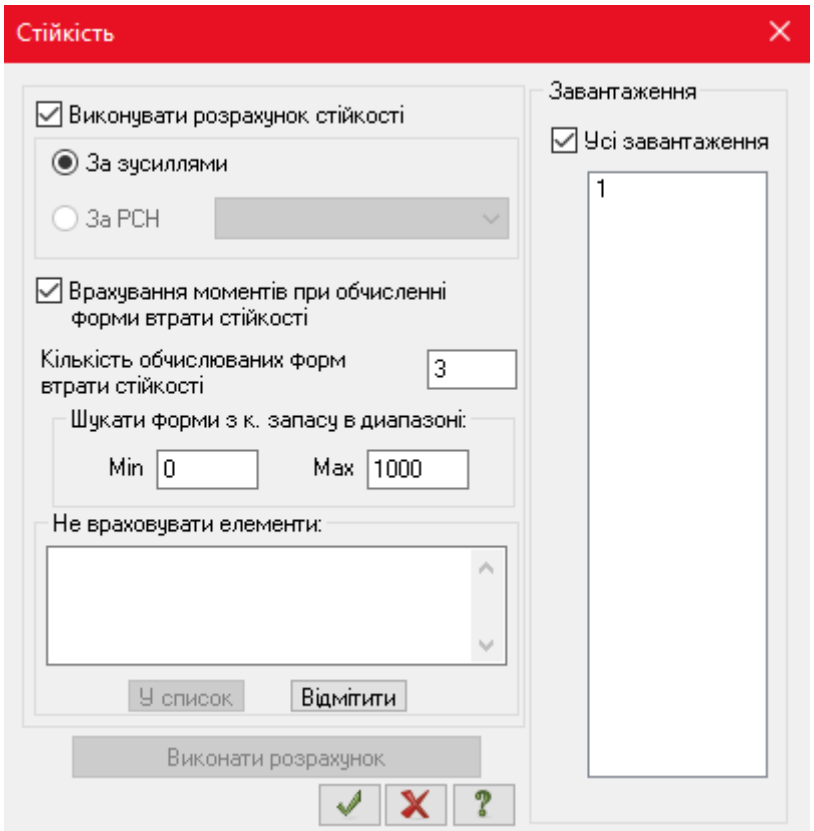


Рисунок 2.14 – Діалогове вікно інструменту панелі додаткові розрахунки – **Стійкість**

7. Виконання розрахунку. У вкладці розрахунок на панелі розрахунок натиснути на кнопку **Виконати розрахунок**.

8. Перегляд і аналіз результатів розрахунку моделі.

Для подальшого виконання дипломної роботи нам потрібно отримати наступні результати: максимальні напруження σ_x [MPa], дотичні напруження τ_{xy} [MPa], прогин балки f [см] , форму втрати та коефіцієнт запасу стійкості λ. Для того щоб переглянути потрібні нам результати розрахунку потрібно перейти на вкладку **Аналіз** і вибрати: для напружень на панелі напруження у пластинах та об’ємних КЕ вибрати інструменти **Ізополя напружень по Nx** (рисунок 2.15), **Ізополя напружень по Ny** (рисунок 2.16) та **Ізополя напружень по τ_{xy}** (рисунок 2.17); для прогинів на панелі деформації вибрати інструмент **Мозаїка переміщень по Z(G)** (рисунок 2.18); для форми втрати та коефіцієнта запасу стійкості на панелі деформації вибрати інструмент **Форма втрати стійкості** (рисунок 2.19).

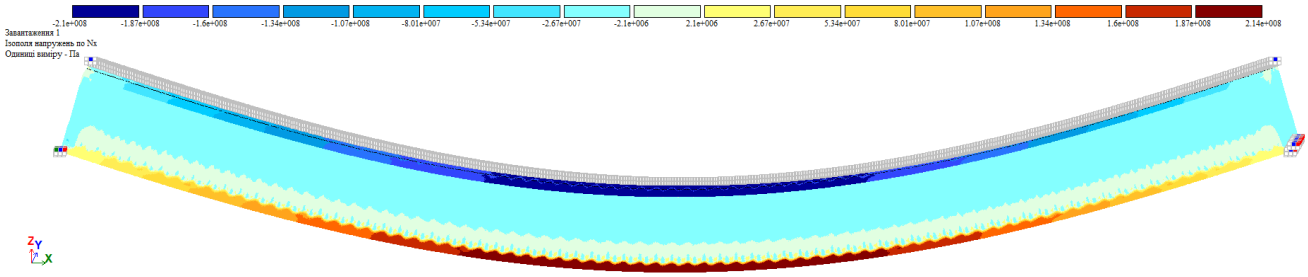


Рисунок 2.15 – Візуалізація результату інструменту **Ізополя напружень по Nx**

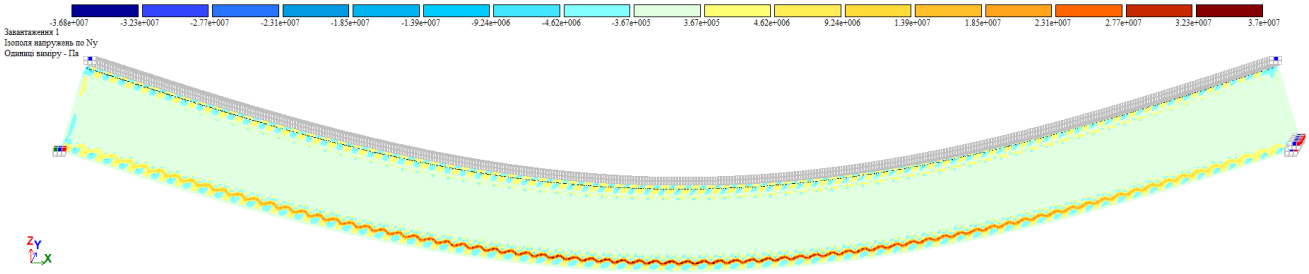


Рисунок 2.16 – Візуалізація результату інструменту **Ізополя напружень по Ny**

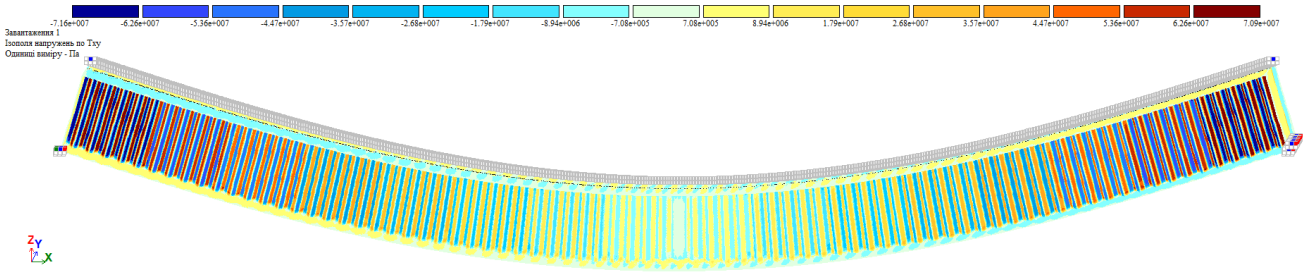


Рисунок 2.17 – Візуалізація результату інструменту **Ізополя напружень по τ_{xy}**

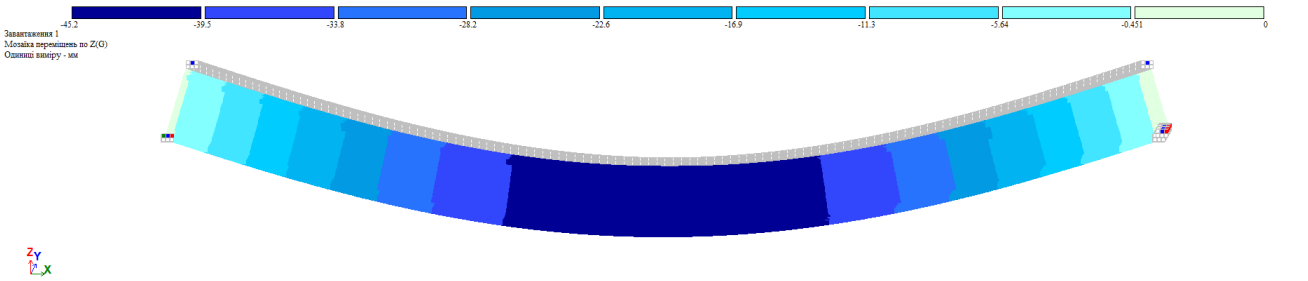


Рисунок 2.18 – Візуалізація результату інструменту **Мозаїка переміщень по Z(G)**

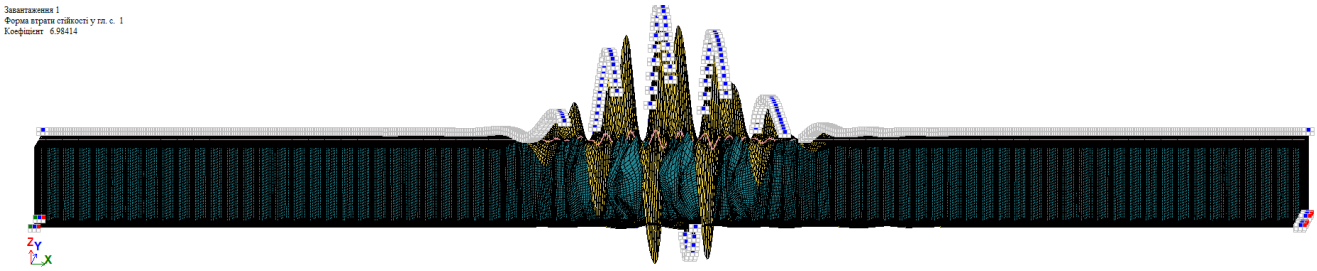


Рисунок 2.19 – Візуалізація результату інструменту **Форма втрати стійкості**

2.4 Верифікація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту

Для порівняння результатів будуть використані результати роботи [3]. Порівнюватися буде балка з гофрованою стінкою (рисунок 2.20). Математична модель якої являє собою шарнірно – оперту сталеву балку з тонкою гофрованою стінкою (рисунок 2.20, а) двотаврового перерізу прольотом **L = 5000 мм**, висотою **H = 644 мм**, розміри нижнього і верхнього поясів:

$$\mathbf{b_f \times t_f = 220 \times 10\ (мм)};$$

розміри гофрованої стінки з хвилястою (синусоїдною) формою гофрів:

$$\mathbf{h_w \times t_w = 624 \times 1\ (мм)};$$

відношення висоти гофрів до кроку гофрів:

$$\mathbf{2f \times 2a = 40 \times 150\ (мм)};$$

Отже за результами дослідження [3] отримано такі результати:

– максимальні дотичні напруження в першому відсіку складають

$$\boldsymbol{\tau_{xy}, max = 139 МПа;}$$

– максимальні нормальні напруження в поясах складають

$$\boldsymbol{\sigma_x, max = -107 МПа;}$$

– найбільші вертикальні деформації становлять **6,2 мм;**

– коефіцієнт запасу стійкості **λ = 2.2444.**

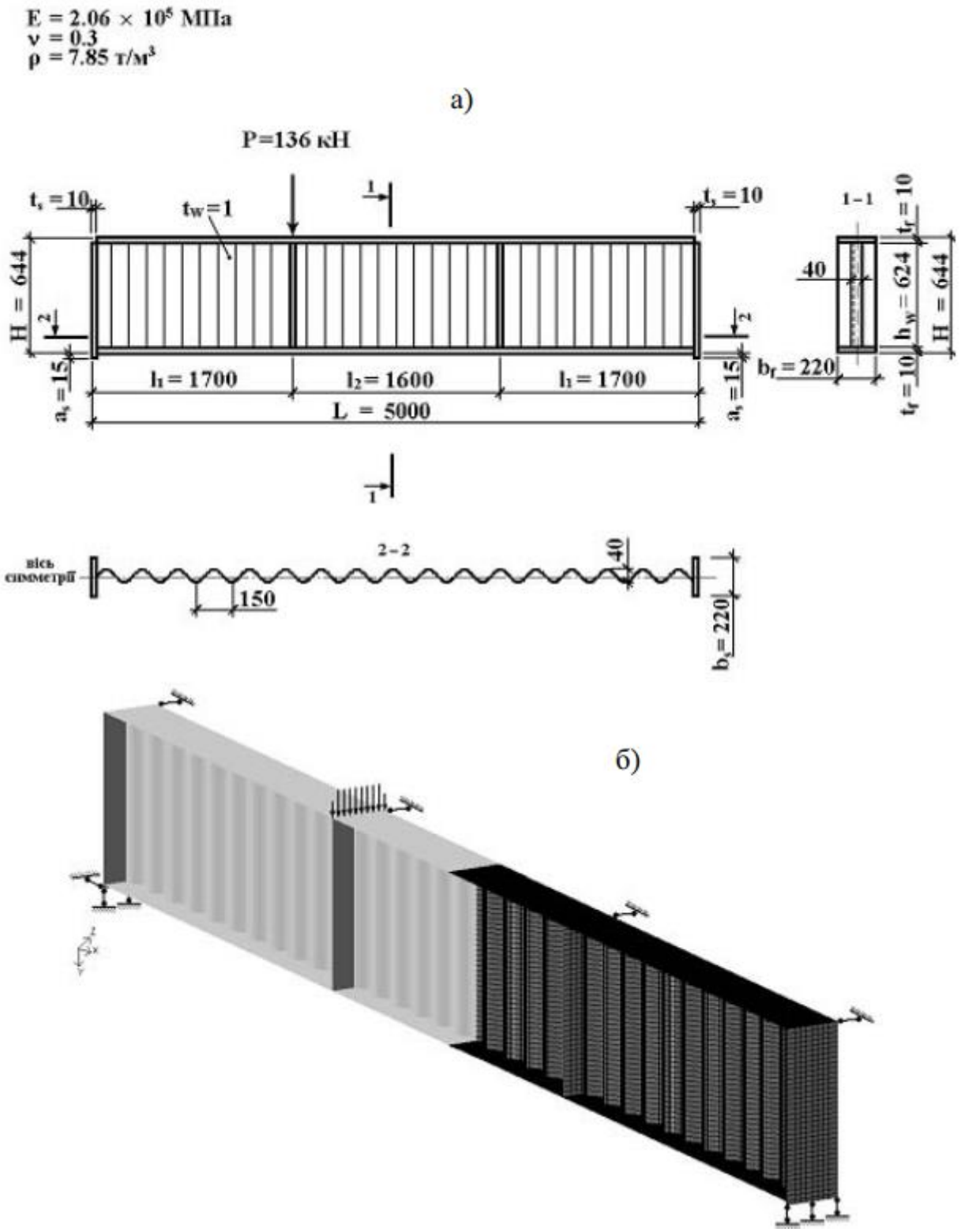


Рисунок 2.20 – Математична модель експериментальної балки з гофрованою стінкою:

а – геометрія конструкції; б – скінченно-елементна модель [3]

За результатами проведеного нами порівняльного комп’ютерного моделюючого експерименту отримано наступні результати:

– максимальні дотичні напруження в першому відсіку складають (рисунок 2.21):

$$\tau_{xy}, \max = 140 \text{МПа};$$

– максимальні нормальні напруження в поясах складають (рисунок 2.22):

$$\sigma_x, \max = -107 \text{МПа};$$

– найбільші вертикальні деформації (рисунок 2.23) становлять: **6,26 мм;**

– коефіцієнт запасу стійкості (рисунок 2.24) становить: **λ = 2.308.**

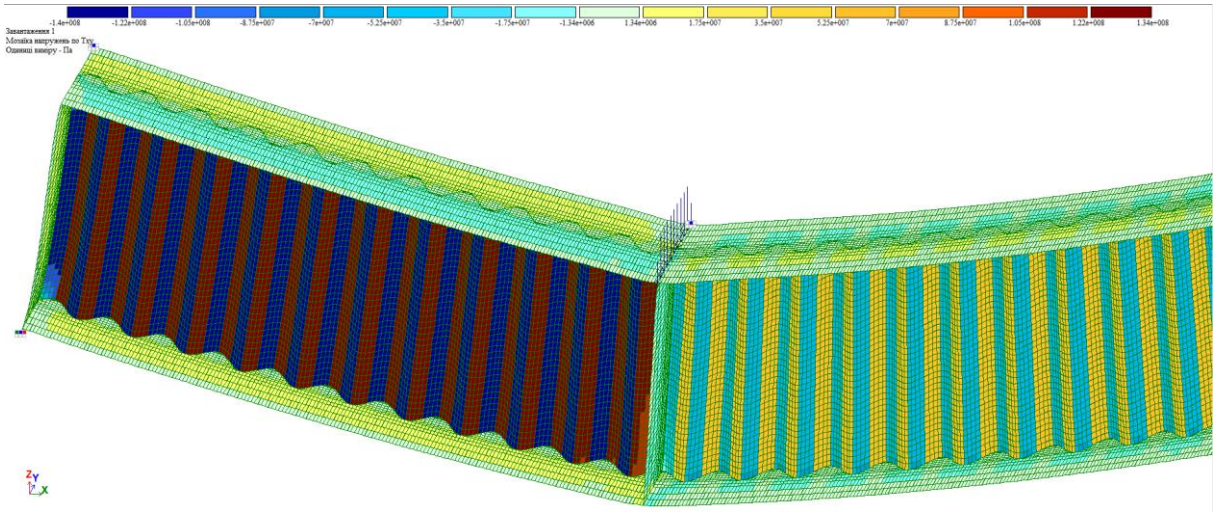


Рисунок 2.21 – Максимальні дотичні напруження експериментальної балки з гофрованою стінкою

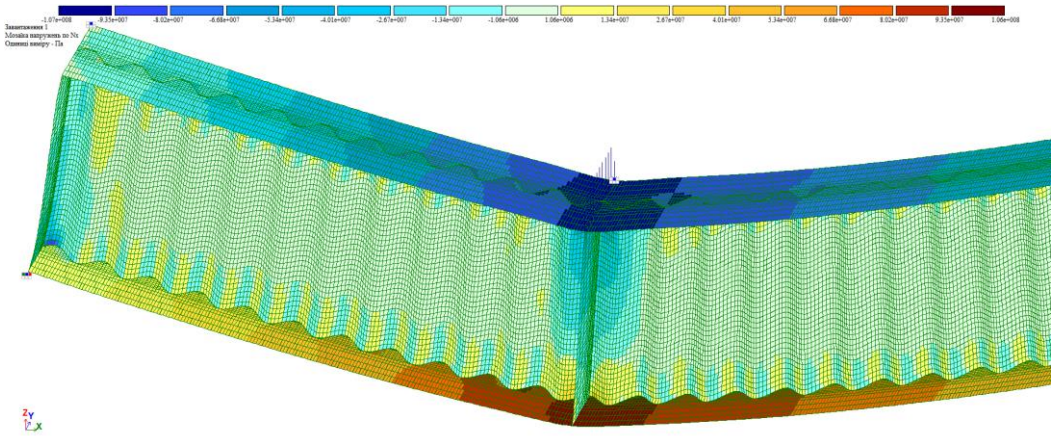


Рисунок 2.22 – Максимальні нормальні напруження експериментальної балки з гофрованою стінкою

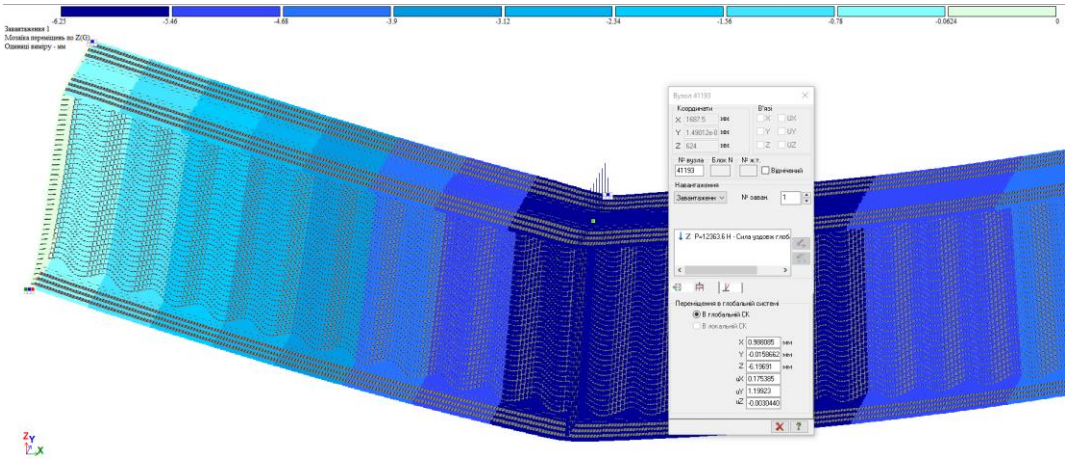


Рисунок 2.23 – Максимальні деформації експериментальної балки з гофрованою стінкою

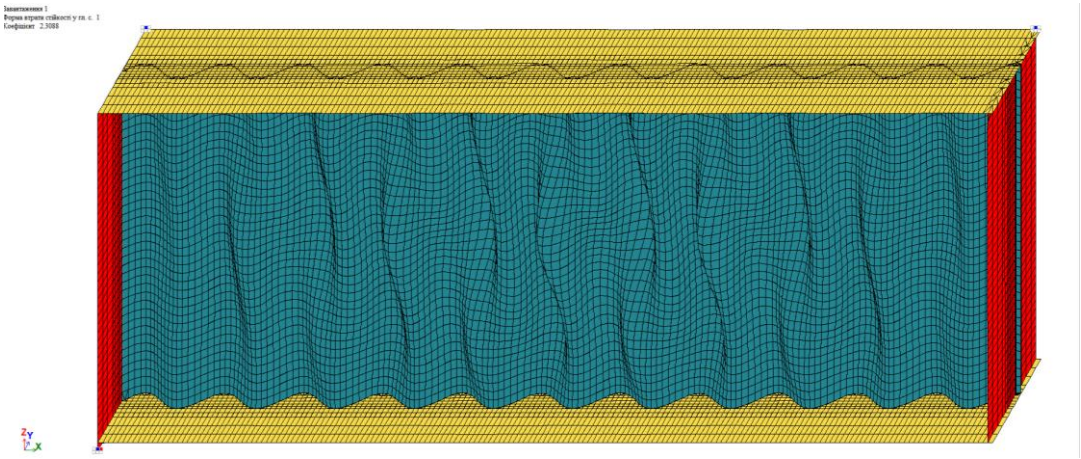


Рисунок 2.24 – Форми втрати стійкості експериментальної балки з гофрованою стінкою

Проаналізувавши результати можна сказати, що похибка становить: для дотичних напружень – 0,7 %; для нормальних напружень – 0 %; для прогинів становить – 0,95 %; за коефіцієнтом запасу стійкості – 2.76%

2.5 Висновки за розділом 2

1. Проаналізовано існуючі методи розрахунку балок з гофрованою стінкою.
2. Розроблено математичну модель для виконання комп’ютерного моделюючого експерименту напружено-деформівного стану та несучої здатності балки з гофрованою стінкою.
3. Для розрахунку застосовано програмний комплекс ЛІРА, який поєднує в собі потрібні інструменти для подальшого дослідження напружено-деформівного стану та стійкості. Даний програмний комплекс є простим та наглядним для проведення дослідження.
4. Проведено верифікацію методики комп’ютерного експерименту.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ГОФРОВАНОЮ СТІНКОЮ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Дослідження напружено-деформівного стану (НДС) та несучої здатності фізичної моделі балки з гофрованою стінкою різних конфігурацій при дії рівномірно розподілених навантажень за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ)

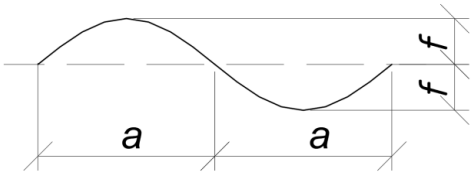
Для дослідження напружено-деформівного стану (НДС) математичних моделей балок з гофрованою стінкою при дії рівномірно розподілених навантажень за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) використано програмний комплекс ЛІРА-САПР 2016.

Розрахунок балки з гофрованою стінкою полягає у визначенні напружень і деформацій в стінці і поясах, що виникають під дією навантаження.

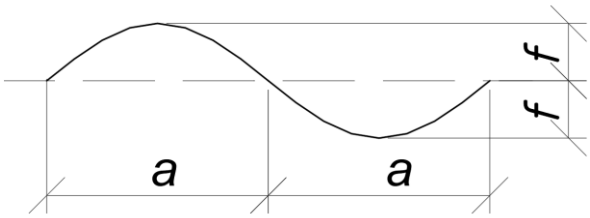
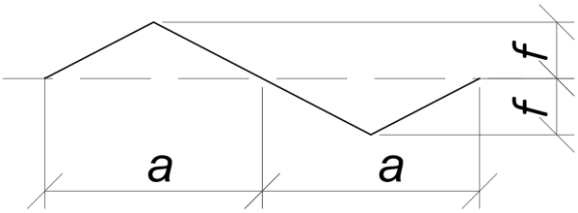
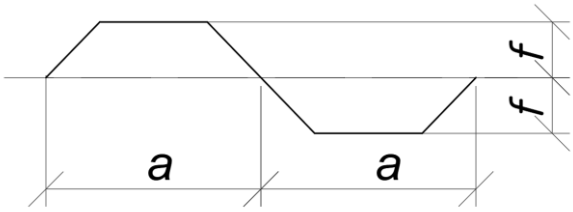
Параметри гофрів всіх розрахункових моделей балок з гофрованою стінкою, які використовувалися для дослідження, наведені у таблиці 3.1.

Основні показники, що визначилися: максимальні напруження в поясі балки σ_x [MPa], дотичні напруження, які сприймає стінка балки τ_{xy} [MPa], прогин балки f [см] та коефіцієнт запасу стійкості λ.

Таблиця 3.1 – Конфігурація гофрів досліджуваних моделей.

№ моделі	Профіль гофрів	Довжина гофрів 2a, мм	Висота гофрів 2f, мм
1	2	3	4
1		50	10
2		50	40
3		50	100
4		155	10

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
5		155	40
6		155	100
7		200	10
8		200	40
9		200	100
10		50	10
11		50	40
12		50	100
13		155	10
14		155	40
15		155	100
16		200	10
17		200	40
18		200	100
19		50	10
20		50	40
21		50	100
22		155	10
23		155	40
24		155	100
25		200	10
26		200	40
27		200	100

3.2 Співставлення та аналіз нормальних напружень балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів

Для визначення залежності нормальних напружень від зміни профілю, висоти та довжини гофри було змодельовано двадцять сім моделей з різними параметрами гофрування (таблиця 3.1). Результати обчислень нормальних напружень зведено у таблицю 3.2, та графічно зображені на рисунка 3.2, 3.3, 3.4.

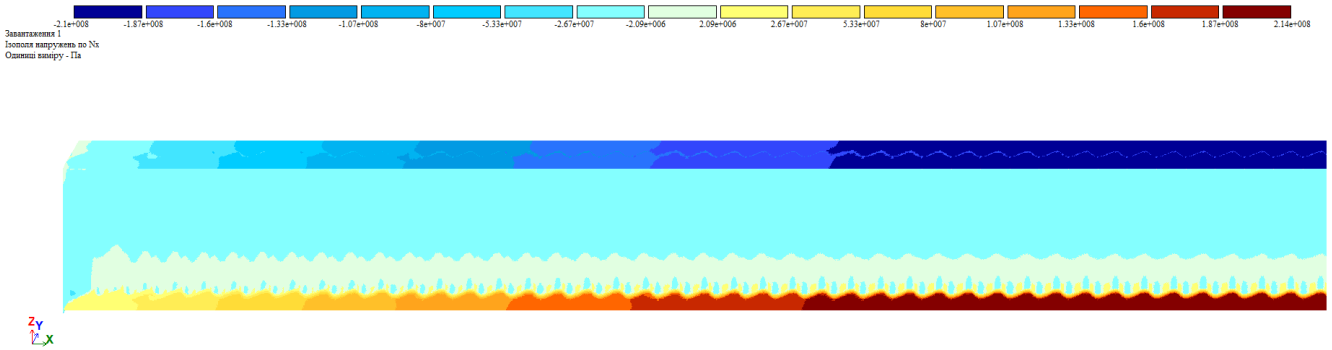
Розподіл нормальних напружень в балці з гофрованою стінкою (рисунок 3.1).

Стінка сприймає нормальні напруження від дії згинаючого моменту σ_x (рисунок 3.1, а) лише в невеликій області безпосередньо біля поясів, при віддалені

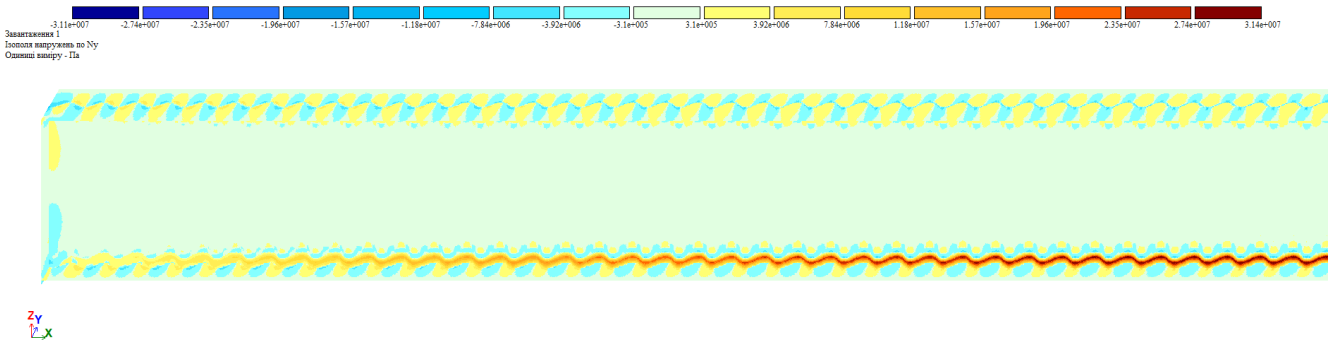
від поясів – напруження зменшуються. Нормальні напруження σ_y, які діють в поперечному напрямку (рисунок 3.1, б), як правило незначні і великого впливу на напружений стан не мають.

Також варто відмітити концентрацію напружень біля опорного ребра, яка може викликати місцеву втрату стійкості внаслідок появи ділянок, які працюватимуть за межею пружності.

В поясах розподіл нормальних напружень σ_x (рисунок 3.1, а) відбувається за звичайною схемою, а от в поперечному напрямку в місцях відхилення гофри виникають незначні напруження σ_y.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Характерний розподіл нормальних напружень балок з гофрованою стінкою отриманий в результаті математичного моделювання МСЕ: а – розподіл нормальних напружень σ_x від дії згинаючого моменту; б – розподіл нормальних напружень σ_y від дії поперечних сил.

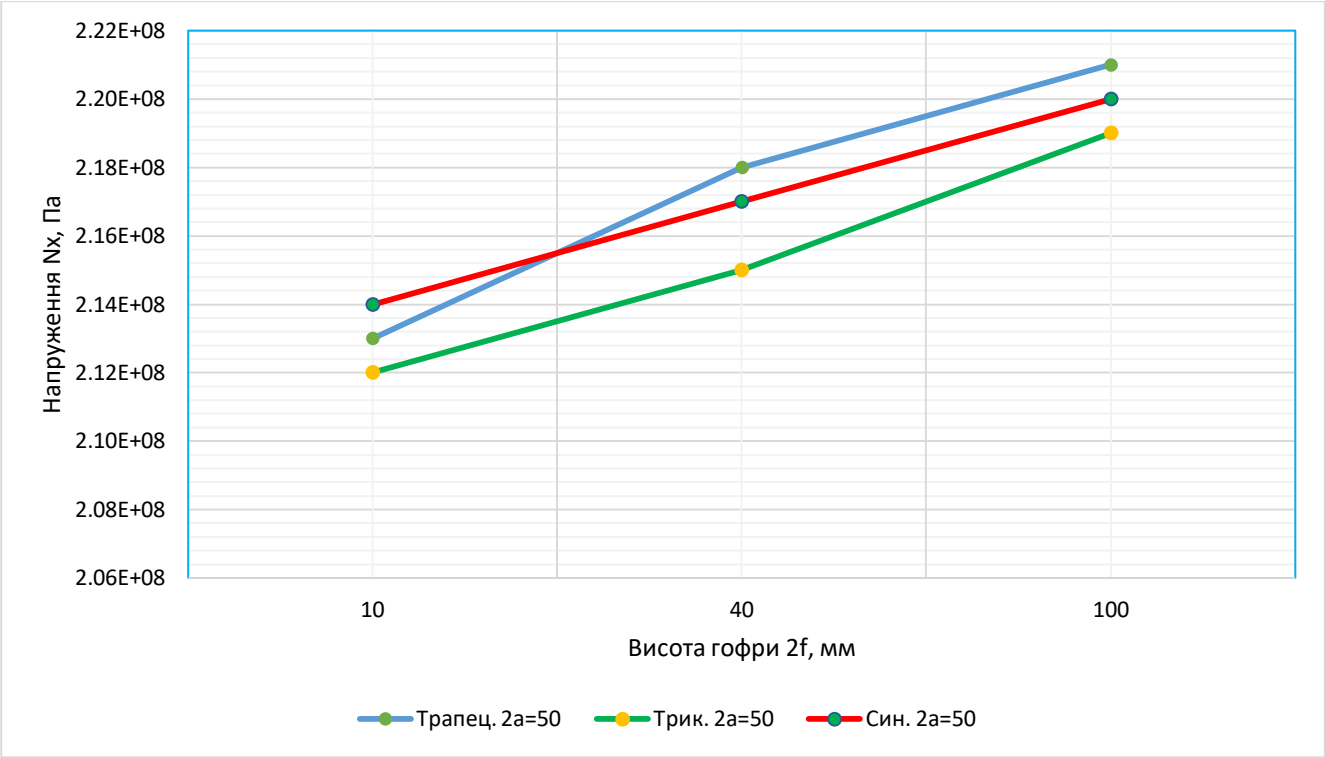


Рисунок 3.2 – Діаграма нормальних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 50 мм.

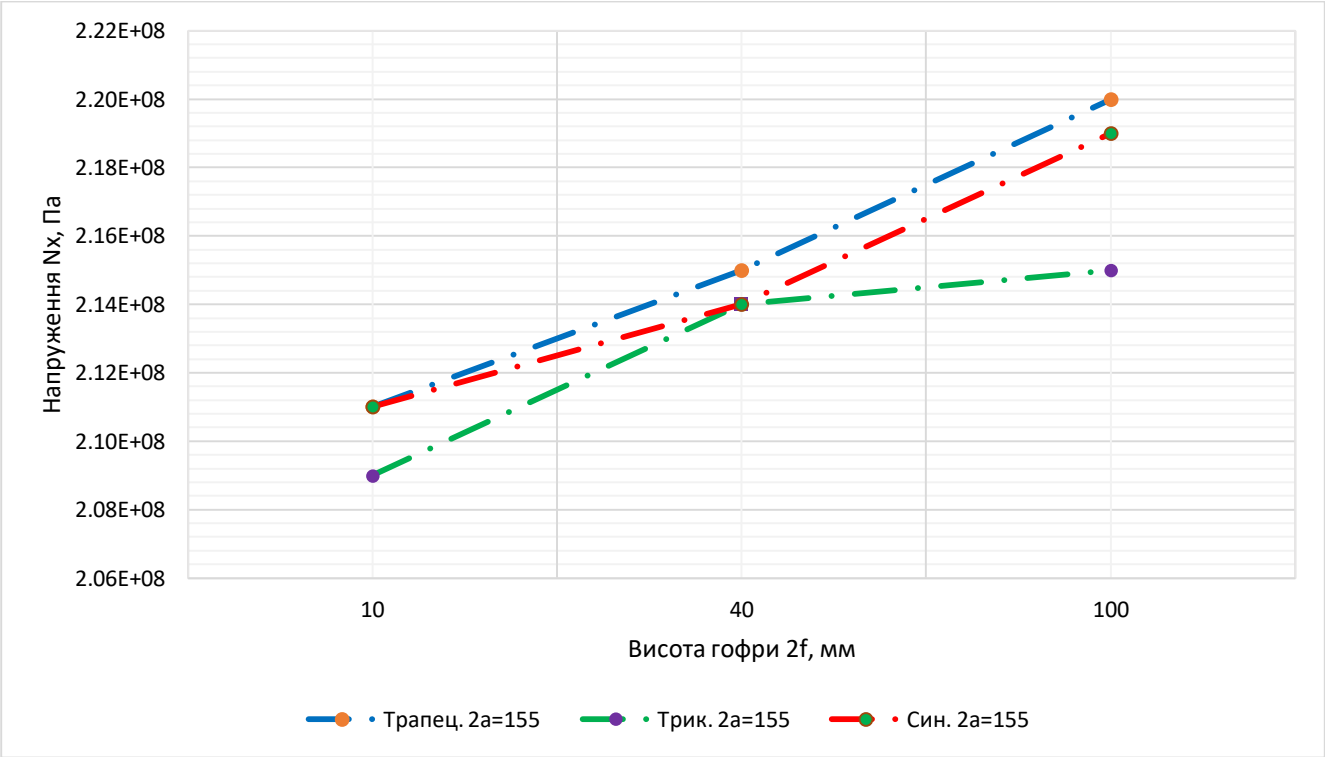


Рисунок 3.3 – Діаграма нормальних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 155 мм.

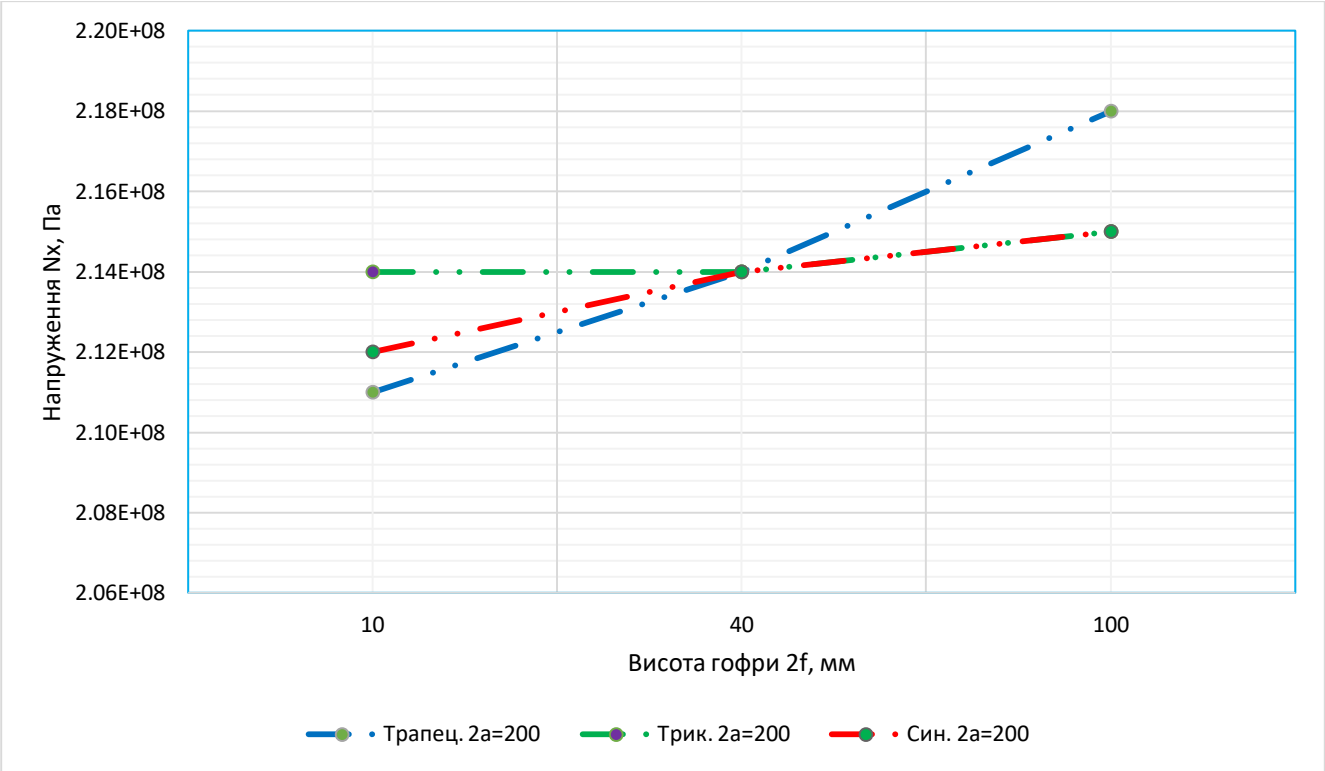


Рисунок 3.4 – Діаграма нормальних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 200 мм.

На діаграмах зображених на рисунках 3.2, 3.3, 3.4. представлено залежності між максимальними нормальними напруженнями та висотою гофрів. Видно, що із збільшенням довжини гофри значення напружень у всіх трьох профілях гофрів зменшується, однак при збільшенні висоти значення напружень зростають. Це може зумовлюватися, як і збільшенням навантаження від власної ваги, так і від внутрішніх факторів розподілення напружень.

3.3 Співставлення та аналіз дотичних напружень балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів

Для визначення залежності дотичних напружень τ_{xy} від зміни профілю, висоти та довжини гофри було змодельовано двадцять сім моделей з різними параметрами гофрування (таблиця 3.1). Результати обчислень нормальних напружень зведено у таблицю 3.2, та графічно зображені на рисунка 3.6, 3.7, 3.8.

Розподіл дотичних напружень в балці з гофрованою стінкою (рисунок 3.5).

Дотичні напруження τ_{xy} у стінці виникають від дії поперечних сил. Як видно з рисунку 3.5 їх розподіл в стінці відбувається майже прямими лініями.

В поясах розподіл дотичних напружень τ_{xy} (рисунок 3.5) відбувається за звичайною схемою.

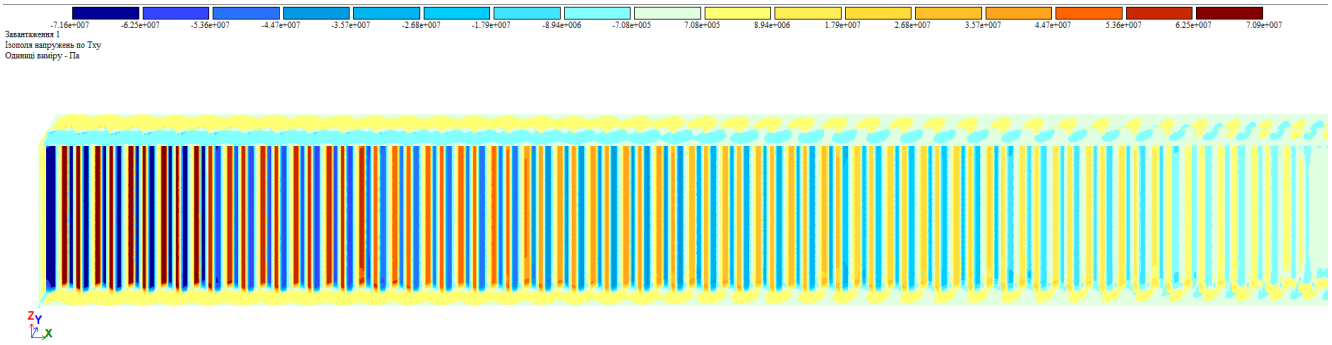


Рисунок 3.5 – Характерний розподіл дотичних напружень τ_{xy} балок з гофрованою стінкою отриманий в результаті математичного моделювання МСЕ.

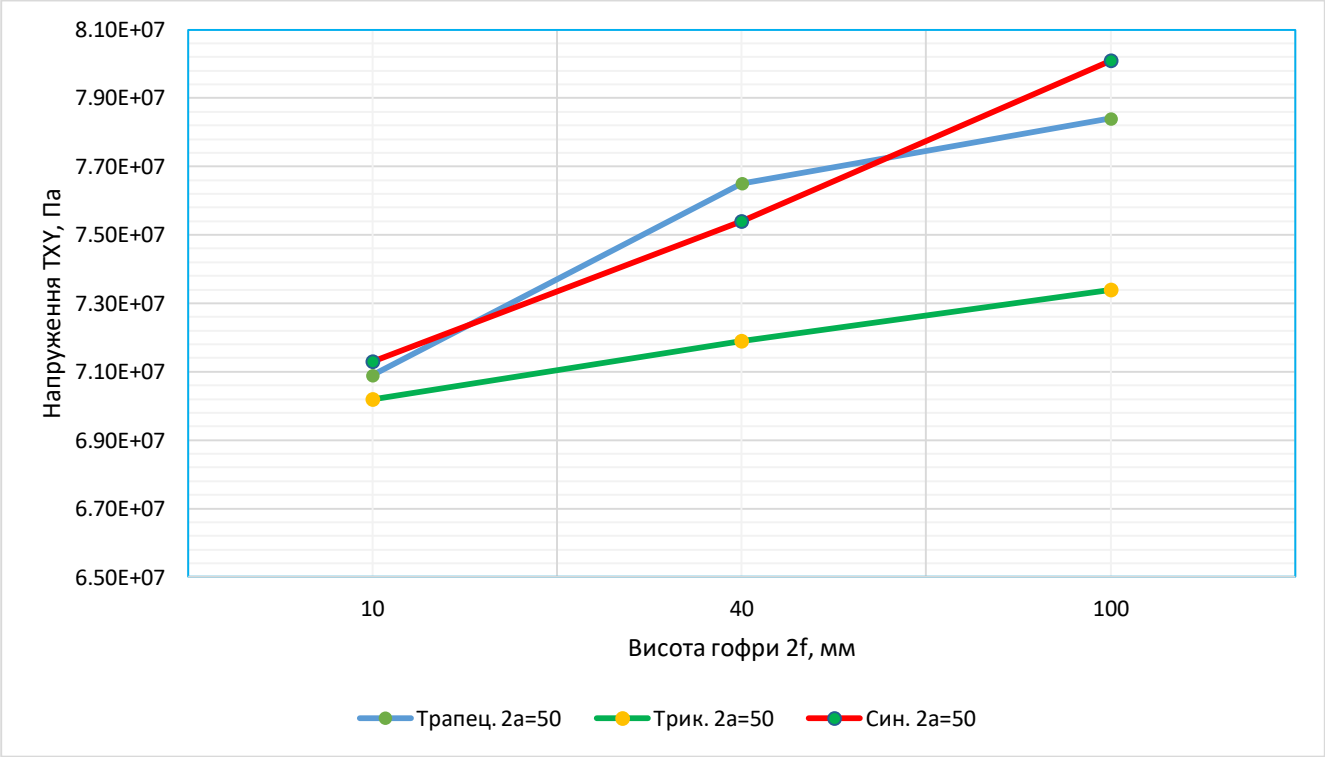


Рисунок 3.6 – Діаграма дотичних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 50 мм.

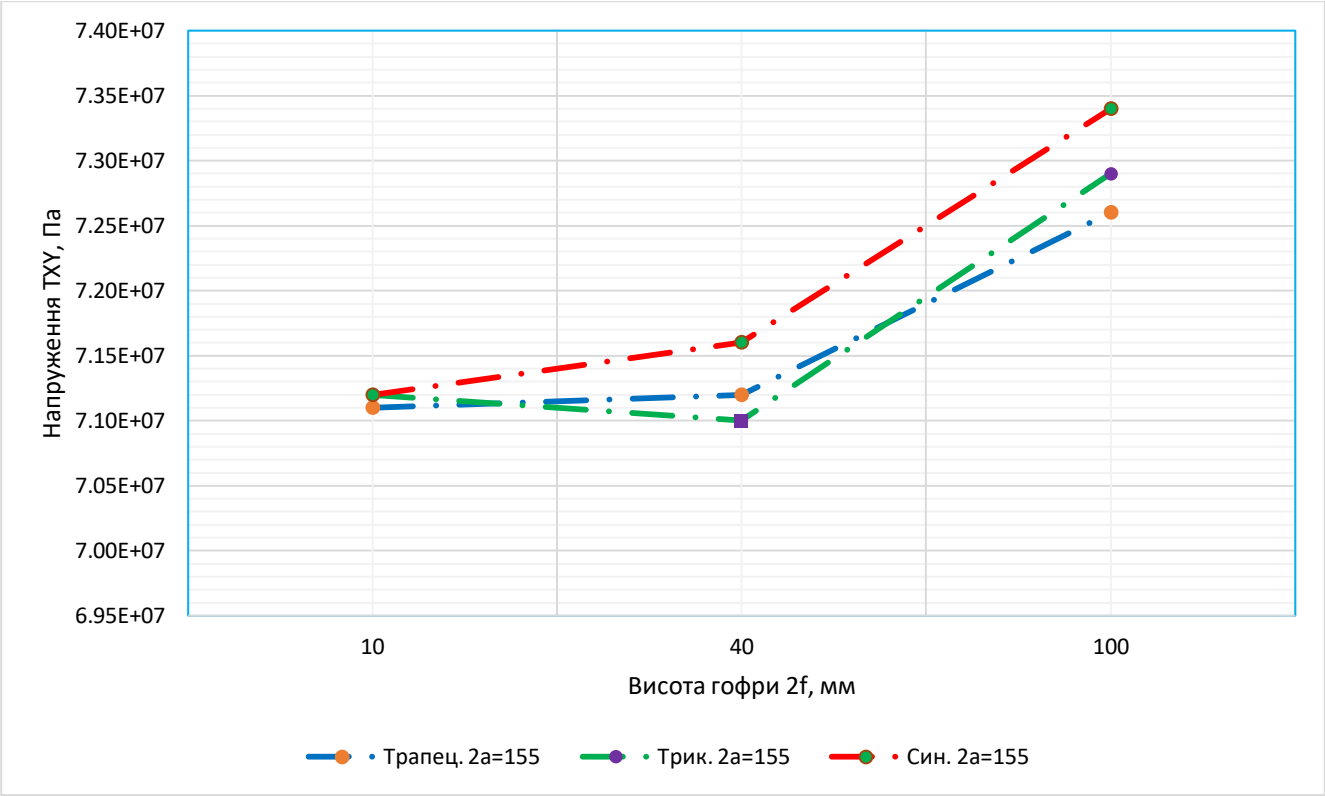


Рисунок 3.7 – Діаграма дотичних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 155 мм.

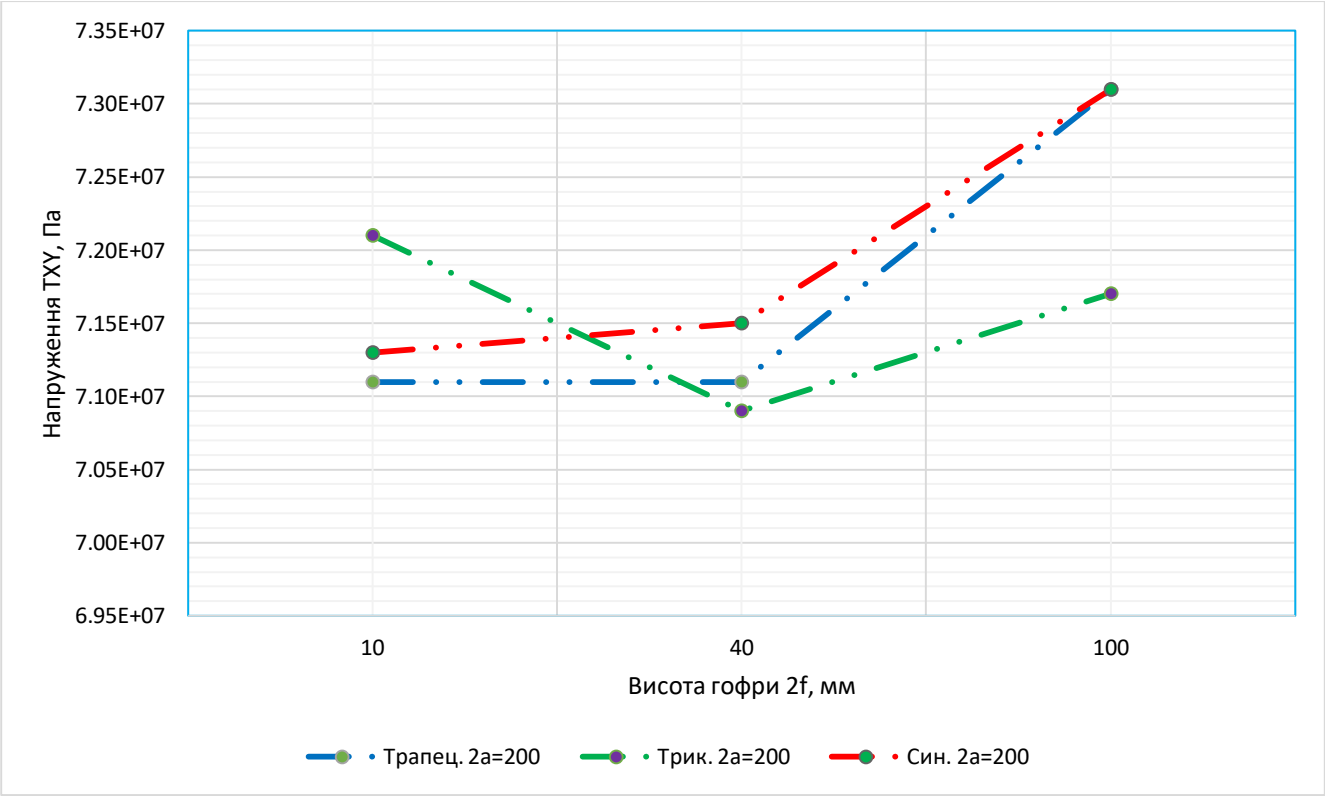


Рисунок 3.8 – Діаграма дотичних напружень у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 200 мм.

На діаграмах, зображених на рисунках 3.6, 3.7, 3.8, представлено залежності між максимальними дотичними напруженнями та висотою гофрів. Ми можемо бачити, що із збільшенням висоти гофри синусоїдального та трапецієвидного профілів значення дотичних напружень зростають, однак у випадку з трикутним то він спочатку зменшується на проміжку 2f = 10 – 40, а тоді на проміжку 2f = 40 – 100 зростає. Це може зумовлюватися, як і збільшенням навантаження від власної ваги, так і від внутрішніх факторів розподілення напружень.

3.4 Співставлення та аналіз прогинів балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів

Для визначення залежності прогинів від зміни профілю, висоти та довжини гофри було змодельовано двадцять сім моделей з різними параметрами гофрування (таблиця 3.1). Результати обчислень нормальних напружень зведено у таблицю 3.2, та графічно зображені на рисунка 3.10, 3.11, 3.12.

Розподіл прогинів в балці з гофрованою стінкою (рисунок 3.9). У всіх моделей прогини розподілялися за звичайною схемою.

Рисунок 3.9 – Характерний розподіл прогинів балок з гофрованою стінкою отриманий в результаті математичного моделювання МСЕ.

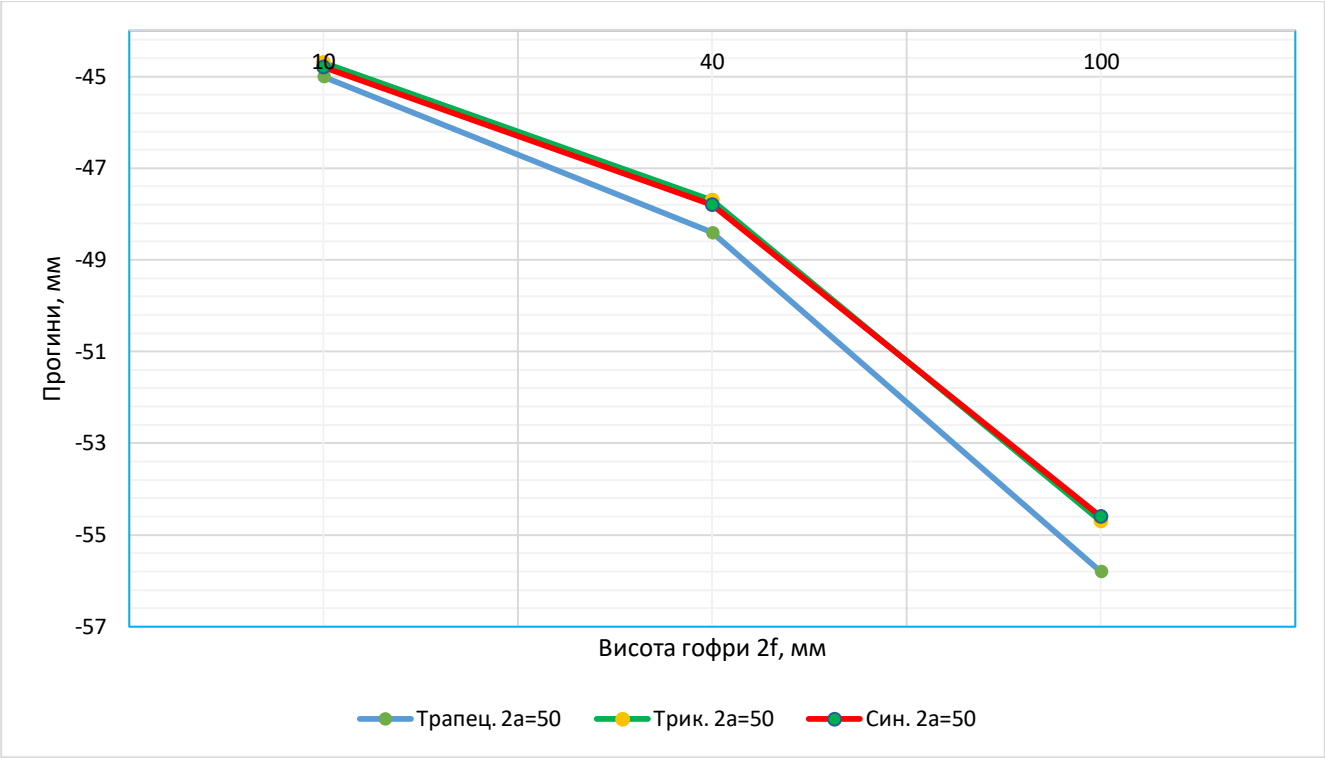


Рисунок 3.10 – Діаграма прогинів у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 50 мм.

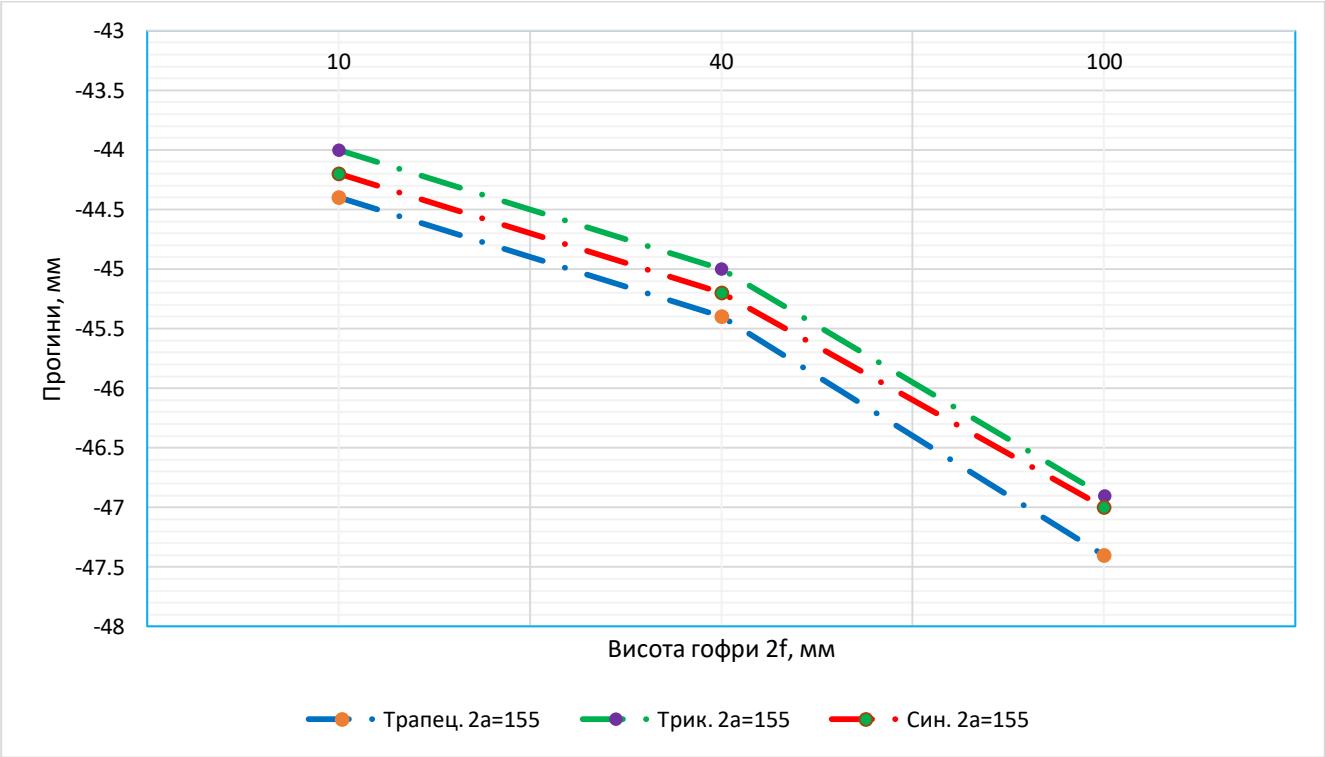


Рисунок 3.11 – Діаграма прогинів у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 155 мм

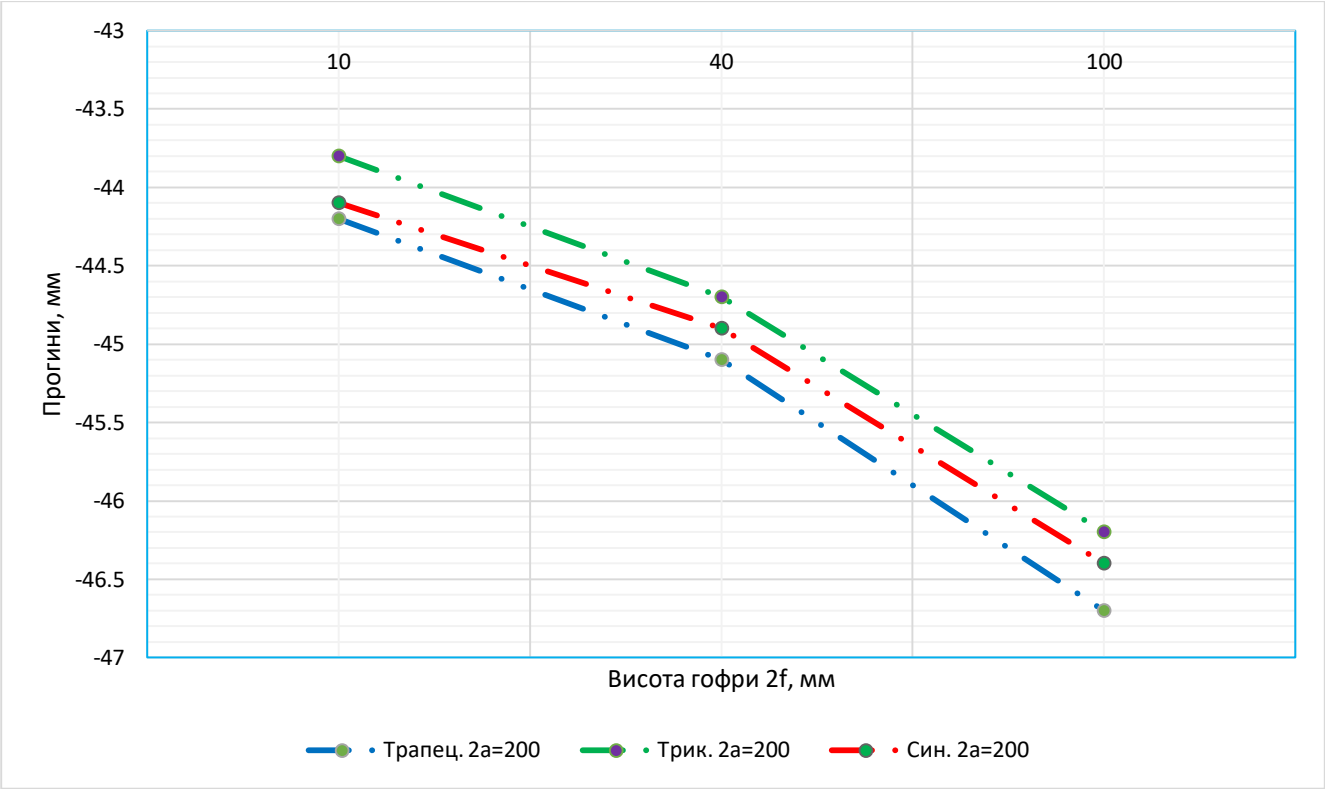


Рисунок 3.12 – Діаграма прогинів у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 200 мм

На діаграмах, зображених на рисунках 3.10, 3.11, 3.12, представлено залежності між прогинами та висотою гофрів. Ми можемо бачити, що як при збільшенні довжини так і при збільшенні висоти значення прогинів зростають. На проміжку 2f = 10 – 40 мм зростання прогинів більш плавне тоді, як на відрізку 2f = 40 – 100 збільшення значення прогинів стало стрімкішим. Це може зумовлюватися, як і збільшенням навантаження від власної ваги, так і від внутрішніх факторів.

3.5 Співставлення та аналіз стійкості балок з гофрованою стінкою з різною конфігурацією гофрів

Для визначення залежності коефіцієнта запасу стійкості від зміни профілю, висоти та довжини гофри було змодельовано двадцять сім моделей з різними параметрами гофрування (таблиця 3.1). Результати обчислень нормальних напружень зведено у таблицю 3.2, та графічно зображені на рисунка 3.14, 3.15, 3.16.

Також на рисунку 3.13 зображено форми втрати стійкості балки з гофрованою стінкою

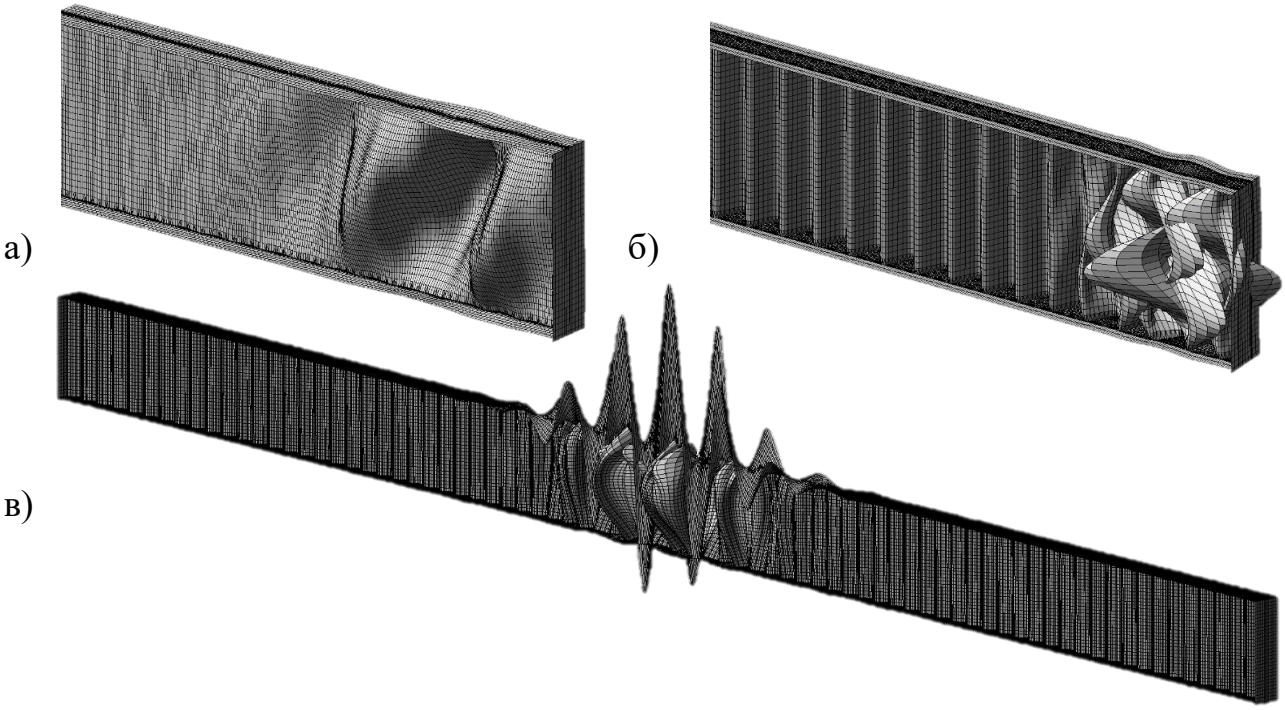


Рисунок 3.13 – Форма втрати стійкості балки з гофрованою стінкою синусоїдального профілю з параметрами гофрів: а – 2а×2f = 10×155; б – 2а×2f = 100×155; в – 2а×2f = 40×155.

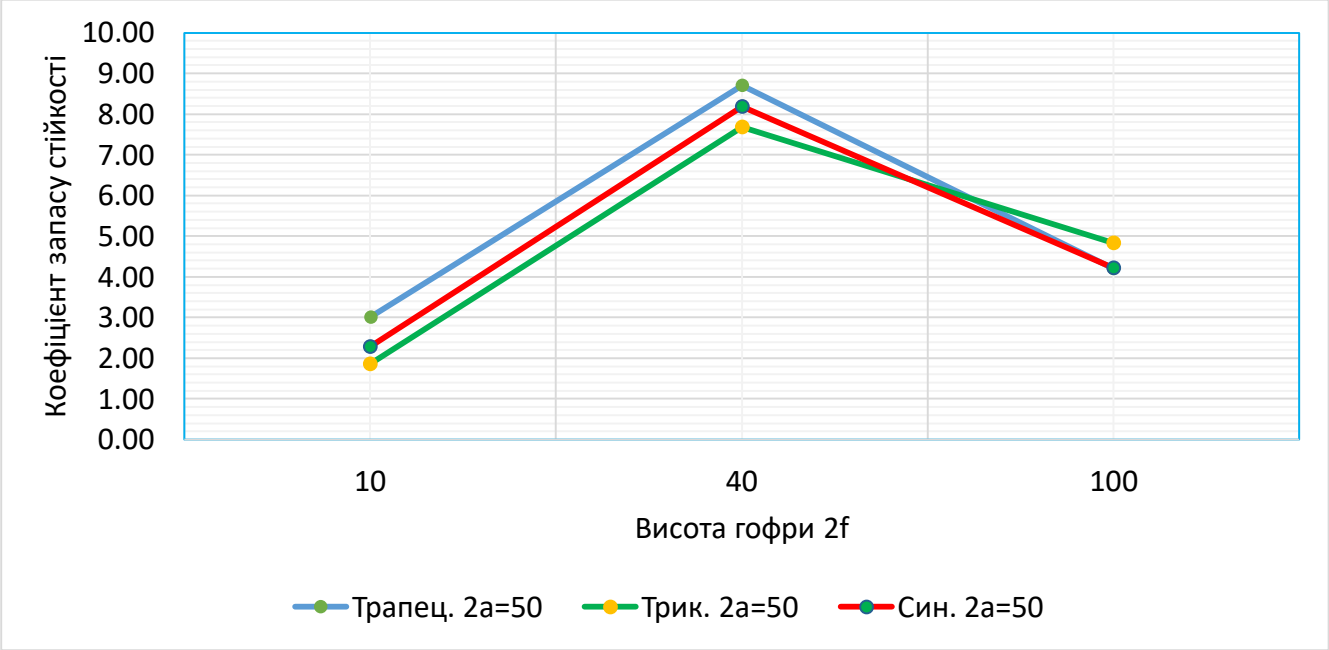


Рисунок 3.14 – Діаграма коефіцієнта запасу стійкості у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 50 мм

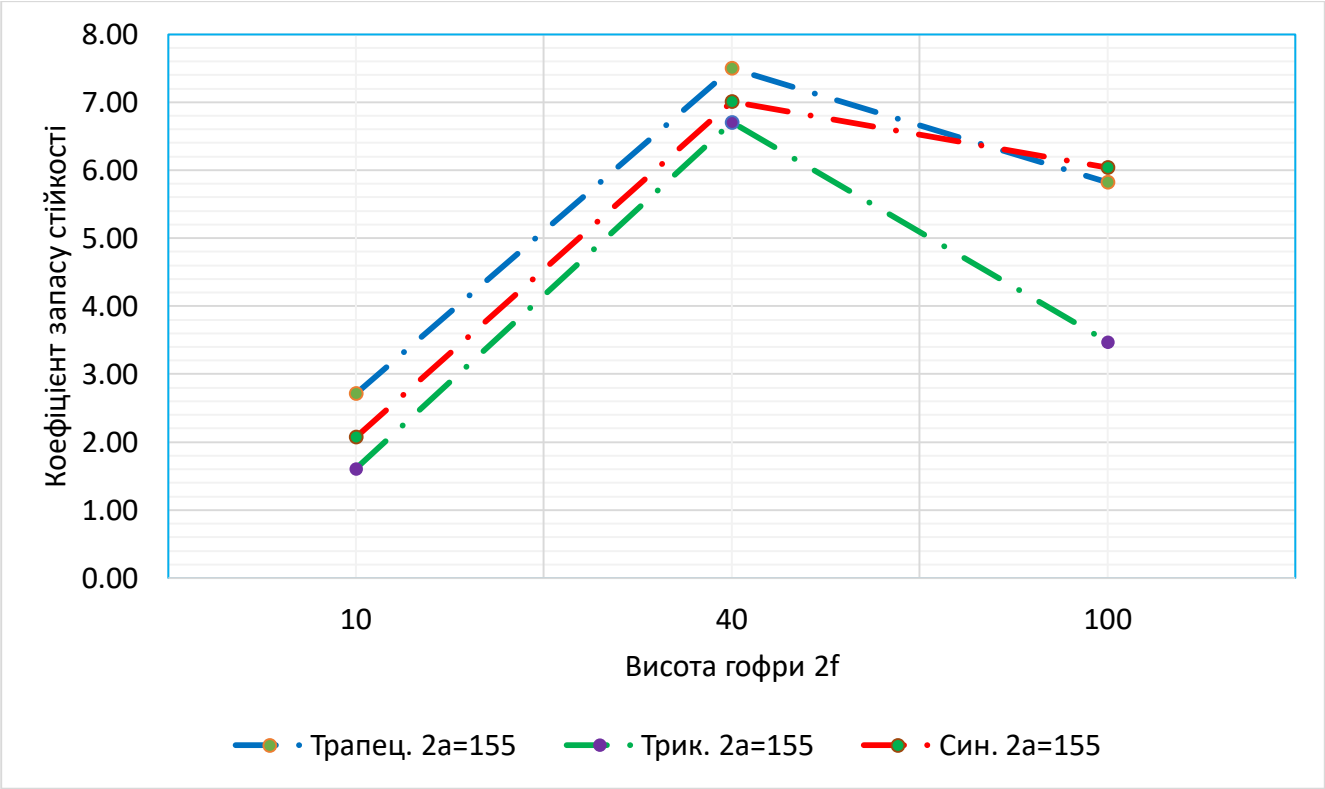


Рисунок 3.15 – Діаграма коефіцієнта запасу стійкості у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 155 мм

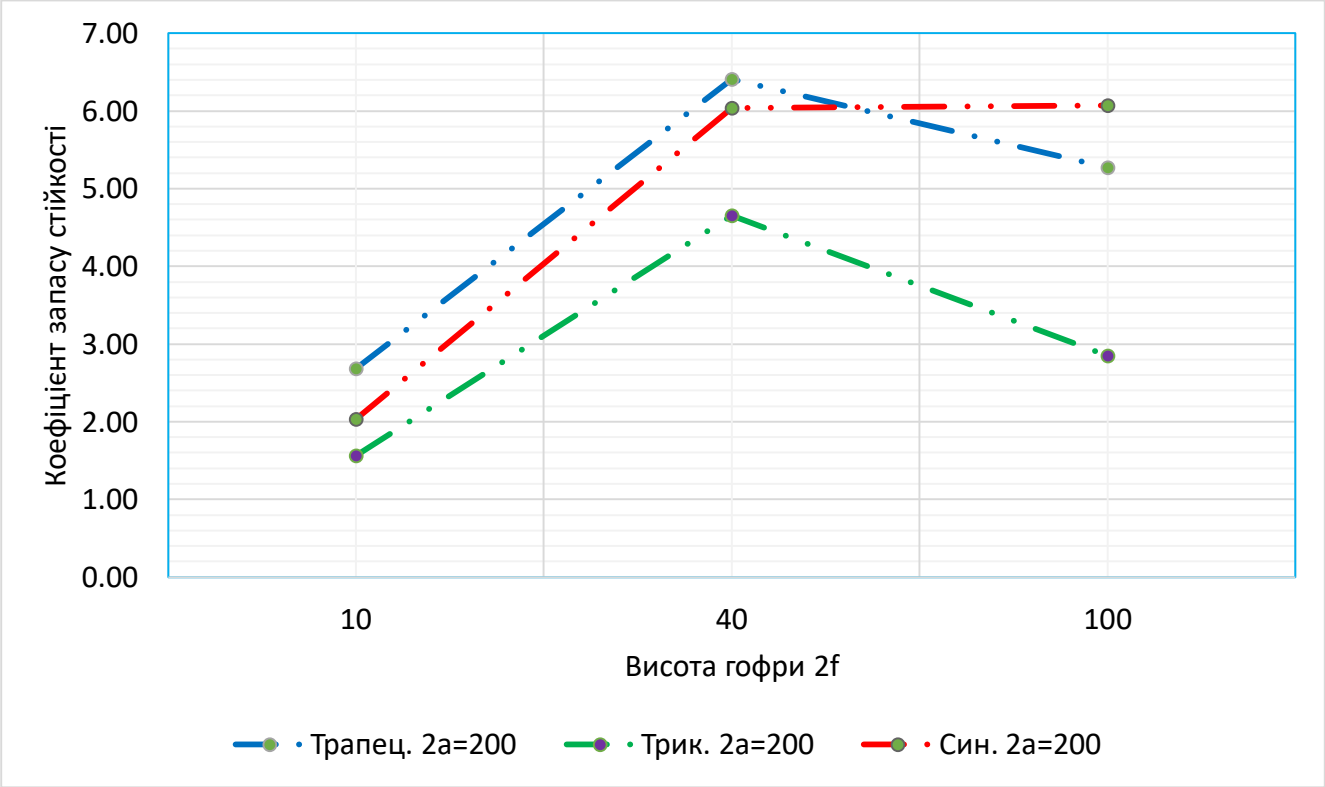


Рисунок 3.16– Діаграма коефіцієнта запасу стійкості у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 200 мм

За результатами розрахунків (рисунок 3.14, 3.15, 3.16) ми можемо бачити які параметри гофрування і у скільки разів (в пружній стадії) можуть перевищувати несучу здатність балки за матеріалом із умови на зріз.

На діаграмах зображених на рисунках 3.14, 3.15, 3.16. представлено залежності між коефіцієнтом запасу стійкості та висотою гофрів. Ми можемо бачити, що на проміжку 2f = 10 – 40 мм коефіцієнт запасу стійкості стрімко зростає і є максимальним при висоті гофри 2f = 40 мм, тоді як в діапазоні 2f = 40 – 100 мм значення коефіцієнта плавно знижується. Також можна зазначити, що найменші значення коефіцієнта запасу стійкості показує трикутний профіль гофрування.

3.6 Співставлення та аналіз залежності власної ваги балок з гофрованою стінкою від конфігурації гофрів

Для визначення залежності ваги балки від зміни профілю, висоти та довжини гофри було змодельовано двадцять сім моделей з різними параметрами гофрування (таблиця 3.1). Результати обчислень зведено у таблицю 3.2, та графічно зображені на рисунка 3.17, 3.18, 3.19.

У зварних двотаврових балках основна вага балки зосереджена у стінці і менше у поясах, натомість у балці з гофрованою стінкою при правильно підібраному параметрі гофрування навпаки стінка може важити в декілька разів менше при тому що вага поясів в обох випадках залишилася однаковою.

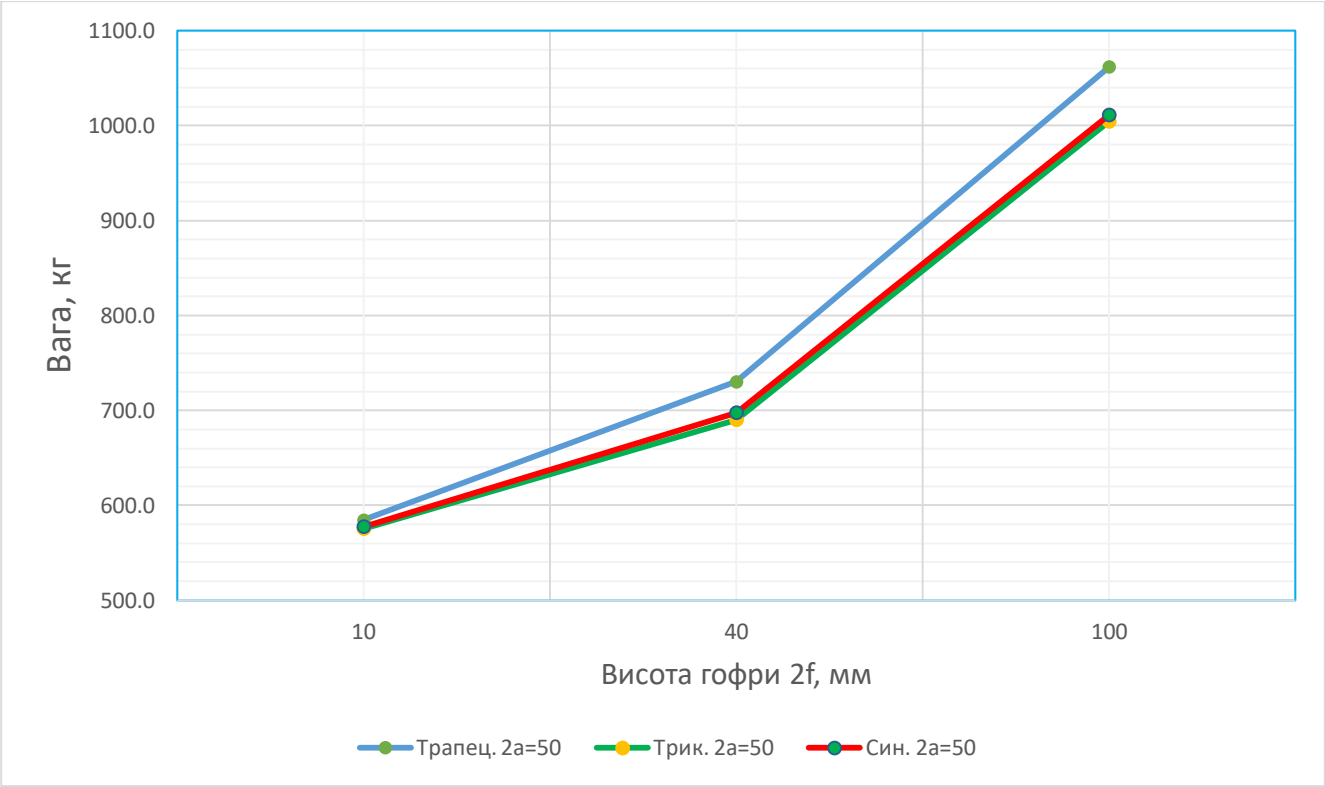


Рисунок 3.17 – Діаграма зміни ваги у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 50 мм

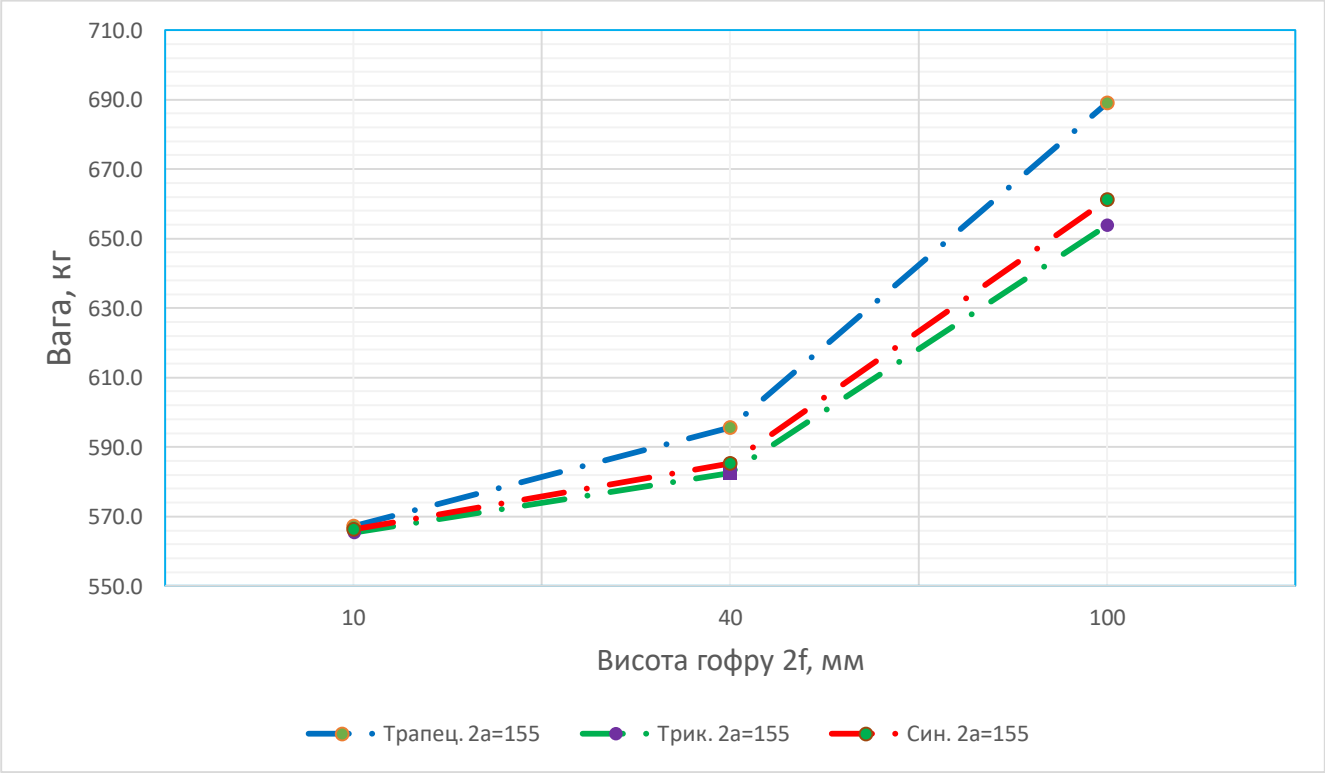


Рисунок 3.18 – Діаграма зміни ваги у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 155 мм

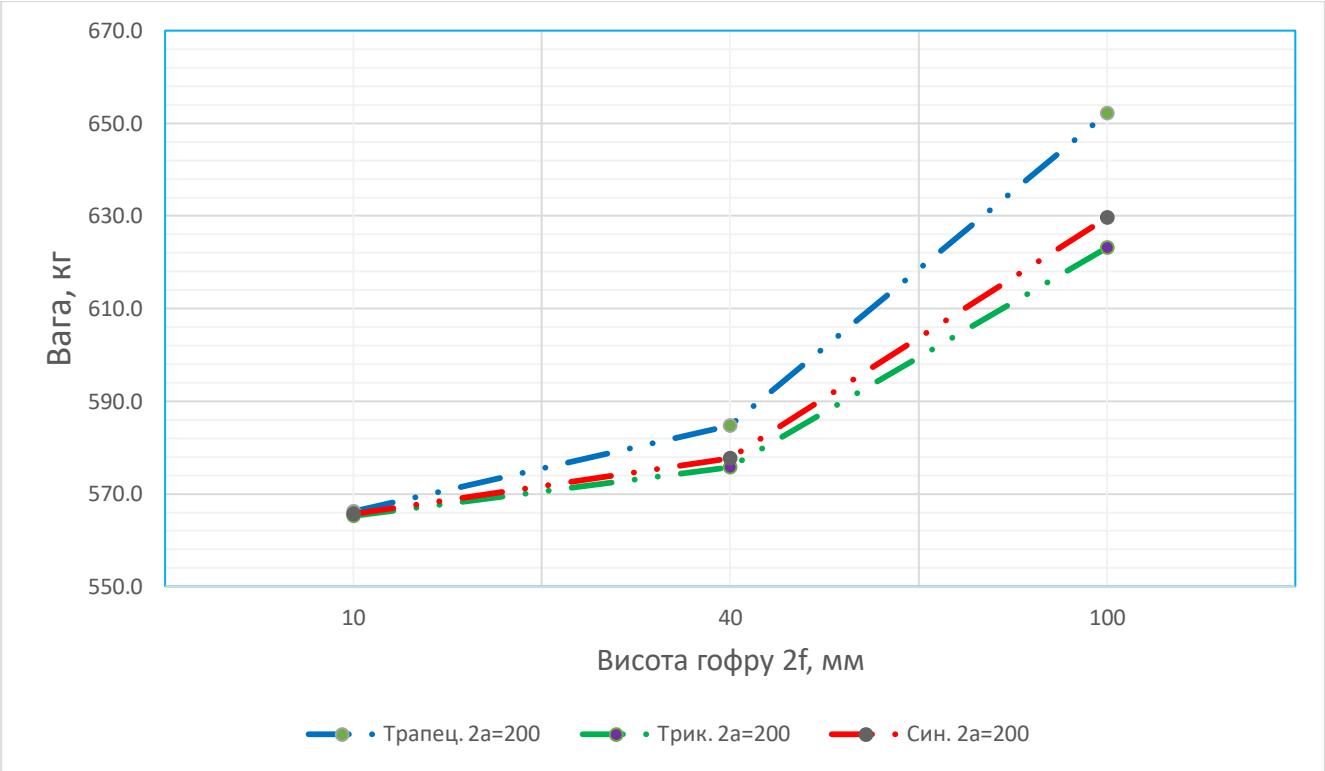


Рисунок 3.19– Діаграма зміни ваги у балках з гофрованою стінкою з гофрами різного профілю при довжині гофри 200 мм

На діаграмах зображених на рисунках 3.17, 3.18, 3.19. представлено залежності між вагою та висотою гофрів для різних профілів гофрування. З графіків можна побачити для всіх профілів гофрування, що при збільшенні висоти 2f у всіх випадках буде збільшуватися вага, а при збільшенні довжини гофри 2a вага буде зменшуватися.

Таблиця 3.2 – Результати отримані при виконанні комп’ютерного моделюючого експерименту балок з гофрованою стінкою при різних конфігураціях стінки.

№ моделі	Нормальні напруження σ_x, Па	Переміщення (прогини) Z, мм	Дотичні напруження (стінка) τ_{xy}, Па	Коефіцієнт стійкості	Довжина стінки, м	Вага балки, кг
1	2	3	4	5	6	7
1	2,14E+08	-44,8	7,13E+07	2,293	13,05	153,7
2	2,17E+08	-47,8	7,54E+07	8,180	23,23	273,6
3	2,20E+08	-54,6	8,01E+07	4,219	49,84	586,9
4	2,11E+08	-44,2	7,12E+07	2,076	12,08	142,2
5	2,14E+08	-45,2	7,16E+07	6,970	13,70	161,3
6	2,19E+08	-47	7,34E+07	6,036	20,14	237,1
7	2,12E+08	-44,1	7,13E+07	2,035	12,03	141,7
8	2,14E+08	-44,9	7,15E+07	6,034	13,05	153,7
9	2,15E+08	-46,4	8,12E+07	6,075	17,46	205,6
10	2,12E+08	-44,7	7,02E+08	1,850	12,88	151,7
11	2,15E+08	-47,7	7,19E+07	7,680	22,57	265,7
12	2,19E+08	-54,7	7,34E+07	4,839	49,31	580,6
13	2,09E+08	-44	7,12E+07	1,606	12,01	141,4
14	2,14E+08	-45	7,10E+07	6,704	13,46	158,5
15	2,15E+08	-46,9	7,29E+07	3,471	19,52	229,9

1	2	3	4	5	6	7
16	2,14E+08	-43,8	7,21E+07	1,556	12,00	141,3
17	2,14E+08	-44,7	7,09E+07	4,650	12,88	151,7
18	2,15E+08	-46,2	7,17E+07	2,846	16,91	199,2
19	2,13E+08	-45	7,09E+07	3,014	13,64	160,6
20	2,18E+08	-48,4	7,65E+07	8,710	26,02	306,4
21	2,21E+08	-55,8	7,84E+07	4,204	54,16	637,7
22	2,11E+08	-44,4	7,11E+07	2,714	12,16	143,2
23	2,15E+08	-45,4	7,12E+07	7,501	14,57	171,6
24	2,20E+08	-47,4	7,26E+07	5,824	22,51	265,1
25	2,11E+08	-44,2	7,11E+07	2,681	12,08	142,2
26	2,14E+08	-45,1	7,11E+07	6,405	13,65	160,7
27	2,18E+08	-46,7	7,31E+07	5,270	19,38	228,2

3.7 Висновки за розділом 3

Було розглянуто наступні геометричні параметри гофрів з висотою 2f = 10, 40, 100 мм, та кроком 2a = 50, 155, 200 мм. Досліджувались 3 види профілів: трикутний, трапецієвидний, синусоїдальний.

Нормальні напруження зростають при збільшенні висоти 2f, та зменшуються при довжині 2a. Щодо дотичних напружень, то із збільшенням висоти гофри 2f синусоїдального та трапецієвидного профілів значення дотичних напружень зростають, однак у випадку з трикутним то він спочатку зменшується на проміжку 2f = 10 – 40, а тоді на проміжку 2f = 40 – 100 зростає.

Найкращий показник стійкості виявлено у балки з трапецеїдальною формою гофрів (рисунок 3.15). Стінки з синусоїдальною формою гофрування за своїми властивостями наближаються до стінок з трапецієвидним гофруванням (рисунок

3.14, 3.15, 3.16), та на проміжку 2f = 40 – 100 стійкість трапецієвидного гофрування зменшується стрімкіше ніж синусоїдального. Стінки з трикутною формою мають найнижчі показники (рисунок 3.16). Найбільшого коефіцієнта стійкості було досягнуто при мінімальній довжині гофрів, а саме 2a = 50мм.

Також за результатами дослідження визначено раціональні параметри гофрування. Оптимальною є довжина гофри 2a=155 мм, а оптимальна висота коливається в межах 2f = 35 – 65 мм.

Також проаналізувавши форми втрати стійкості визначено, що при висоті гофри 2a = 200 мм природа деформування гофрів змінюється, якщо при 2a = 50 вона була направлена перпендикулярно до осі балки, то при 2a = 200 мм появляється можливість місцевої втрати стійкості в напрямку осі балки.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Законодавство України з охорони праці

На території нашої країни діючим документом (законом), який визначає права і обов'язки жителів, а також організаційну структуру органів влади й промисловості є Конституція. У статті 43 Конституції України зазначено, що кожен має право на працю, а також має право на належні, безпечні й здорові умови праці.

У статті 45 Конституції України громадянам надається право на відпочинок. Це право гарантується наданням: щотижневих вихідних; оплачуваної щорічної відпустки; встановленням робочого дня щодо окремих професій; максимальна тривалість робочого часу; мінімальна тривалість відпочинку; вихідні та святкові дні та інше.

Закон України «Про охорону праці» [18] затверджений 22 листопада 2002 року за № 229-IV, у якому міститься 44 статті. У ньому визначені основні шляхи реалізації конституційних прав громадян про охорону їх життя та здоров'я в процесі трудової діяльності. Закон також регулює відносини між працівником та роботодавцем з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища та встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

У цьому законі встановлений пріоритет життя та здоров'я працівників відносно результату виробничої діяльності. Тобто над всім стоїть дотримання вимог, щоб запобігти травмування чи погіршення стану здоров'я і лише після цього звертати увагу на результат виробничої діяльності.

Повну відповідальність за безпечність умов праці на кожному робочому місці несе керівник. Працівник сам повинен неухильно дотримуватися вимог безпеки праці. Закон передбачає: відшкодування суми грошей потерпілій особі за період її тимчасової непрацездатності у вигляді одноразової допомоги, пенсії; якщо нещасний випадок стався внаслідок невиконання потерпілою особою вимог охорони праці, тоді розмір разової грошової допомоги зменшується.

Однак останнім часом вимоги щодо охорони праці часто недотримуються підприємствами різних організаційно-правових форм, що використовують працю найманих робітників. Зумовлюється це насамперед важким економічним становищем держави, а також іншими об'єктивними і суб'єктивними причинами, зокрема: спрацюванням основних виробничих фондів; відсутністю зацікавленості власників у поліпшенні умов і безпеки праці; некомпетентністю більшості персоналу в питаннях охорони праці; низькою трудовою і технологічною дисципліною; недостатньою роллю органів нагляду і контролю за дотриманням законодавства про працю й охорону праці.

4.1.2 Правила охорони праці під час виготовлення балок з гофрованою стінкою

Згідно технології виготовлення балок з гофрованою стінкою для поясів використовують листову сталь товщиною 5 – 30 мм, а для стінки тонку листову сталь товщино 2 – 6 мм. Сталь на стінку привозять в рулонах різної висоти, яка відповідає й висоті стінки, а от поясну сталь необхідно відрізати від великої пластини. Матеріал сталь С245.

Процес виготовлення металевих балок складається з послідовних операцій:

– підготовка – доставка матеріалу в цех, очистка;

– обробка – різання ножицями, пилками чи газорізальними установками, утворення гофри в пресувальні машині, вирізання отворів, обробка зварювальних кромок;

– формування вузлів – складення деталей для їх приварювання, свердління монтажних отворів;

– приварювання – складених вузлів, приварювання фасонних частин, опорних ребер, монтажних петель тощо;

– ґрунтування та фарбування – обробка, чистка, знежирення, покриття захисним шаром.

Отже, виготовлення металевих балок з гофрованою стінкою тісно пов’язане із застосуванням значної кількості різноманітного устаткування, як правило в

такого устаткування є частини, які: швидко обертаються (пили, вали, маховики, шестерні тощо); створюють тиск (преси, ножиці); з відкритим вогнем (пальник, різак); розпилюють аерозолі. Порушення правил техніки безпеки та експлуатації може спричинити нещасні випадки або викликати аварію. Тому для запобігання подібних випадків обслуговуючий персонал повинен бути висококваліфікованим, досконало знати і застосовувати правила охорони праці при роботі і знаходженні з обладнанням.

Обладнання повинне розташовуватися так, щоб не заважати траєкторії руху вантажопідйомників і іншого транспорту, який знаходиться в цеху. Готові вироби слід складувати тільки в спеціально відведених для цього майданчиках.

Усі небезпечні зони біля технологічного обладнання повинні бути надійно обгороджені. Небезпечними називають такі зони, в яких періодично можуть виникнути або постійно діяти фактори небезпечні для життя чи здоров’я людини.

Обладнання повинне бути пофарбоване у світлі тони. Огородження мають мати колір самого устаткування. У червоний фарбують ті місця, які мають бути закриті.

Для обслуговування обладнання, на якому обробляються важкі деталі потрібно встановлювати підіймальні пристрої.

Сьогодні при розкрійці поясної сталі використовують плазмове різання, суть полягає в потоці газу та зовнішньому електромагнітному полі.

Основну небезпеку несуть: вибухи сумішей горючих газів з киснем і повітрям займання та вибухи, викликані взаємодією стисненого повітря з мастилами або жировими речовинами.

Одним з найефективніших методів запобігання травмувань та погіршення здоров’я на важких видах робіт є автоматизація виробничого процесу на всіх стадіях виконання від тримання сировини до виходу готового виробу. Це дасть можливість знизити рівень травматизму і різного роду виробничих захворювань.

4.1.3 Висновки за пунктом 4.1

У даному розділі було розглянуто законодавчу базу України з охорони праці. Суть законів про охорону праці полягає в захисті конституційних прав, збереженні здоров'я та працездатності громадян України в процесі трудової діяльності.

Також відзначено основні правила охорони праці на виробництві металевих конструкцій. Вони поширюються на всі суб'єкти господарювання, діяльність яких пов'язана з обробленням металів, нанесенням покриттів та механічної обробки металевих виробів.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Стійкість будівель та споруд при виникненні надзвичайної ситуації

Ризик виникнення надзвичайних ситуацій на території України, на жаль залишається високим. Масштабність їх наслідків тільки зростає. Частішими стали випадки небезпечних природних явищ і процесів геологічного походження. Серед них повені, землетруси, зсуви, лісові та польові пожежі, урагани, смерчі, тощо.

Неможливо виключити можливість виникнення надзвичайної ситуації, але необхідно вміти мінімізувати її наслідки. Для підприємства важливим є його здатність виготовляти та збувати продукцію в звичайних обсягах, навіть при виникненні надзвичайної ситуації, а також в разі руйнувань чи збою постачання сировини відновити виробництво у найкоротший термін.

На етапі проектування будівель і споруд передбачається термін експлуатації в нормальних умовах. Окрім ушкоджень накопичених в результаті експлуатації на працездатність будівель і споруд також можуть впливати: сейсмічні впливи, метеорологічні явища, пожежі, вибухи, дефекти та початкові недосконалості тощо.

Тому необхідним є проводити розрахунки споруди на міцність і стійкість так, щоб при локальному руйнуванні окремих несучих елементів протистояти прогресуючому обваленню.

4.2.2 Оцінка стійкості будівель та споруд при виникненні надзвичайної ситуації

Щоб дослідити стан стійкості роботи об’єкту необхідно провести спеціальне дослідження, яке зводиться до вивчення умов, які можуть виникнути в разі тих чи інших надзвичайних ситуацій та у визначенні впливу цих умов на виробничу діяльність. Метою такого дослідження є виявлення вразливих місць при виникненні надзвичайної ситуації і вироблення рекомендацій по підвищенню стійкості.

Оцінку стійкості роботи будівель та споруд проводиться власними силами підприємства із залученням спеціалістів різного роду науково-дослідницьких та проектних організацій.

Оцінка стійкості роботи об'єкта в цілому здійснюється за:

– рівнем стійкості його елементів;

– забезпеченістю виробничого персоналу захистом від засобів масового ураження;

– можливістю матеріально-технічного забезпечення виробництва при тимчасовому порушенні постачань;

– готовністю об'єкта до виконання відбудовних робіт;

– забезпеченістю надійного керування об'єкта.

4.2.3 Способи підвищення стійкості роботи будівель та споруд

Заходи, які спрямовані на підвищення стійкості, розробляють з врахуванням стратегічності об’єкта та економічної доцільності проведення цих заходів. Проведенням інженерно-технічних, організаційних та технічних заходів можна досягти підвищення стійкості будівель та споруд. До прикладу інженерно-технічні заходи – комплекс робіт, спрямований на забезпечення стійкості виробничих будівель та споруд, обладнання та різних систем.

Натомість технологічні забезпечують підвищення стійкості об’єкту, проводячи заходи у бік спрощення виробництва кінцевої продукції та обмеженням розвитку аварій.

Організаційними заходами передбачено розроблення ефективних дій керуючого складу при проведенні рятувальних чи інших невідкладних робіт.

Для того, щоб підвищити стійкість роботи будівель та споруд проводять, такі заходи:

– Підсилення несучих та самонесучих конструкцій (підсилення колон, простінків);
– Підсилення кладки стін, замуровування отворів;
– Збільшення жорсткості конструкції за допомогою додаткових в’язей;
– Розкріплення високих слабо стійких високих споруд розтяжками;
– Заміна горючих елементів конструкції, слабо займистими.

4.2.4 Висновки за пунктом 4.2

Для мінімізації наслідків від можливого виникнення надзвичайної ситуації, потрібно проводити заходи по догляду за несучими конструкціями, вчасне виявлення пошкоджень, стратегічне планування заготівлі сировинної бази, вдосконалення методики розрахунку будівельних конструкцій.

Для попередження руйнування внаслідок виникнення небезпечної ситуації пропонуються наступні способи попередження: загальне зміцнення та підсилення в першу чергу несучих конструкцій, заміна горючих матеріалі на слабо займисті.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі на основі розрахунків вибраних математичних моделей методом комп’ютерного моделюючого експерименту отримано значення максимальних напружень в стінці та балці, прогинів та форми втрати стійкості.

На основі проведених досліджень виявлено те, що: нормальні напруження зростають при збільшенні висоти 2f, та зменшуються при довжині 2a; дотичні напруження із збільшенням висоти гофри 2f для синусоїдального та трапецієвидного профілів зростають, однак у випадку з трикутним то він спочатку зменшується на проміжку 2f = 10 – 40 мм, а тоді на проміжку 2f = 40 – 100 мм зростає; найкращий показник стійкості виявлено у балки з трапецеїдальною формою гофрів.

Проведено порівняння результатів дослідження, визначено раціональні параметри гофрування стінки для балок з гофрованими стінками. Визначено, що трапецієвидний та синусоїдний профілі гофри ефективніші ніж трикутний.

Шляхом моделювання різних геометричних параметрів гофрів визначено їх раціональні параметри для отримання максимальної несучої здатності та стійкості при найменшій металоємності.

БІБЛІОГРАФІЯ:

1. Клименко Ф.Є., Барабаш В.М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції : підручник. Львів : Світ, 2002. 312 с.

2. Заборова Д.Д., Дунаевская Ю.П. Преимущества и особенности применения гофро-балки в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 7. – С. 37 – 42.

3. Лазнюк М.В. Балки з тонкою поперечно гофрованою стінкою при дії статичного навантаження : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Лазнюк Михайло Васильович ; наук. керівник О.О. Нілов ; Київ. нац. ун-т буд. і арх. – Київ, 2006, - 194 с.

4. Остриков Г. М., Максимов Ю. С., Долинский В. В. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – № 1. – С. 66 – 70.

5. Лазнюк М. В. Численное моделирование балок с тонкими гофрированными стенками // Будівельні конструкції міжвідом. наук.- техн. збір. випуск 58 –Київ: НДІБК, 2003. – С. 64 – 68.

6. Остриков Г. М., Барановская С. Г. Нормальные напряжения в стенке металлической двутавровой балки от локальных нагрузок //Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. 1989, № 8. – С. 109 – 111.

7. Нілов О. О., Лазнюк М. В. Балки з гофрованою стінкою //Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов Вып. 7. – Симферополь: КАПСК, 2002. – С. 64 – 66.

8. Перельмутер А. В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Київ.: Сталь, 2002. – 600 с.

9. Баженов В. А., Цихановський В. К., Кислоокий В. М. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м’яких оболонок. – Київ : Київ. нац. ун-т буд. і арх., 2000, – 386 с.

10. Баженов В. А., Дехтярюк Е. С., Крицкий А. Б. Исследование механизма устойчивости двутавровой балки с гибкой стенкой на основе МКЭ // Проблемы прочности. Вып. №11, 1994. – С. 12 – 16.

11. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – Київ.: «Факт», 2005. –344 с.

12. Нилов А. А. К вопросу о нормативном обеспечении проектирования стальных двутавров с гофрированными стенками [Електронний ресурс] / А. А. Нилов, М. В. Лазнюк, А. Я. Мартынюк // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. - 2008. - Вип. 1. - С. 44-53.

13. ТУ У В.2.6-28.1-30653953-007:2007 Балки двутавровые гофрированные облегченные (гофро-балки). Рекомендации по проектированию (четвертая редакция). – Харьков: АО «Металлист СМК», 2008. – 97 с.

14. Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В. Розвиток конструктивних рішень сталевих балок із гофрованою стінкою // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – Випуск 12, – Київ : Сталь, 2013. – С. 19 – 25.

15. Кудрявцев С. В. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговым отверстием : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / С. В. Кудрявцев. – Екатеринбург, 2011. – 175 с.

16. Степаненко А. Н., Тишков Н. Л. О дополнительных усилиях в поясах стальных балок с тонкими поперечно гофрированными стенками // Вестник ТОГУ, – 2014. – № 4(35). – с. 49 – 52.

17. Пічугін С. Ф. Сучасний підхід до розрахунку на дію поперечних сил сталевих легких балок із подвійною профільованою стінкою [Електронний ресурс] / С. Ф. Пічугін, В. П. Чичулін, К. В. Чичуліна // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2013. - Вип. 25. - С. 390-398. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_25_56.

18. Про охорону праці : Закону України від 14 жовтня 1992 року №2694-XII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2694-12.

19. Кудрявцев С. В. Расчет и проектирование сварных двутавровых профилей с волнистыми стенками : учебно-методическое пособие. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2017. 61 с.

20. Нілов О. О. Чисельне дослідження несучої здатності сталевих балок з поперечно-гофрованою стінкою з урахуванням початкових недосконалостей [Електронний ресурс] / О. О. Нілов, Т. О. Нілова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2015. - Вип. 30. - С. 193-199. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2015_30_29.

21. Рамы из сварных двутавров с гофрированной стенкой [Електронний ресурс] / А. А. Нилов, А.Я. Мартынюк, М.В. Лазнюк, С.С. Рыженко // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. - 2009. - Вип. 4. - С. 71-78. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2009_4_10

22. Лазнюк М. В. Нові конструктивні рішення сталевих прогонів двотаврового перерізу з гофрованою стінкою [Електронний ресурс] / М. В. Лазнюк // Будівельні конструкції. - 2015. - Вип. 82. - С. 613-618. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2015_82_69

23. Нілова Т. О. До розрахунку на місцеву стійкість стиснутих поясів двотаврових елементів з поперечно-гофрованими стінками [Електронний ресурс] / Т. О. Нілова, Л. І. Лавріненко, М. В. Лазнюк // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. - 2012. - Вип. 9. - С. 93-102. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2012_9_11

24. Нілова Т. О. Аналітичний метод розрахунку на місцеву стійкість поясів елементів із поперечно-гофрованими стінками [Електронний ресурс] / Т. О. Нілова // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. - 2014. - Вип. 14. - С. 59-69. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2014_14_7.

25. Нілова Т. О. До розрахунку ефективних перерізів двотаврових елементів з поперечно-гофрованими стінками [Електронний ресурс] / Т. О. Нілова // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции

сбалансированного (устойчивого) развития. - 2013. - Вып. 68. - С. 249-253. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2013_68_44.

26. Пічугін С. Ф. Європейський досвід проектування металевих балок з гофрованими стінками [Електронний ресурс] / С. Ф. Пічугін, В. П. Чичулін, К. В. Чичуліна // Містобудування та територіальне планування. - 2016. - Вип. 61. - С. 374-380. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_48

27. Лавріненко Л.І. Ефективні параметри малоелементних шпренгельних ферм із застосуванням двотаврових елементів з гофрованими стінками [Електронний ресурс] / Л. Лавріненко, А. Зотіна // Будівельні конструкції: теорія і практика. - 2019. - Вип. 4. - С. 56-69. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp_2019_4_9

28. Лазнюк М. В. Численное моделирование балок с тонкими гофрированными стенками //Будівельні конструкції. Зб. наук. пр. Вип. 58 — К.; НДІБК, 2003. — С. 64 — 68

29. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення Вимоги проектування : ДСТУ Б В.1.2-3:2006 : – К, 2006.

30. prEN 1993-1-5: 20xx. 1-st draft. 14 November 2001. Eurocode 3: Design ofsteel structures; Part 1.5: Plated struktural elements.

31. Кириленко В. Ф., Окрайнец Г. А. К вопросу расчета балок сгофрированной стенкой //Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. 1969, № 4.— С. 23 — 27.

32. Стрелец–Стрелецкий Е. Б., Гензерский Ю. В., Лазнюк М. В., Марченко Д. В., Титок В. П. ЛИРА 9.2. Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие /Под ред. Городецкого А. С. — К.: «Факт», 2005. — 146 с.

33. ҚР ҚНжЕ 5.04 – 08 – 2004 / СН РК 5.04 – 08 – 2004. Пособие по проектированию стальных конструкций. — Астана: Комитет по делам строительства и жилищно – комунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2005. — 144 с.

34. ҚР ҚНжЕ 5.04 – 23 –2002 / СНиП РК 5.04 – 23 – 2002. Стальные конструкции. — Астана: Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. — 118 с.

35. ҚР ҚНжЕ 5.04–07–2004 / СНиП РК 5.04 – 23 – 2002. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий (в развитие СНиП РК 2.03 – 04 – 2004). Часть 2. — Астана: Комитет по делам строительства и жилищно – коммунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2005. — 46 с.

36. Барабаш М. С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій : навч. посіб. для студ. ВНЗ, які навчаються за напрямом підготов. "Будівництво" / М. С. Барабаш, С. В. Козлов, Д. В. Медведенко; Нац. авіац. ун-т. - К. : НАУ, 2012. - 568 с.