

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему:

**Удосконалення методики реконструювання мостових
конструкцій на автомобільних дорогах загального
користування**

Розробив: **Крат Андрій Анатолійович**
студент гр. 601-БА
освітньо-професійна програма
«Автомобільні дороги, вулиці та дороги
населених пунктів»
№ з.к. 10588942

Керівник: **Гасенко Ліна Володимирівна**
к.т.н., доцент кафедри автомобільних доріг,
геодезії та землеустрою

Рецензент: **Мироненко Віктор Олексійович**
головний інженер проектувальник
ТОВ ВКК «АРІЯ»

Полтава 2024

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою

ЛИСТ ПОГОДЖЕННЯ

**до кваліфікаційної роботи магістра
на тему**

**Удосконалення методики реконструювання мостових
конструкцій на автомобільних дорогах загального
користування**

Розробив: **Крат Андрій Анатолійович**
студент гр. 601-БА,
освітньо-професійна програма
«Автомобільні дороги, вулиці та дороги
населених пунктів»
№ з.к. 10588942

Консультанти:

розділ 1

к.т.н., ст. викл. Єрмакова І.А.

розділ 2

к.т.н., доц. Карюк А.М.

розділ 3

к.т.н., доц. Гасенко Л.В.

Допустити до захисту
зав. кафедрою

д.е.н., доц. Шарий Г.І.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою

Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою

Ступінь вищої освіти «магістр»

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Освітня програма «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри _____ Шарий Г.І.

« ___ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

Крат Андрій Анатолійович

1. Тема кваліфікаційної роботи

Удосконалення методики реконструювання мостових конструкцій на автомобільних дорогах загального користування

керівник *к.т.н., доцент Гасенко Ліна Володимирівна*

затверджені наказом по університету від « 04 » вересня 2023 р. № 986-ф,а

2. Строк подання кваліфікаційної роботи « 15 » січня 2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

- загальні відомості та програма проведення чисельного експерименту
- геометричні параметри пошкоджених мостових конструкцій
- конструктивні рішення з підсилення мостових конструкцій

4. Зміст текстового матеріалу (перелік питань, що належить розробити)

1. Виконати обґрунтування необхідності реконструювання мостових конструкцій
2. Описати алгоритм та виконати створення чисельну скінченно-елементну модель реконструйованих мостових конструкцій
3. Навести та проаналізувати результати чисельного моделювання реконструйованих мостових конструкцій

5. Перелік графічного матеріалу

- графічний супровід результатів дослідження

6. Консультанти за розділами кваліфікаційної роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	к.т.н., ст. викл. Єрмакова І.А.		
Розділ 2	к.т.н., доц. Карюк А.М.		
Розділ 3	к.т.н., доц. Гасенко Л.В.		

7. Дата видачі завдання « 02 » жовтня 2023 р.

Календарний план виконання кваліфікаційної роботи

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Формування теми, структури та змісту роботи. Виписування завдання</i>	02.10-08.10.23	
2	<i>Формування мети й завдань дослідження. Аналіз вихідних даних за темою роботи.</i>	09.10-29.10.23	
3	<i>Проведення теоретичних досліджень за темою роботи.</i>	30.10.-12.11.23	
4	<i>Опрацювання результатів теоретичних досліджень.</i>	13.11-10.12.23	
5	<i>Розроблення рекомендацій щодо практичного використання результатів дослідження.</i>	11.12-24.12.23	
6	<i>Формування основних висновків. Складання списку використаних джерел.</i>	25.12-31.12.23	
7	<i>Оформлення графічного матеріалу</i>	01.01-07.01.24	
8	<i>Здача роботи на кафедрі. Проходження перевірки роботи на плагіат</i>	08.01-10.01.24	
9	<i>Затвердження роботи консультантами та керівником. Отримання рецензії на роботу.</i>	11.01-14.01.24	
10	<i>Затвердження роботи завідувачем кафедрою. Отримання направлення та підготовка до захисту.</i>	15.01-21.01.24	
11	<i>Захист роботи</i>	з 22.01.24	

Студент _____ Крат А.А.

Керівник _____ Гасенко Л.В.

Крат А.А. Удосконалення методики реконструювання мостових конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. – Полтава, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 123 с.

Кваліфікаційна робота магістра зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів» актуальному питанню удосконалення методики реконструювання мостових конструкцій на автомобільних дорогах загального користування.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у доведенні того, що скінченно-елементне моделювання може бути успішно використане для проектування інженерних споруд, зокрема мостів, через виконання чисельного моделювання реальних мостових споруд і їх елементів, що перебувають у експлуатації.

У роботі виконано обґрунтування необхідності реконструювання мостових конструкцій, наведена класифікація пошкоджень мостових конструкцій та конструктивні рішення з підсилення пошкоджених мостових конструкцій. У другому розділі описано алгоритм, зокрема створення просторової геометричної моделі та на її основі скінченно-елементної моделі, а також виконано створення чисельної скінченно-елементної моделі реконструйованих мостових конструкцій. Як результат, у третьому розділі наведено та проаналізовано результати чисельного моделювання п'яти зразків-моделей пролітної частини реконструйованих мостових конструкцій.

Робота складається зі вступу, трьох розділів основної частини, висновків до кожного розділу та загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 123 сторінок.

Ключові слова: комплексний план, просторовий розвиток, територіальне планування, інженерні вишукування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РЕКОНСТРУЮВАННЯ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	11
1.1. Деякі відомості про чисельне дослідження.....	11
1.1.1 Поняття чисельного експерименту.....	11
1.1.2 Загальні положення методу скінченних елементів.....	13
1.1.3 Коротка характеристика програм скінченно-елементного моделювання.....	22
1.2 Класифікація пошкоджень мостових конструкцій.....	23
1.2.1 Пошкодження мостових конструкцій, що виникли під час експлуатації	23
1.2.2 Пошкодження мостових конструкцій, що виникли в результаті воєнних дій в Україні.....	32
1.3 Конструктивні рішення з підсилень пошкоджених мостових конструкцій.....	36
1.3.1 Підсилення мостових опор.....	36
1.3.2 Підсилення прогонових частин мосту.....	38
Висновки до першого розділу.....	41
РОЗДІЛ 2 СТВОРЕННЯ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	42
2.1 Створення просторової геометрії моделі.....	42
2.1.1 Створення файлу проекту.....	42
2.1.2 Створення просторової геометричної моделі балки, що складається із двох бетонів.....	45
2.1.2 Виокремлення геометрії повнотілих арматурних стержнів.....	52

						<i>КРБ 601-БА 10588942</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					
<i>Розробив</i>		<i>Крат А. А.</i>			<i>Удосконалення методики реконструювання мостових конструкцій на автомобільних дорогах загального користування</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>		
<i>Перевірів</i>		<i>Гасенко Л.В.</i>				5	123		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Щепак В.В.</i>				<i>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Кафедра АДГЗ</i>			
<i>Затвердив</i>		<i>Шарий Г.І.</i>							

2.1.3	Задавання геометричних параметрів опор балки та траверси завантаження	55
2.2	Створення скінченно-елементної моделі балки.....	60
2.2.1	Збірка прямокутної балки.....	60
2.2.2	Налаштування властивостей матеріалів балки (бетонів, арматури, траверси завантаження, опор)	65
2.2.3	Перевірка відповідності створеної моделі передбачуваним характеристикам, та параметризація геометрії тіл.....	68
2.2.4	Налаштування характеристик розрахунку.....	74
	Висновки до другого розділу	78
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ		79
3.1	Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 80-80	79
3.2	Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 55-105	86
3.3	Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 105-55	94
3.4	Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 40-120	102
3.5	Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 120-40	110
	Висновки до третього розділу.....	120
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		122

					<i>КРБ 601-БА 10588942</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку інфраструктури транспорту та дорожнього будівництва особлива увага приділяється питанням ефективної реконструкції та підтримки мостових конструкцій. Мостові споруди - ключовий елемент транспортної системи будь-якої країни, і їхній стан безпеки та надійності має прямий вплив на безпеку дорожнього руху та економічний розвиток.

У зв'язку зі змінами та вдосконаленням технологій, реконструкція мостів стає дедалі більш актуальною задачею. Однак, вирішення цих завдань вимагає використання сучасних інженерних методів та розрахункових моделей, що відображають реальні умови та навантаження на мостові споруди.

Значним аспектом дослідження в цьому контексті є питання руйнування мостових конструкцій в умовах воєнних конфліктів. Воєнний час може призвести до серйозних пошкоджень мостів, що вимагає не лише їхньої реконструкції, але й розробки спеціальних розрахункових моделей для оцінки стану та можливостей відновлення.

Метою цього дослідження є створення точних та надійних розрахункових моделей для реконструйованих мостових конструкцій після руйнування в воєнний час, які дозволять визначити їхню міцність, стійкість та надійність в умовах кризової ситуації. Результати цієї роботи будуть корисні для інженерів та проектувальників у сфері дорожнього будівництва, а також для владних органів, які відповідають за відновлення інфраструктури після конфліктів та катастроф.

Аналіз поставленого питання. Метод скінченних елементів (МСЕ) виявився дуже ефективним у вирішенні численних завдань знаходження розв'язків інтегральних та диференціальних рівнянь у частинних похідних. За останні півстоліття цей метод зарекомендував себе як незамінний інструмент

для інженерного аналізу та дизайну конструкцій. Його популярність призвела до створення ряду комерційних пакетів програм, призначених для практичного застосування МСЕ. Серед таких програм в механіці можна виділити NASTRAN, ANSYS, SCAD, Cosmos, ASKA та інші. Ці програми стали невід'ємною частиною інженерних розрахунків і використовуються для статичних, динамічних та інших розрахунків різноманітних конструкцій, незалежно від їх геометричної складності та фізичної структури.

Метод скінченних елементів і відповідні програми сприяють покращенню інженерних рішень та дозволяють аналізувати поведінку конструкцій у різних умовах, що робить їх незамінними інструментами для інженерів та науковців у великій кількості галузей.

Штучні споруди на транспортних маршрутах забезпечують комфорт переміщення та надають можливість перетинати транспортні потоки на різних рівнях, що, в свою чергу, збільшує безпеку всіх учасників дорожнього руху. Останній факт в першу чергу доводить актуальність та необхідність проектування та впровадження новітніх інженерних споруд під час реконструкції та будівництва нових маршрутів.

Зазвичай, несучі частини мостів, які є найважливішими компонентами штучних споруд на транспортних маршрутах, складаються зі сталевих зварних балок. Проїзна частина мосту виготовляється із монолітного чи збірного залізобетону. Для збільшення пролітів та зменшення перерізу несучих частин мосту, їх часто реалізують у вигляді статично-невизначених багатопрогінних схем. Крім цього, для зниження висоти перерізу сталевих балок, їх конструктивно поєднують із бетонною проїзною частиною.

Складність поставленої задачі полягає в додаткових викликах у процесі розробки статично-невизначених систем. Кількість невідомих параметрів перевищує кількість рівнянь, які визначають статику. Ця ситуація вимагає глибоких розглядів і детальних розрахунків для досягнення інтегрованих рішень. Коли об'єднання сталевих прогінних і залізобетонних

проїзних частин спрямоване на спільну роботу, це призводить до розподілу внутрішніх зусиль по висоті поперечного перерізу елементів будівельних конструкцій. Ця обставина створює потребу у більш ретельних обчисленнях і аналізі, щоб знайти оптимальні рішення. Всі ці фактори ускладнюють і сповільнюють процес інженерно-технічних розрахунків під час проектування будівельних конструкцій для штучних споруд, і тому важливо приділяти їм належну увагу для успішного вирішення завдань проектування.

Метою дослідження є показати, що скінченно-елементне моделювання може бути успішно використане для проектування інженерних споруд, зокрема мостів, через виконання чисельного моделювання реальних мостових споруд і їх елементів, що перебувають у експлуатації.

Для досягнення цієї мети поставлено ряд завдань:

1. Розглянути основні концепції методу скінченних елементів та його інтеграцію в комерційні програми для практичного використання на сучасних обчислювальних системах.

2. Подати опис етапів створення чисельних моделей будівельних конструкцій з використанням методу скінченних елементів та провести їх аналіз.

3. Подати класифікацію пошкоджень мостових споруд, що виникають під час експлуатації, та методів їх відновлення та реконструкції.

4. Проаналізувати особливості архітектурно-конструктивного виконання інженерних мостових споруд.

5. Виконати моделювання та провести аналіз чисельних скінченно-елементних розрахунків моделей реальних експлуатованих мостів, виділивши можливості та переваги їх використання.

Об'єкт дослідження – штучні споруди (мости).

Предмет дослідження – напружено-деформований стан штучних споруд (мостів) ті їх елементів

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань та досягнення цілей був використаний різноманітний набір методів у теоретичних дослідженнях, включаючи:

- Метод критичного аналізу існуючої інформації щодо чисельного моделювання методом скінченних елементів.
- Аналітичний метод чисельного моделювання методом скінченних елементів для оцінки напружено-деформованого стану штучних споруд (мостів).
- Використання методів математичної статистики для аналізу результатів теоретичних досліджень штучних споруд (мостів).

Практичне значення одержаних результатів роботи. Описана методика чисельного проектування методом скінченних елементів за допомогою комерційних програм для електронно-обчислювальних машин дозволяє отримувати більш детальну інформацію про місця концентрації напружень під час проектування мостів на велосипедних шляхах.

Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 123 сторінк.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РЕКОНСТРУЮВАННЯ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Комп'ютерне моделювання за допомогою пакетів комерційних програм (ANSYS, NASTRAN, Autodesk *Inventor* SCAD, Cosmos, ASKA, ЛИРА, МОНОМАХ і ін.) призначене для чисельного дослідження на електронно-обчислювальних машинах напружено-деформованого стану (НДС), стійкості конструкцій в цілому і їх елементів та виявлення небезпечних місць концентрації напружень.

1.1. Деякі відомості про чисельне дослідження

1.1.1 Поняття чисельного експерименту.

Унаслідок швидкого розвитку обчислювальної техніки, чисельний експеримент став широко використовуваним інструментом для проведення наукових досліджень та інженерного проектування. Цей метод базується на створенні та аналізі математичних моделей об'єкта або явища за допомогою комп'ютера.

Далі ми розглянемо схему чисельного експерименту [1], яка представлена на рисунку 1.1.



Рис. 1.1 Схема ходу чисельного експерименту

Припустимо, що ми маємо вивчити певний об'єкт, процес чи явище . Перший крок полягає в тому, щоб сформулювати основні закони та взаємозв'язки, які описують цей об'єкт. За допомогою цих законів розробляється математична модель, яка, як правило, включає запис цих законів у вигляді системи рівнянь (алгебраїчних, диференціальних, інтегральних та інших). Після сформулювання задачі, її необхідно вирішити. Проте лише в окремих випадках можливо отримати аналітичний розв'язок. У більшості випадків, для розв'язання задачі, потрібно використовувати певний апроксимаційний метод, обчислювальний метод або дискретну модель. На основі отриманої дискретної моделі створюється обчислювальний алгоритм, результатом якого є числове значення або таблиця числових значень.

Для реалізації обчислювального методу необхідно створити програму для персонального комп'ютера . Після розроблення та налагодження програми переходимо до етапу виконання обчислень. Отримані результати піддаються докладному аналізу з огляду на їх відповідність досліджуваному явищу, та за потреби, можуть бути внесені зміни в математичну модель або вибрано інший обчислювальний метод. Цей процес повторюється до досягнення результатів з потрібною точністю.

Обчислювальна математика грає роль лише на одному етапі обчислювального експерименту, а саме - на етапі вибору або побудови обчислювального методу. Від цього вибору в значній мірі залежить ефективність всього експерименту.

Сучасні обчислювальні системи працюють з числами, для яких визначено фіксовану кількість розрядів або бітів. Кількість цих розрядів зазвичай визначається як типом обчислювальної системи, так і мовою програмування. Оскільки розрядна сітка обмежена, числовий діапазон, з якими працює обчислювальна система, також обмежений через скінченність розрядів. Це обмеження призводить до похибок у чисельних експериментах.

1.1.2 Загальні положення методу скінченних елементів.

Метод скінченних елементів (МСЕ) виник з необхідністю розв'язування складних задач в області еластичності та структурного аналізу, особливо в цивільній, морській та авіаційній інженерії. Історія розвитку МСЕ включає в себе внесок видатних вчених, таких як Олександр Хреніков та Річард Курант, які, незважаючи на різницю у своїх підходах, зосереджувалися на важливому аспекті: поділ великої області на менші підобласті, відомі як елементи.

Перша робота, де розглядалася схема типу МСЕ, належить відомому математику Р. Куранту. Побудова методу з використанням фізичного змісту і його назва "Метод скінченних елементів" містяться в статті [2], написаній інженерами. Таке поєднання авторів різних спеціальностей характерне для робіт по МСЕ. Хреніков використовував принцип розбиття на сітку для розподілу області, тоді як Курант використовував трикутні підобласті, які відповідали розв'язкам еліптичних диференціальних рівнянь другого порядку, зумовлених проблемою скручування циліндра. Курантовий підхід базувався на попередніх дослідженнях в галузі диференціальних рівнянь, зокрема на роботах Рейліга, Рітца та Гальоркіна.

Подальший розвиток методу скінченних елементів розпочався в середині 1950-х років для використання в структурному аналізі в галузі аерокосмічних та будівельних інженерних дисциплін. Серйозний внесок у розвиток методу зробили Джон Аргеріс та Рей В. Клаф в університеті Берклі в 1960-х для застосування в цивільній інженерії. Наприкінці 1950-х ключові концепції, такі як матриця жорсткості та збірка елементів, вже існували практично в тих же формах, що і сьогодні. В 1965 році була створена програма НАСТРАН за замовленням НАСА, яка була призначена для втілення МСЕ в практику. Сам метод був строго формалізований у 1973 році в роботі Стренга та Фікса під назвою "Аналіз методу скінченних елементів". З того часу МСЕ став окремою галуззю прикладної математики та

математичного моделювання фізичних систем і знайшов застосування в численних інженерних дисциплінах.

Починаючи із 1970 року МСЕ став все більш популярним серед інженерів всіх спеціальностей завдяки роботам Зінкевича О.С. [3; 4], Розіна Л.А. [5], Галлагера, Одена, Ліона, Равьяра, Сільвестера.

Побудова скінченно-різницевих схем зазвичай вимагає невеликого об'єму обчислень, як правило, меншого, ніж в МСЕ. Проте перевагами МСЕ є гнучкість та різноманітність сіток і скінченних елементів (див. рис. 1.2), стандартні прийоми побудови дискретних задач для довільних областей, простота обліку натурних краєвих умов. Крім того, математичний аналіз МСЕ є простішим за МСР, його методи можна застосовувати до ширшого класу початкових завдань, а оцінки похибок наближених рішень, як правило, отримують при менш жорстких обмеженнях, чим в МСР. Разом з тим необхідно підкреслити, що основу для дослідження МСЕ створили фундаментальні результати, пов'язані з дослідженням збіжності і стійкості скінченно-різницевих схем, проєкційних методів, узагальнених рішень.

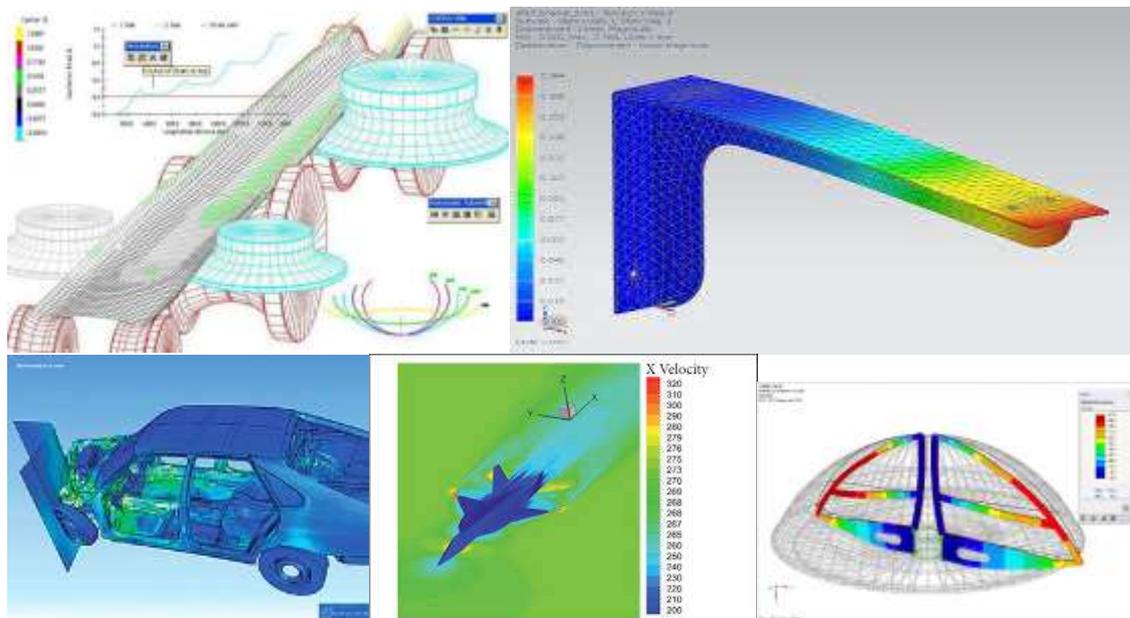


Рис. 1.2 Приклади застосування методу скінченних елементів

Суть методу скінчених елементів (МСЕ) полягає в наступному [5]. Припустимо, що стан системи може бути описаний деякою функцією. Нехай ця функція є єдиним розв'язком математичної задачі, сформульованої на основі фізичних законів. Однак знайти точний розв'язок задачі у разі достатньої складності може бути неможливо. Замість безкінечного пошуку серед безлічі різних функцій, задачу спрощують. Вони розглядають обмежену групу функцій, які можуть бути параметризовані скінченною кількістю параметрів. Зазвичай серед таких функцій немає точного розв'язку задачі. Проте шляхом відповідного вибору параметрів можна намагатися наблизити розв'язок до задачі та створити наближений варіант. Цей загальний підхід характерний для багатьох методів наближеного аналізу. Однак конкретно для МСЕ є характерним побудова обмеженої групи функцій, що визначаються скінченною кількістю параметрів. Давайте розглянемо детальніше основні кроки **методу скінчених елементів (МСЕ)** [2]. Припустимо, що ми хочемо створити групу функцій $u(x)$ при $a \leq x \leq b$. Інтервал ab розділяється на скінченну кількість частин (елементів), які з'єднані між собою і з кінцями інтервалу в вузлових точках (вузлах) x_i . У межах кожного елемента задається функція, наприклад, у вигляді лінійного полінома. Ця функція визначається своїми значеннями $u(x_i)$ в вузлах на кінцях елемента. Якщо шукана функція є безперервною, то її значення в кожному вузлі для сусідніх елементів збігаються. У результаті отримуємо групу частково-лінійних безперервних функцій, які можна зображати у вигляді ламаних і визначаються скінченною кількістю параметрів – своїми вузловими значеннями. У випадку кількох змінних схема методу скінчених елементів, в принципі, залишається незмінною. Таким чином, метод скінчених елементів перетворює задачу знаходження функції у задачу визначення скінченної кількості її наближених значень в окремих точках-вузлах. При цьому, якщо початкова задача стосується функціонального рівняння, наприклад, диференціального рівняння

з відповідними граничними умовами, то завдання МСЕ відносно її значень у вузлах зводиться до системи алгебраїчних рівнянь.

Зменшення максимального розміру елементів призводить до збільшення кількості вузлів і невідомих вузлових параметрів. Це в свою чергу збільшує можливість більш точно врахувати рівняння задачі і тим самим наблизитися до шуканого рішення. Вже проведено багато досліджень щодо збіжності наближеного рішення методу скінчених елементів (МСЕ) до точного у різних випадках. Для лінійних задач, де невідомі функції і операції над ними входять у всі відношення задачі лише у першому ступені, МСЕ отримав достатньо повне математичне обґрунтування [2]. Вирішення лінійних задач методом скінчених елементів сводиться до вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Загальний алгоритм використання методу скінчених елементів (МСЕ) можна узагальнити таким чином [8]:

1. Дискретизація конструкції, тобто представлення її у вигляді сукупності скінчених елементів.
2. Створення матриць жорсткості для кожного елемента.
3. Формування загальної матриці жорсткості і вектора навантаження для всієї області.
4. Застосування граничних умов та зменшення розмірів матриць жорсткості, векторів невідомих і навантажень.
5. Вирішення системи рівнянь для визначення переміщень вузлів.
6. Обчислення інших потрібних величин, які залежать від переміщень вузлів.

Теоретичні засади методу скінчених елементів (МСЕ) можна сформулювати таким чином [2]. Основний принцип МСЕ полягає в розбитті вивченої області на елементарні області скінчених розмірів, які називаються скінченими елементами. У межах кожного такого елемента невідома функція апроксимується поліномом, ступінь якого може змінюватися відповідно до

поставленої задачі, але, як правило, залишається відносно невисоким (від 1 до б). Для кожного елемента апроксимуючий поліном визначається його коефіцієнтами, які можна знайти за значеннями функції в окремих точках (вузлах елемента). Якщо відома функція в кожному вузлі, то це надає можливість апроксимувати її на всій області. Можна також виразити, що невідома функція $A(x, y, z)$ залежить від m параметрів A_1, A_2, \dots, A_m , що є невідомими, які охарактеризовані функцією в кожному вузлі кожного елемента. Визначення параметрів A_1, A_2, \dots, A_m є етапом визначення функції $A(x, y, z)$.

Знаючи варіаційне представлення задачі, потрібний інтеграл $\min \left\{ F(A) = \iiint_{\Omega} [A, A'_x, A'_y, A'_z, x, y, z] dx dy dz \right\}$ замінюють на суму інтегралів на

кожному скінченному елементі області: $F(A) = \sum_{K=1}^{N_e} F_K(A)$, де N_e – число

елементів розбиття і F_K – частина F на елементі з номером K . На кожному елементі з номером K функція A може бути замінена її апроксимацією $A = P(A_1^K, x, y, z)$, інтегрування якої дасть $F(A)$ у вигляді функції параметрів тільки одного елемента K : $F_K(A) = F(A_1^K)$. Сумуючи та приймаючи до уваги,

що деякі з вузлів $1, 2, \dots, m$ є загальними для декількох елементів і що вплив кожного елемента повинен враховуватися у виразі для функції F щодо величин A_1, A_2, \dots, A_m невідомої функції в цих вузлах, коли об'єднують

елементи для всієї області, отримують $F(A) = \sum_{K=1}^{N_e} F_K(A) = F(A_1, A_2, \dots, A_m)$.

Потім знаходиться оптимальне значення F по всій області, маючи на увазі, що окремі похідні F щодо величин A_1, A_2, \dots, A_m одночасно перетворюються в нуль (наприклад $dF/du_1 = 0$). Ця операція приводить до складання системи з m рівнянь з m невідомими, які визначають величини $A_1,$

A_2, \dots, A_m у вузлах розбиття. Праву частину цих рівнянь отримують, використовуючи ту частину функції, яка містить члени, що характеризують джерела, або на основі значень A , заданих на межі області (неоднорідні граничні умови Діріхле).

Оскільки розв'язок системи рівнянь МСЕ займає основну частину часу розрахунку задачі, вибір методу розв'язання є дуже важливим кроком.

Проблемі розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь присвячена величезна кількість робіт, існує багато готових програм. При виборі методу необхідно враховувати особливості МСЕ. Матриці жорсткості у МСЕ є рідко заповненими, що дозволяє при раціональній нумерації привести всі ненульові коефіцієнти ближче до головної діагоналі (стрічкова структура матриці). Існують програми, які враховують стрічкову структуру і суттєво зменшують час розв'язання системи рівнянь із такою матрицею [7].

Існують два основних підходи до розв'язання систем лінійних рівнянь: прямі і ітераційні методи. Прямі методи широко використовуються, і серед них одним з найпоширеніших є метод Гауса. З ітераційних методів варто відзначити метод Гауса-Зайделя (метод послідовної релаксації) [9]. У системі Mathcad для розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь використовується блок Given...Find.

Розв'язок задачі динаміки залежить від характеру правої частини диференціального рівняння коливань. У випадку нульової правої частини розв'язок сводиться до визначення власних частот і форм коливань, і це відомо як задача на власні значення матриці динамічної жорсткості. У випадку ненульової правої частини ми стикаємося з задачами вимушених коливань.

Зазначимо деякі важливі переваги Методу скінченних елементів (МСЕ) [6]:

1. Зручна схема формування системи алгебраїчних рівнянь: МСЕ дозволяє побудувати зручну схему для створення системи алгебраїчних рівнянь, яка відображає вузлові значення шуканої функції. Процес наближеної апроксимації розв'язку використовує прості поліноміальні функції на окремих типових елементах, а потім об'єднує ці елементи в систему алгебраїчних рівнянь, особливо ефективно для геометрично і фізично складних систем.
2. Низька кількість невідомих: Кожне алгебраїчне рівняння, отримане за допомогою МСЕ, має невелику кількість вузлових невідомих порівняно з їх загальною кількістю. Багато коефіцієнтів в рівняннях системи рівні нулю, що спрощує її розв'язання.
3. Дискретизація задачі: МСЕ дозволяє ефективно розв'язувати дискретні задачі, в яких вирішення замінюється скінченним числом параметрів, задовольняючи системі алгебраїчних рівнянь. Цей метод наближено перетворює континуальну задачу на дискретну, що полегшує уявлення про весь процес рішення та дозволяє уникнути можливих помилок.
4. Розширена сфера застосування: Схема МСЕ використовується не тільки для континуальних задач, але й для з'єднання елементів та формування алгебраїчних рівнянь при розв'язанні дискретних задач. Це розширює область застосування методу.

Основні чисельні методи для розв'язання систем лінійних рівнянь, які виникають при використанні Методу скінченних елементів (МСЕ), включають:

1. Прямі методи:
 - Факторизація Гауса: Застосовується до всіх дійсних або комплексних, симетричних або несиметричних несингулярних матриць.

- Факторизація Холоцького: Застосовується до всіх дійсних симетричних позитивно визначених матриць.

2. Ітераційні методи:

- Зв'язані біградієнти з передобумовленістю: Застосовуються до всіх несингулярних матриць (дійсних або комплексних).

- Зв'язані градієнти з передобумовленістю:* Застосовуються до всіх дійсних симетричних позитивно визначених матриць.

У модифікованому вигляді ці методи можуть бути використані для розв'язання нелінійних систем методом Ньютона-Рафсона. Також цей метод може бути використаний для оптимізації результату, отриманого при розв'язанні системи лінійних рівнянь алгебри.

Під час використання Методу скінченних елементів (МСЕ) при визначенні елементарної матриці для кожного скінченного елемента необхідно обчислювати визначені інтеграли шляхом інтегрування функцій, які апроксимуються за допомогою функцій форми. У випадку, коли елементи є криволінійними або задача є нелінійною, аналітичне інтегрування стає неможливим, і в такому випадку використовують чисельне інтегрування. При інтегруванні по області можна використовувати інтегрування по кожному її елементу, застосовуючи ефективні та точні методи чисельного інтегрування, основними з яких є:

Метод Гауса: Широко використовується при інтегруванні лінійних елементів, вимагає обчислення в певній кількості точок.

Метод Ньютона-Котеса: Дозволяє обчислювати інтеграл лише в точках, визначених користувачем. Зручний при інтегруванні на поверхнях, для яких розраховані гаусові координати і де точки рівномірно розподілені.

При використанні Методу скінченних елементів (МСЕ) для розв'язання задач параболічного типу, необхідно вирішувати системи диференціальних рівнянь першого порядку. В цьому контексті застосовують наступні методи:

1. Метод дотичних: простий метод, але для досягнення достатньої точності рішення потрібно використовувати дуже малі кроки обчислень.
2. Явні методи: простіше в застосуванні, але часто вимагають вибору дрібних кроків обчислень через числову нестійкість.
3. Неявні методи: більш стійкі та допускають великі кроки обчислень, але на кожному етапі потрібно вирішувати системи рівнянь через наявність неявного члена.
4. Напівнеявні методи: забезпечують велику точність, але вимагають значних обчислень на кожному етапі. Схема Кренка-Ніколсона є популярним варіантом, забезпечуючи високу точність.

Методи прогнозу-корекції призначені для уникнення розрахунків, характерних для неявних методів, за допомогою подвійного (одночасно неявного і явного) розрахунку при виконанні тільки однієї ітерації.

Популярність МСЕ призвела до створення комерційних програм, таких як NASTRAN, ANSYS, SCAD, Autodesk Inventor, Cosmos, ASKA. Ці програми використовуються для розрахунків різноманітних конструкцій зі складною геометрією та фізичною структурою в різних областях механіки.

1.1.3 Коротка характеристика програм скінченно-елементного моделювання.

Чисельне моделювання НДС зразків було виконано в системі Autodesk Inventor Pro 2021 64 bit. Ця програма є інженерним САД-засобом, призначеним для 3D-моделювання та проектування в галузях машинобудування та інженерії. Розроблено компанією Autodesk, ця програма є визнаним лідером у даному напрямку та успішно використовується в промисловості протягом 24 років.

Засоби аналізу напружень вбудовані в програму, допомагаючи визначати надійність конструкцій. Функції створення та редагування збірок роблять управління складними проектами більш ефективним.

Autodesk Inventor Pro 2021 легко інтегрується з AutoCAD, спрощуючи обмін даними між різними проектами. Програма дозволяє автоматизувати багато етапів проектування та створювати технічну документацію для проектів. Розширені можливості експорту та імпорту сприяють ефективній взаємодії з іншими програмами.

Достовірність результатів розрахунку гарантована довгостроковим використанням програми в промисловості та відповідністю високим стандартам якості. Різноманітні навчальні ресурси, такі як книги і статті, полегшують процес вивчення програми.

1.2 Класифікація пошкоджень мостових конструкцій

1.2.1 Пошкодження мостових конструкцій, що виникли під час експлуатації

В сучасних умовах проектування та будівництва мостів, при високому рівні наукових досягнень у теорії їх розрахунку, руйнування мостів за звичайних умов експлуатації практично виключені. Однак військова агресія Російської Федерації спричинила руйнування транспортної інфраструктури в 15 областях України. За інформацією першого заступника голови Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України, Андрія Івка, на початку січня 2023 року у країні зазнали пошкоджень 25,1 тис. км доріг та 341 штучна споруда, включаючи 150 мостів та шляхопроводів на державній мережі. Найбільше зруйнованих мостів виявлено у Чернігівській області – 27, Харківській – 25, та Київській – 24. Ці оцінки стосуються лише територій, які перебувають під контролем України.

Внаслідок воєнних подій в Чернігівській області пошкоджено 680 км державних автомобільних доріг. На трасі М-01 Київ - Чернігів - Нові Яриловичі виявлені руйнування, зокрема, два великих автомобільних мости через річку Десна поблизу обласного центру, і порушено пряме сполучення зі столицею. Щодо Луганської, Донецької та лівобережної частини Херсонської області, руйнування поки що не були визначені.

З кожним звільненням регіоном України зростає необхідність негайного відновлення руйнівних мостів для відновлення транспортних зв'язків, і це нарощується в геометричній прогресії. Процес відновлення мостів стає спільним зусиллям підрядників обласних служб відновлення та розвитку інфраструктури та Спеціальної служби транспорту Міністерства оборони України. На даний момент проїзд на 76 мостах вже відновлено завдяки будівництву обхідних доріг або створенню тимчасових переправ. У

Харківській області на 28 березня 2023 року функціонують 22 тимчасові переправи, ще одна знаходиться у стадії будівництва. Крім того, ведеться ремонт залишених в цілості мостів, прикладом чого є реконструкція 200-метрового мосту через річку Псел в Сумській області. Однак проблемою при відновленні мостів, пошкоджених війною, є те, що більшість об'єктів доведеться відбудовувати "з нуля". Наприклад, великий міст через річку Десна навколо м. Чернігів потребує значних фінансових та часових ресурсів. За останніми оцінками, на відновлення всієї зруйнованої інфраструктури України понад чотири роки.

Відновлення мостів у більшості випадків стикається з значними технічними труднощами через складність вибору найбільш раціонального методу відновлення, викликану труднощами практичного виконання відновлювальних робіт і значними ускладненнями, що виникають внаслідок різноманітності і часто невідомості всіх пошкоджень на мості. Отже, відновлення зруйнованих мостів є складною галуззю мостової справи, яка володіє власним досвідом та методами. Висловлене вище вимагає розробки організаційно-технічних рішень щодо відновлення мостів, пошкоджених внаслідок військової агресії Російської Федерації, і, передусім, розробки класифікації мостів за групами руйнувань.

Характер руйнування мостів може бути дуже різноманітним і залежить від причин, що його викликали, а також від обставин, які супроводжували цей процес. За своїм характером руйнування мостів можна поділити на наступні основні групи:

- 1) повне руйнування мосту на всій його довжині;
- 2) повне руйнування мосту на частині його довжини;
- 3) руйнування окремих елементів мосту (прогонових будов, опор, тощо);
- 4) дрібні пошкодження мосту, що не викликали обвалення його частин.

Зазначений поділ не є вичерпним, оскільки характер та види руйнувань можуть бути дуже різноманітними й неочікуваними.

Повне руйнування мосту вздовж всієї його довжини призводить до формування вибою на місці невеликої штучної споруди в насипі. У випадку більшості мостів, що перетинають багатководні річки, при повному руйнуванні може відбутися обрушення всіх прогонових конструкцій та опор. Фундаменти опор, а часто й нижні частини видимої частини опори, зазвичай залишаються цілі або лише отримують пошкодження (див. рисунок 1.3). Проте існують ситуації, коли внаслідок бойових дій руйнуються опорні конструкції, та прогонова будова ще має здатність утримувати потік авто з гуманітарною допомогою (див. рисунок 1.3 «б»). Бувають ситуації, коли руйнування поширюється вглиб кладки в фундаменти, за межі поверхні землі, та на значну глибину.



Рисунок 1.3 – Руйнування опори: а – кам'яної; б – бетонної



Рисунок 1.4 – Повністю зруйнований міст, прогонові будови якого не придатні для використання під час відновлювальних робіт (а, б) [1, 2]

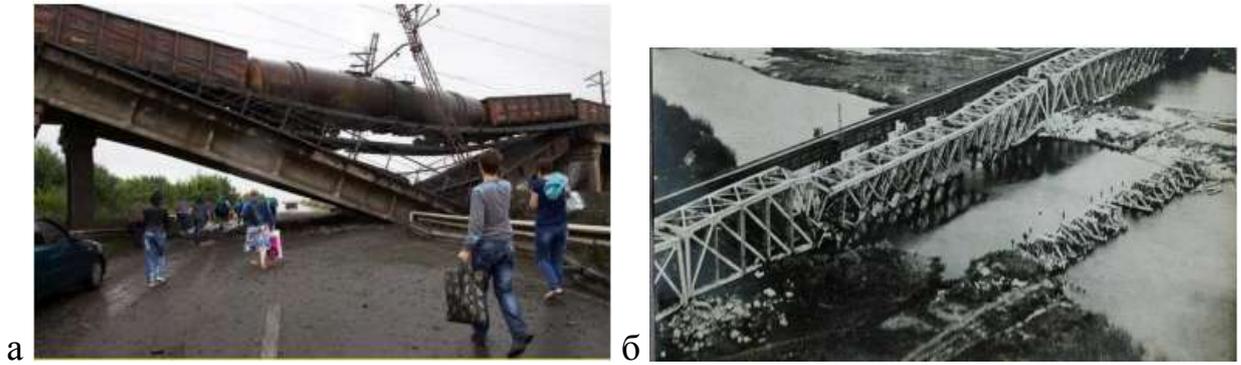


Рисунок 1.5 – Повністю зруйнований міст, прогонові будови якого придатні для використання при відновленні (а, б) [2]

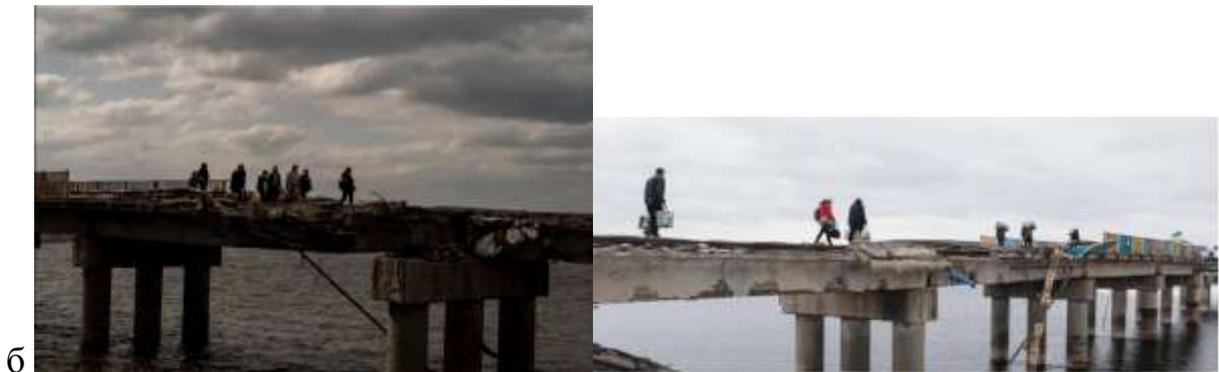


Рисунок 1.6 – Зруйнований місь на певній ділянці його довжини
а) м. Святогірськ Донецької області. б) Міст через Сіверський Донець в Харківській області

У випадку повного зруйнування дерев'яних мостів в результаті пожежі (див. рисунок 1.6), зазвичай залишаються лише нижні частини дерев'яних опор, розташованих у воді, або бетонні опори (див. рисунок 1.7).

Повне руйнування мосту на певній ділянці його довжини. Цей вид пошкодження відрізняється від попереднього тим, що повністю зруйнованою виявляється лише частина мосту, яка зазвичай має великі прогони складну та масивну конструкцію, яку важко відновити (див. рисунок 1.8).

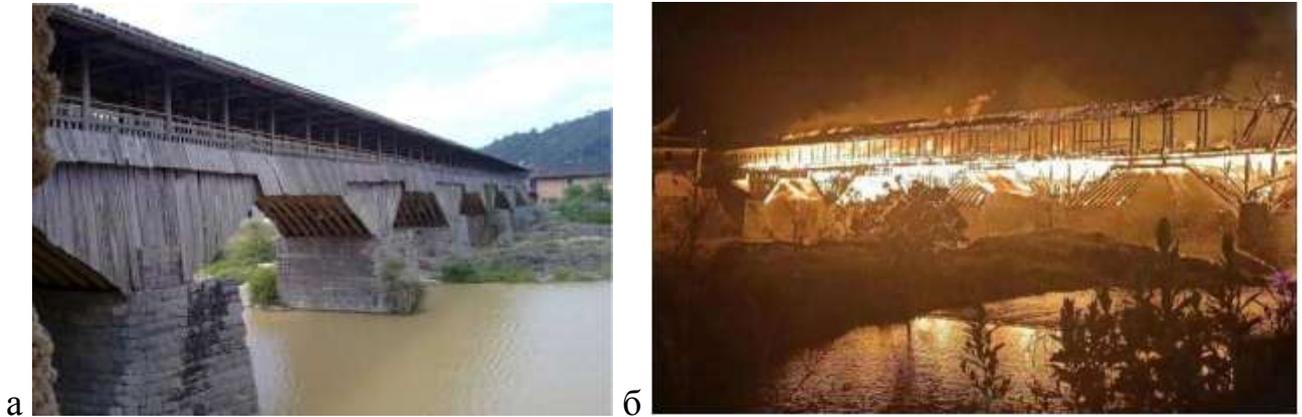


Рисунок 1.7 – Руйнування пожежею 900 річного арочного дерев'яного мосту Ваньань у Китаї: а – міст до пожежі; б – пожежа на мосту



Рисунок 1.8 – Залишки мостів після пожежі (а, б)

Порушення прогонових будов часом виникає внаслідок руйнування їхніх кінців (див. рисунок 1.9, а), в опорних вузлах, опорних частинах або опорних панелях. У таких випадках часто пошкоджується і верхня частина опори мосту. Деякі прогонові будови можуть бути серйозно зруйновані одразу в кількох місцях (див. рисунок 1.9, б).

Якщо руйнування мосту викликано пошкодженням його опор, то відповідні кінцеві частини прогонових будов можуть бути серйозно пошкоджені. Металеві прогонові будови, що впали, в залежності від причин

обвалення, висоти і умов падіння можуть виявитися сильно деформованими або зберегти експлуатаційний стан на всій або частині довжини.

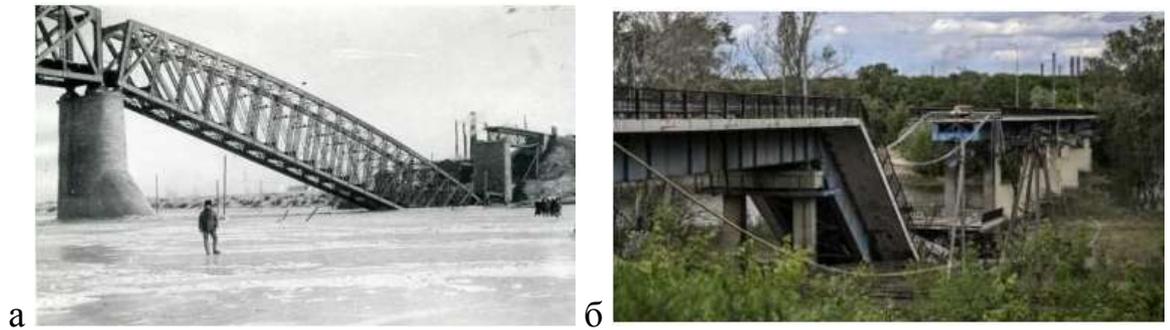


Рисунок 1.9 – Міст, зруйнований на частині довжини (а, б) [1, 2]

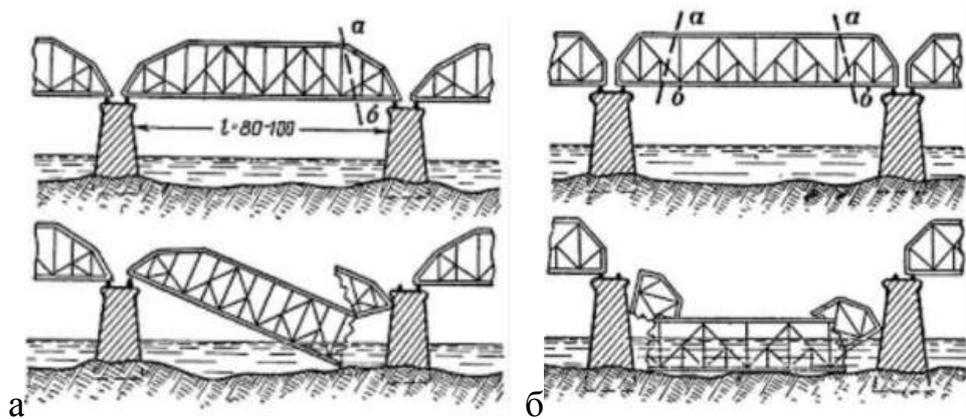


Рисунок 1.10 – Обрушення прогонових будов у результаті руйнування їх біля опори (а) або в декількох місцях (б) [2]

Дерев'яні прогонові будови при падінні, зазвичай розламуються і перетворюються на безладну купу уламків. Винятком є дощаті та клеєні ферми, які іноді при падінні можуть повністю або частково зберегтися. (рис.1.11)



Рисунок 1.11 – Зруйнований дерев'яний шляхопровід (а) та міст (б)

Залізобетонні прогонові будови, які впали (Рис. 1.12), через значну власну вагу часто розтріскуються. При цьому в ушкоджених областях арматура, як правило, залишається цілою. Підняття залізобетонних мостів, які впали, супроводжується визначеними труднощами через велику масу конструкції, але іноді такий процес все ж можливий.

Під час обрушення кам'яних склепінь розламуються на частини, і їх можна використовувати лише як окремі камені, отримані під час розбирання зруйнованої кладки.

Найчастіше виникає *руйнування окремих елементів мосту*. На рисунку 1.12 показані приклади залізобетонних мостів з різними прогоновими будовами, які мають пошкодження окремих елементів.



Рисунок 1.11 – Зруйновані залізобетонні мости (а-г) [1-3]



Рисунок 1.12 – Мости із руйнуванням окремих елементів прогонової будови (а-г) [1-3]

Дрібні ушкодження мостів, які не викликали обвалення його частин, зазвичай включають у себе вигини, розриви та переломи окремих елементів, пробоїни в проїзній частині та окремих деталях, вибоїни в кладці масивних прогонових будов і опор та інше (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Ушкодження мостів, які не спричинили обвалення прогонової будови (а-г) [1-3]

При дрібних ушкодженнях неважливих елементів мосту загалом не спостерігається видимих деформацій. Проте, при ушкодженні основних несучих конструкцій, розриві поясу або розкосу головної ферми, у прогоновій будові мосту можуть виникнути помітні деформації у вигляді провисання або перекосу, що не обов'язково призводить до обвалення мосту (рис. 11, в).

Часом серйозні ушкодження конструкції, такі як руйнування частини ширини склепіння в кам'яних, бетонних і залізобетонних аркових мостах, або руйнування однієї з головних балок або ферм в залізобетонних або металевих мостах з їздовою поверхнею, не завжди призводять до їх обвалення.

Пошкодження мостів від морозного пучання ґрунту

Деформації елементів конструкцій мостів стають неминучими внаслідок пошкоджень опорних елементів. Вертикальні та горизонтальні зміщення свайних опор та порушення цілісності опор призводять до втрати міцності та стійкості балок, ферм та прогінних плит мостів.

Морозне пучення ґрунту - це складний багатофакторний природний процес. Основний вплив на його перебіг залежить від ґрунтових умов, вологості ґрунту, закономірностей фільтрації та міграції вологи. У промерзаючому та талому ґрунті поблизу опор мостових споруд виникає складний напружено-деформований стан, що обумовлений водно-тепловим режимом ґрунту, вологопровідними властивостями ґрунту, жорсткістю конструкцій та іншими факторами. Цей стан характеризується комплексом силових факторів, що викликають різноманітні ушкодження конструкцій. Основні види ушкоджень елементів мостів, які експлуатуються в умовах морозного промерзання ґрунту, та їх причини відображені в таблиці.

**Види та причини пошкоджень елементів мостів
у умовах морозного пучення ґрунту**

№ п/п	Вид пошкодження	Причина пошкодження
1	Підйом опор мостів (вертикальні переміщення)	Дотичні сили морозного пучення
2	Горизонтальне переміщення і відхилення опор мостів	Односторонній вплив рівнодійних дотичних та нормальних сил морозного пучення
3	Деформації та руйнування опор мостів	Дотичні сили морозного пучення → підйом свай опор
		Порушення роботи дренажних споруд → нормальні сили морозного пучення → додаткове навантаження на стінки обсіпаних устоїв мостів
4	Деформації пролітних будов	Види пошкоджень мостів №1,2 та 3

1.2.2 Пошкодження мостових конструкцій, що виникли в результаті воєнних дій в Україні



Рисунок 1.14 – Повністю зруйнований міст через р. Сіверський Донець в с. Богородичне Донецької області., прогонові будови якого не придатні для використання під час відновлювальних робіт



3

Рисунок 1.15 – Руйнування мосту на певній ділянці його довжини внаслідок бомбардування на півночі Чернігова.



4 а



б

Рисунок 1.16 – Зруйнований місь на певній ділянці його довжини
 а) м. Святогірськ Донецької області. б) Міст через Сіверський Донець в Харківській області



Рисунок 1.17 – Фото руйнувань мосту через р. Ірпінь у Романівці



Рисунок 1.18 – а) Фото будівництва нового, моста через р. Ірпінь у Романівці.
б) Фото нового збудованого моста

1.3 Конструктивні рішення з підсилень пошкоджених мостових конструкцій

1.3.1 Підсилення мостових опор

Консольні ділянки ригелів раціонально підсилювати улаштуванням залізобетонних обойм. Обойми стандартної (прямокутного чи трикутного абрису), хоча і економічні, однак володіють не виразною архітектурною формою. Тому більш раціонально улаштування обойм у вигляді 2-х різновисоких трапецій, які суттєво покращують архітектурну виразність мостової споруди, водночас, вельми посилюючи непридатні до експлуатації ділянки.

Бітрапецеїдальна форма капітелей колон добре зарекомендувала себе у промисловому й цивільному будівництві. Досвід моделювання напружено-деформованого стану таких конструкцій свідчить, що після підсилення ригельна система може сприймати більше до двох разів навантаження у порівнянні зі звичайними ригелями. Надійність та ефективність такої системи підсилення підтверджується виконаним ґрунтовним аналізом скінчено-елементних моделей напружено-деформованого стану і міцнісними розрахунками.

Для надійного зчеплення конструкцій підсилення бетонування обойми слід вести за один прийом. Тому, після улаштування проектного армування та опалубки обойми виникають суттєві технологічні проблеми із оббетонування отриманих конструкцій.

По-перше, унаслідок значної висоти обойми створюється надзвичайно високий гідростатичний тиск, який стрибкоподібно збільшується в момент вібрування бетонної суміші глибинними вібраторами; для компенсації цих гідравлічних стрибків тиску (гідроударів) потрібно встановлювати щільне поле стягуючих опалубку шпильок.

По-друге, через невелику відстань від опори до армування і опалубки, особливо в нижній частині обойми, під ригелем, звичайний бетон не завжди добре заповнює порожнини, що може призвести до появи недосконалостей – великих внутрішніх, раковин, порушень цілісності захисного шару, тобто, до прихованих внутрішніх макро дефектів й до необхідності виконання додаткових ремонтних робіт вже на самій обоймі, що, в кінцевому випадку, призведе до суттєвого зниження міцності посиленої конструкції, збільшення термінів виконання будівельно-монтажних робіт та їх вартості. Крім того, існує реальна небезпека, що бетон обмонолічення взагалі не зчепиться зі старим бетоном нижньої поверхні ригеля через ефект «консервування» повітря.

Для забезпечення вимог чинних норм з бездефектного бетонування залізобетонних конструкцій рекомендується використати для обойм самоущільнюючі бетонні суміші на основі сучасних рецептур, запропонованих фірмою Sika ці суміші володіють низькою в'язкістю, малим водоцементним відношенням і, водночас, великою рухливістю, не потребують вібрування, повністю заповнюють весь об'єм опалубки, володіють високою адгезією до старого бетону і арматури.

Технологічна послідовність робіт з виконання робіт з улаштування обойм включає:

- оббивання слабкого бетону ригелів та ділянок обмонолічення, дефектного захисного шару, утворення опорних шпонок глибиною 100 ... 150 мм на поверхнях бетону, які безпосередньо примикають до обойми посилення;
- очищення існуючого армування від продуктів корозії;
- встановлення хімічних анкерів у тіло шпонок та ригелів;
- улаштування нового армування обойми посилення з приєднанням до анкерів;

- захист усього масиву арматури від корозії ефективними високоадгезійними полімер-цементними матеріалами;
- улаштування опалубки на металевій інвентарній основі великої несучої здатності у вигляді трубчастих стійок, розпірок та опорних балок;
- бетонування обойми самоущільнюючими бетонними сумішами без використання глибоких вібраторів, що зменшить гідростатичні тиски;
- розбирання опалубки, улаштування монолітних підферменників висотою не менше 150 мм;
- встановлення нових еластомерних опор під проектні впливи;
- фінішна обробка бетонних поверхонь опор ізоляційними та оздоблювальними матеріалами.

1.3.2 Підсилення прогонових частин мосту

Експлуатаційний стан збірних плитних прольотних будов визначається їх конструктивними особливостями. Порівняно із ребристими вони є більш захищеними від негативного впливу зовнішнього середовища, оскільки мають значно меншу площу відкритих поверхонь. Порівняно незахищеними є лише зовнішні бокові поверхні крайніх плит, де й нагромаджуються основні дефекти, пов'язані з корозією бетону, відшаруванням його захисного шару, місцевим оголенням арматури й її корозією. Нижні поверхні плит є більш захищеними і суттєвих дефектів практично не мають.

Поширеним дефектом, який спостерігається у більшості прольотних будов, є пошкодження та розриви гідроізоляції, внаслідок цього просочування води через шпонкові шви між плитами й пов'язане з цим вилуговування бетону замоноличення, зменшення сил тертя у швах і їх міцності на сприйняття поперечних сил, що є основним фактором забезпечення сумісної роботи плит прольотної будови.

Характерним дефектом є також недосконалість та недовговічність надпорних деформаційних швів закритого типу. Їх розгерметизація призводить до багаторазового замочування-висихання, замерзання-розмерзання торцевих і приопорних ділянок плит, що супроводжується інтенсивною корозією бетону, оголенням арматури і пошкодженням бетону в зоні розташування опорних частин.

За тонкостінних перерізів пустотних плит це зменшує їх довговічність, тому одним із завдань реконструкції повинна бути ліквідація деформаційних швів. Загалом експлуатаційний стан плитних прольотних будов порівняно з ребристими за однакових термінів їх експлуатації є значно кращим, а дефектів, які б суттєво впливали на несучу здатність плит практично немає. Тому всі вони незалежно від періоду будівництва на тепер є цілком працездатними, мають загалом задовільний стан несучих конструкцій і можуть бути використані під час реконструкції, мета якої доведення експлуатаційних показників до вимог чинних норм проектування мостів з забезпеченням вантажопідйомності, розширенням габариту за нормативами перспективної категорії дороги та нормованого терміну експлуатації співрозмірного з новими мостами.

Прольотну будову розширюють за нормативами дороги II-ї технічної категорії до габариту Г-11,5+2×1,0 м плоскою монолітною залізобетонною плитою з консольними ділянками завдовжки по 1,95 м. Накладну плиту об'єднують для сумісної роботи з існуючими плитами за допомогою клеєстержневих петльових анкерів, розташованих уздовж прольоту з кроком 120 см і поперек по осі крайніх і через одну проміжних плит. Зовнішні відкриті і частково пошкоджені корозією бетону бокові поверхні крайніх плит захищені добетонованими ребрами з нахиленими поверхнями, об'єднаними в нижній частині з плитами II-подібними анкерами А-2. Підсилення плит на сприйняття нормованих тимчасових навантажень і НК-100, виконують зміною статичної схеми з балкової

вільнообпертої на защемлену на опорах за допомогою влаштування поперечних надпорних ребер. Для цього над опорами відкривають пустоти зверху, встановлюють додаткову надпорну арматуру після чого відкриті ділянки пустот разом з ребрами бетонують одночасно з бетонуванням накладної плити, на приопорних ділянках якої встановлюють зварні сітки з надпорною арматурою для сприйняття опорних згинальних моментів, які виникають після защемлення плит.

Після влаштування накладної плити виконують заміну гідроізоляції і покриття, а також захисних елементів мостового полотна. Для забезпечення довговічності відкриті поверхні прольотної будови і опори захищені від агресивних впливів зовнішнього середовища та можливої корозії під час майбутньої експлуатації сучасними високоякісними і довговічними відновлювально-захисними матеріалами.

Висновки до першого розділу

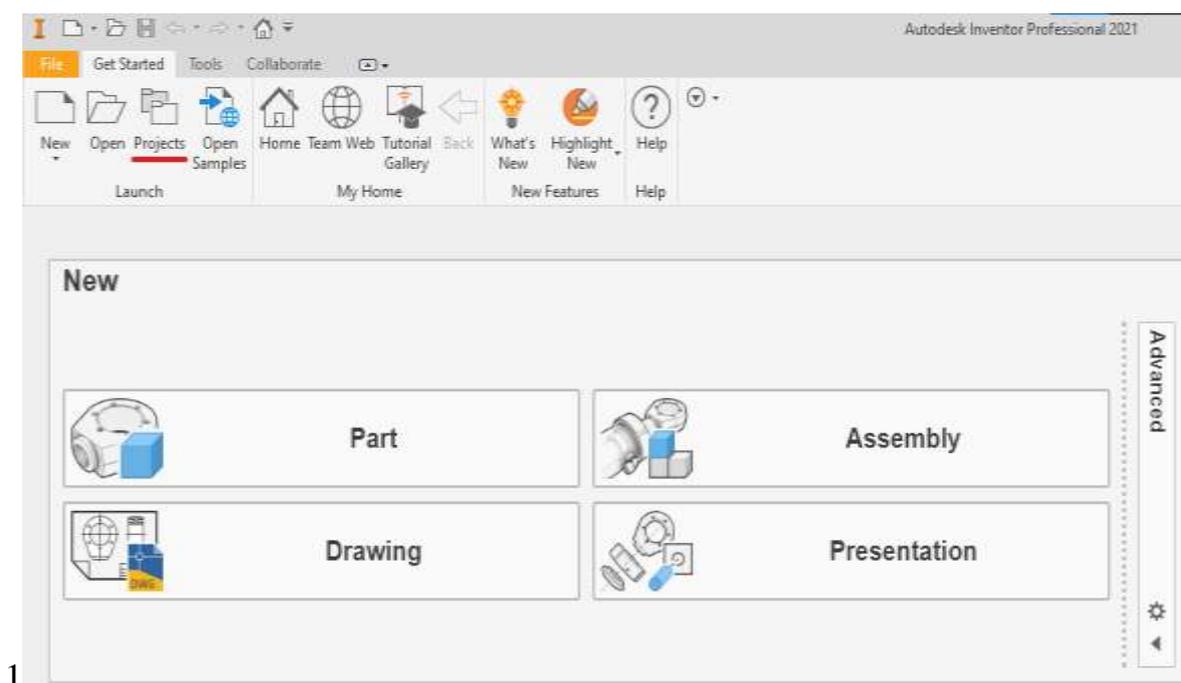
1. Метод скінченних елементів добре зарекомендував себе за останні 50-60 років, як числова техніка знаходження розв'язків інтегральних та диференціальних рівнянь у частинних похідних. Процес розв'язання методом скінченних елементів побудований або на повному усуненні диференціального рівняння для стаціонарних задач, або на розкладі диференціальних рівнянь у частинних похідних в апроксимуючу систему звичайних диференціальних рівнянь, які потім розв'язуються використанням якої-небудь стандартної методики, такої як метод Ейлера, Рунге-Кутти тощо.
2. Виконано розгляд пошкоджень мостових конструкцій, що виникають під час експлуатації. Особливу увагу приділено пошкодженням мостових конструкцій, що виникли в результаті воєнних дій на території України. . За своїм характером руйнування мостів можна поділити на наступні основні групи: 1) повне руйнування мосту на всій його довжині; 2) повне руйнування мосту на частині його довжини; 3) руйнування окремих елементів мосту (прогонових будов, опор, тощо); 4) дрібні пошкодження мосту, що не викликали обвалення його частин.
3. Розглянуто конструктивні рішення з підсилення пошкоджених конструктивних елементів мостових конструкцій, таких як мостових опор та прогінної мостової частини.

РОЗДІЛ 2

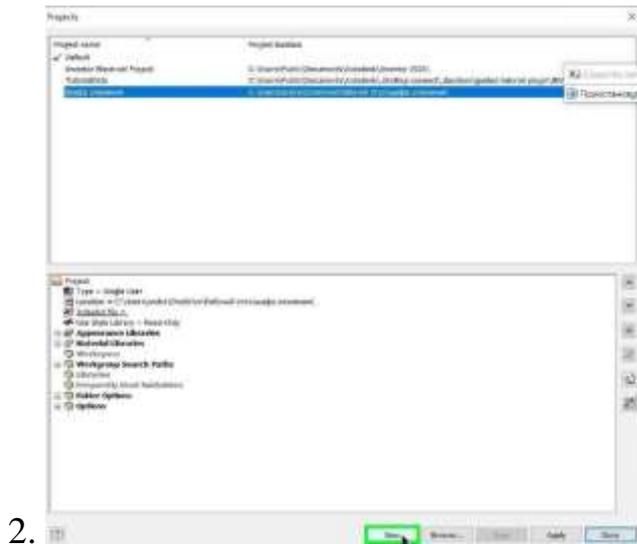
СТВОРЕННЯ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Створення просторової геометрії моделі

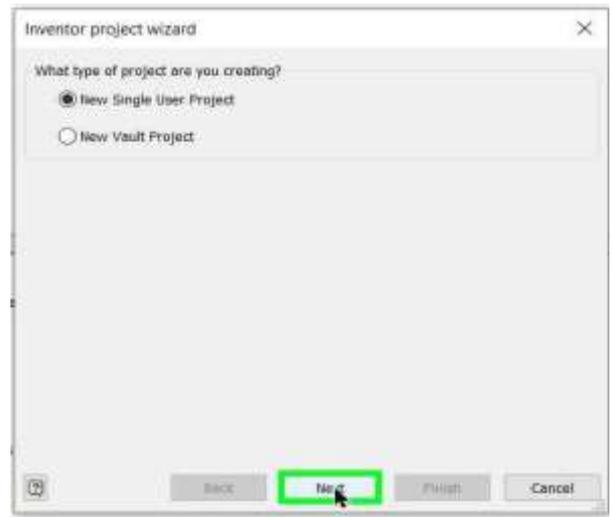
2.1.1 Створення файлу проекту



1. Для початку створимо файл проекту, до якого будуть зсилатись наші просторові моделі деталей та файл збірки. Натиснувши «Projects» в треї «Launch» Файли з результатами розрахунків будуть зберігатись в зазначеному шляху для файлу проекту.



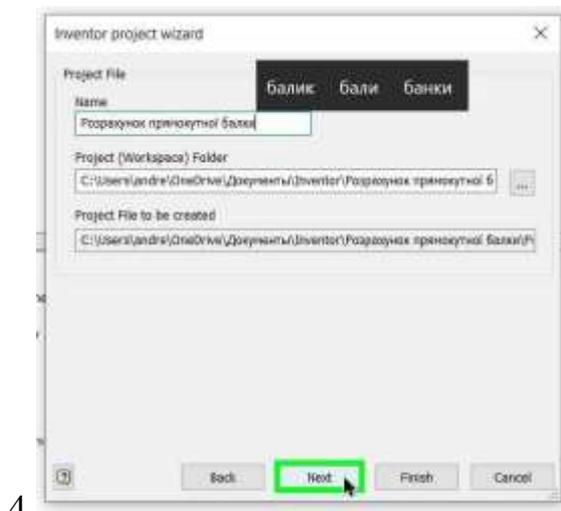
2.



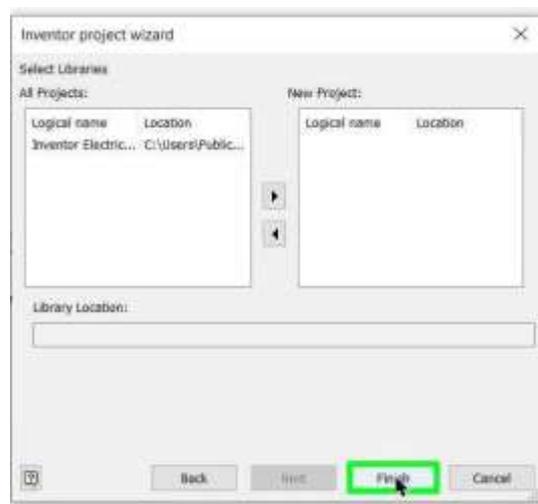
3.

2. Створюємо новий проект натиснувши кнопку "New (button)" лівою кнопкою миші в "Projects".

3. Обираємо "New Single User project", натискаємо "Next (button)"



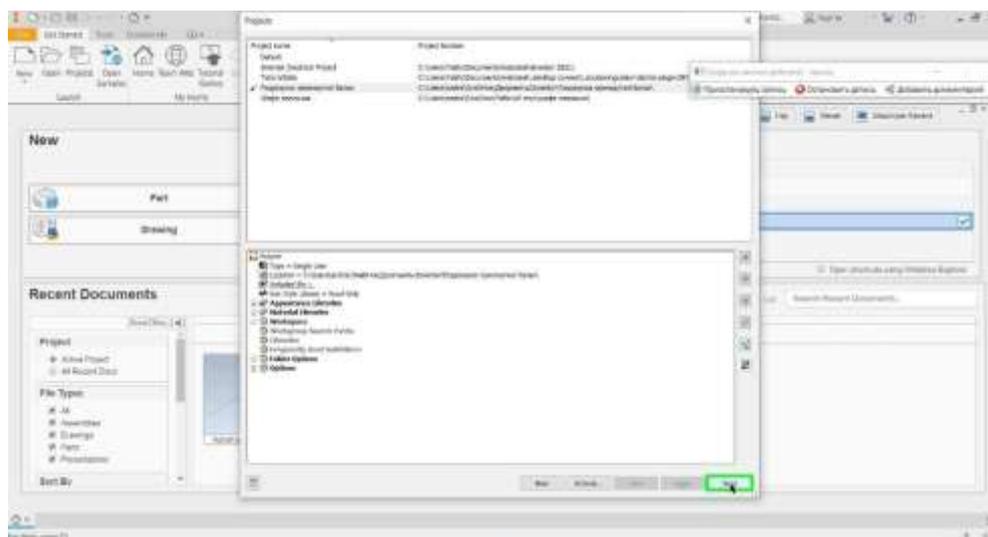
4.



5.

4. Клікаємо "Next (button)", створюємо та називаємо свій файл проекту «Розрахунок прямокутної балки»

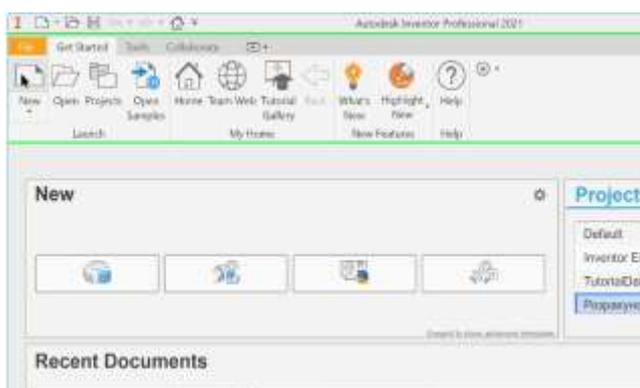
5. Натискаємо "Finish (button)"



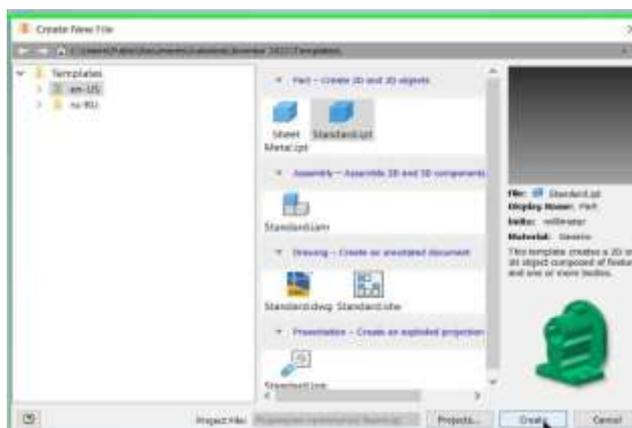
6.

6. В списку проектів обираємо новостворений проект, та натискаємо "Done (button)"

2.1.2 Створення просторової геометричної моделі балки, що складається із двох бетонів



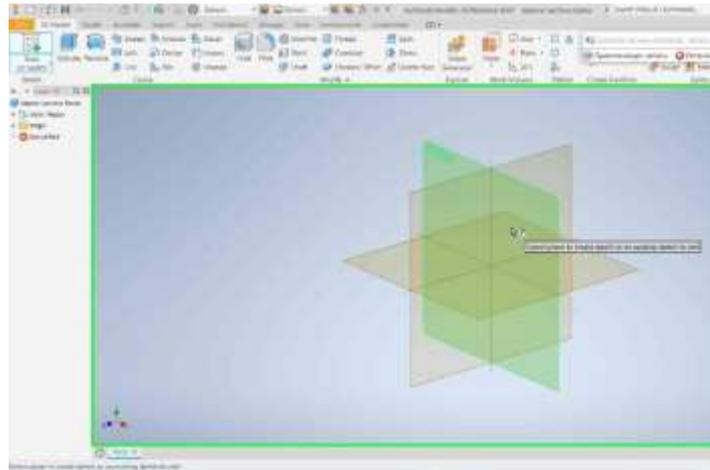
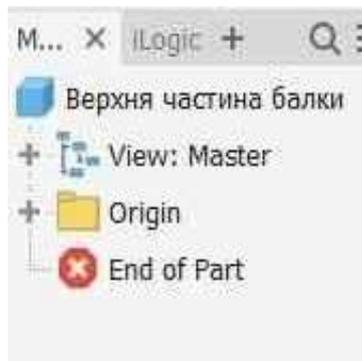
1.



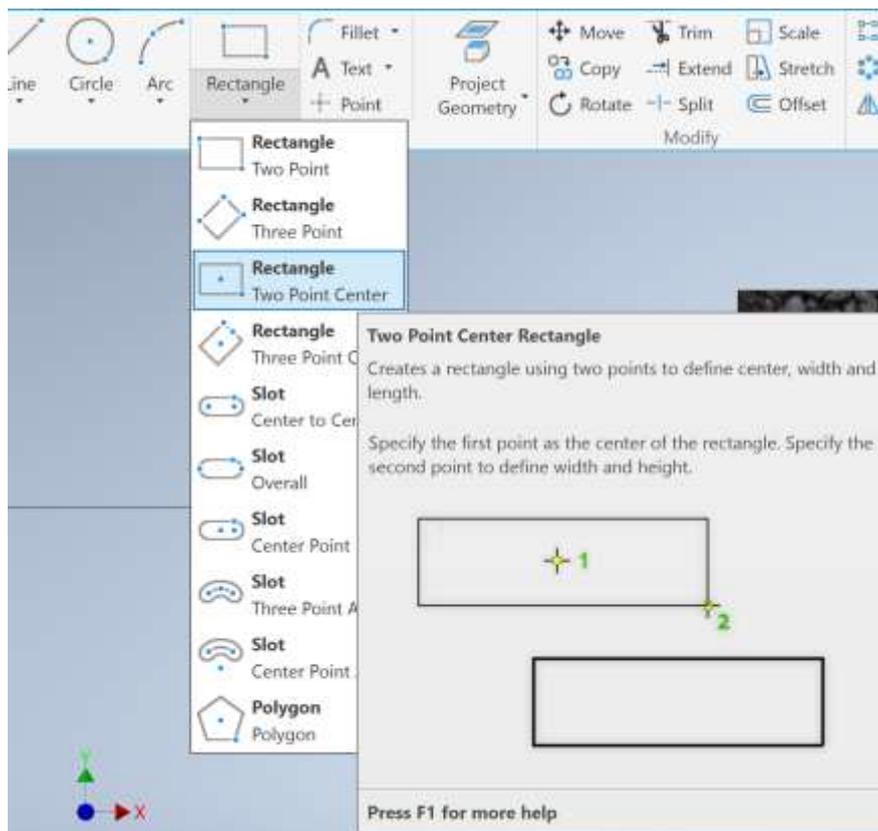
2.

1. Натискаємо «New»

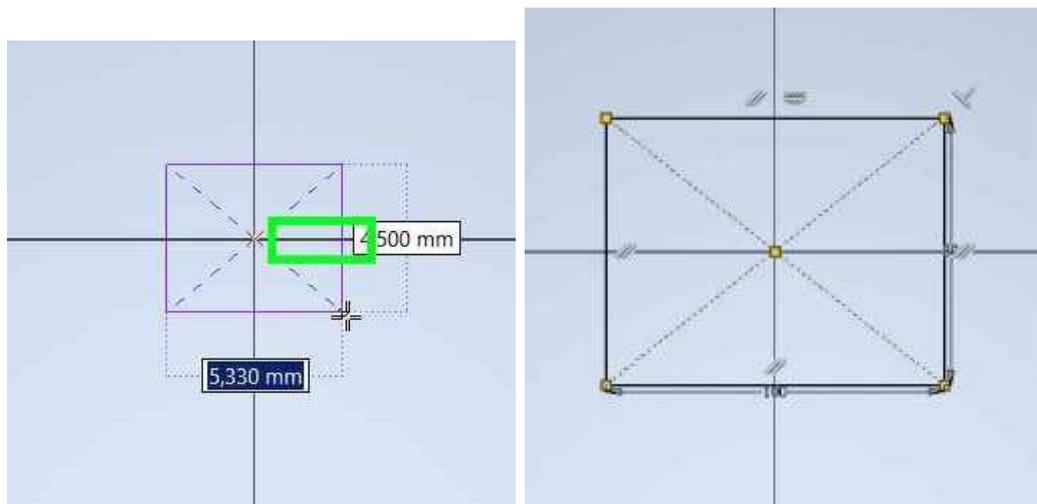
2. В наступному вікні обираємо тип шаблону «Standart» , клік «Create»



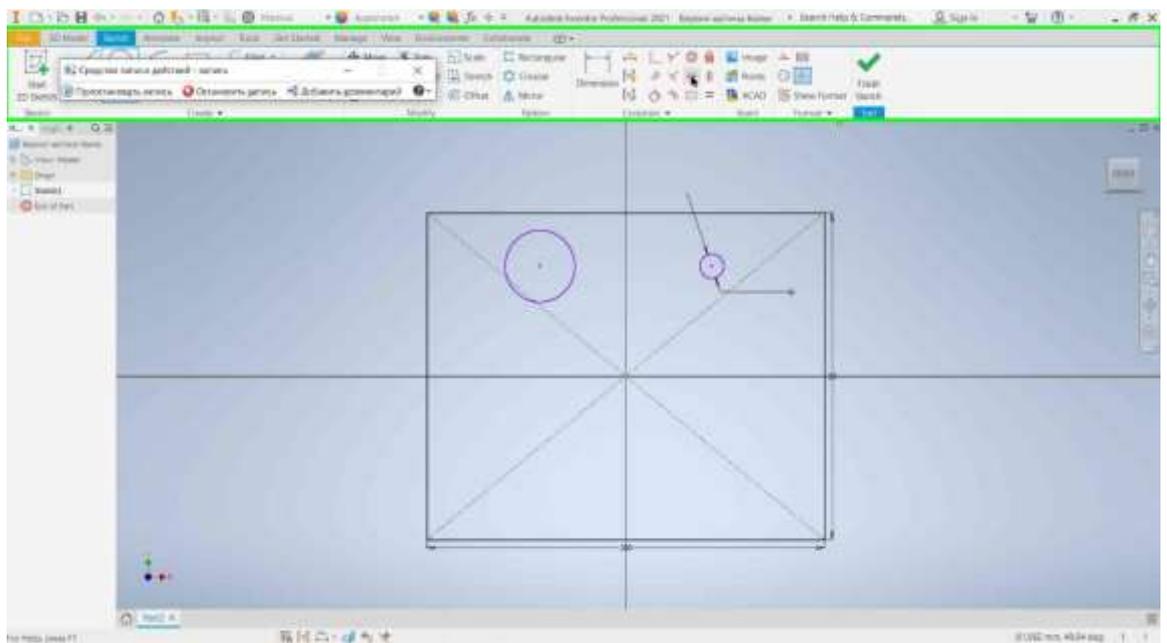
3. В дереві елементів назвемо деталь «Верхня частина балки»
4. На панелі керування натиснемо на «Start 2D Sketch», та оберемо площину XY. Так ми переходимо до створення ескізу нашої геометрії



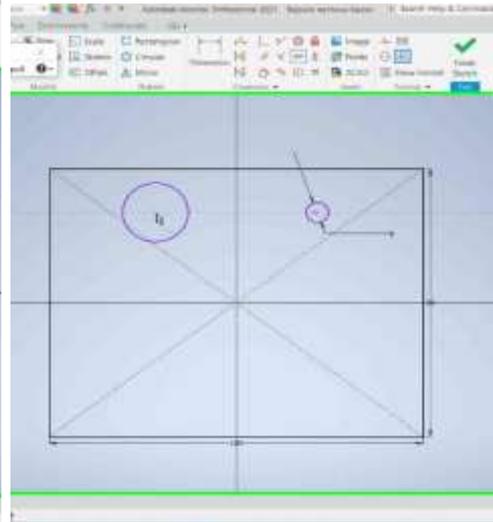
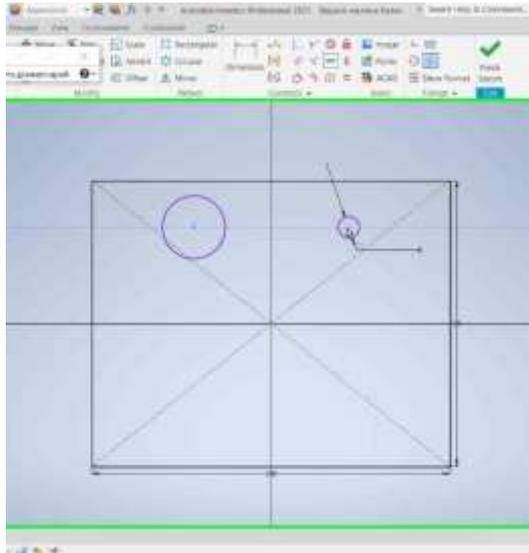
5. В панелі «Create» обираємо «Rectangle», а щоб прямокутник був координатно-визначений я зазвичай обираю варіацію «Two Point Center» (таким чином не доведеться налаштовувати взаємозв'язки відносно центру координат).



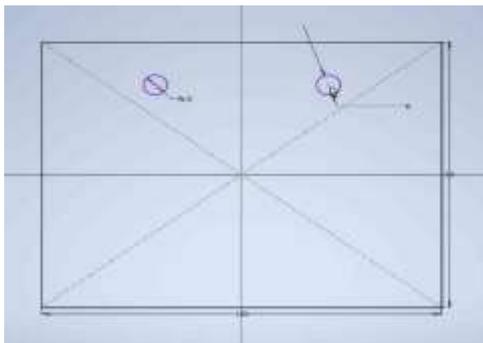
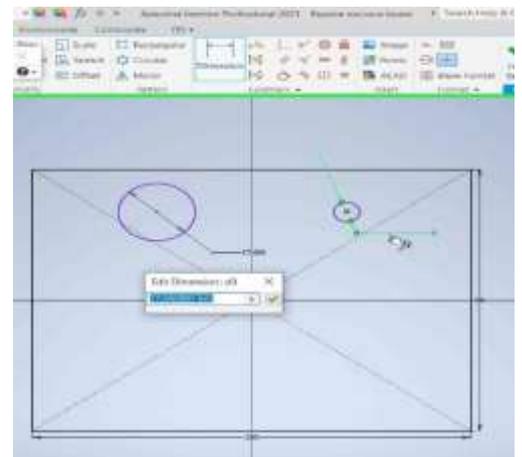
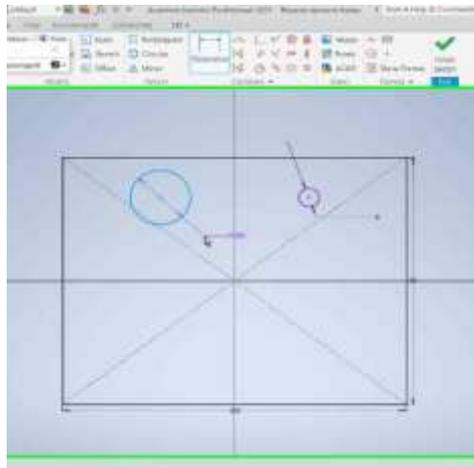
6. Починаємо ескіз з центру координат, та відразу задаємо розміри 100x80 перемикаючись клавішею “ТАВ” . Та отримаємо геометрично визначену геометрію. Пурпурним відображається геометрично-невизначена геометрія.



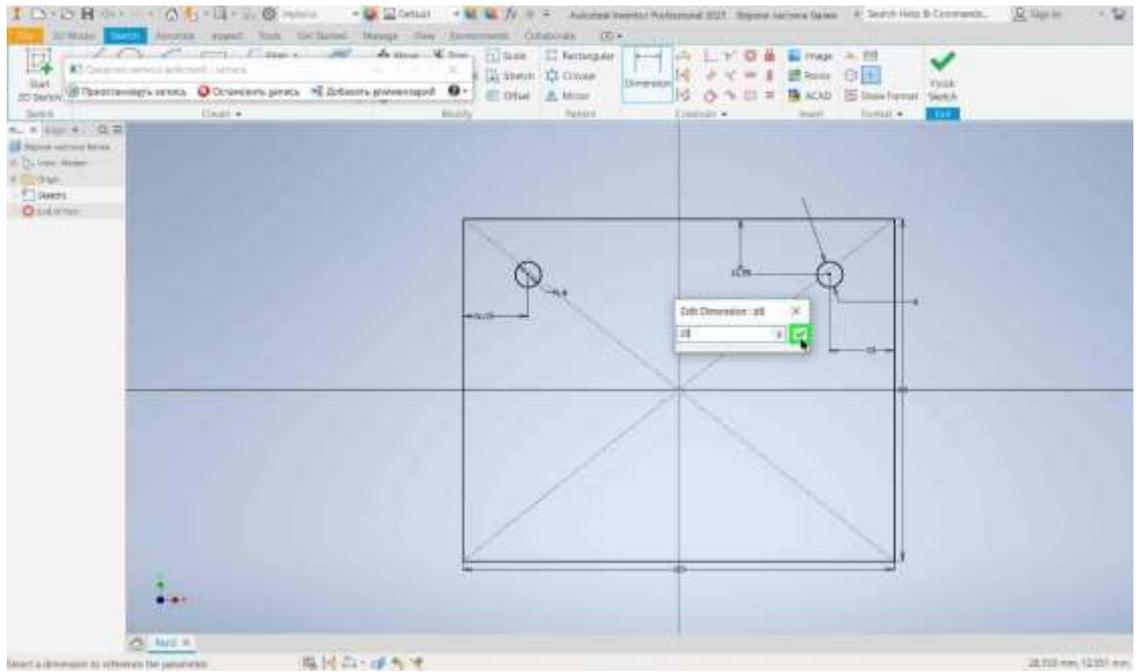
7. Використавши команду «Circle», креслимо 2 круги всередині прямокутника. Задавши діаметр 6 мм. для одного з них.



8. У розділі «Constrain» використаємо функцію «Horizontal Constraint», щоб накласти взаємозв'язок горизонтальності між колами.



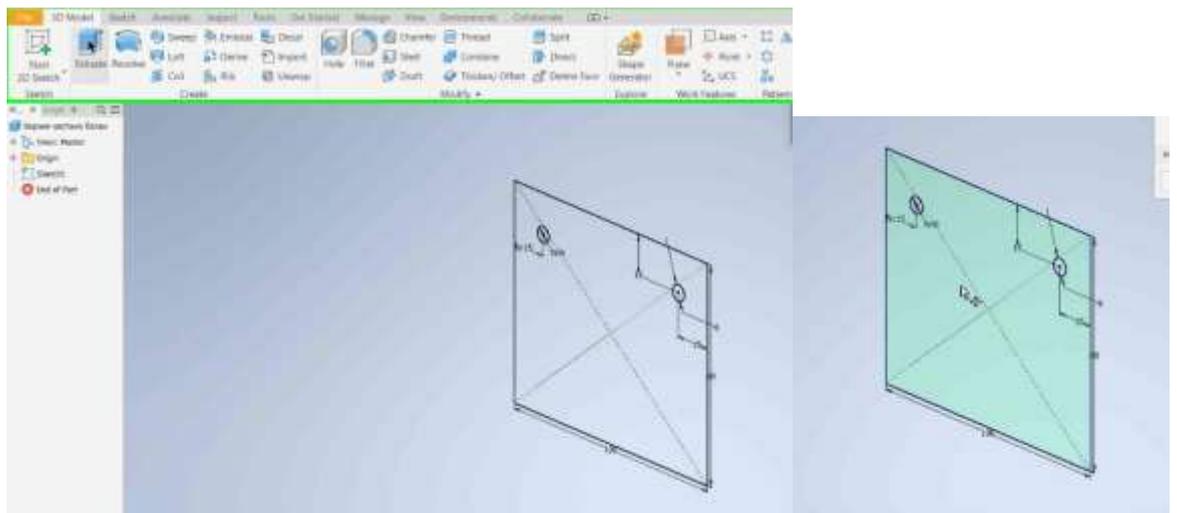
9. Скориставшись функцією «Dimension», клікаємо по колу що не має розміру, встановивши місцезрешташування розміру та замість ручного вводу, клікаємо по існуючому розміру посилаючись на нього.



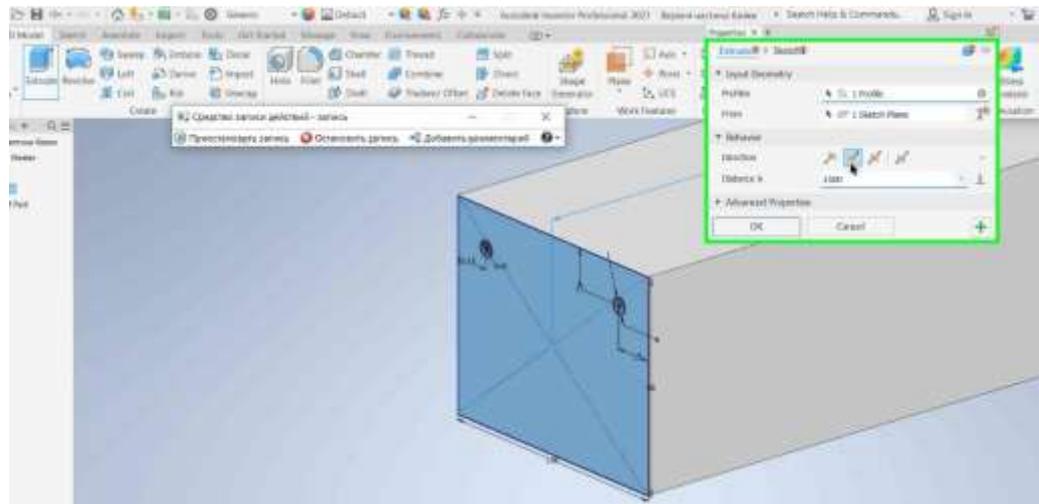
10. Виставляємо відстані кола від границь прямокутника 15 мм. Звернемо увагу, що вся геометрія координатно-визначена, про що свідчать лінії чорного кольору.



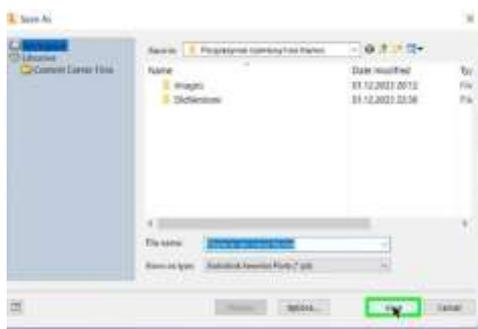
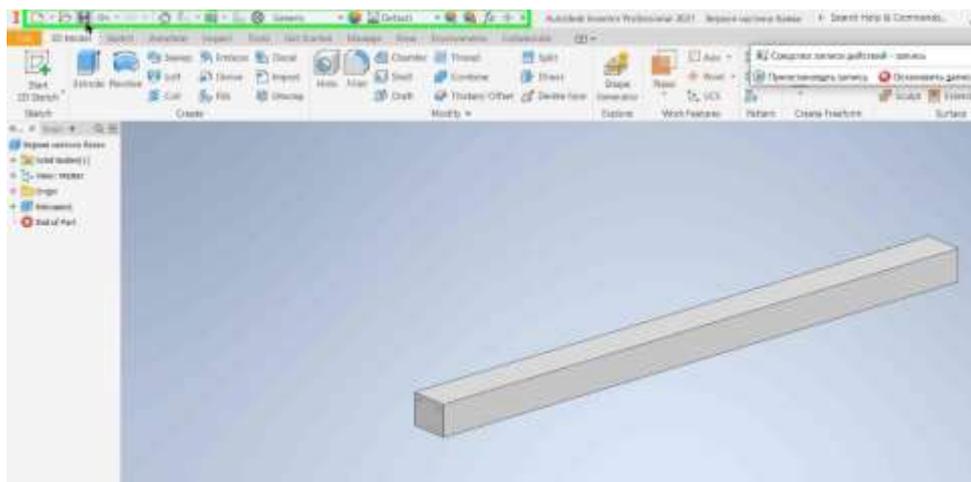
11. Натискаємо «Finish Sketch», після чого відкриється панель «3D Model»



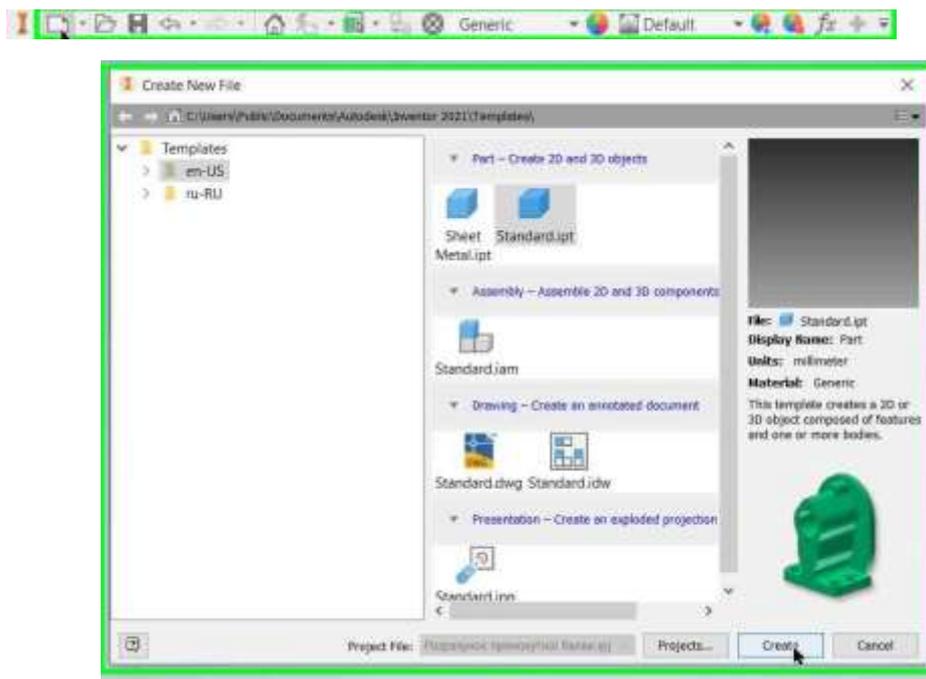
12. В панелі «Create» обираємо функцію «Extrude», та обираємо площину ескізу, по якій буде виконуватись «видавлювання».



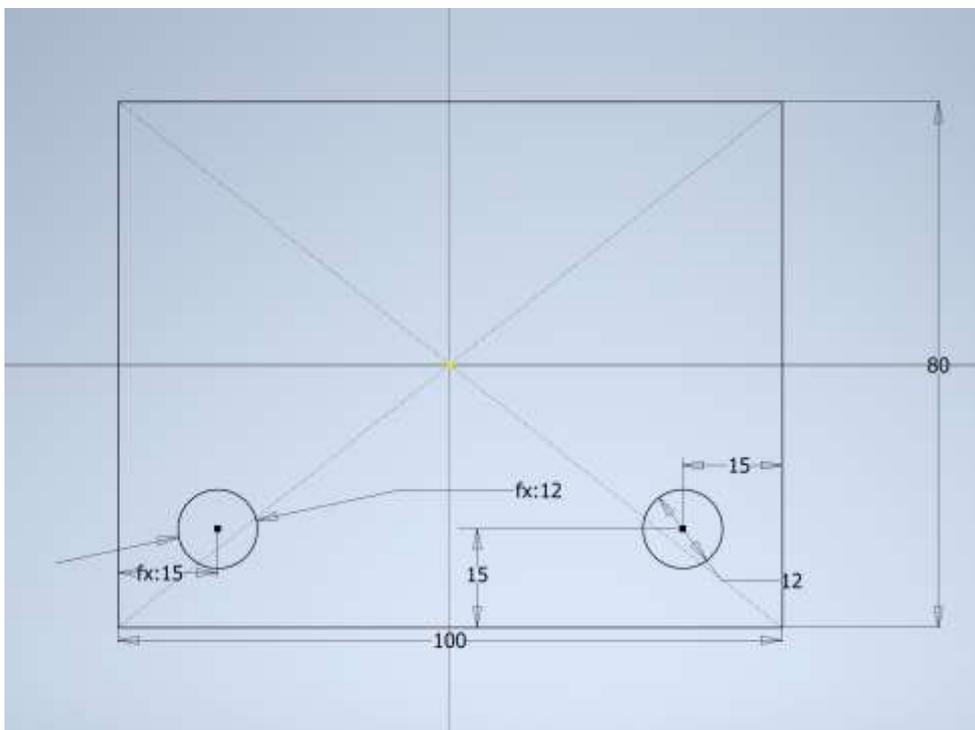
13. В діалоговому вікні, виставляємо значення довжини нашої балки 1500 мм. Натискаємо «OK»



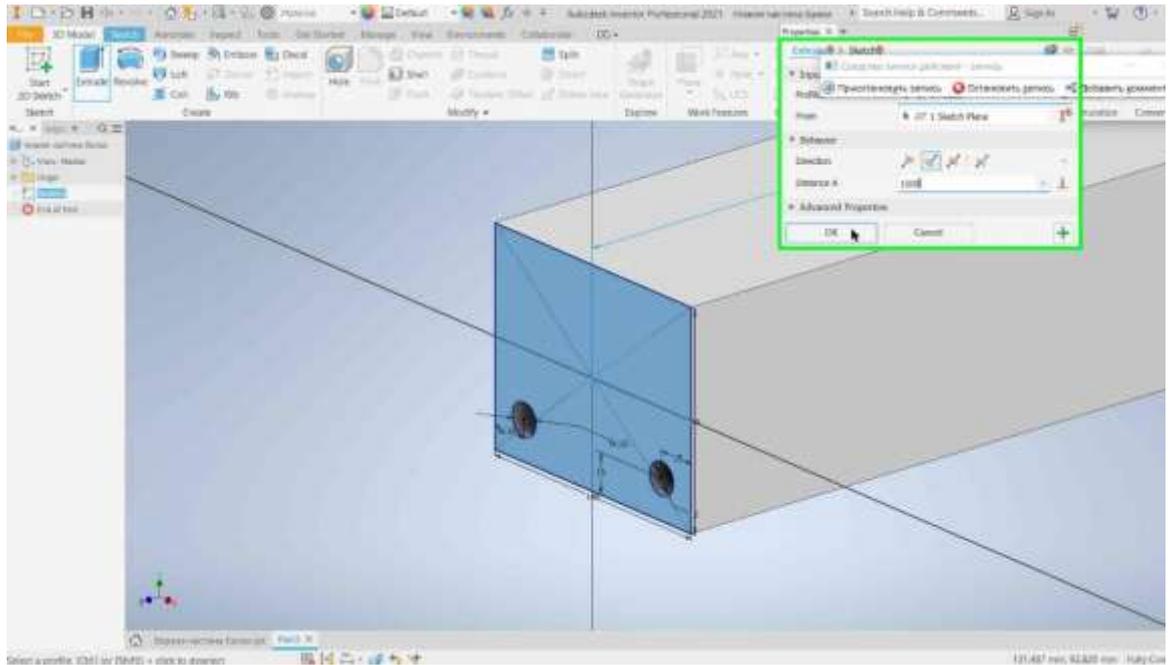
14. Зберігаємо нашу деталь в папці з файлом проекту.



1. Створюємо новий файл деталі, обираємо тип «Standard.ipt», натискаємо «Create».

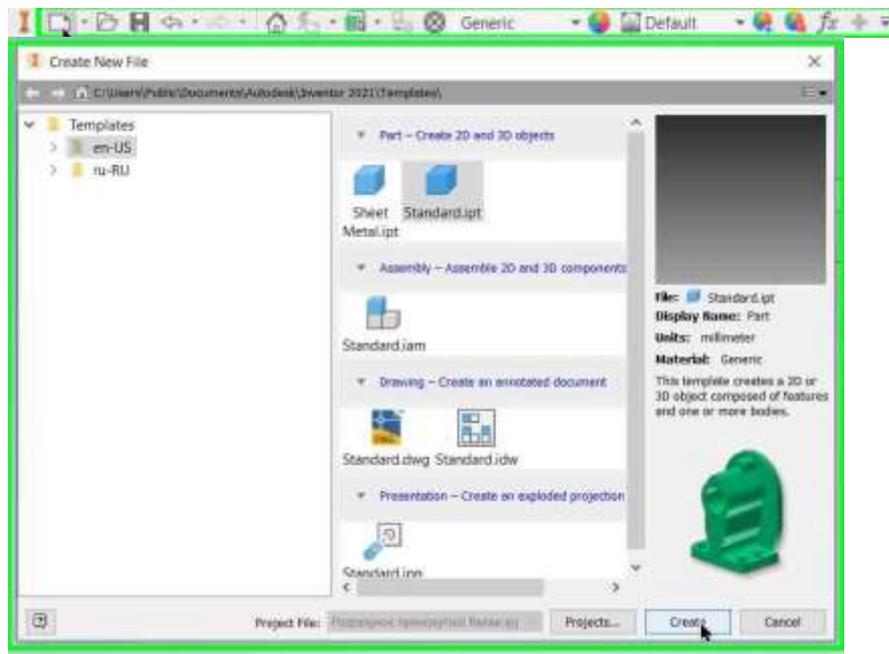


2. Креслимо профіль поперечного перерізу для нижньої частини балки. Тут в нас закладена арматура D12.

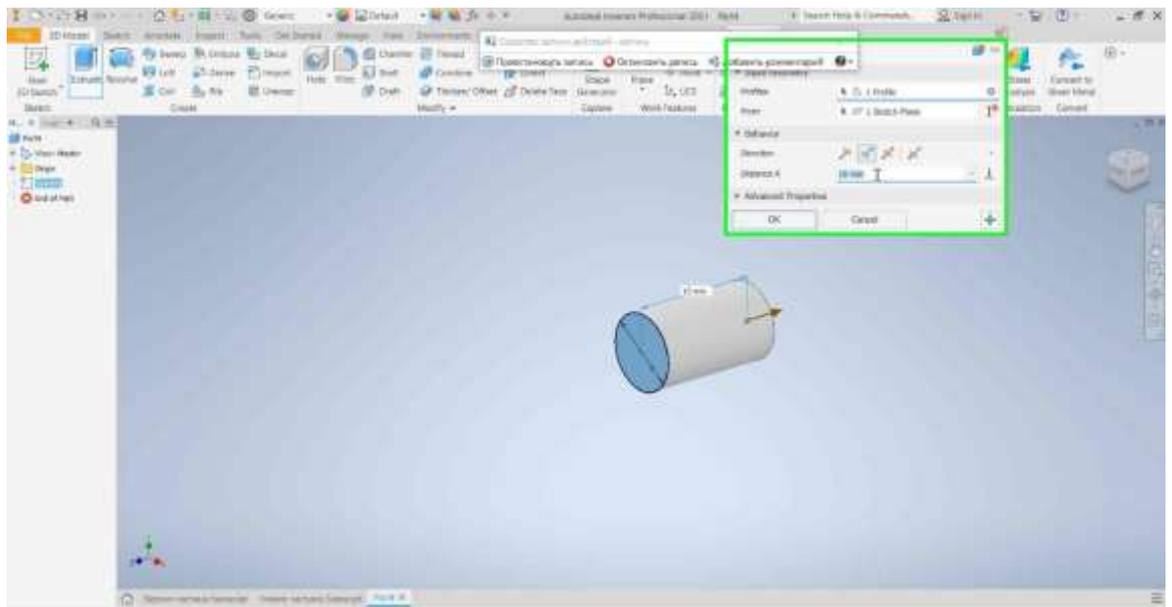


3. Викорстовуємо функцію «Extrude» в панелі «Create», задаємо довжину 1500 мм.

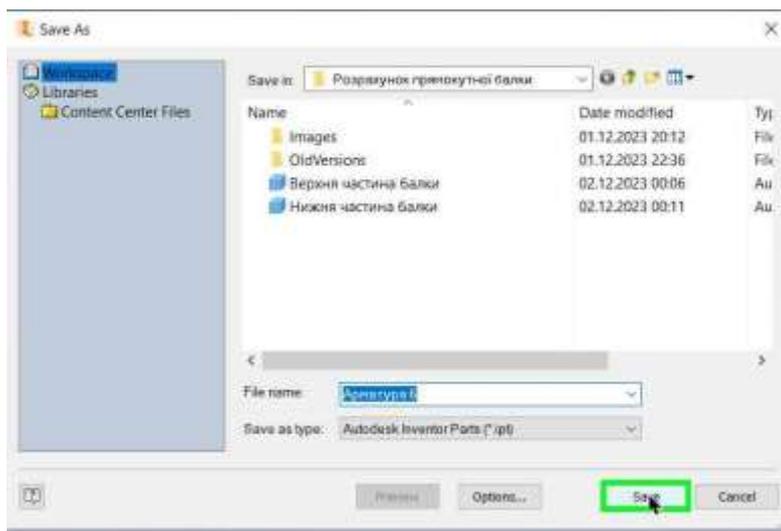
2.1.2 Виокремлення геометрії повногілих арматурних стержнів



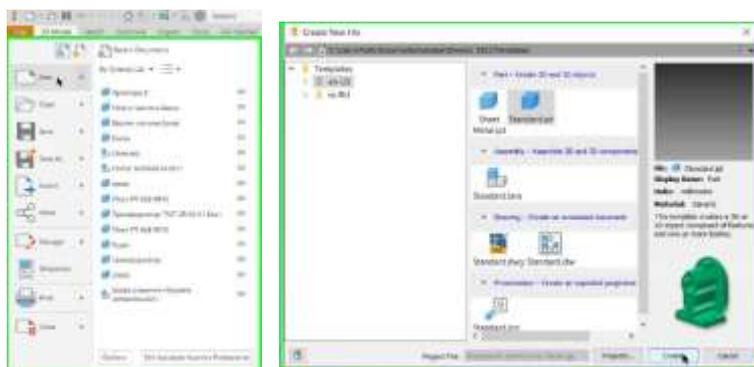
1. Створюємо новий файл деталі, обираємо тип «Standart.ipt», натискаємо «Create».



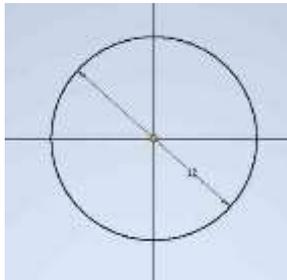
2. Накресливши коло діаметром 6 мм, виходимо з режиму редагування ескізу, та використовуємо функцію «Extrude», задаємо величину 1500 мм.



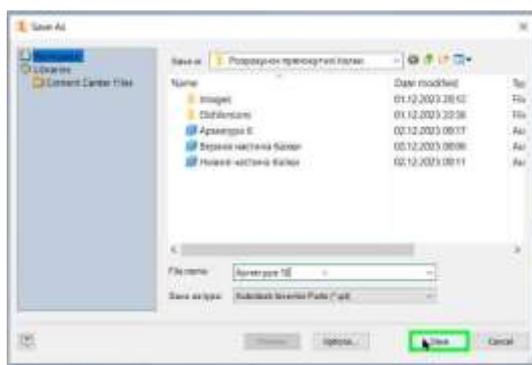
3. Зберігаємо файл деталі до папки з нашим файлом проекту.



4. Створюємо новий файл деталі. В панелі «File» Обираємо вкладку «New». В вікні що відкрилось обираємо шаблон «Standart.ipt» та натискаємо «Create».

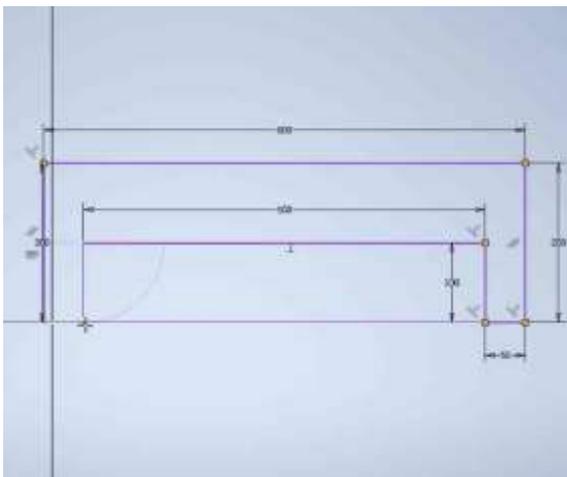
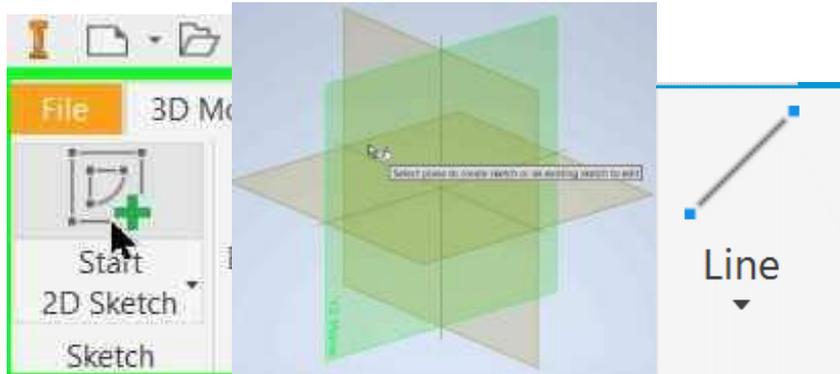


5. Накресливши коло діаметром 12 застосовуємо функцію «Extrude», обравши геометрію видавлювання вводимо параметр 1500 мм. «OK»

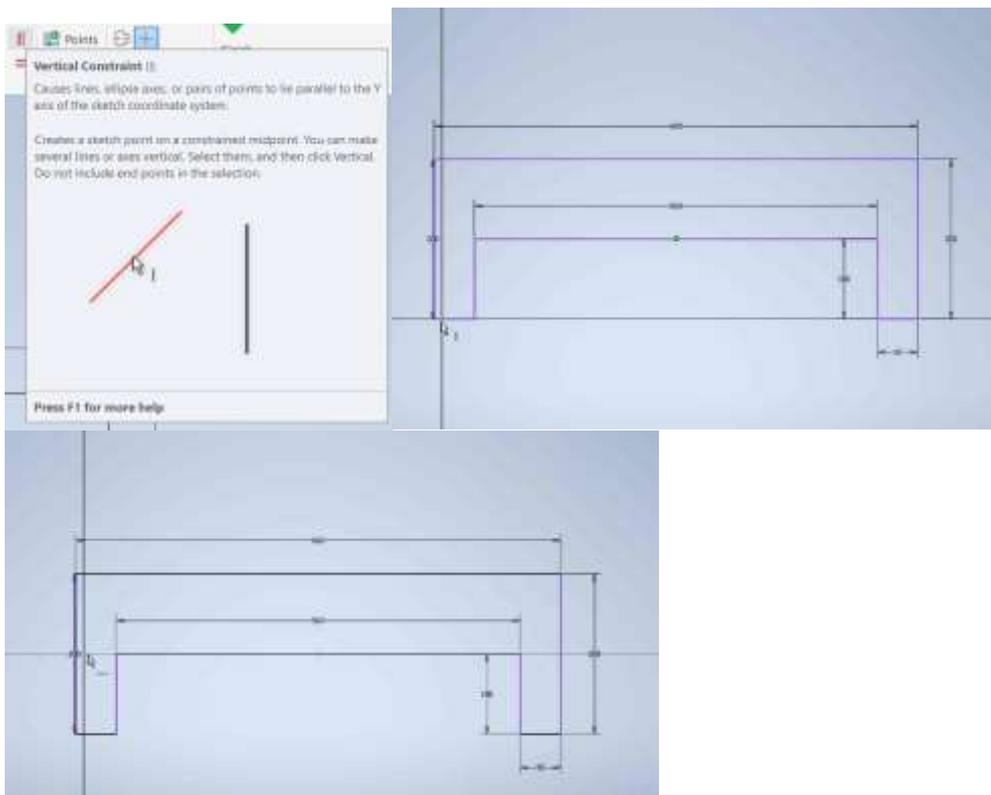


6. Зберігаємо файл деталі до папки з нашим файлом проекту.

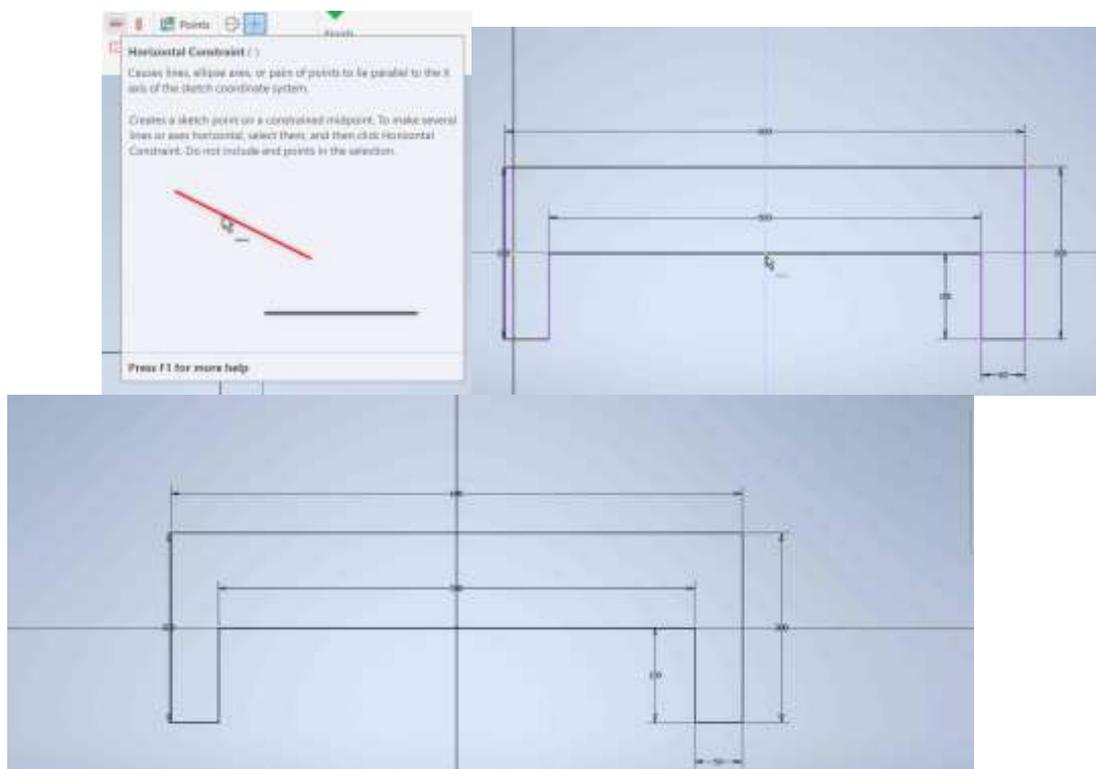
2.1.3 Задавання геометричних параметрів опор балки та траверси завантаження



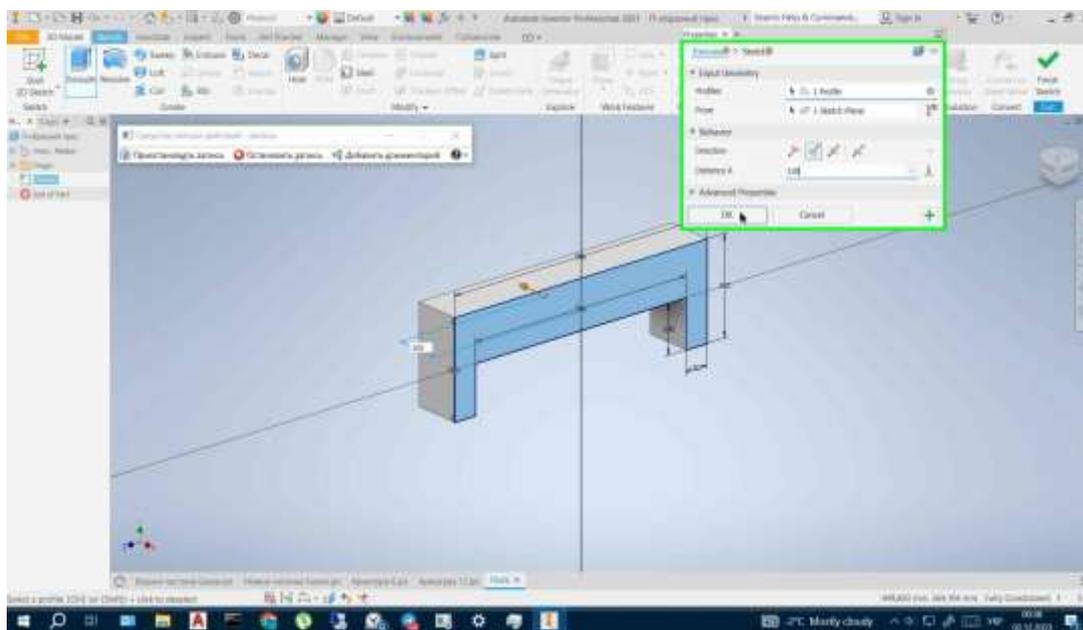
1. Створивши новий файл, натискаємо «Start 2D Sketch», обравши площину, креслимо профіль траверси для навантаження за допомогою функції «Line»



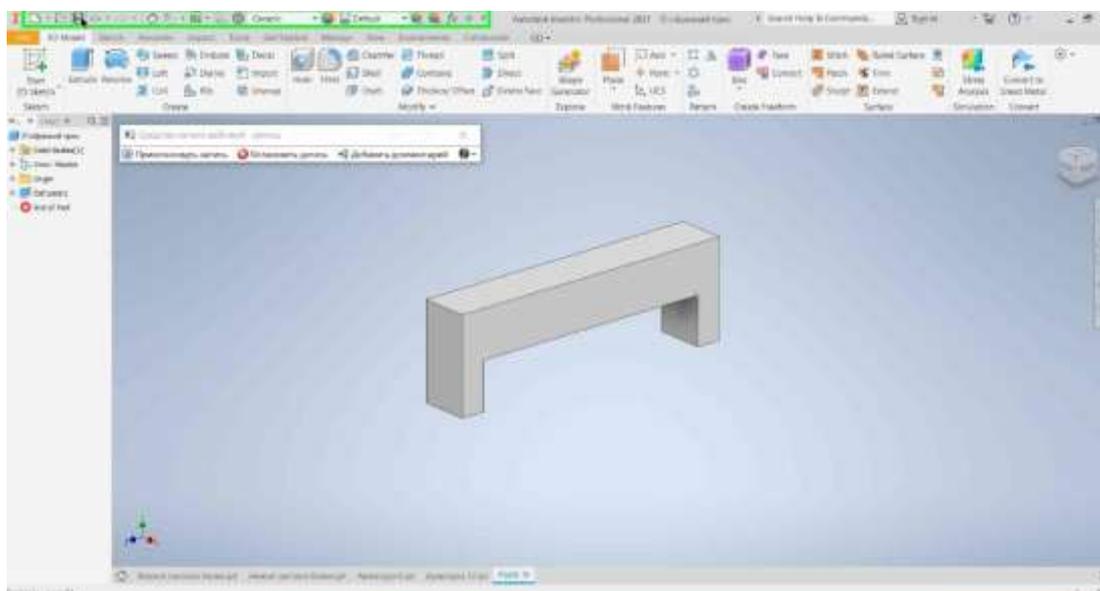
2. У вкладці «Constraint», обираємо «Vertical constraint», прив'язуємо залежність вертикальності нашої геометрії до нульової точки координат.

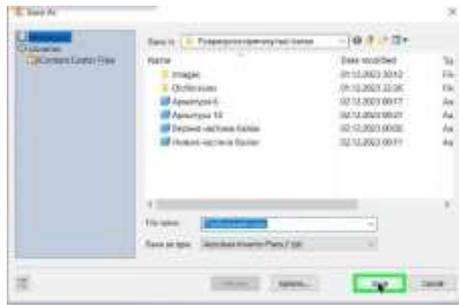


3. У вкладці «Constraint», обираємо «Horizontal constraint», прив'язуємо залежність вертикальності нашої геометрії до нульової точки координат. Отримуємо геометрично визначену геометрію.

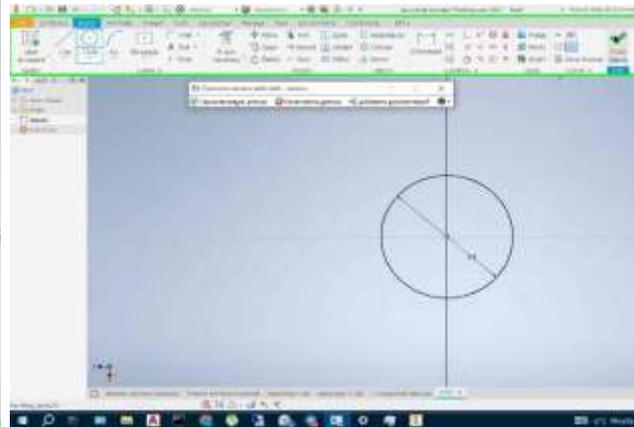
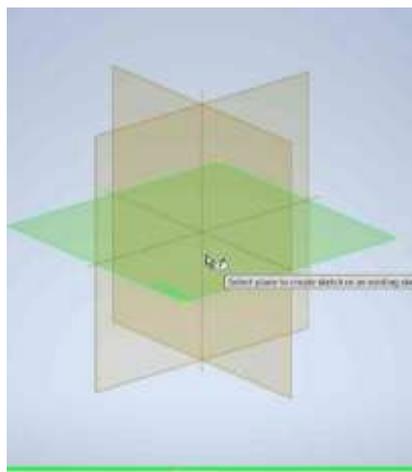
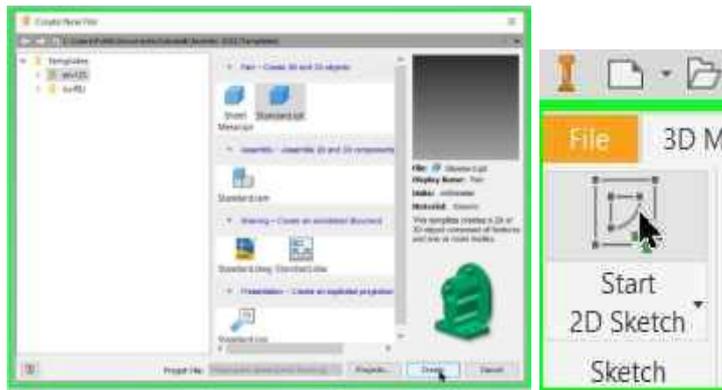


4. В панелі «3D model» натискаємо «Extrude», обираємо ескіз нашої геометрії, та вводимо довжину «видавлювання» 100 мм.

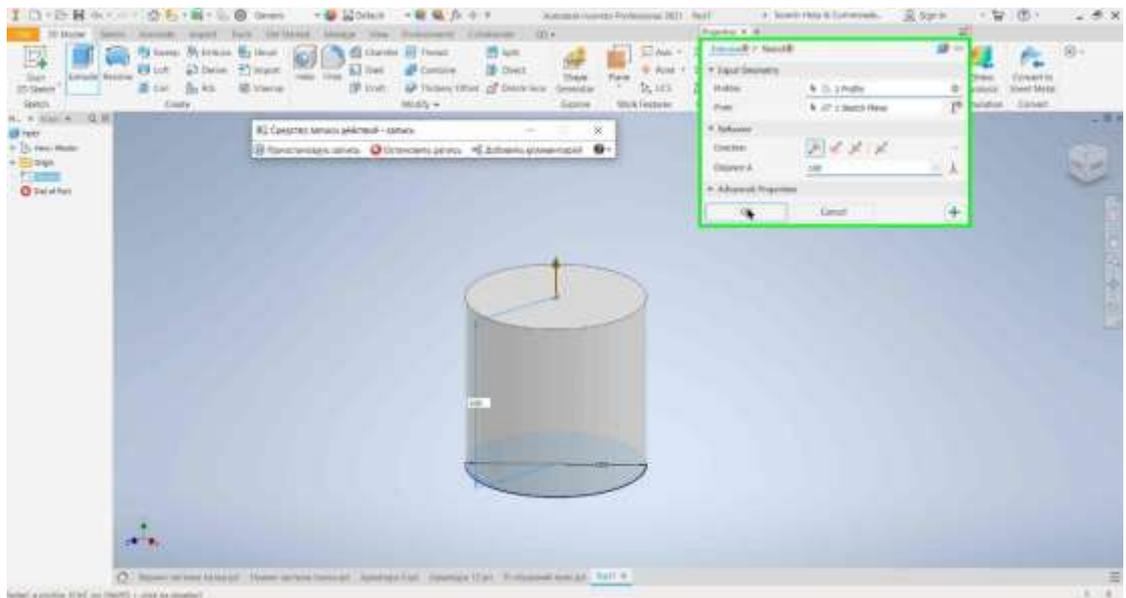




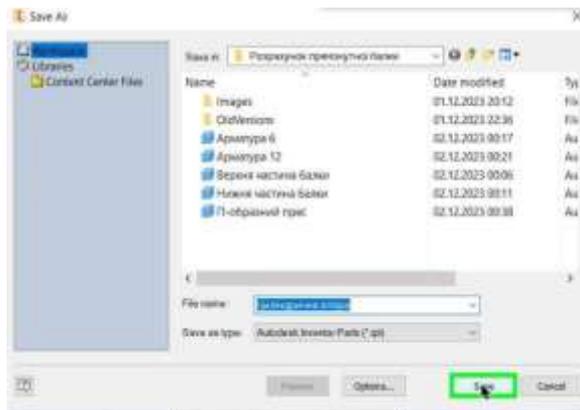
5. Зберігаємо файл деталі до папки з нашим файлом проекту.



6. Створюємо новий файл деталі по шаблону «Standart», натискаємо «Start 2D Sketch» обравши площину та креслимо геометрію нашої опори за допомогою функції «Circle».



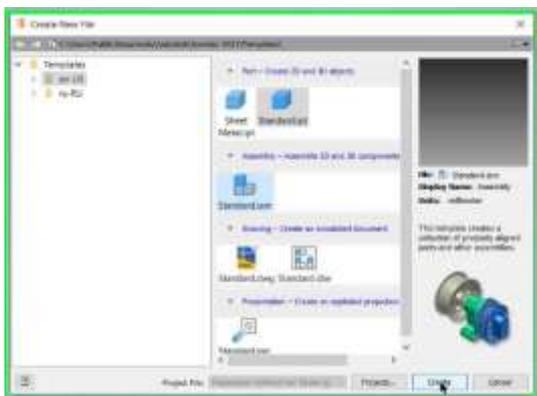
7. В панелі «3D model» натискаємо «Extrude», обираємо ескіз нашої геометрії, та вводимо довжину «видавлювання» 100 мм.



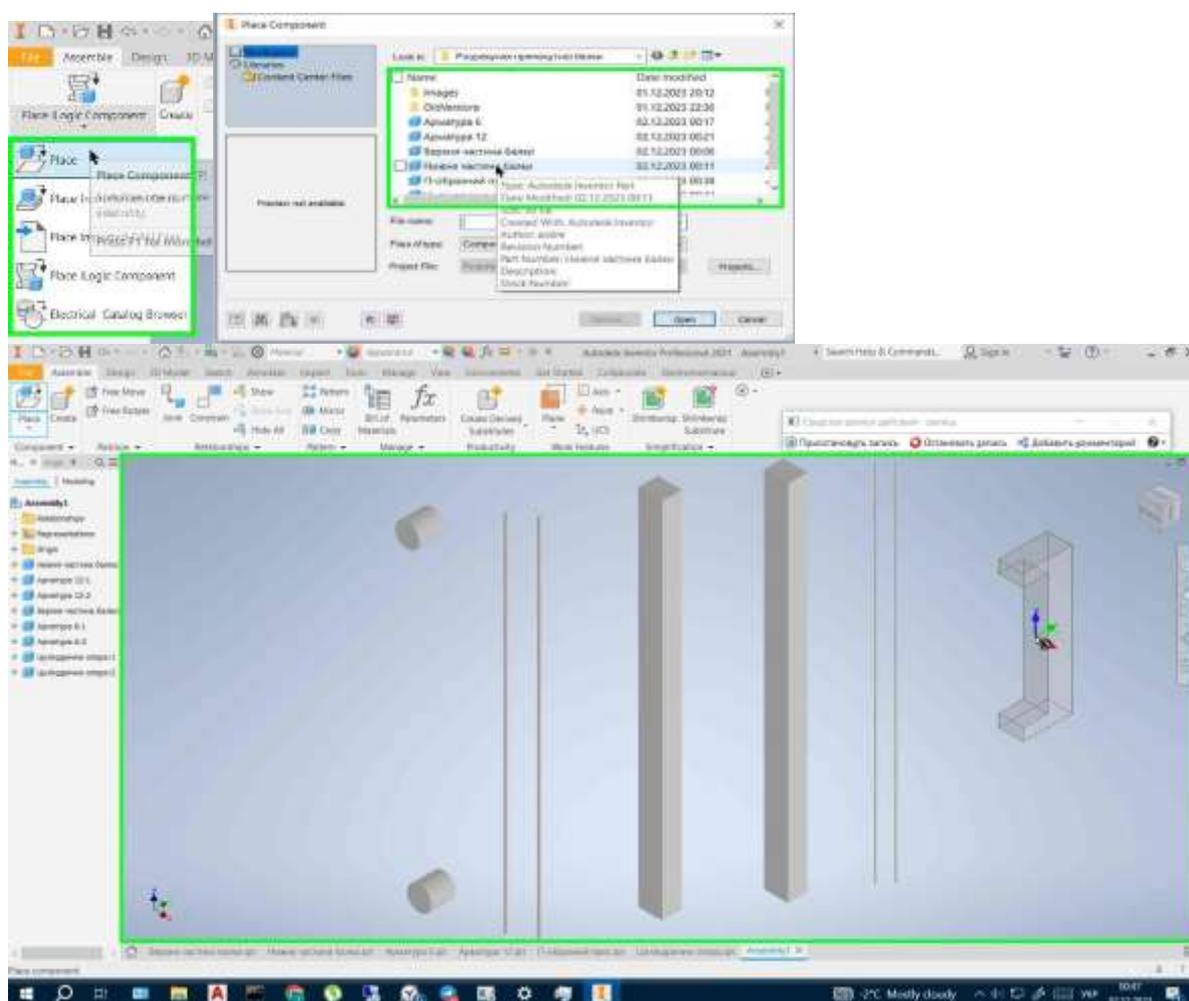
8. Зберігаємо файл деталі до папки з нашим файлом проекту.

2.2 Створення скінченно-елементної моделі балки

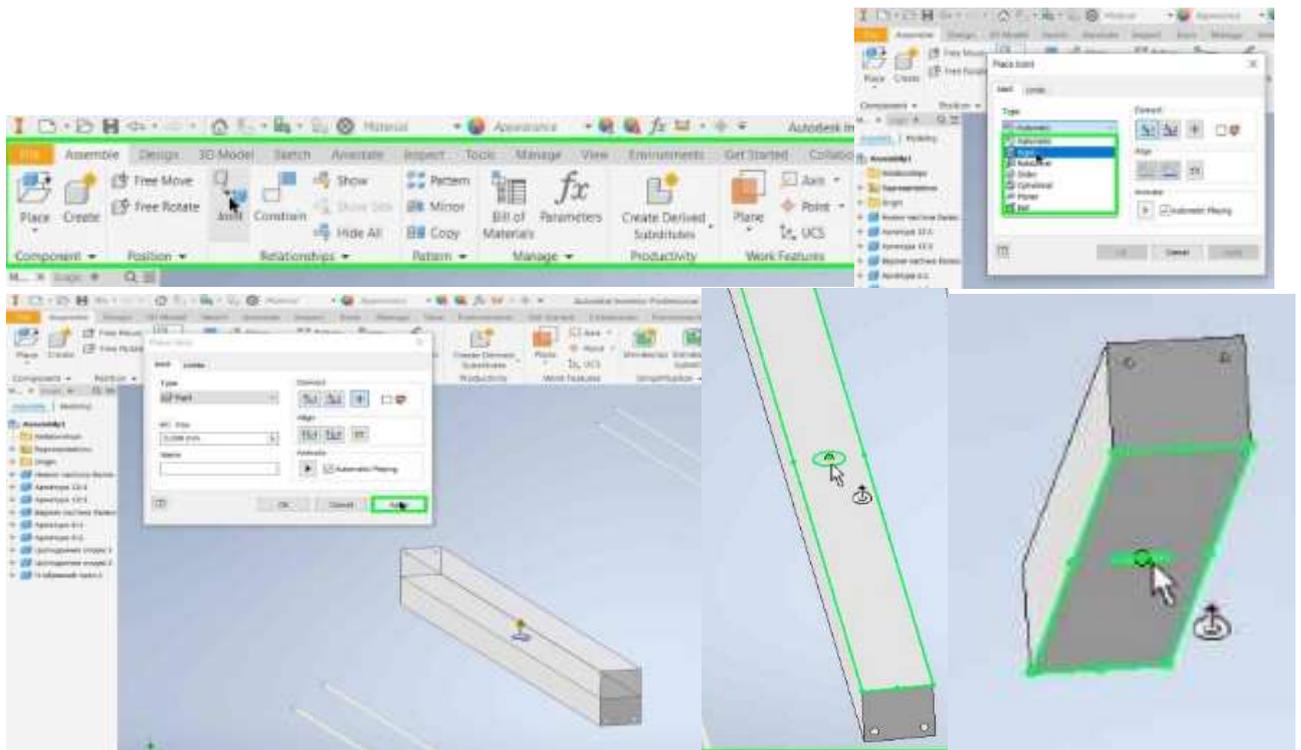
2.2.1 Збірка прямокутної балки



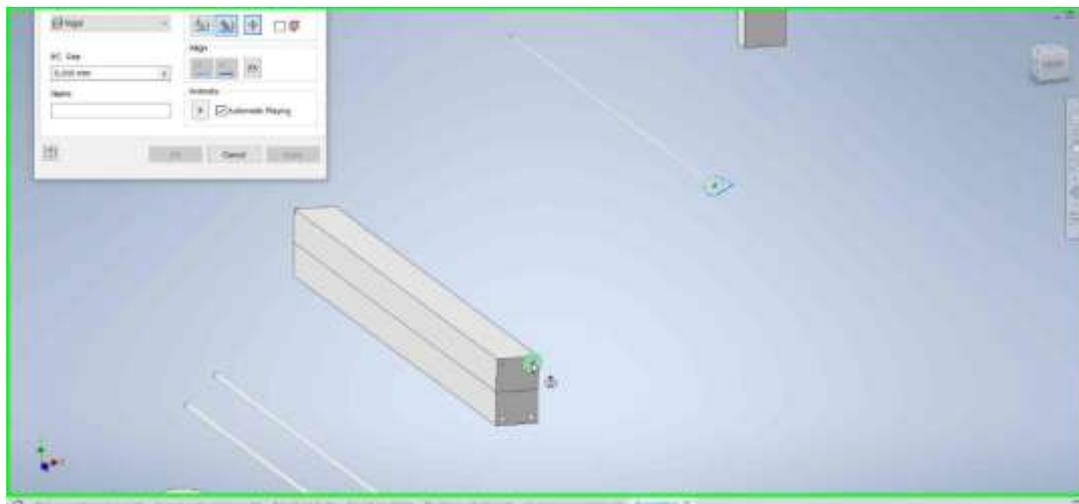
1. Створюємо новий файл збірки обравши «Standart.ipt»



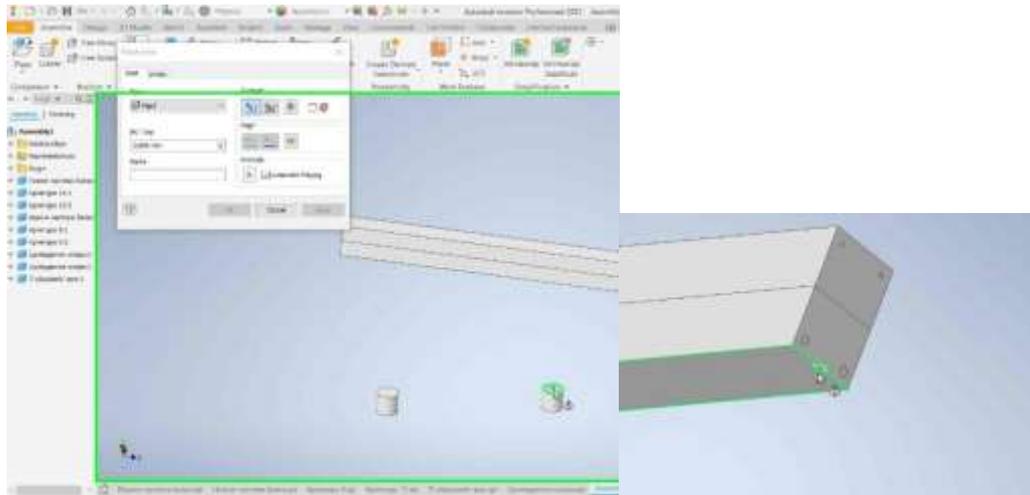
2. У вкладці «Assemble» обираємо «Place». У вікні що відкрилось, обираємо наші деталі, та розташовуємо їх в нашому робочому просторі.



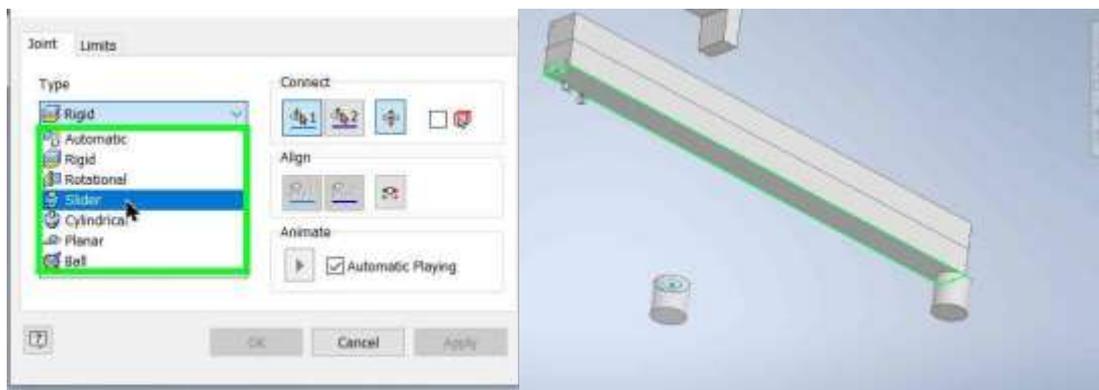
3. Обираємо функцію «Joint». У вікні обираємо тип з'єднання «Rigid», та обираємо 2 площини деталей для з'єднання. «Apply». Та обираємо наступну пару граней.



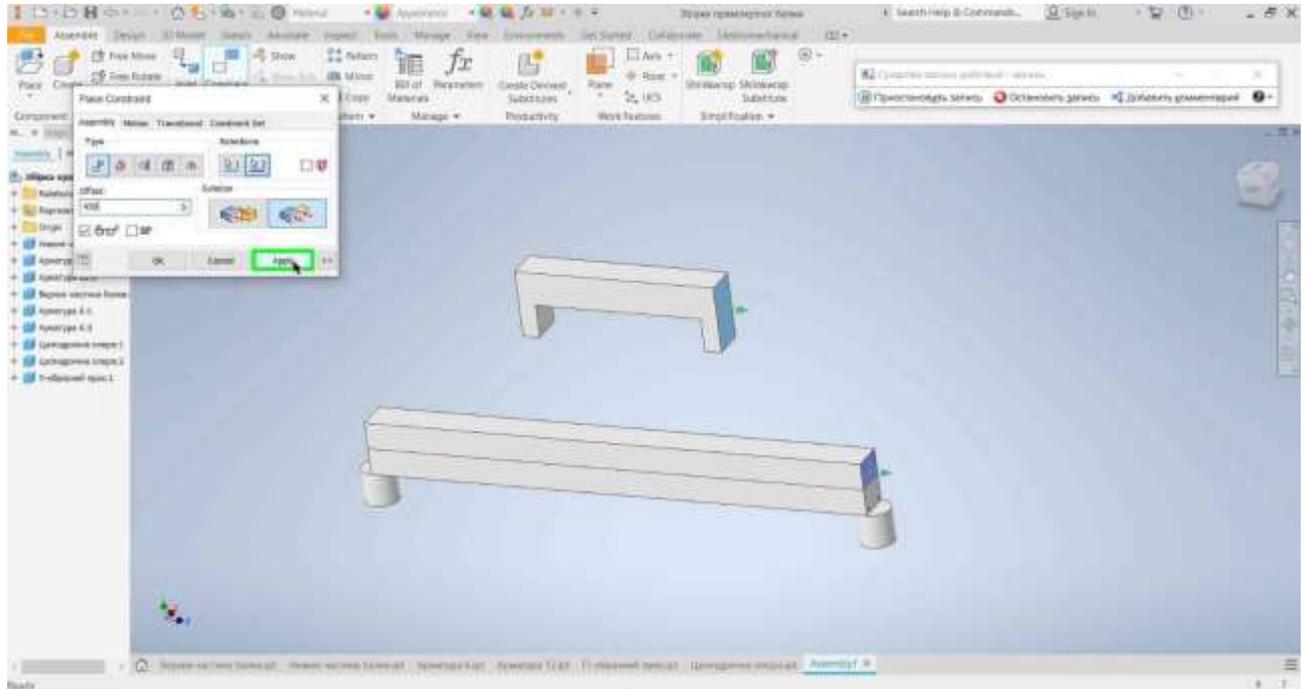
4. Встановлюємо арматуру в тіло бібетонної балки.



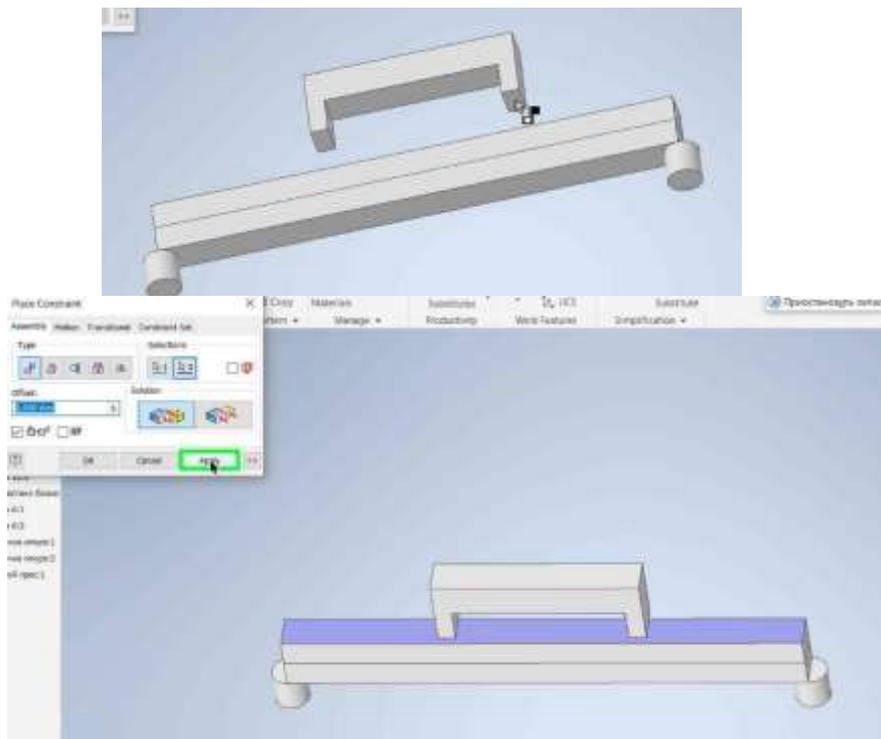
5. Прив'язуємо опору, обравши «Rigid» з'єднання. Натискаємо «Apply» переходимо до зв'язування наступної опори.



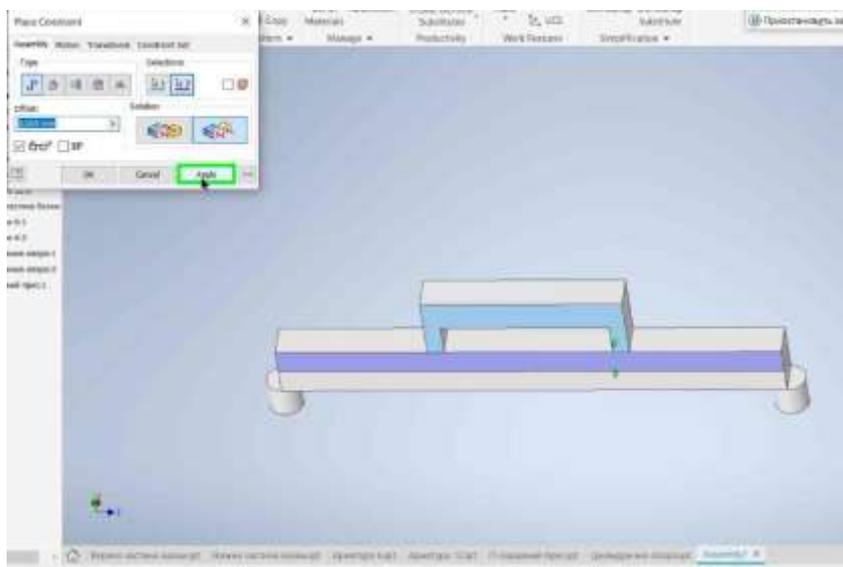
6. Змінюємо тип з'єднання на «Slide», та приєднуємо другу опору до балки.



7. Налаштовуємо взаємозв'язок нашої траверси за допомогою «Constraint» тип з'єднання «Mate», рішення «Flush», обравши площини виставляємо зміщення в 450 мм. Приймаємо взаємозв'язок натиснувши «Apply». Таким чином ми змістили траверсу до центру балки.

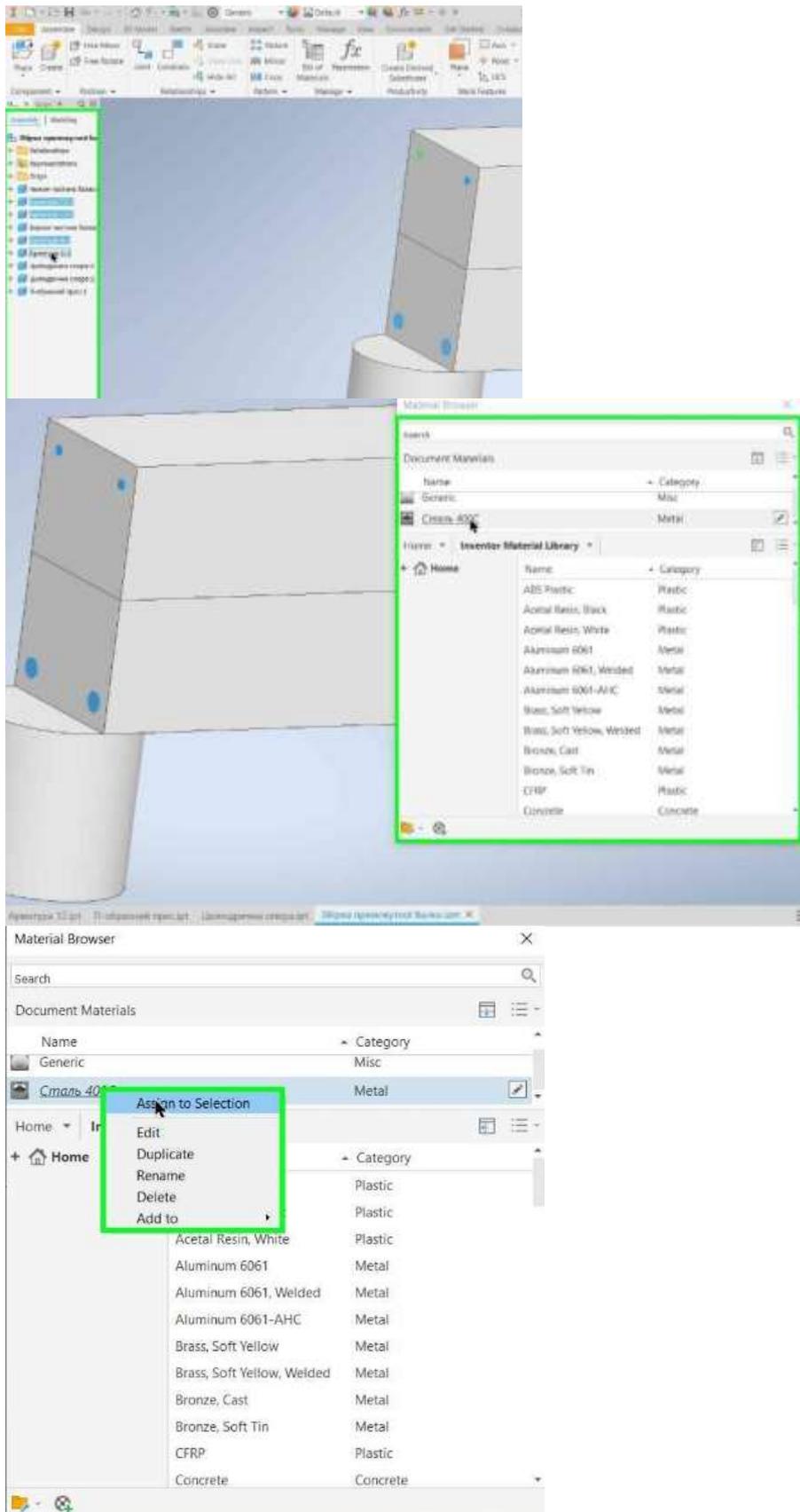


8. Обираємо пару площин, які будуть контактувати з балкою. Цього разу обираємо тип та рішення відношення «Mate». Застосовуємо з'єднання натиснувши «Apply».



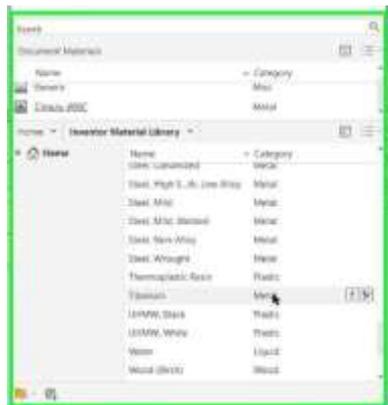
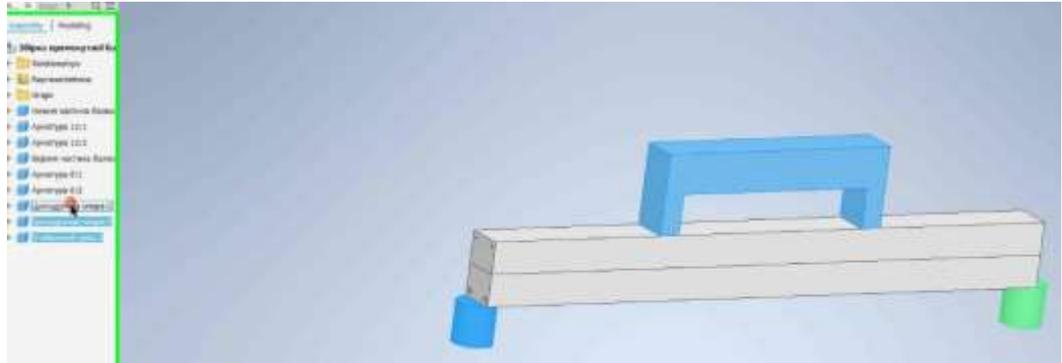
9. Перемкнувшись на рішення «Flush», виставляємо траферсу рівень з балкою, та застосовуємо зміни.

2.2.2 Налаштування властивостей матеріалів балки (бетонів, арматури, траверси завантаження, опор)

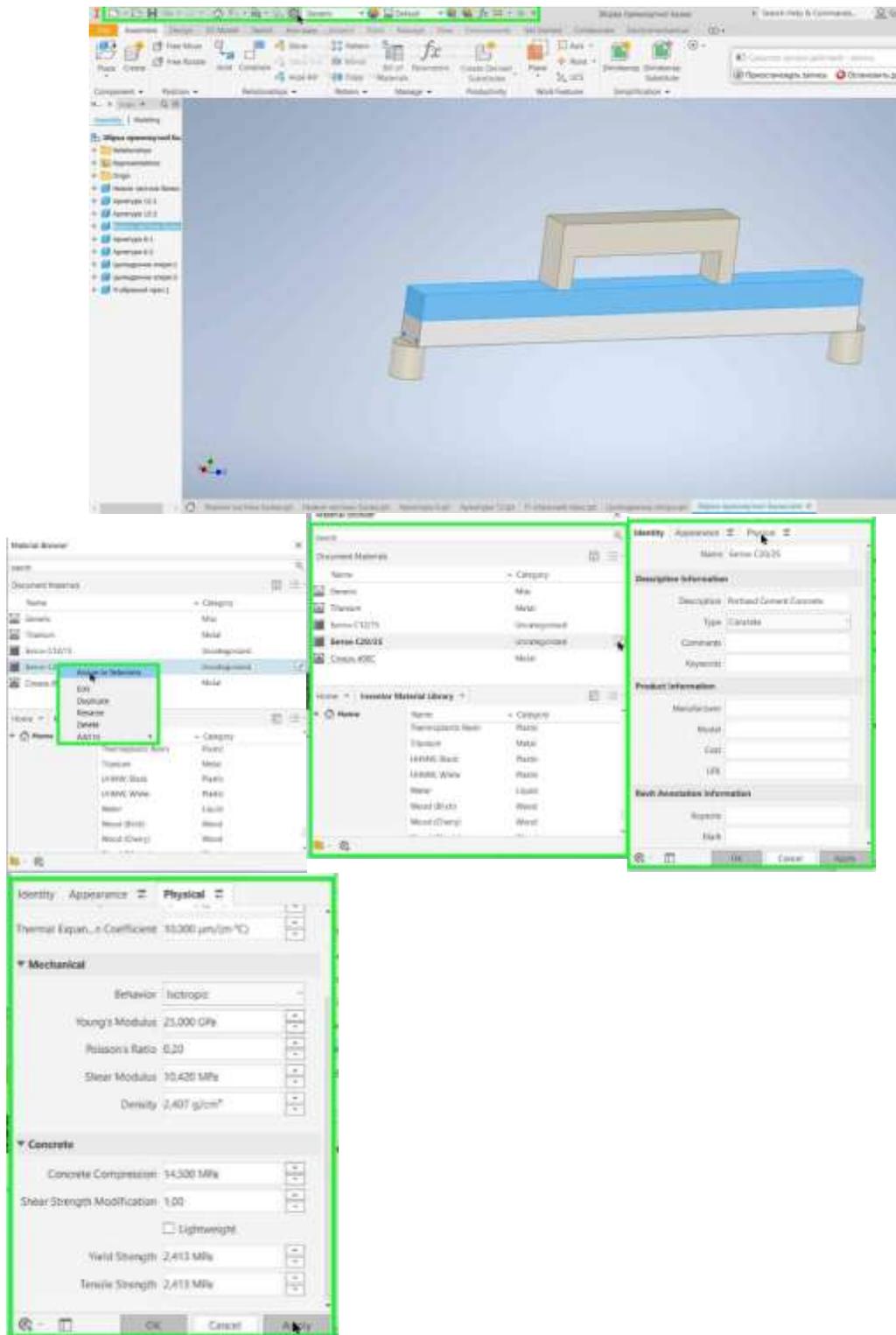


1. В дереві компонентів, виділяємо деталі Арматури затиснувши Ctrl, та в верхній панелі відкриваємо «Material browser». В дереві компонентів знаходимо «Сталь 400С» натиснувши ПКМ натискаємо «Add to» - «Document materials», та обираємо «Assign to selection».

Властивості матеріалу арматури застосова

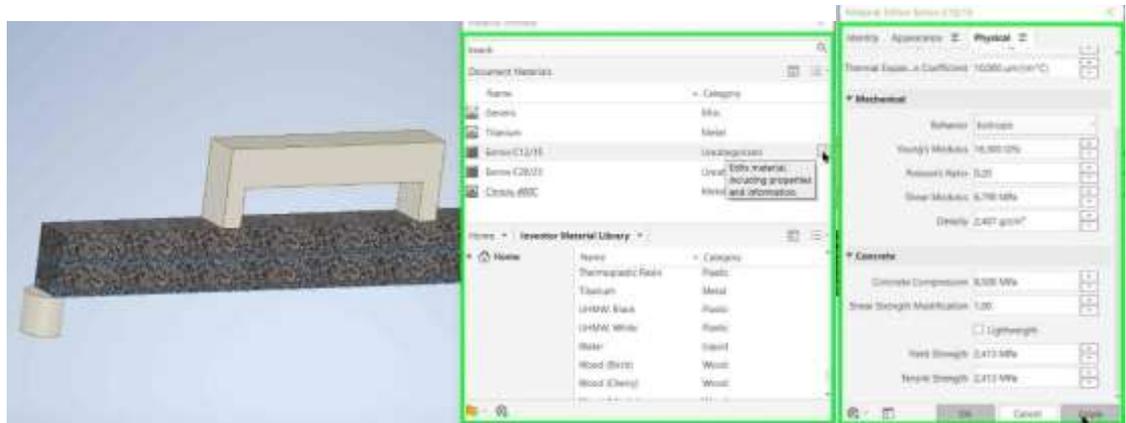


2. Тепер обираємо опори та траверсу, і в «Material Browser» знаходимо «Titanium», додаємо його в «Document materials» та застосовуємо ці властивості матеріалу.



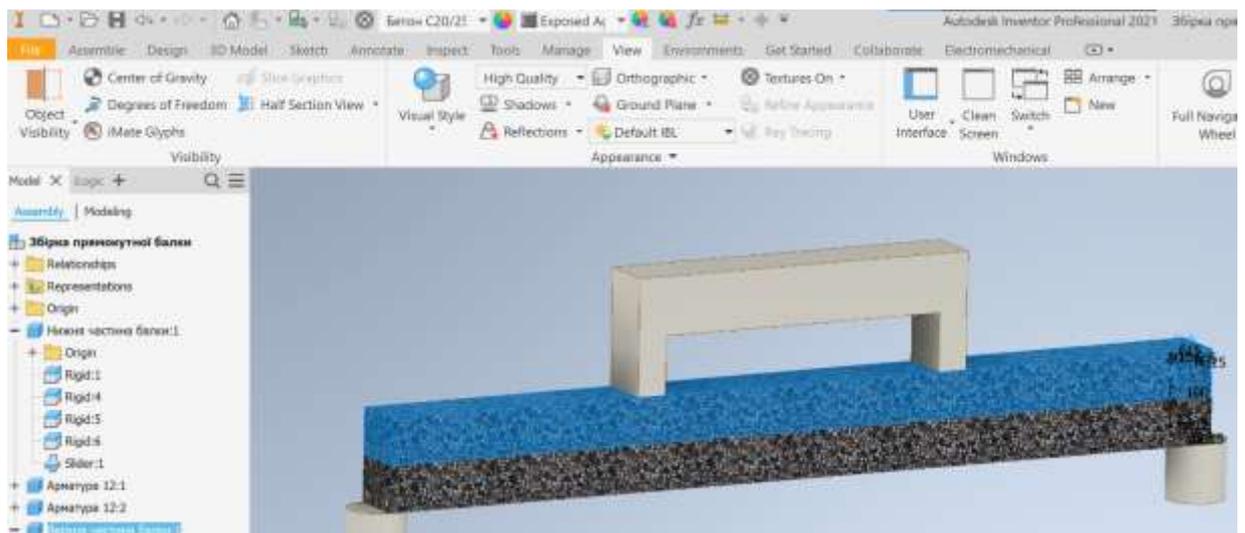
3. Обираємо верхню частину балки та задаємо для неї властивості матеріалу «Бетон C20/25» та «Бетон C12/15» , додаємо його в «Document materials» та застосовуємо «Бетон C20/25». Та перевіряємо введені фізичні параметри для матеріалу. Натиснувши

на «Edit materials». У вкладці «Material Edit» відчиняємо вкладку Physical, де ми можемо редагувати фізичні властивості матеріалу.

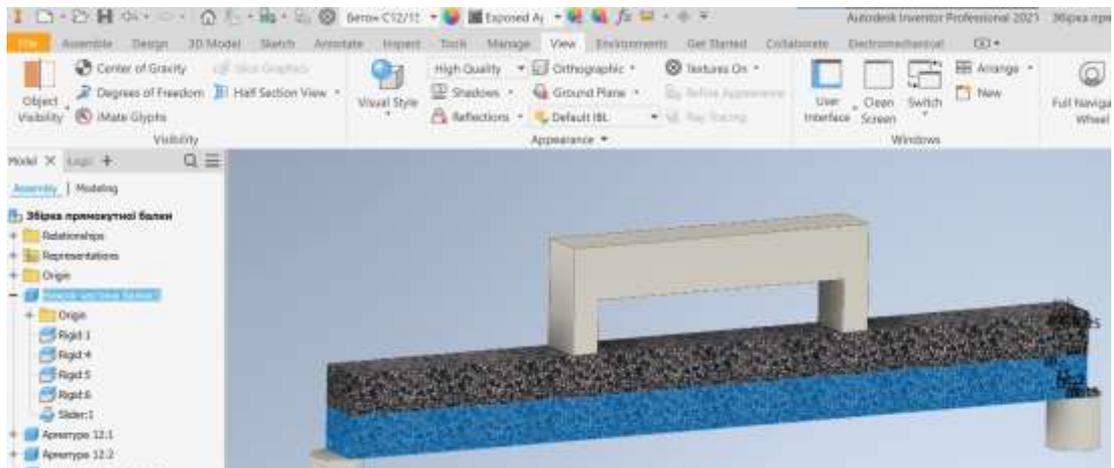


4. Обравши нижню частину балки, застосовуємо для неї властивості бетону C12/15, та перевіряємо фізичні характеристики бетону в «Material Edit»

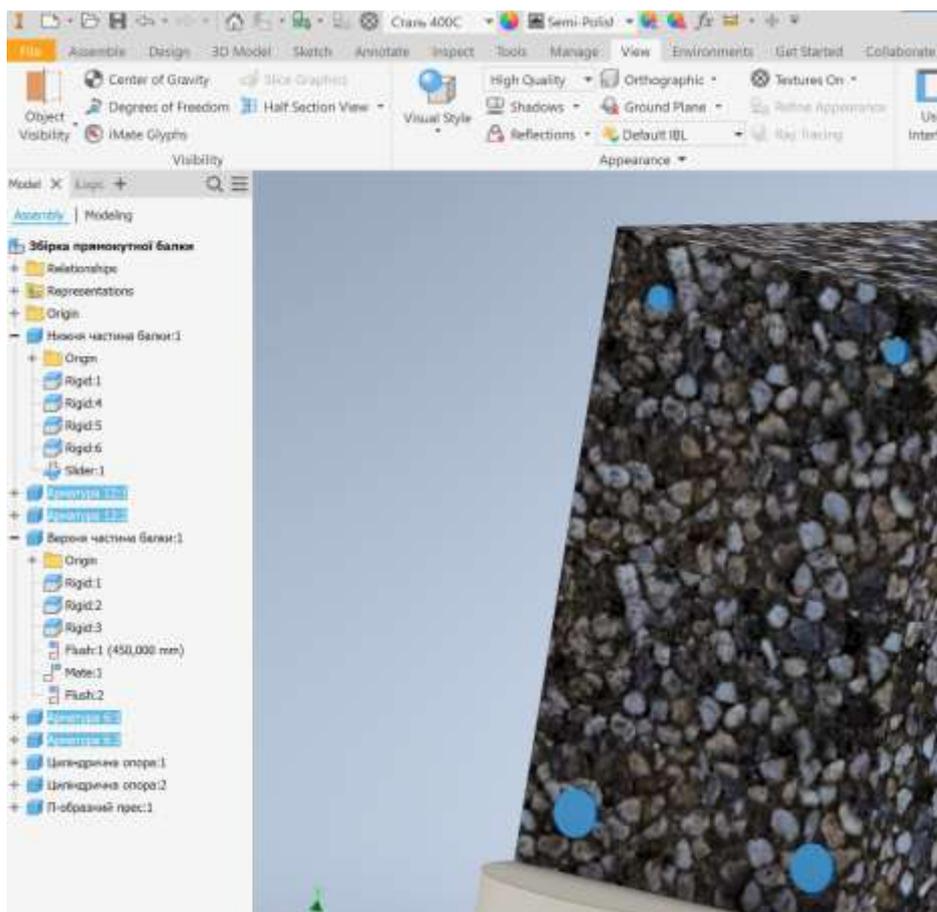
2.2.3 Перевірка відповідності створеної моделі передбачуваним характеристикам, та параметризація геометрії тіл.



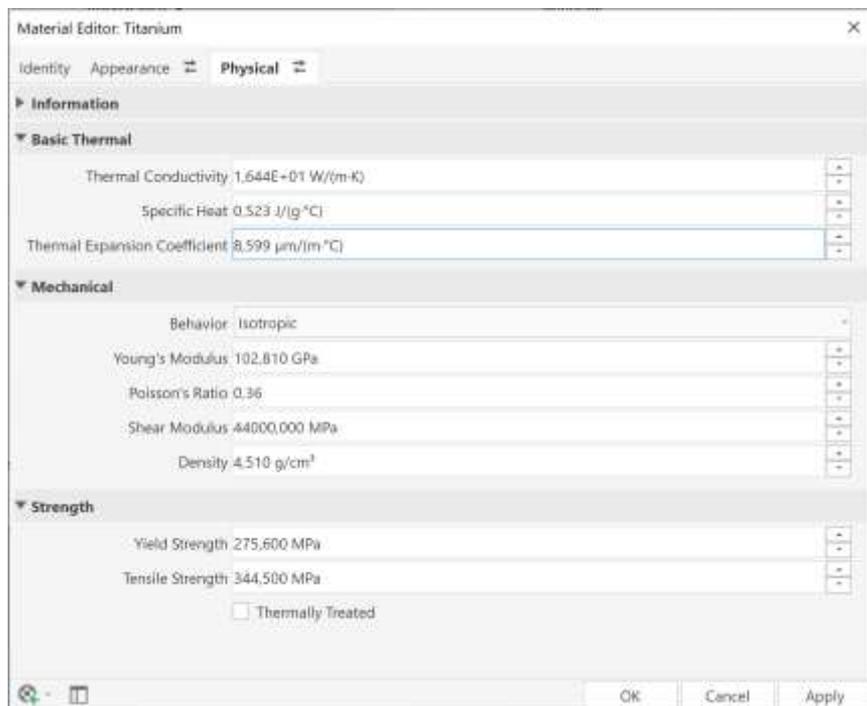
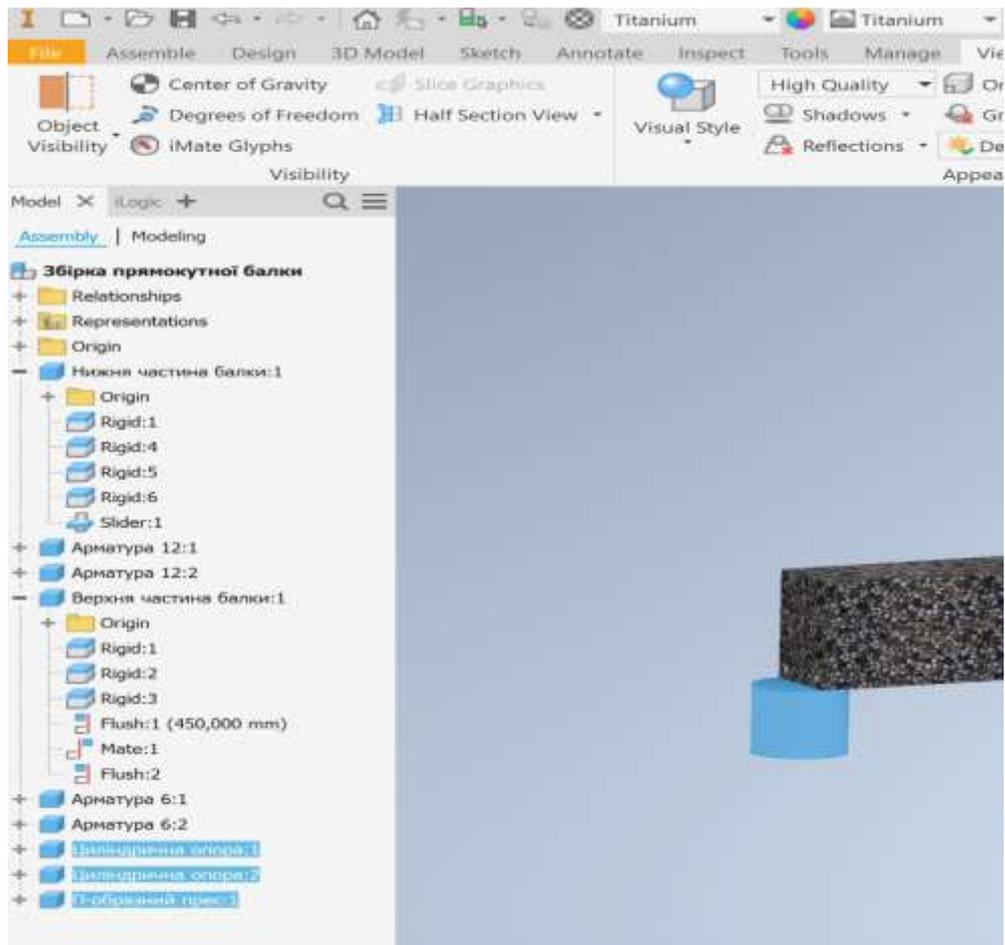
1. Відкривши браузер матеріалів ми можемо побачити всі застосовані матеріали в збірці. Виділивши верхню частину бетонної балки ми бачимо, в браузері виділений «Бетон C20/25»



2. Натиснувши на нижню частину балки, виділяється «Бетон C12/15»



3. Тіла арматури мають властивість «Сталь 400С»



А для опор та траверси були застосовані властивості матеріалу «Titanium», так як його фізичні властивості дозволяють знехтувати його можливими деформаціями.

2.2.3.1 Параметризація

1. Оскільки для проведення аналізу, нам необхідно буде змоделювати балки з різним співвідношенням бетонів, то на цьому етапі ми

параметризуємо нашу збірку відкривши вкладку з параметрами.



Parameters

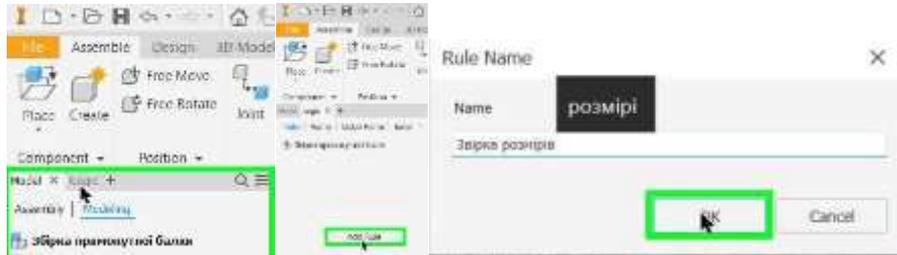
Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation
d5	Rigid:6	mm	0,000 mm
d6	Slider:1	mm	0,000 mm
d5 is consumed by Rigid:6 1		mm	0,117 mm
d8	Flush:1	mm	450 mm
d9	Mate:1	mm	0,000 mm
d10	Flush:2	mm	0,000 mm
sa_0		N	10000 N
User Parameters			
Нверх		mm	80 mm
Нниз		mm	80 mm
Статичний Аналіз балки			
sa_0		N	10000 N

Buttons: Add Numeric, Update, Purge Unused, Import from XML, Link, Immediate Update, Export to XML

За допомогою програми Inventor можна створювати та редагувати текстові параметри і параметри типу "true/false", окрім стандартних параметрів. Текстові параметри є символічними параметрами, тоді як параметри типу "true/false" містять логічне значення True або False. Обидва типи параметрів можна використовувати в правилах. Це дозволяє використовувати параметри Inventor або будь-які інші параметри, які використовуються за допомогою правил. У правилах ці параметри представлені стандартними типами VB.NET String і Boolean.

Нам необхідно буде змінювати всього 2 параметри це висота верхньої частини балки, та нижньої. В файлі збірки відображаються лише параметри взаємозв'язків та співвідношень деталей між собою, але не самі параметри

геометрії тіл, тож додаємо в цей список 2 цифрових параметра називаємо «Нверх» і «Нниз». Переходимо у вкладку iLogic та натиснувши ПКМ натискаємо «Add Rule». Я назвав його «Звірка розмірів».

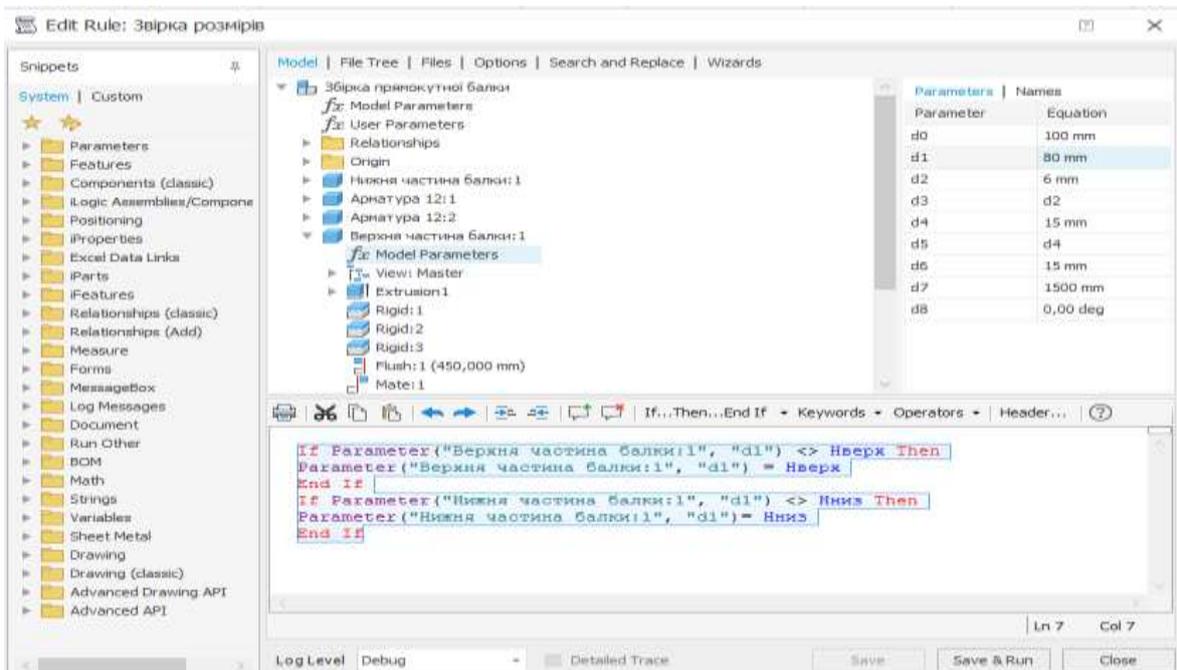


2. В дереві вибору параметрів моделі ми можемо знайти необхідний нам параметр для зв'язування його в формі, яка буде створена для зміни геометрії з файлу збірки. То пропишемо декілька рядків:

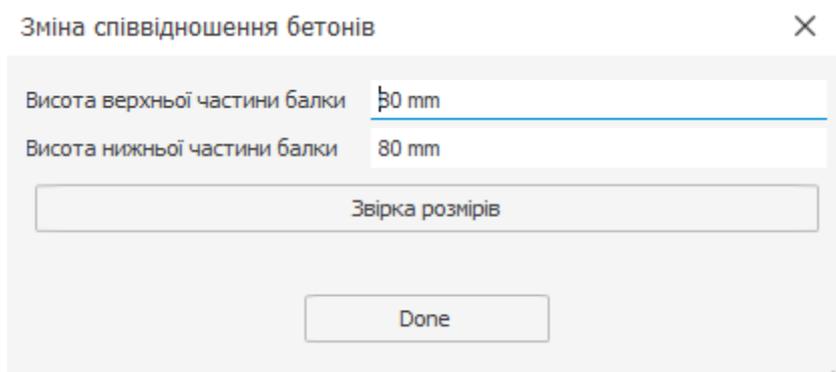
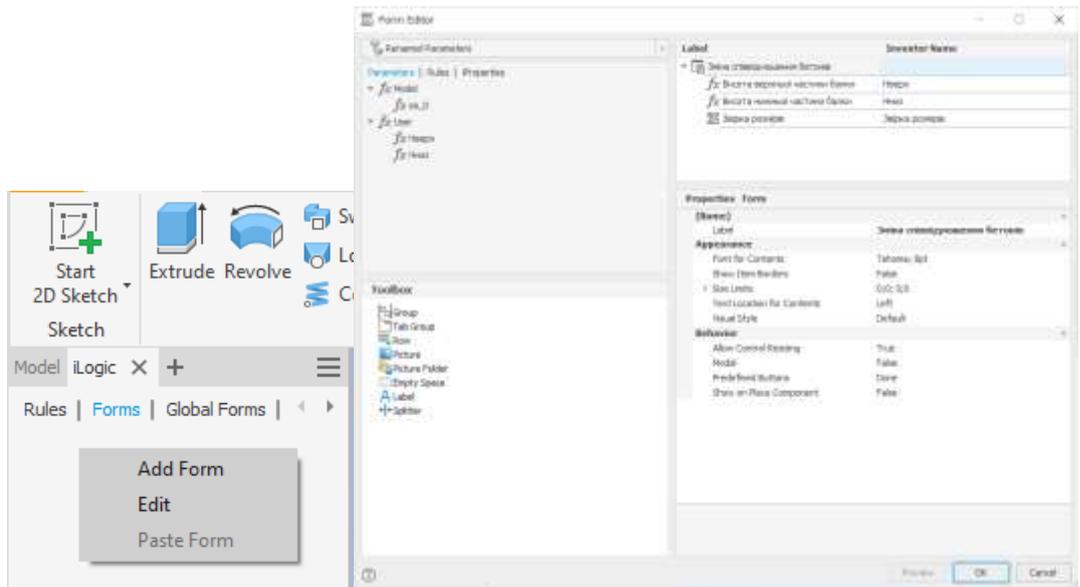
```
If Parameter("Верхня частина балки:1", "d1") <> Нверх Then
Parameter("Верхня частина балки:1", "d1") = Нверх
End If
```

```
If Parameter("Нижня частина балки:1", "d1") <> Нниз Then
Parameter("Нижня частина балки:1", "d1")= Нниз
```

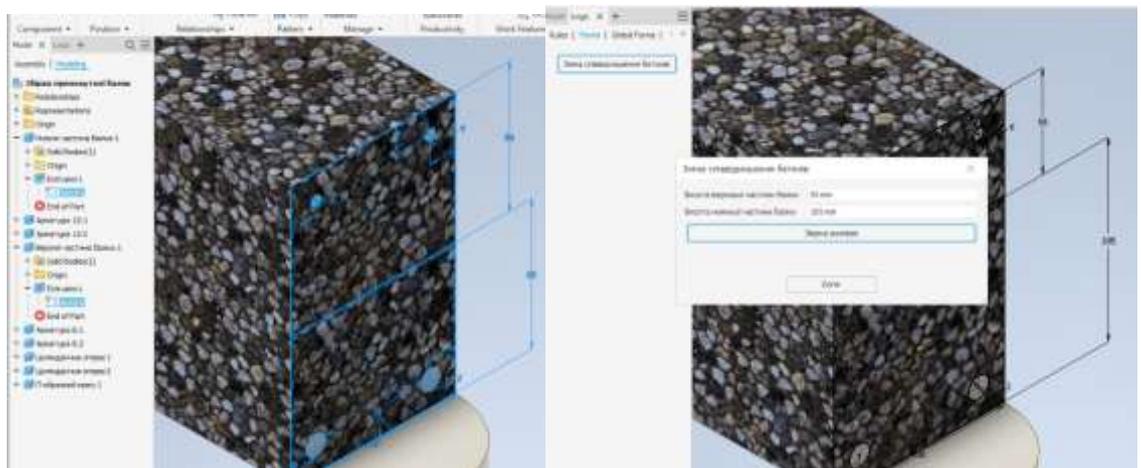
End If



3. Створюємо форму натискаємо ПКМ у вікні форми, та створюємо форму в яку закидуємо 2 параметри та наше правило



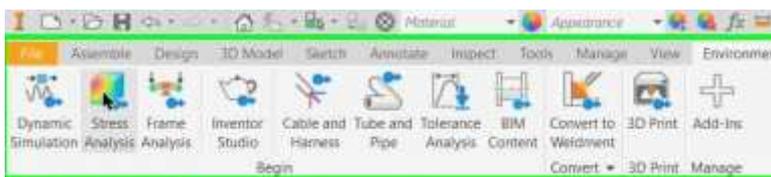
4. Зробимо видимими ескізи бетонної балки, для наглядності зміни її геометрії. Для цього оберемо ескізи моделі балок, скористаємось комбінацією Alt+V.



2.2.4 Налаштування характеристик розрахунку



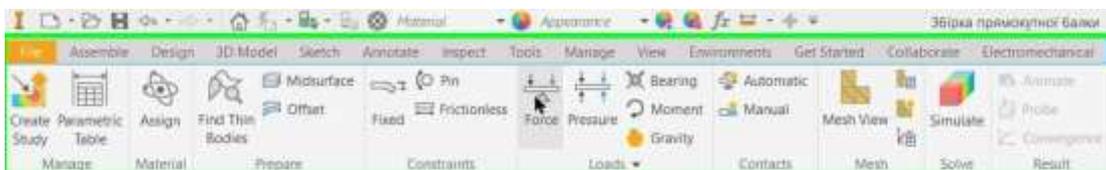
1. Переходимо до панелі «Environments»



2. Обираємо «Stress Analysis»



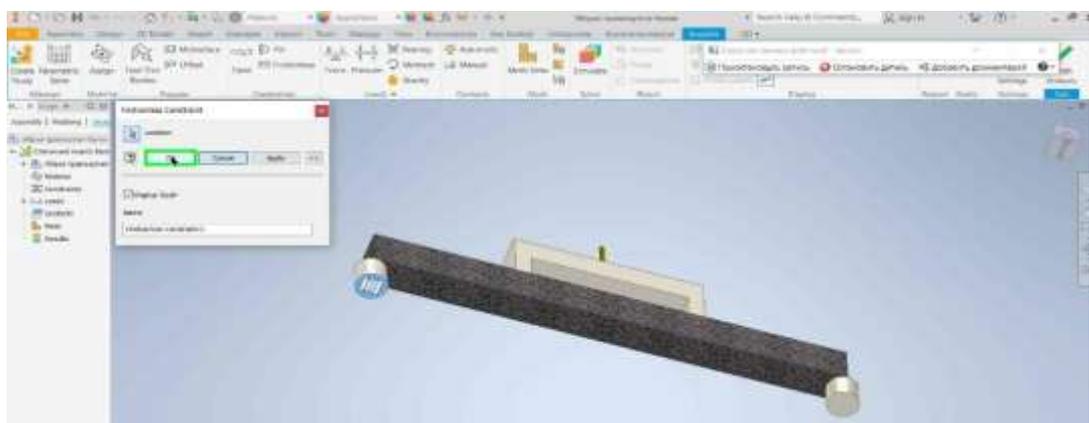
3. Натискаємо «Create Study», вводимо назву «Статичний аналіз балки», та натискаємо «ОК»



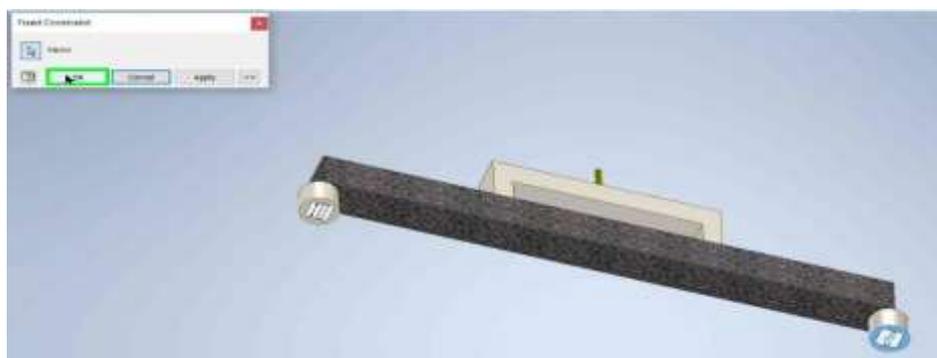
4. Створюємо навантаження натиснувши на «Force».



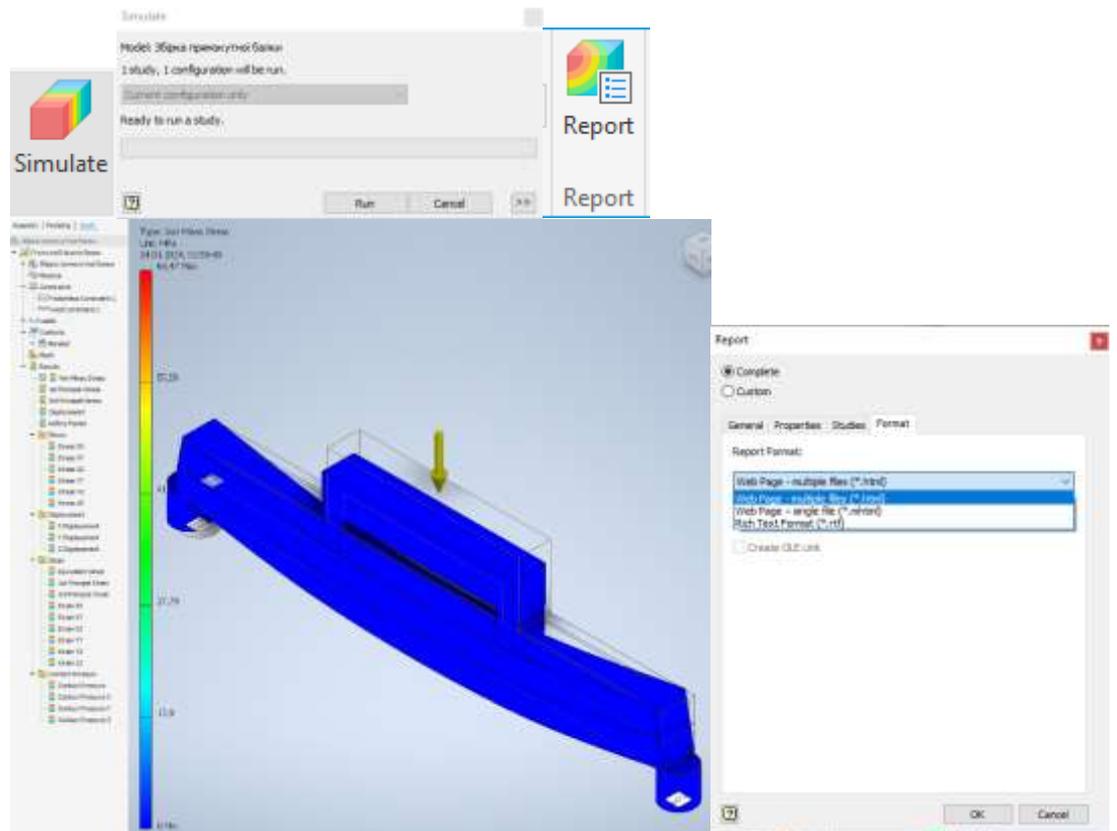
5. Обираємо площину, до якої буде прикладатись сила, та вводимо величину в 10000 Н.



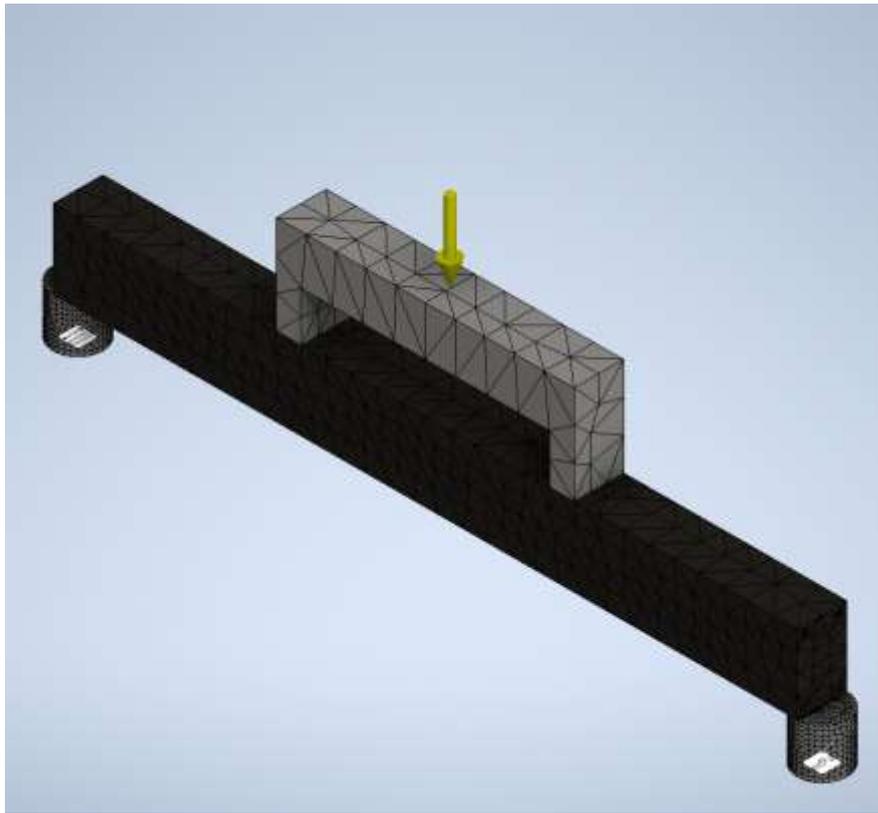
6. В панелі «Constraints» , обираємо «Frictionless» щоб призначити шарнірно рухому опору, та обираємо одну з циліндричних опор.



7. В панелі «Constraints», обираємо «Fixed» прив'язуємо другий циліндр як шарнірно нерухому опору.



8. Після налаштування характеристик розрахунку, натискаємо на «Simulate»-«Run» та отримуємо результати розрахунку, які ми можемо імпортувати за допомогою кнопки «Report», де ми можемо налаштувати формат імпортування в .html .mhtml .rtf
9. Саме так виглядає розбита на тетраїдри скінченно-елементна модель нашої збірки



Висновки до другого розділу

1. Детально розглянуто алгоритм та виконано створення скінченно-елементної моделі бібетонної армованої балки у програмному комплексі Autodesk Inventor Pro 2021. Просторова скінченно-елементна модель бібетонної армованої балки складалася із двох бетонів та сталевих арматурних стержнів. При цьому геометрія повнотілих арматурних стержнів виокремлювалася із геометрії бетону.
2. Окремо розглянуто створення зовнішньої траверси, через яке передавалося навантаження на модель, а також задавання характеристик опор балки.
3. Створена геометрична модель бібетонної армованої балки розбита на скінченні елементи із заданими фізико-механічними властивостями. Створена скінченно-елементна модель перевірялася на відповідність передбачуваним параметрам.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Загальні дані матеріалів використані в збірці.

Name	Бетон C12/15	
General	Mass Density	2,40731 g/cm ³
	Yield Strength	2,41329 MPa
	Ultimate Tensile Strength	2,41329 MPa
Stress	Young's Modulus	16,3 GPa
	Poisson's Ratio	0,2 ul
	Shear Modulus	6,79167 GPa
Part Name(s)	Нижня частина балки	
Name	Сталь 400C	
General	Mass Density	7,75 g/cm ³
	Yield Strength	689 MPa
	Ultimate Tensile Strength	861,25 MPa
Stress	Young's Modulus	206,7 GPa
	Poisson's Ratio	0,27 ul
	Shear Modulus	81,378 GPa
Part Name(s)	Арматура 12 Арматура 12 Арматура 6 Арматура 6	
Name	Бетон C20/25	
General	Mass Density	2,40731 g/cm ³
	Yield Strength	2,41329 MPa
	Ultimate Tensile Strength	2,41329 MPa
Stress	Young's Modulus	25 GPa
	Poisson's Ratio	0,2 ul
	Shear Modulus	10,4167 GPa
Part Name(s)	Верхня частина балки	

3.1 Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 80-80

Results

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force	Reaction Moment
-----------------	----------------	-----------------

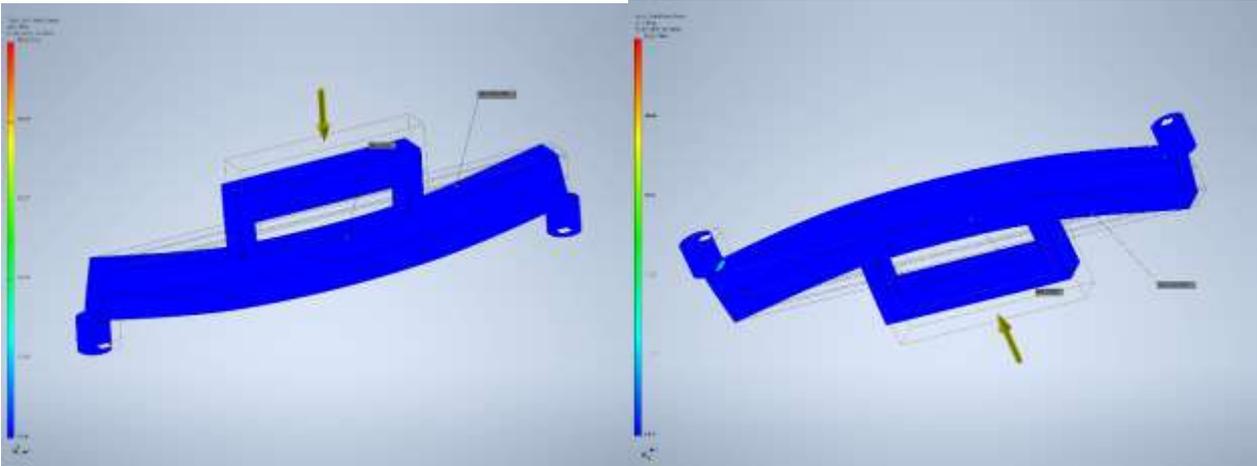
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Frictionless Constraint:1	4983,03 N	0 N	446,831 N m	-446,831 N m
		4983,03 N		0 N m
		0 N		0 N m
Fixed Constraint:1	5015,97 N	0 N	463,21 N m	463,204 N m
		5015,97 N		0 N m
		0 N		2,37221 N m

Result Summary

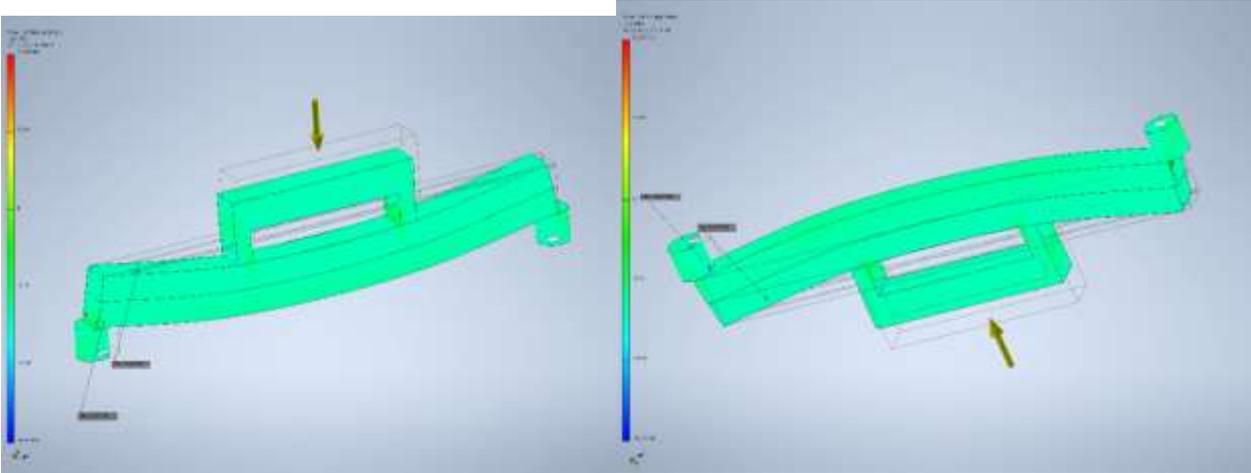
Name	Minimum	Maximum
Volume	32570800 mm ³	
Mass	98,6957 kg	
Von Mises Stress	0,00225507 MPa	55,6126 MPa
1st Principal Stress	-44,4749 MPa	52,9779 MPa
3rd Principal Stress	-100,336 MPa	12,2788 MPa
Displacement	0 mm	0,308554 mm
Safety Factor	0,193951 ul	15 ul
Stress XX	-50,5602 MPa	17,505 MPa
Stress XY	-14,9032 MPa	15,0563 MPa
Stress XZ	-19,155 MPa	19,6254 MPa
Stress YY	-83,237 MPa	49,5979 MPa
Stress YZ	-25,6755 MPa	27,4791 MPa
Stress ZZ	-64,0203 MPa	41,1648 MPa
X Displacement	-0,00507081 mm	0,00128921 mm
Y Displacement	-0,302486 mm	0,0132095 mm
Z Displacement	-0,122713 mm	0,000148445 mm
Equivalent Strain	0,0000000774703 ul	0,000538872 ul
1st Principal Strain	-0,00000343846 ul	0,000492311 ul
3rd Principal Strain	-0,000650367 ul	0,00000144526 ul
Strain XX	-0,0000619502 ul	0,0000720342 ul
Strain XY	-0,000168645 ul	0,000127517 ul
Strain XZ	-0,000179253 ul	0,00021665 ul
Strain YY	-0,000417668 ul	0,000453966 ul
Strain YZ	-0,000339893 ul	0,000363769 ul
Strain ZZ	-0,000337379 ul	0,000210632 ul

Figures

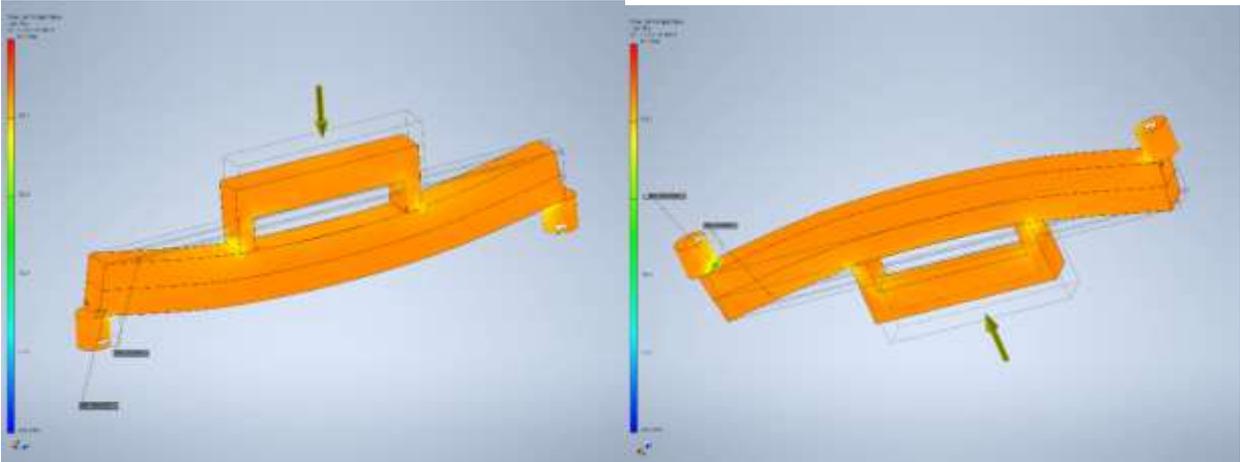
Von Mises Stress



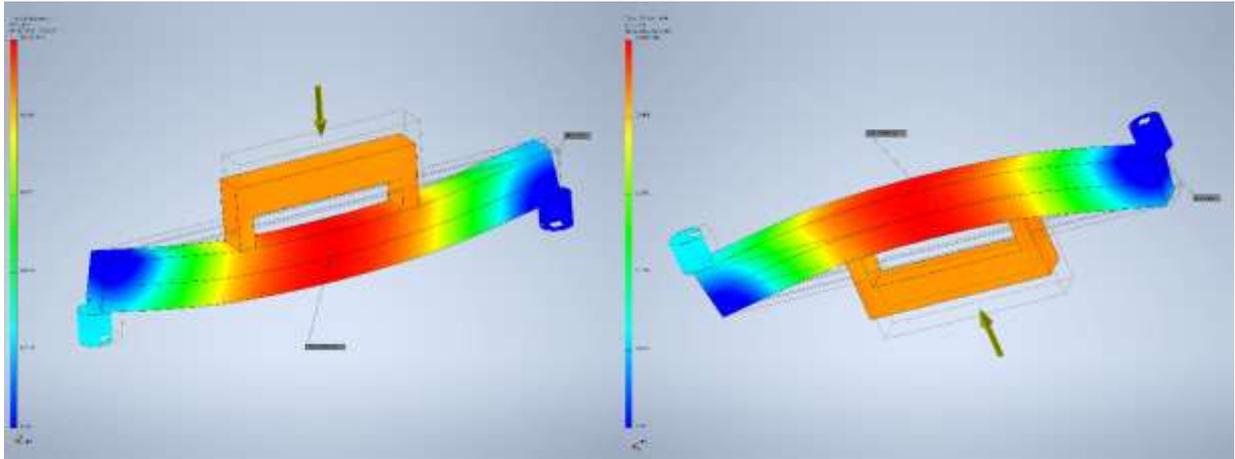
1st Principal Stress



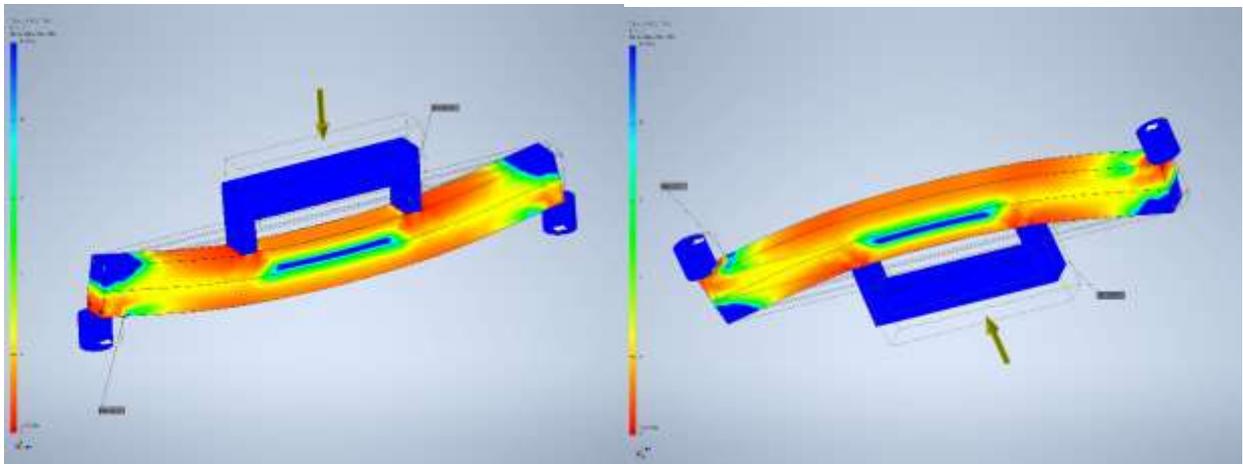
3rd Principal Stress



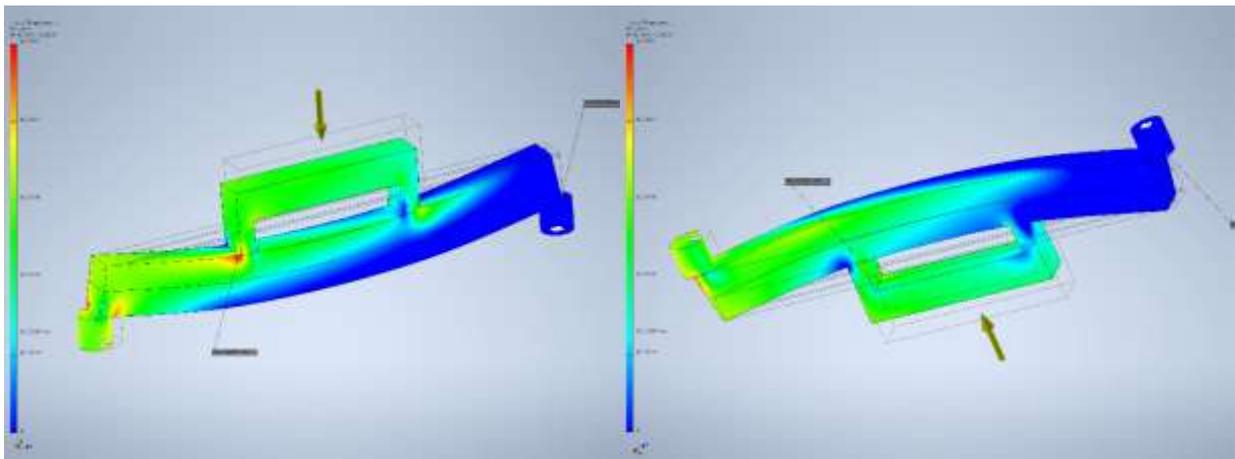
Displacement



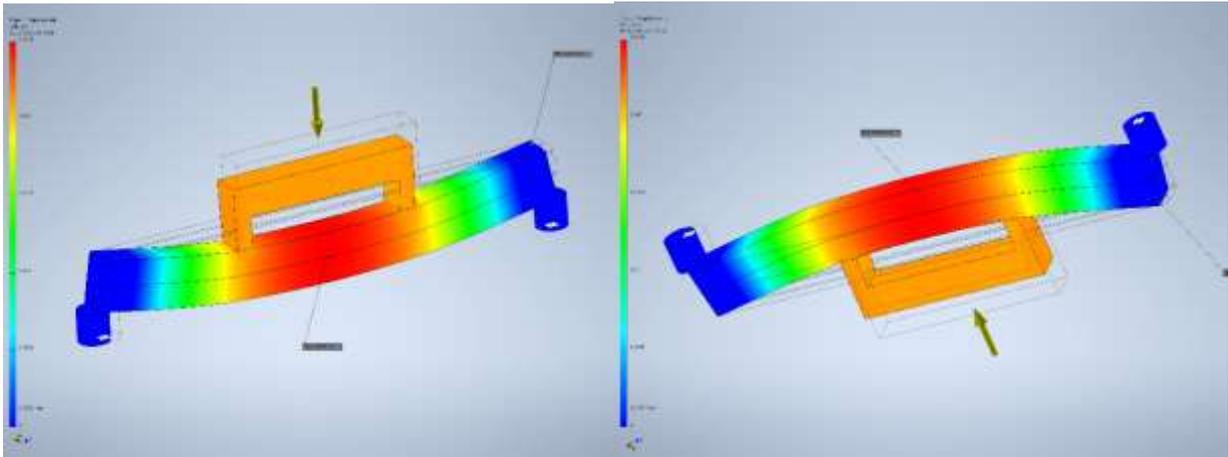
Safety Factor



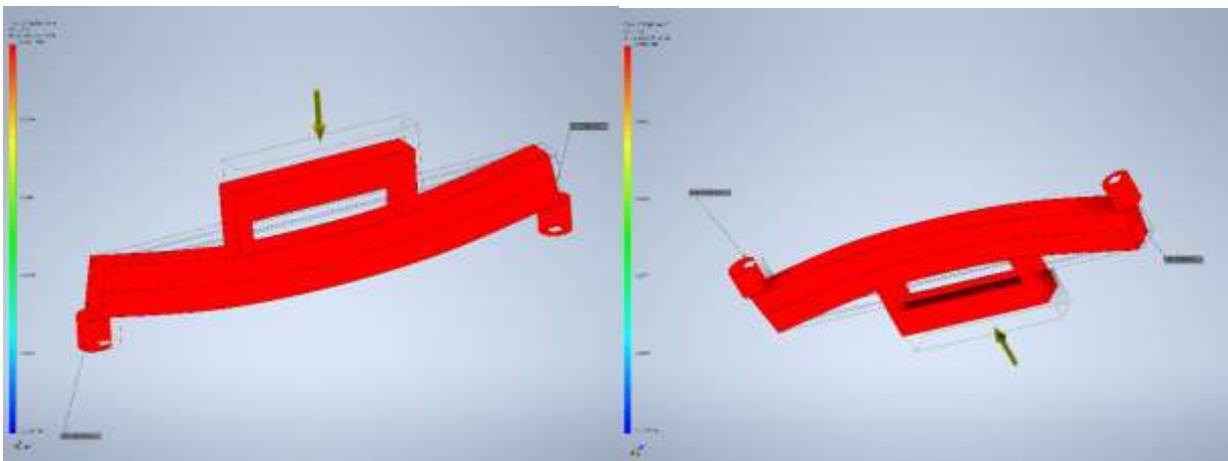
X Displacement



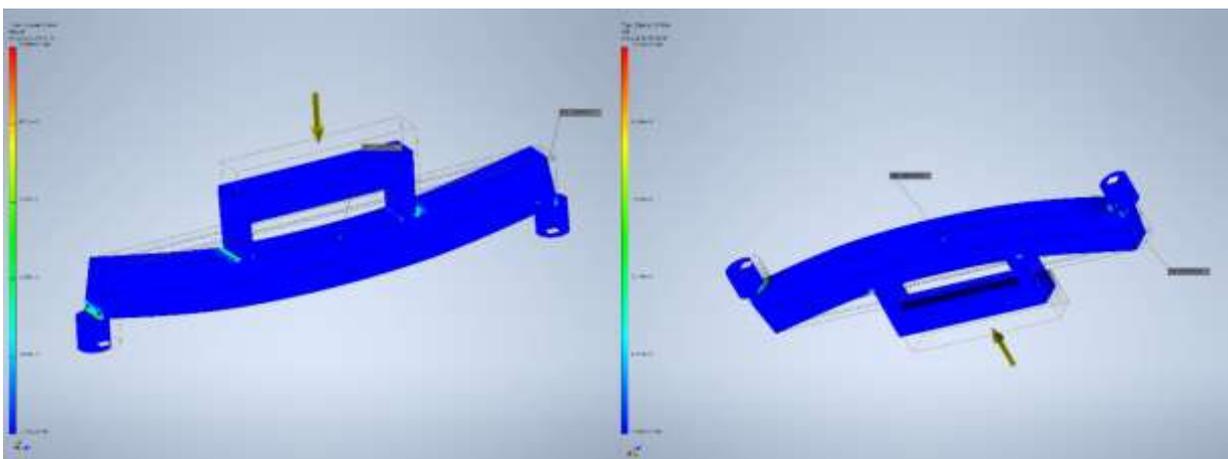
Y Displacement



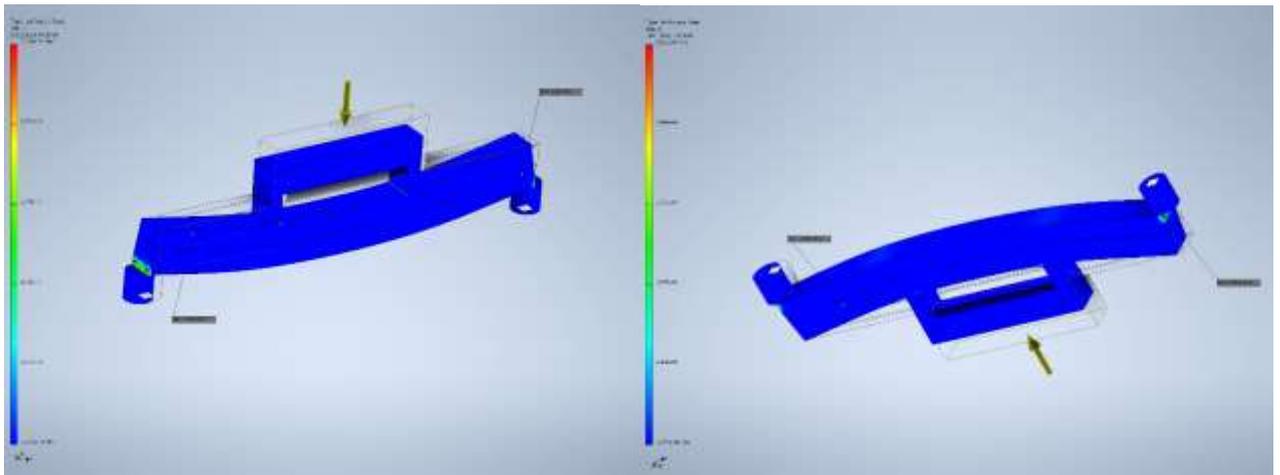
Z Displacement



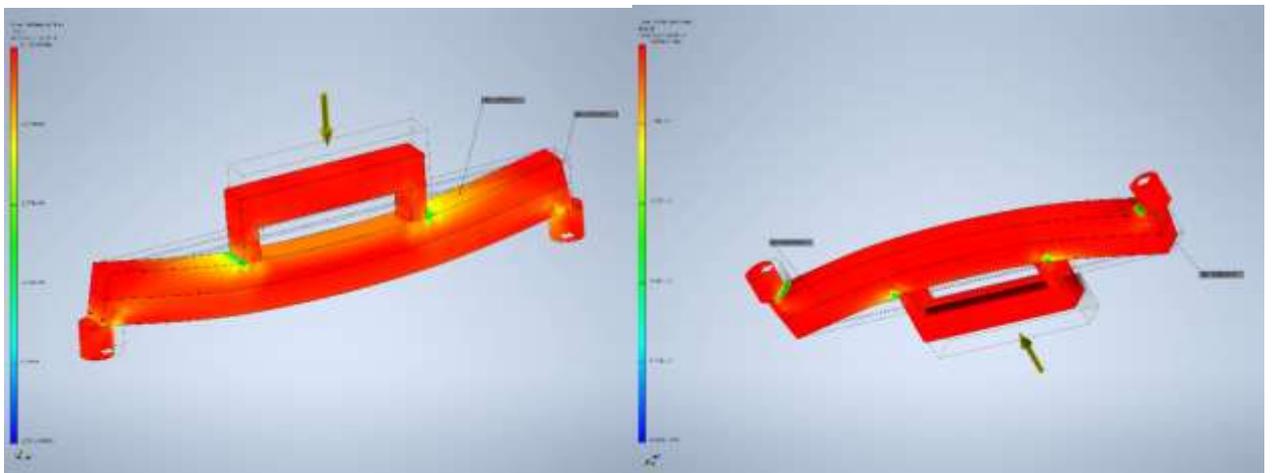
Equivalent Strain



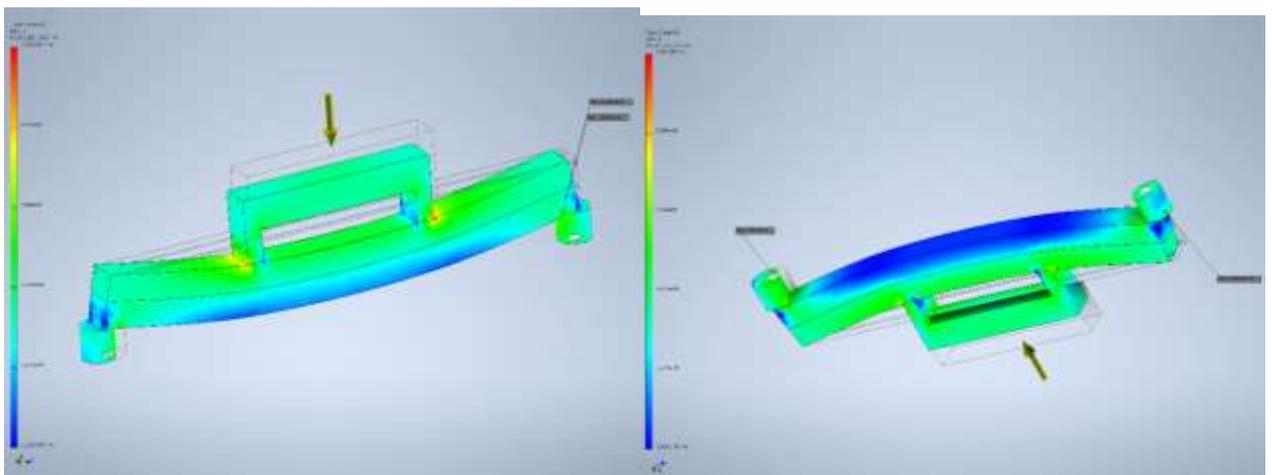
1st Principal Strain



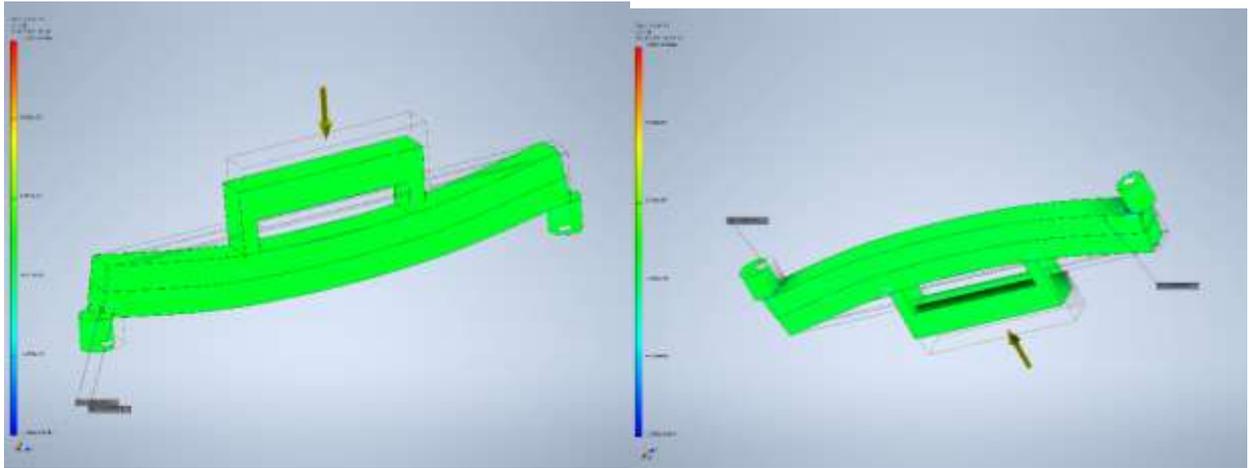
3rd Principal Strain



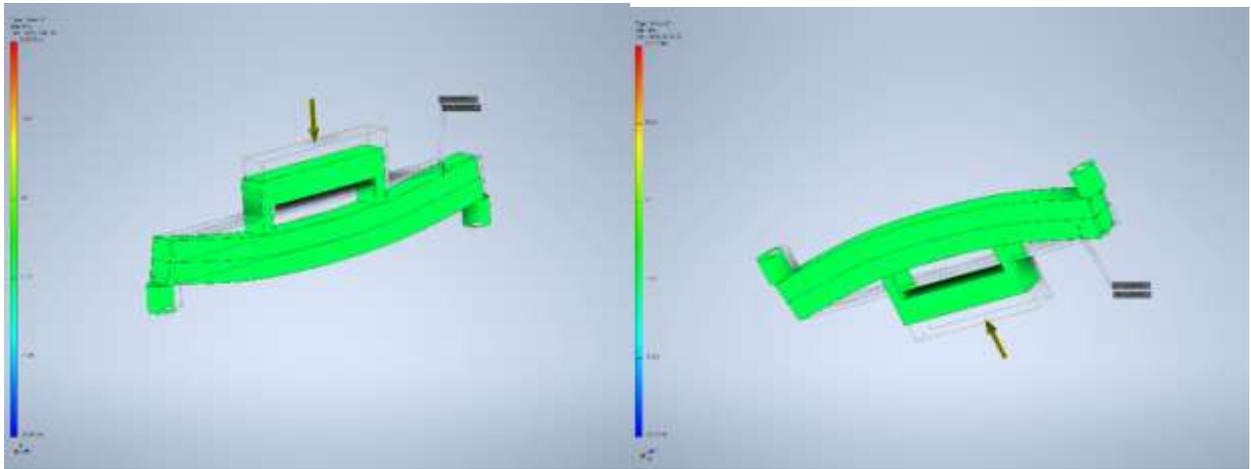
Strain XX



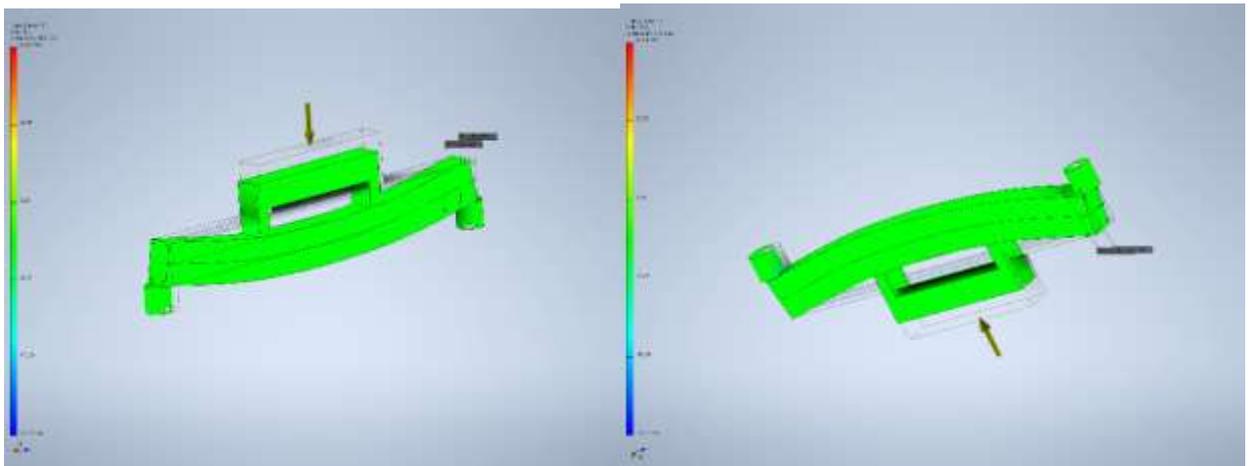
Strain XY



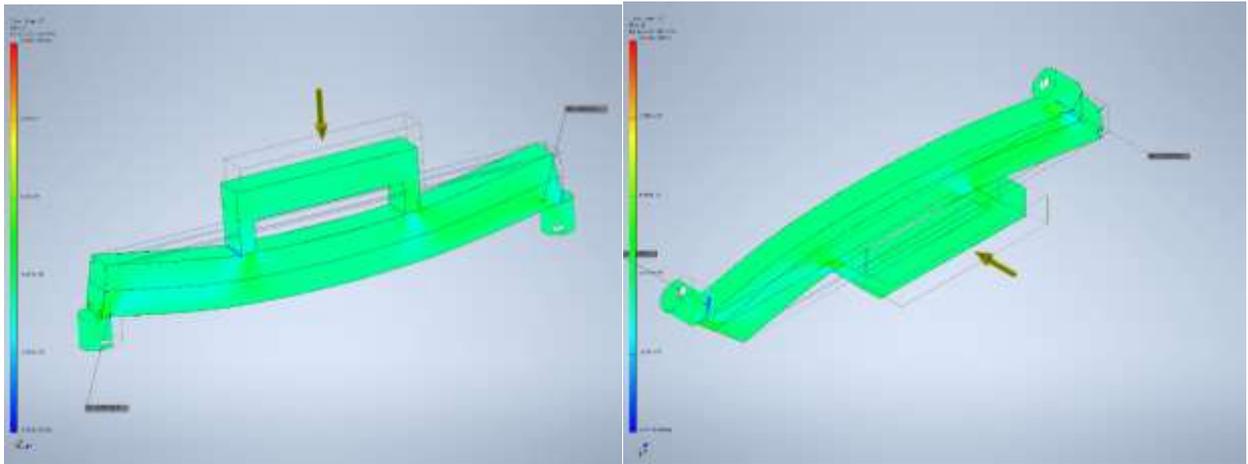
Strain XZ



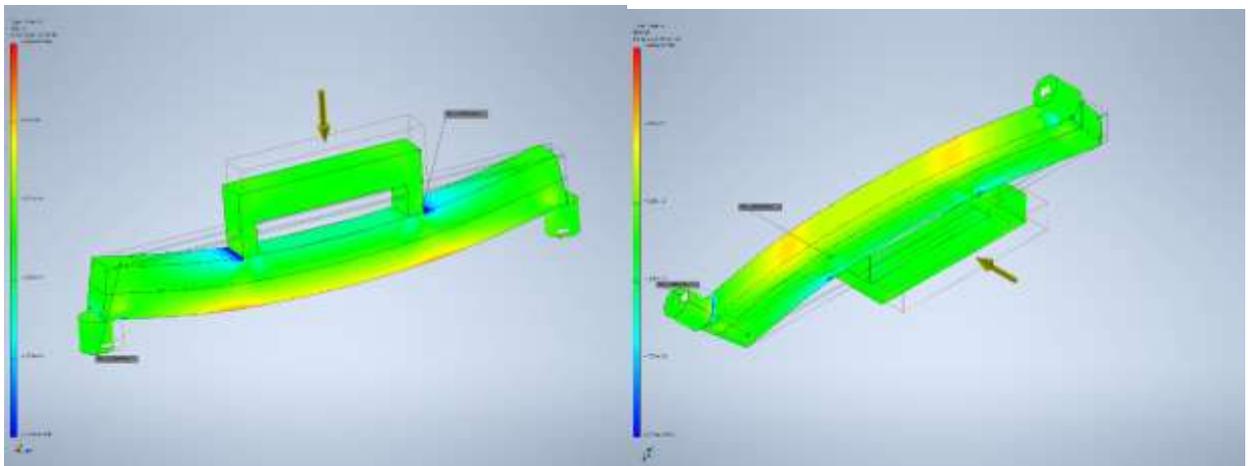
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



3.2 Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 55-105

Reaction Force and Moment on Constraints

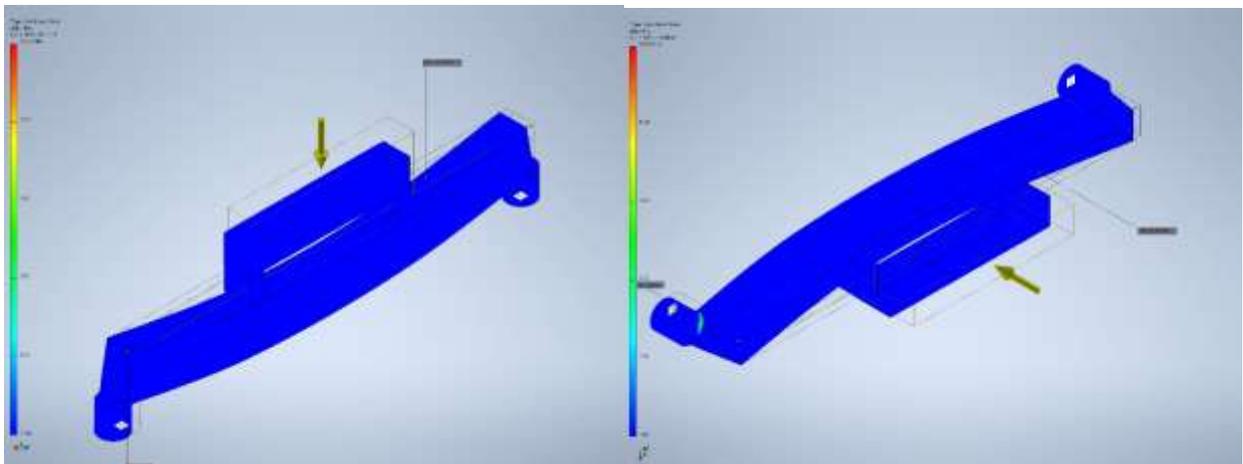
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Frictionless Constraint:1	5000,31 N	0 N	447,208 N m	-447,208 N m
		5000,31 N		0 N m
		0 N		0 N m
Fixed Constraint:1	4999,92 N	0 N	466,73 N m	466,725 N m
		4999,92 N		0 N m
		0 N		2,13784 N m

Result Summary

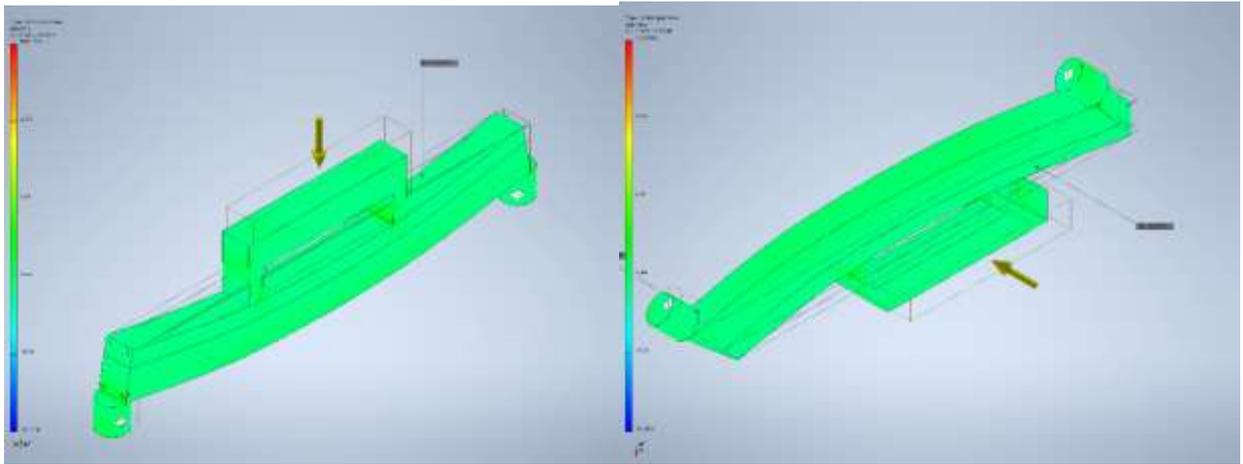
Name	Minimum	Maximum
Volume	32570800 mm ³	
Mass	98,6957 kg	
Von Mises Stress	0,00385765 MPa	52,9947 MPa
1st Principal Stress	-43,4006 MPa	44,0083 MPa
3rd Principal Stress	-98,0877 MPa	8,46111 MPa
Displacement	0 mm	0,309397 mm
Safety Factor	0,18734 ul	15 ul
Stress XX	-49,1494 MPa	12,9912 MPa
Stress XY	-13,8715 MPa	14,7277 MPa
Stress XZ	-21,5291 MPa	18,1013 MPa
Stress YY	-78,9284 MPa	42,5699 MPa
Stress YZ	-25,8243 MPa	25,9185 MPa
Stress ZZ	-62,3779 MPa	39,6547 MPa
X Displacement	-0,00409383 mm	0,00128425 mm
Y Displacement	-0,303344 mm	0,0132371 mm
Z Displacement	-0,122343 mm	0,000150144 mm
Equivalent Strain	0,000000141295 ul	0,000520168 ul
1st Principal Strain	-0,00000214787 ul	0,000500588 ul
3rd Principal Strain	-0,000629733 ul	-0,00000000371798 ul
Strain XX	-0,0000632012 ul	0,000080341 ul
Strain XY	-0,00012869 ul	0,000167095 ul
Strain XZ	-0,000169199 ul	0,000225505 ul
Strain YY	-0,000382762 ul	0,0004561 ul
Strain YZ	-0,000341862 ul	0,00034311 ul
Strain ZZ	-0,000336417 ul	0,000181968 ul

Figures

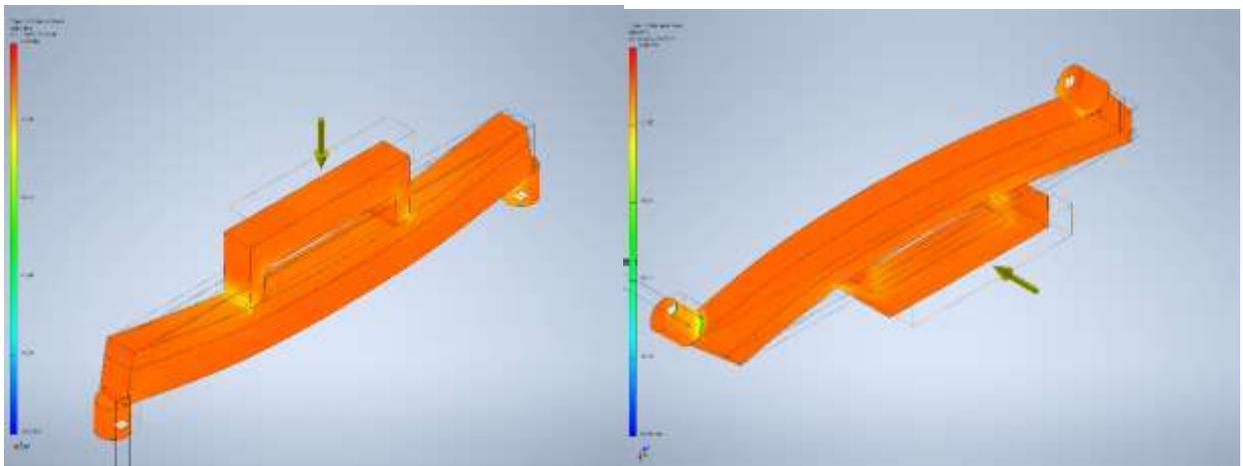
Von Mises Stress



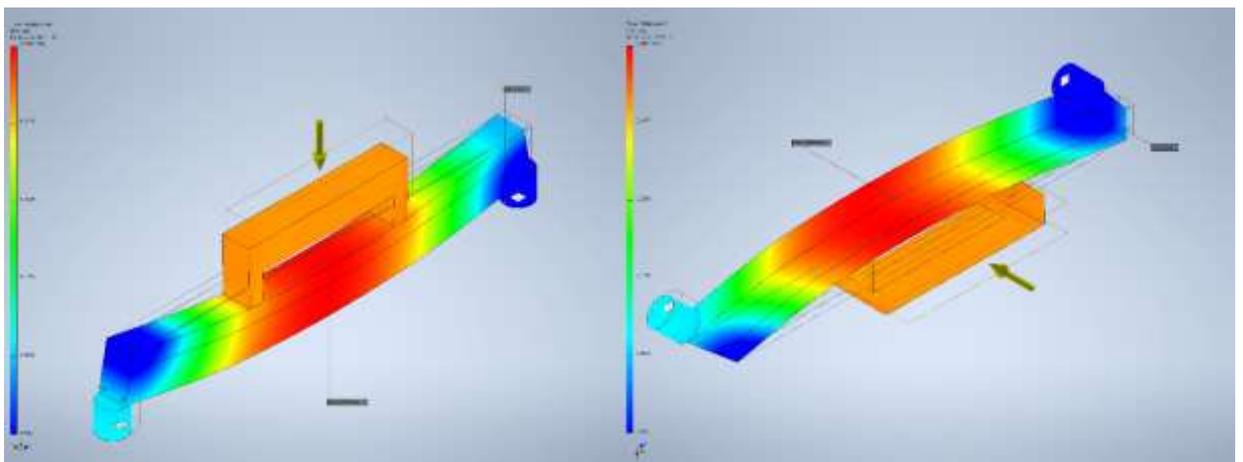
1st Principal Stress



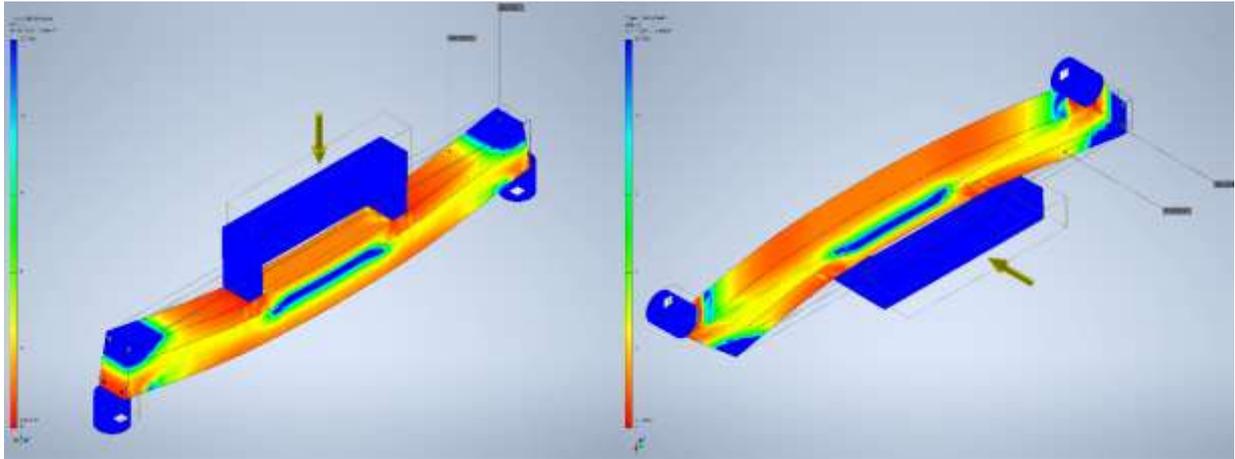
3rd Principal Stress



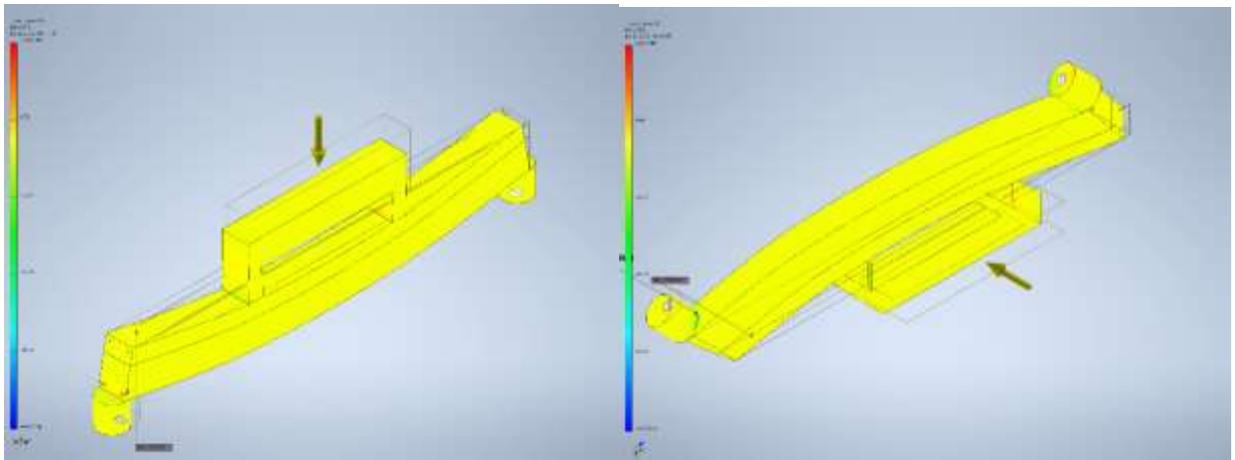
Displacement



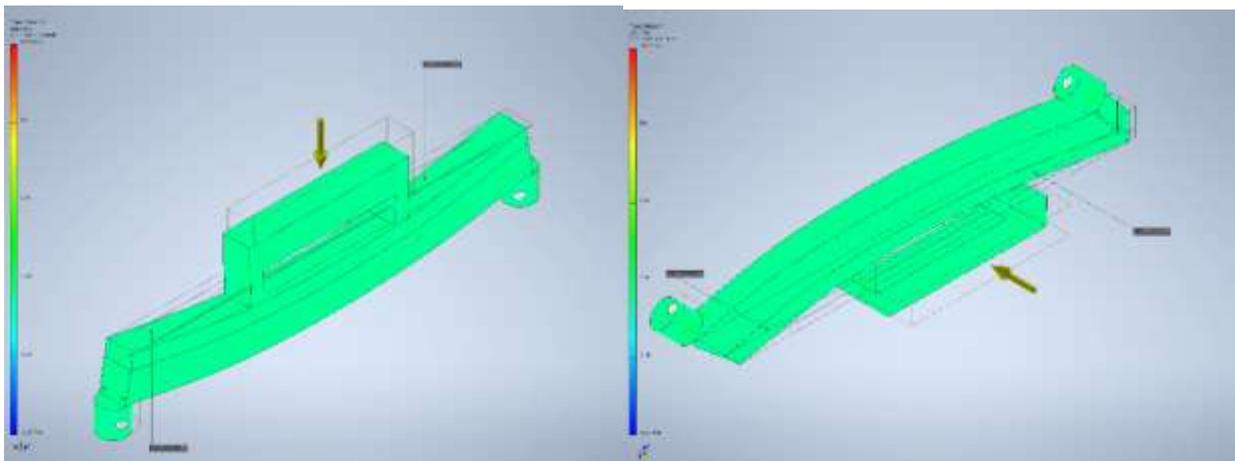
Safety Factor



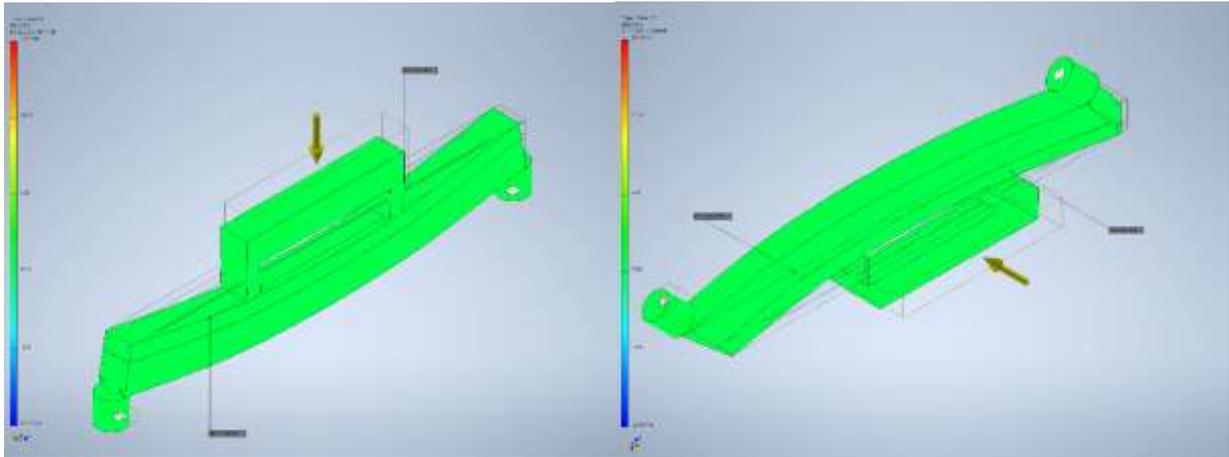
Stress XX



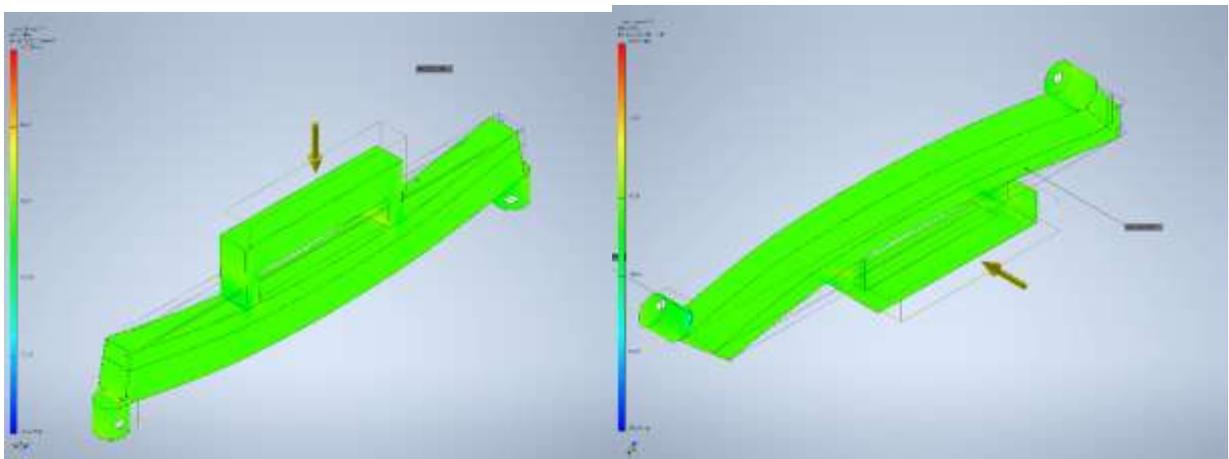
Stress XY



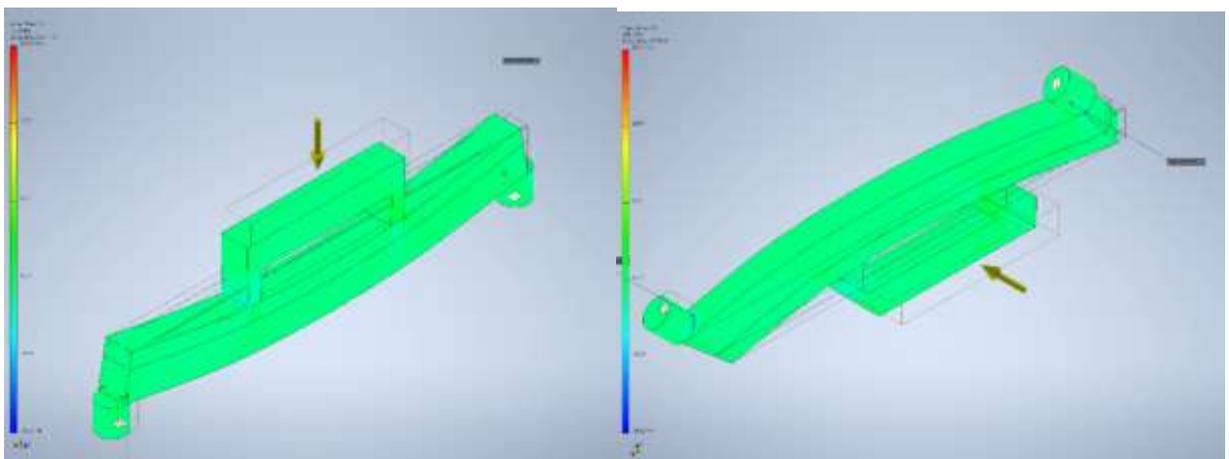
Stress XZ



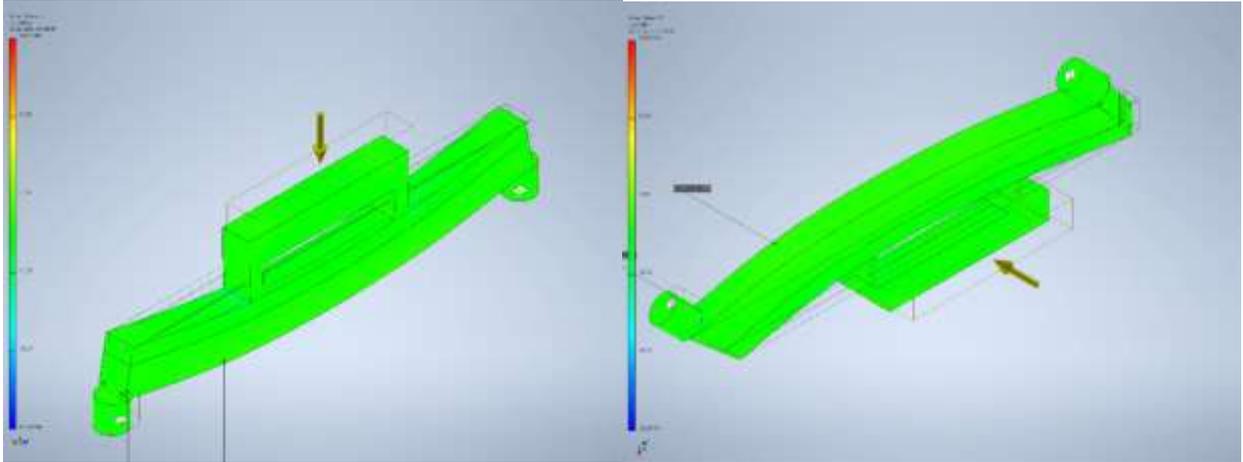
Stress YY



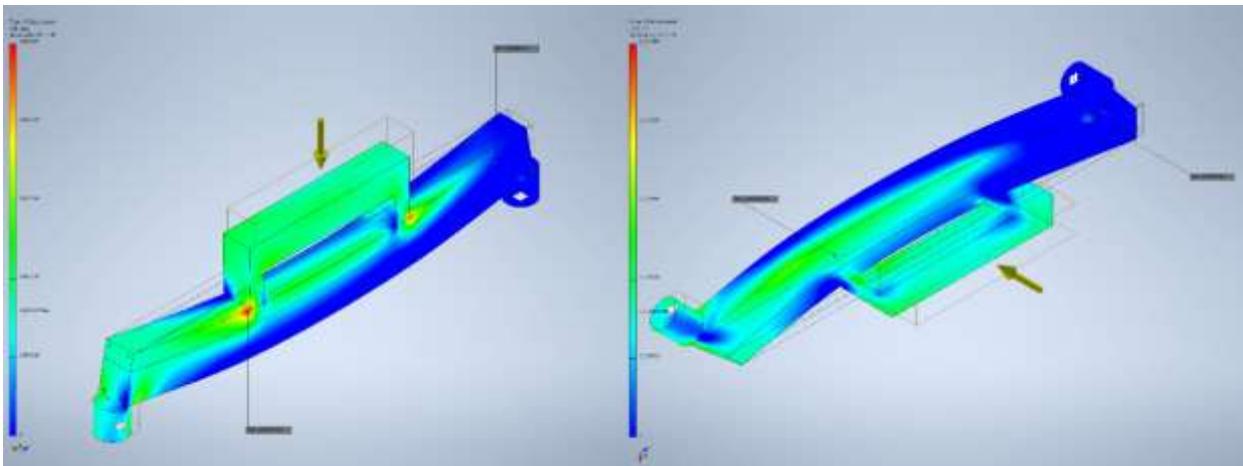
Stress YZ



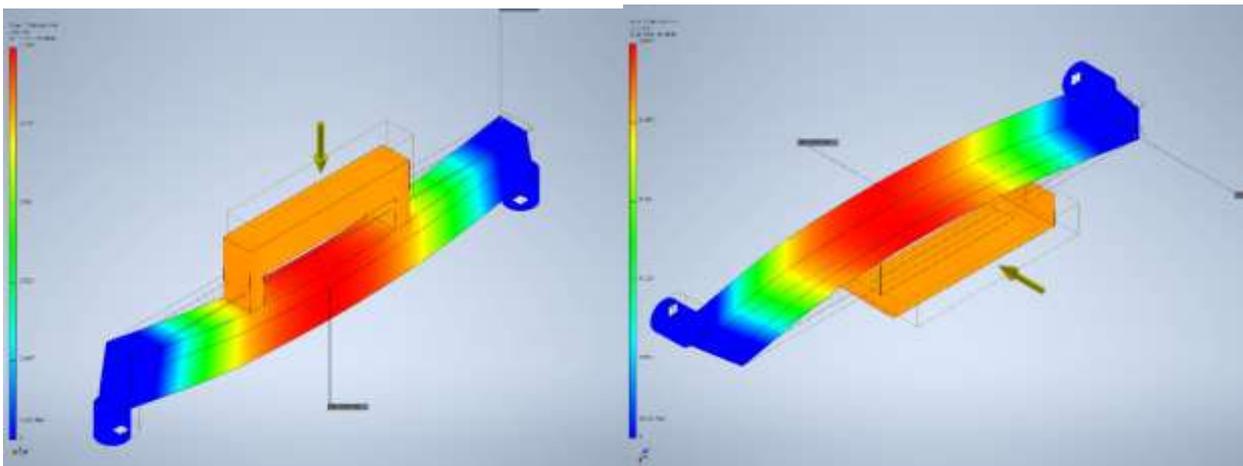
Stress ZZ



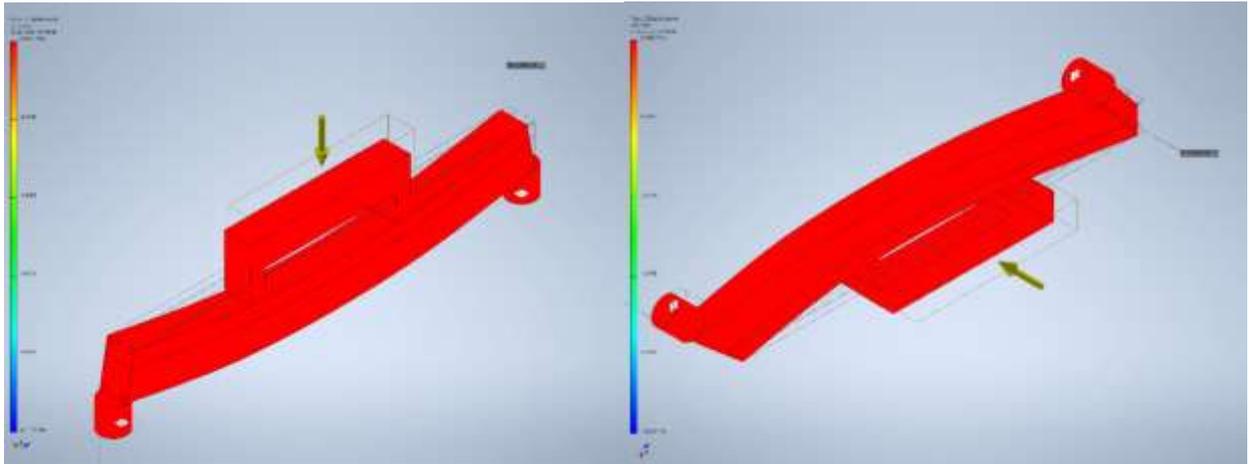
X Displacement



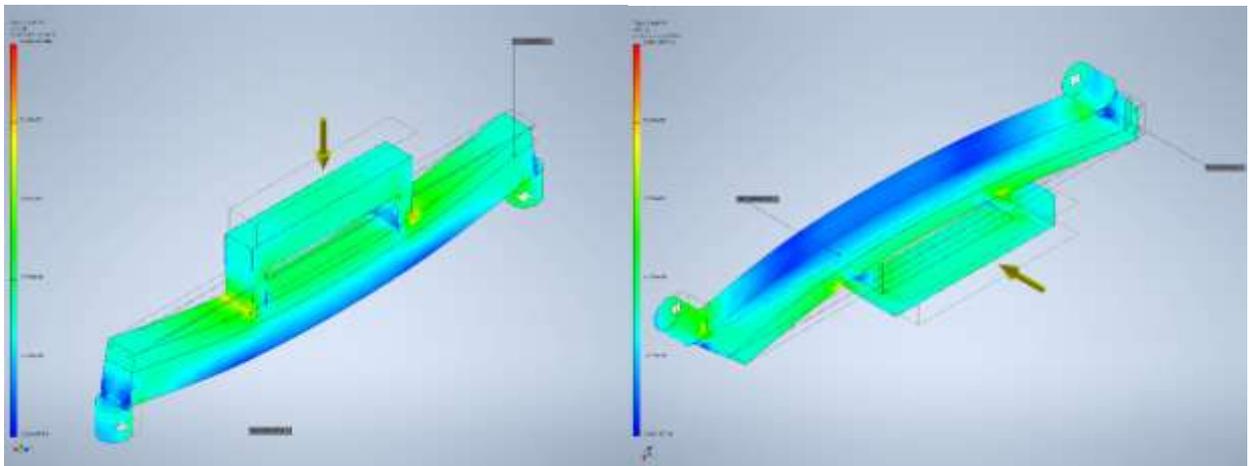
Y Displacement



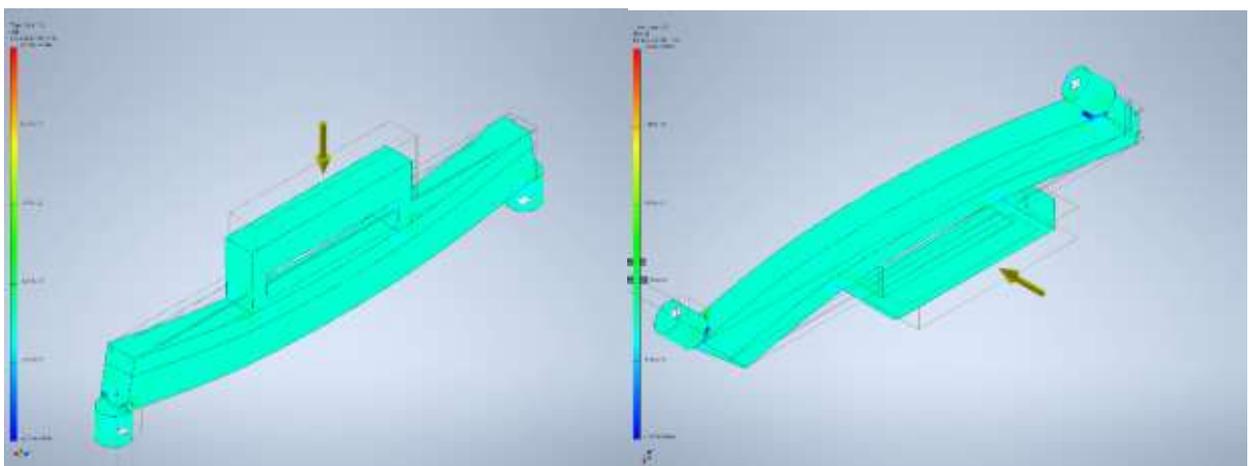
Z Displacement



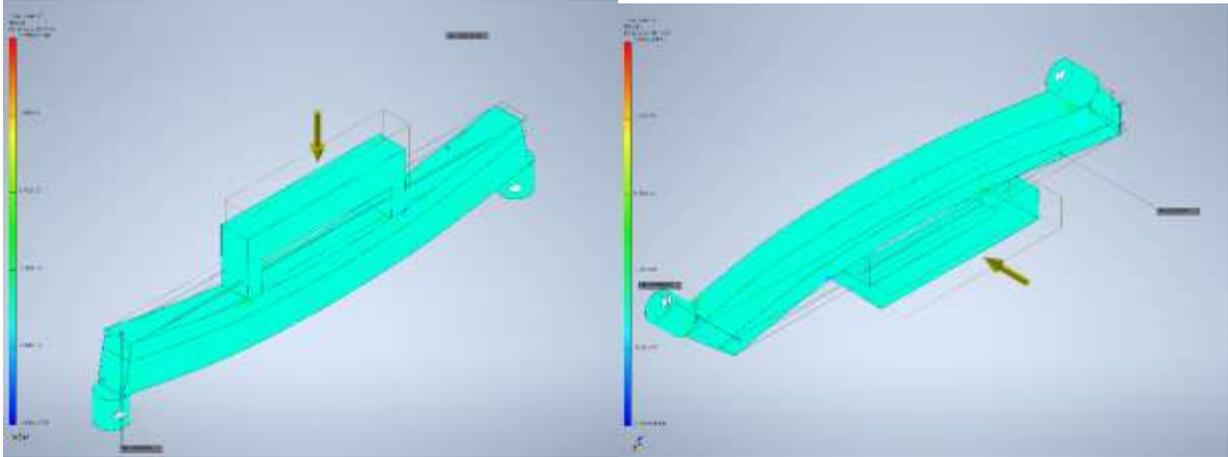
Strain XX



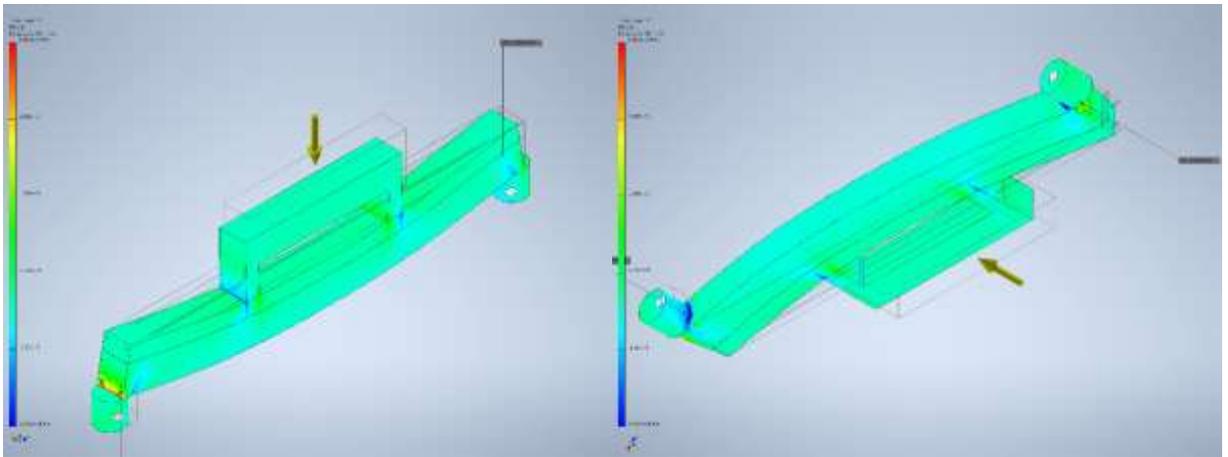
Strain XY



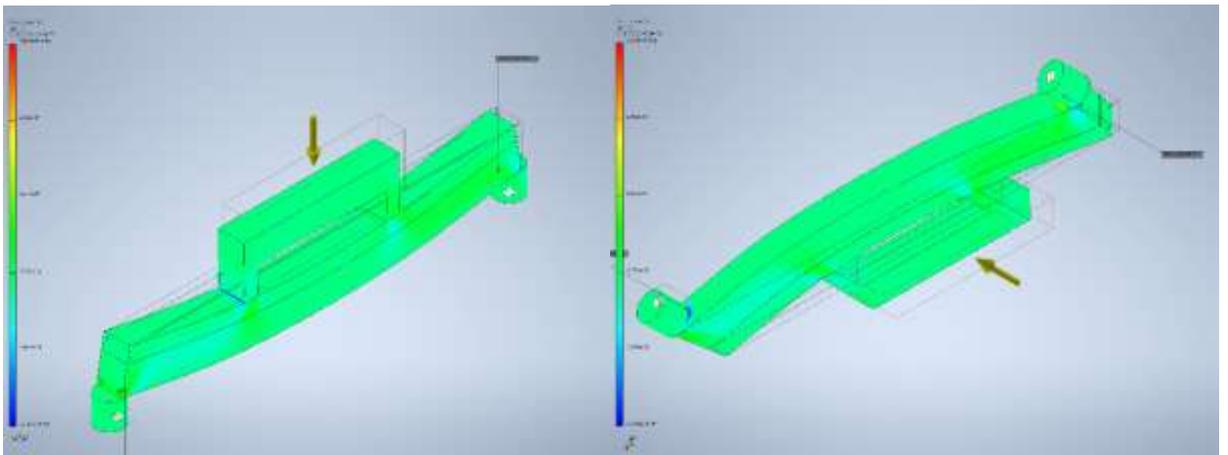
Strain XZ



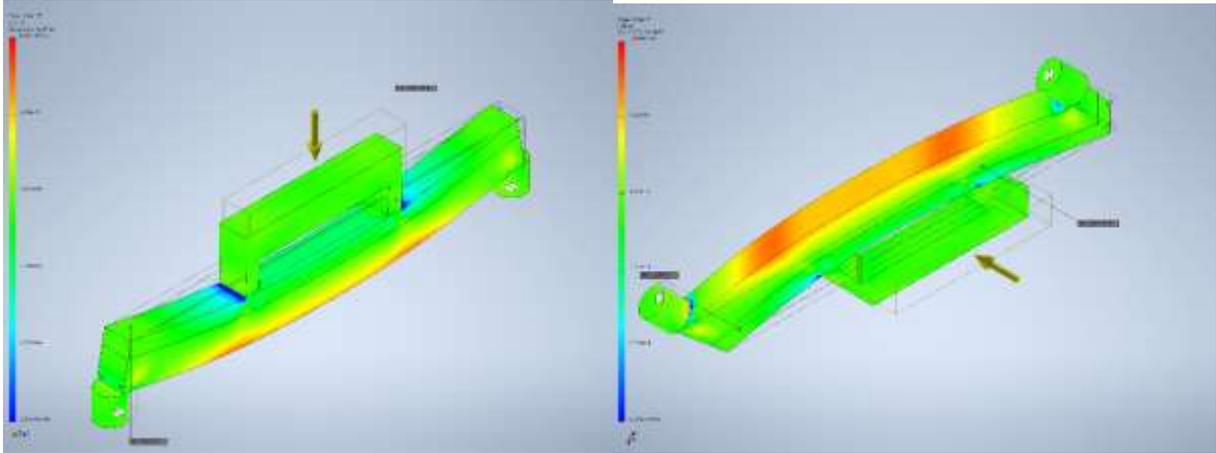
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



3.3 Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 105-55

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Frictionless Constraint:1	4975,34 N	0 N	436,74 N m	-436,74 N m
		4975,34 N		0 N m
		0 N		0 N m
Fixed Constraint:1	5024,24 N	0 N	459,864 N m	459,856 N m
		5024,24 N		0 N m
		0 N		2,65714 N m

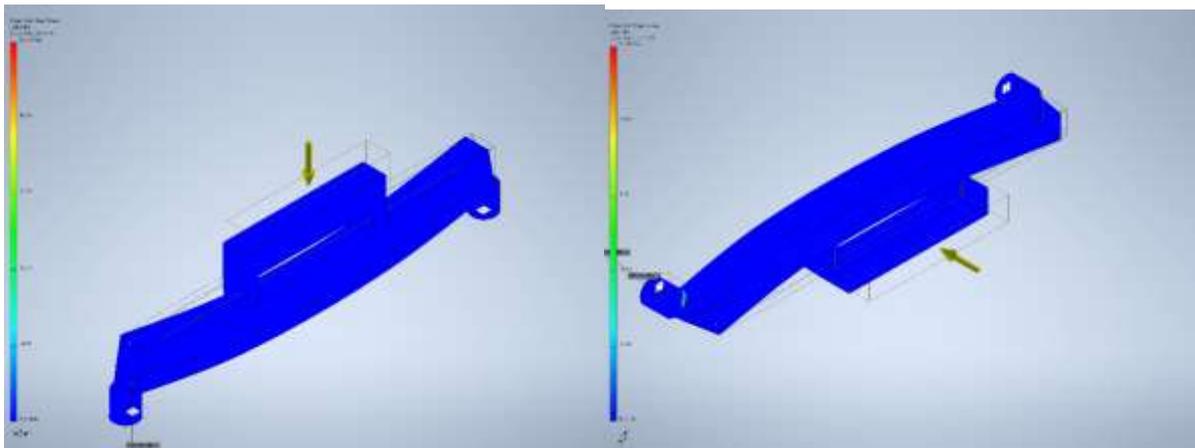
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	32570800 mm ³	
Mass	98,6957 kg	
Von Mises Stress	0,00572863 MPa	54,7812 MPa
1st Principal Stress	-46,7002 MPa	51,1855 MPa

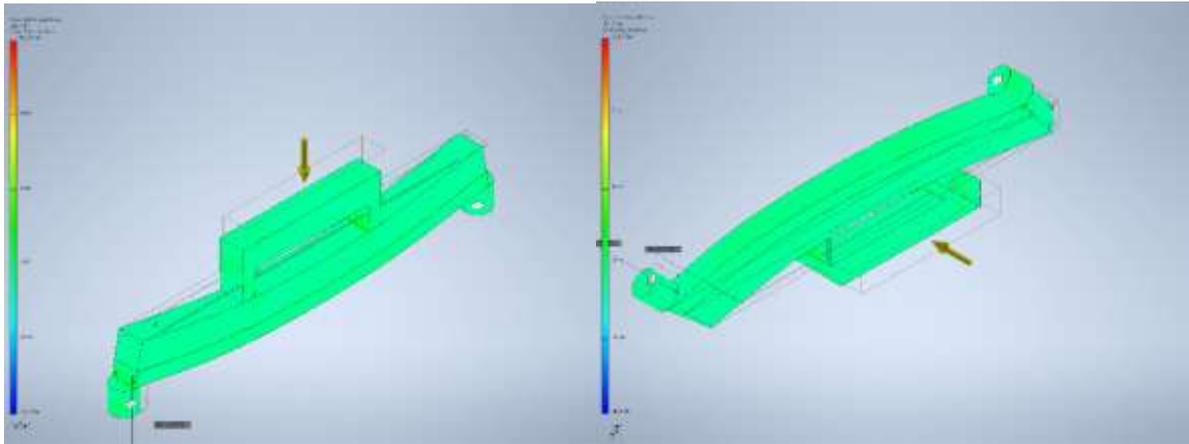
3rd Principal Stress	-104,021 MPa	11,6545 MPa
Displacement	0 mm	0,293181 mm
Safety Factor	0,22547 ul	15 ul
Stress XX	-52,968 MPa	14,1596 MPa
Stress XY	-13,2928 MPa	13,1393 MPa
Stress XZ	-20,6508 MPa	21,6798 MPa
Stress YY	-85,3888 MPa	48,2915 MPa
Stress YZ	-25,9318 MPa	25,9258 MPa
Stress ZZ	-64,8075 MPa	40,199 MPa
X Displacement	-0,00565904 mm	0,00125833 mm
Y Displacement	-0,28726 mm	0,0125286 mm
Z Displacement	-0,118276 mm	0,000148324 mm
Equivalent Strain	0,00000021957 ul	0,000547639 ul
1st Principal Strain	-0,00000210338 ul	0,000495774 ul
3rd Principal Strain	-0,000663658 ul	0,0000049138 ul
Strain XX	-0,0000596342 ul	0,0000853903 ul
Strain XY	-0,000104503 ul	0,000127098 ul
Strain XZ	-0,000196809 ul	0,000197853 ul
Strain YY	-0,000417 ul	0,000452726 ul
Strain YZ	-0,000343285 ul	0,000343206 ul
Strain ZZ	-0,000383853 ul	0,000248573 ul

Figures

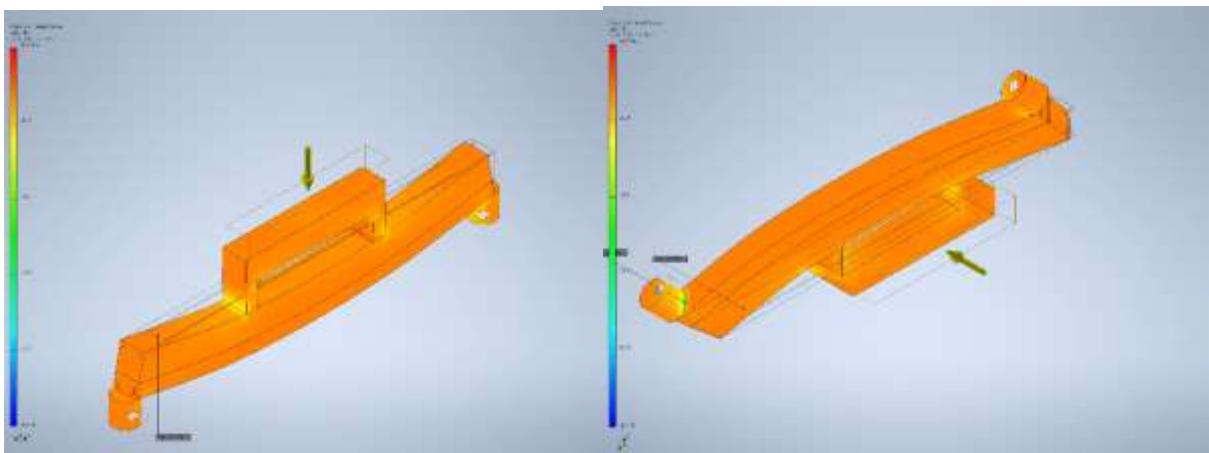
Von Mises Stress



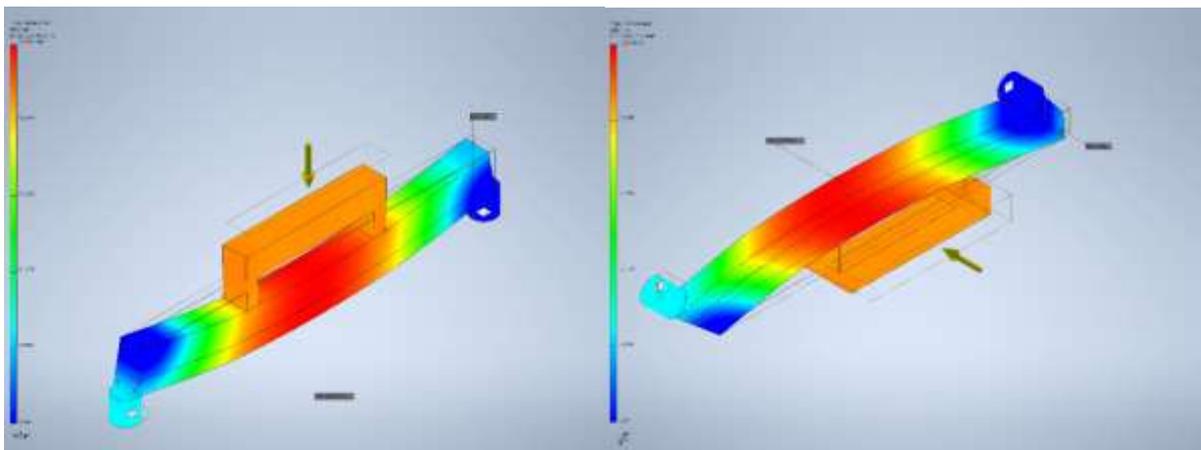
1st Principal Stress



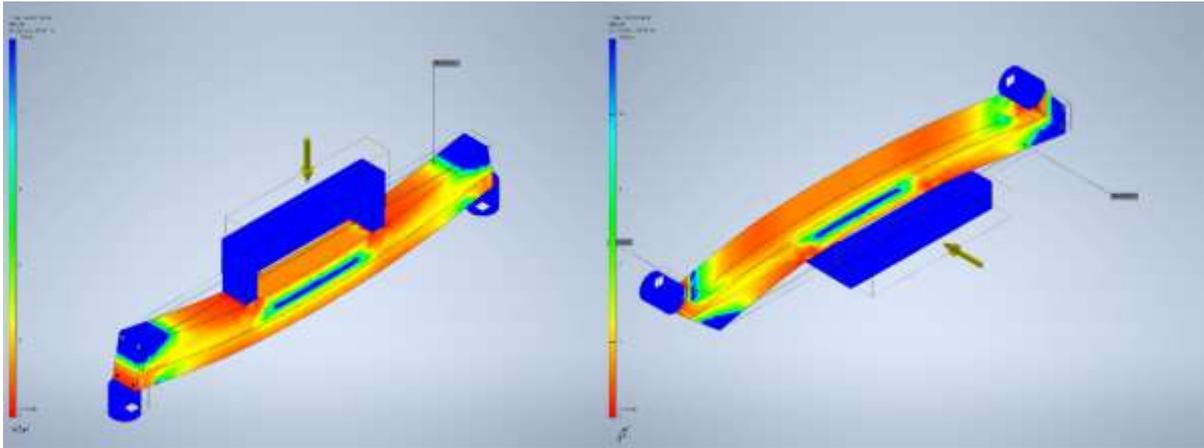
3rd Principal Stress



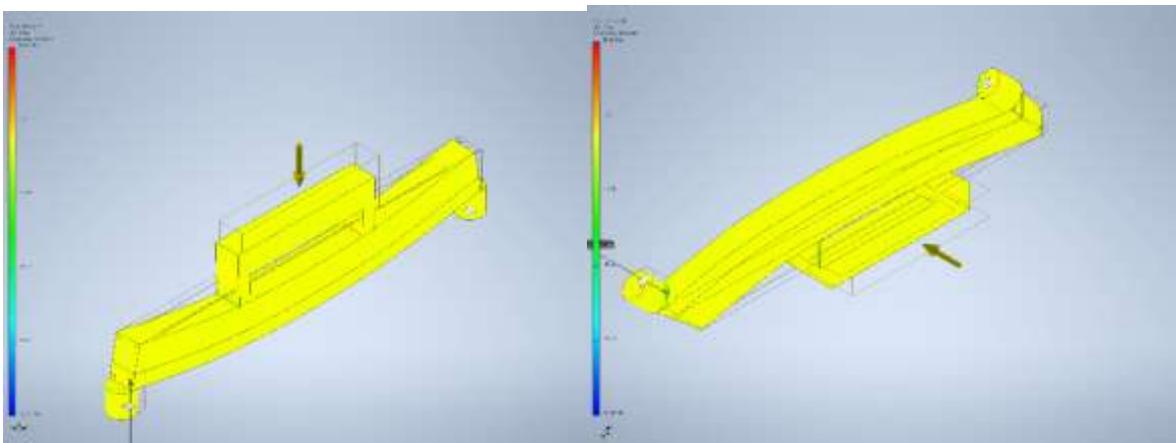
Displacement



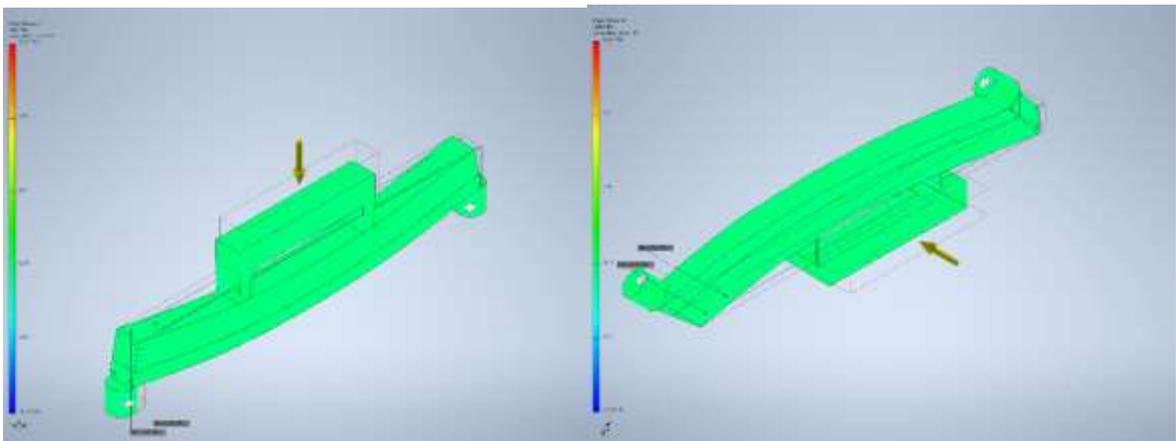
Safety Factor



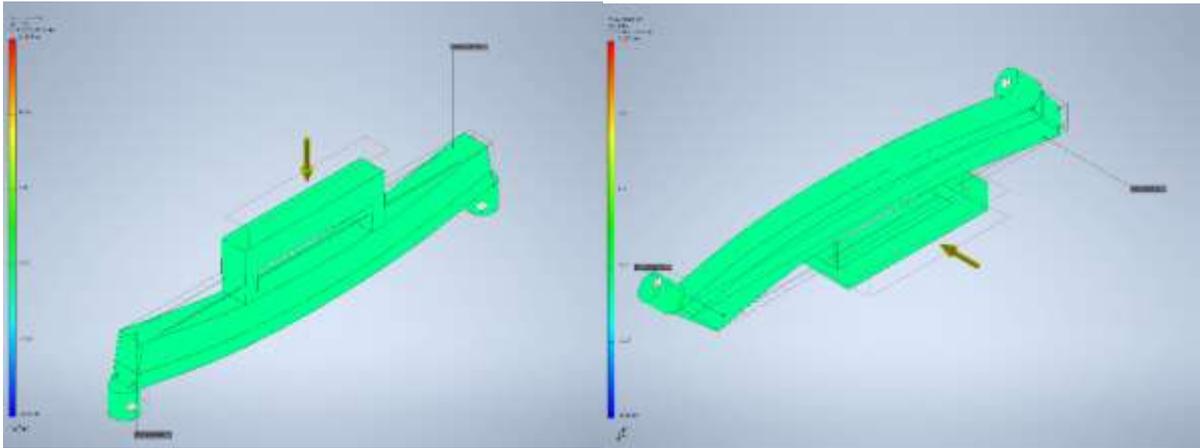
Stress XX



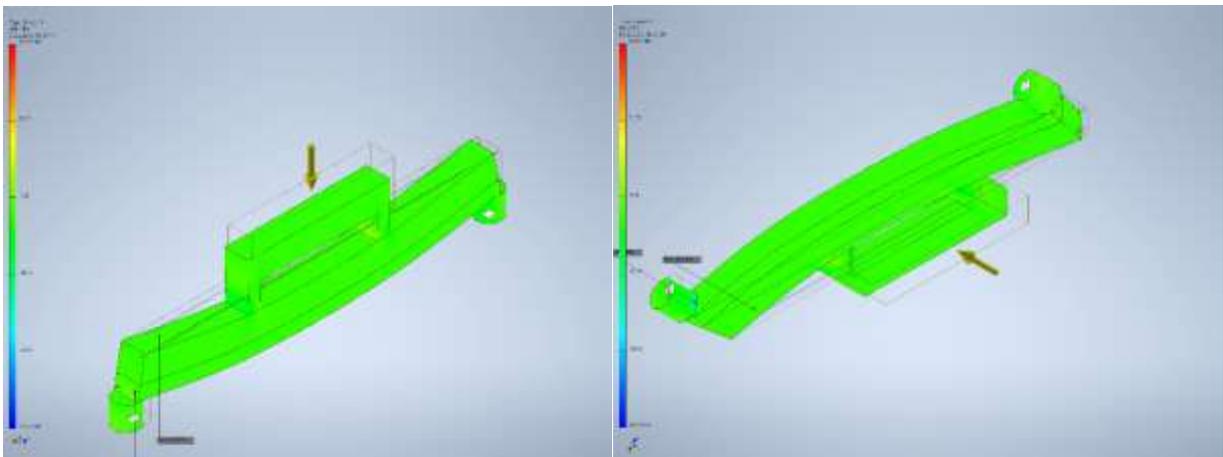
Stress XY



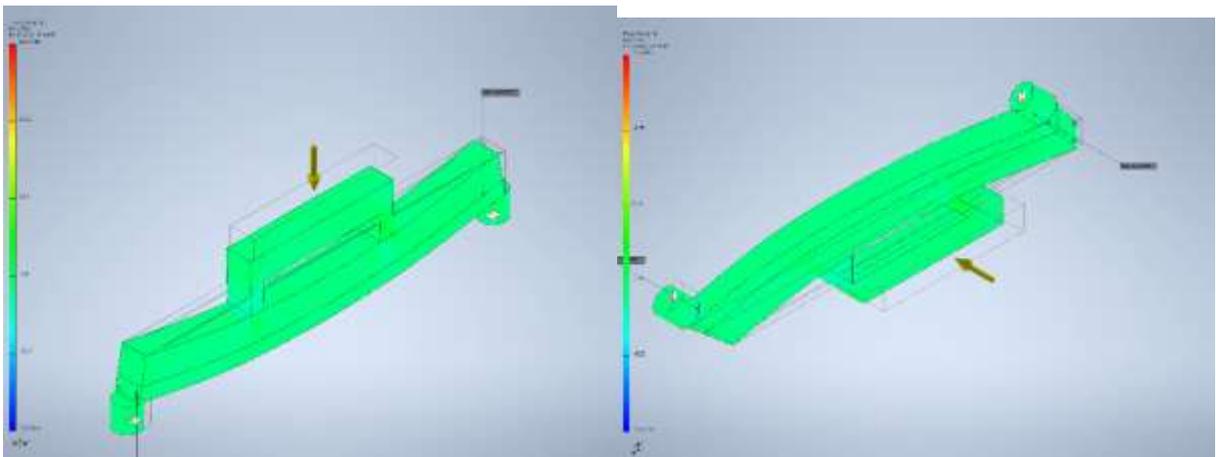
Stress XZ



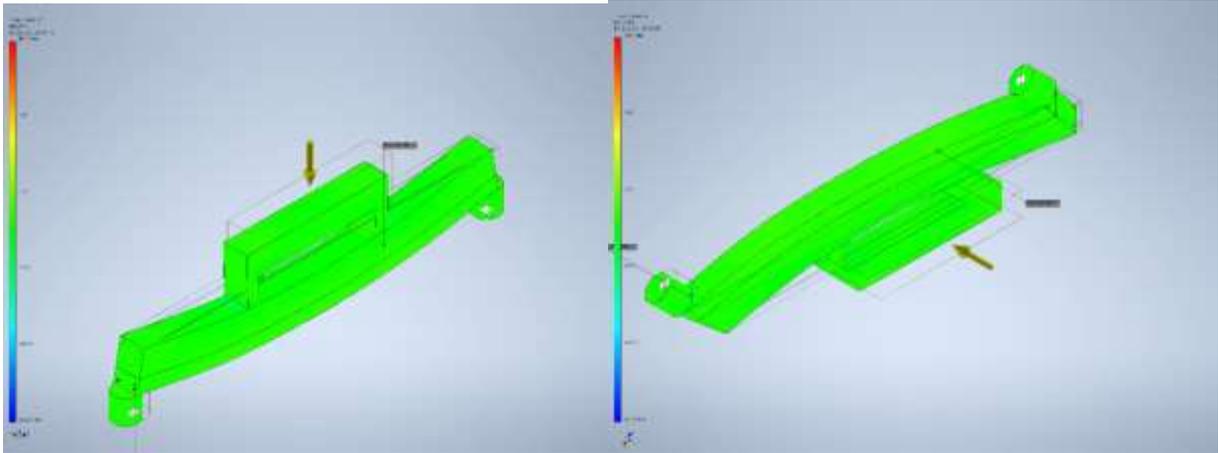
Stress YY



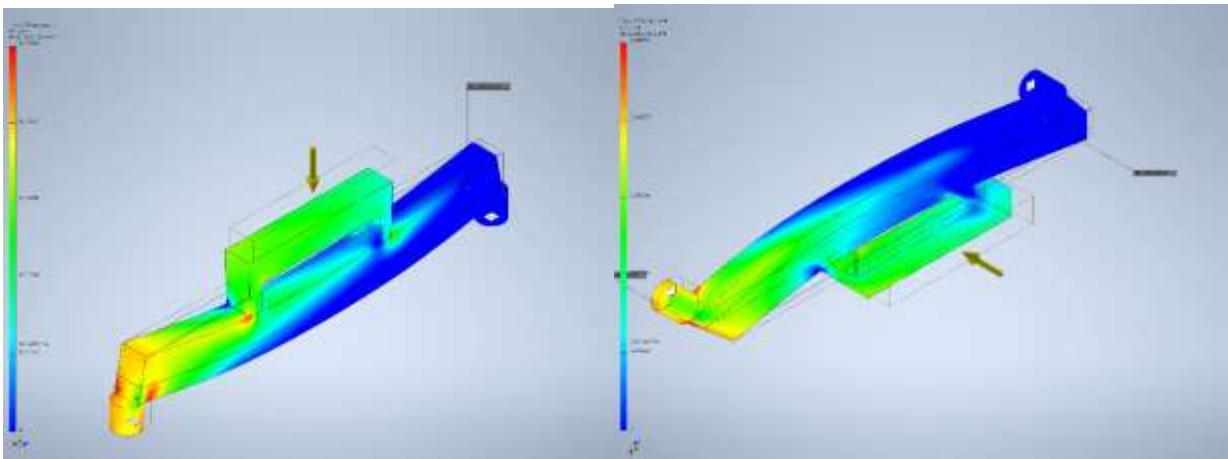
Stress YZ



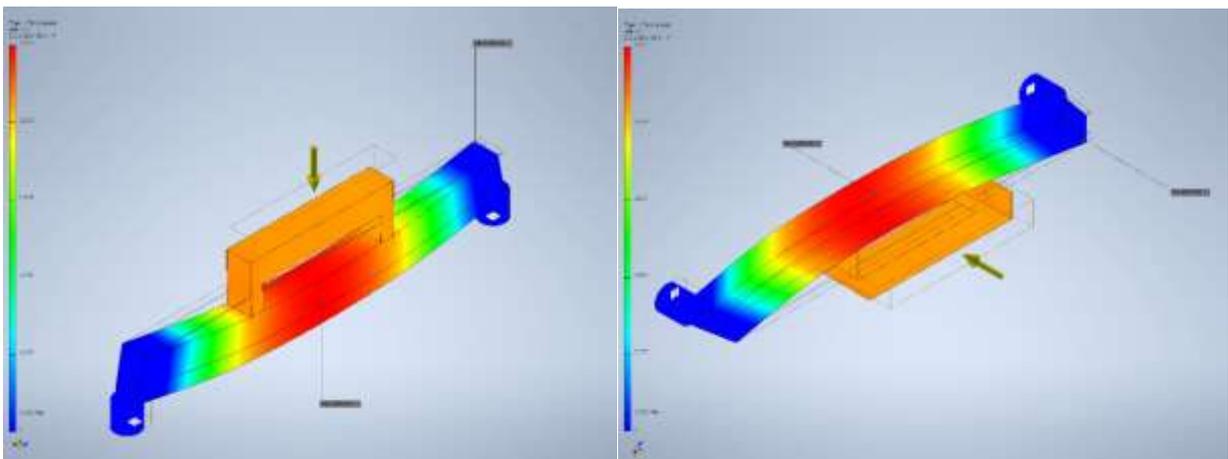
Stress ZZ



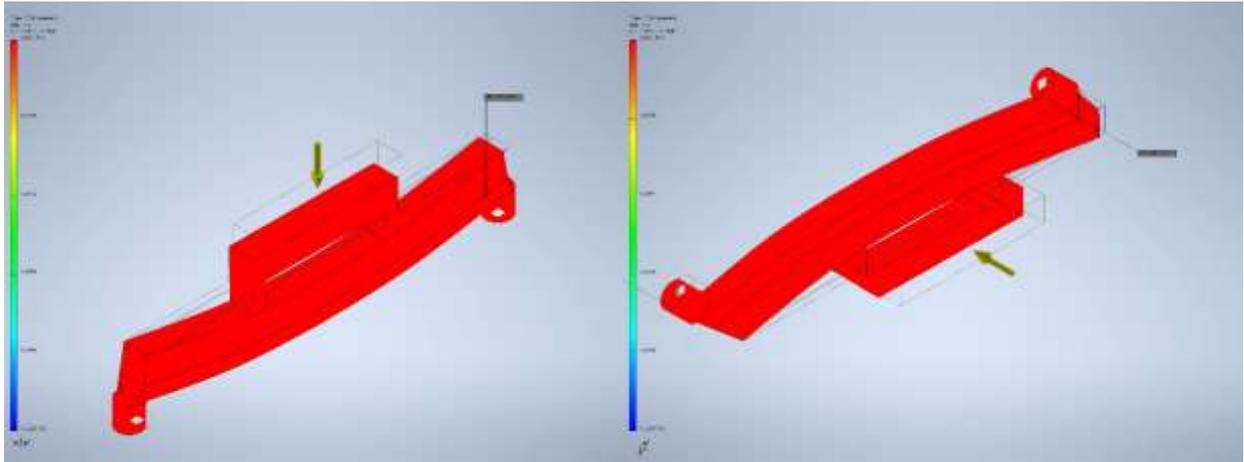
X Displacement



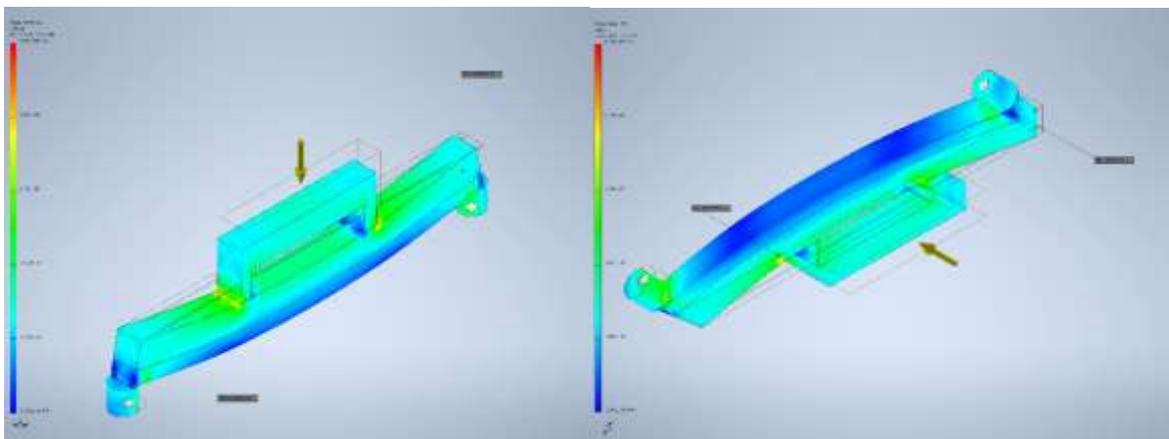
Y Displacement



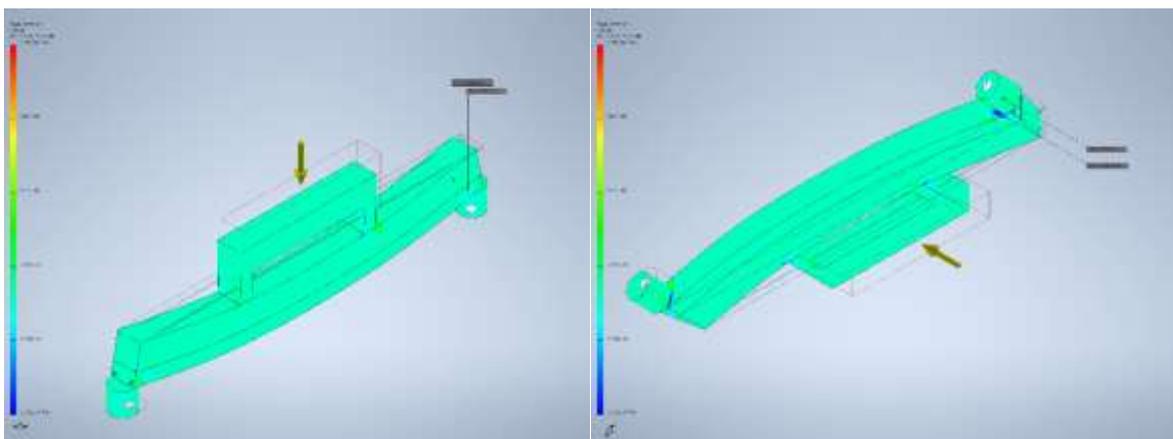
Z Displacement



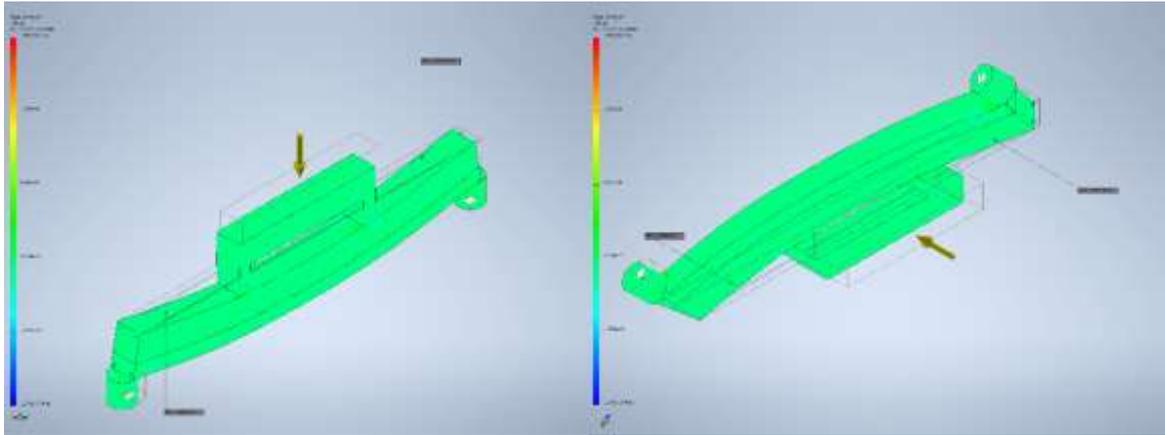
Strain XX



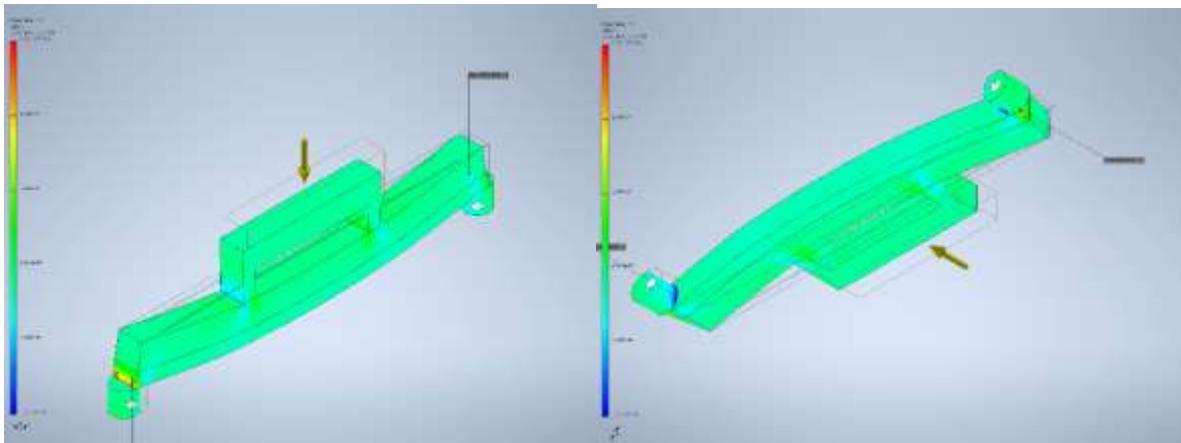
Strain XY



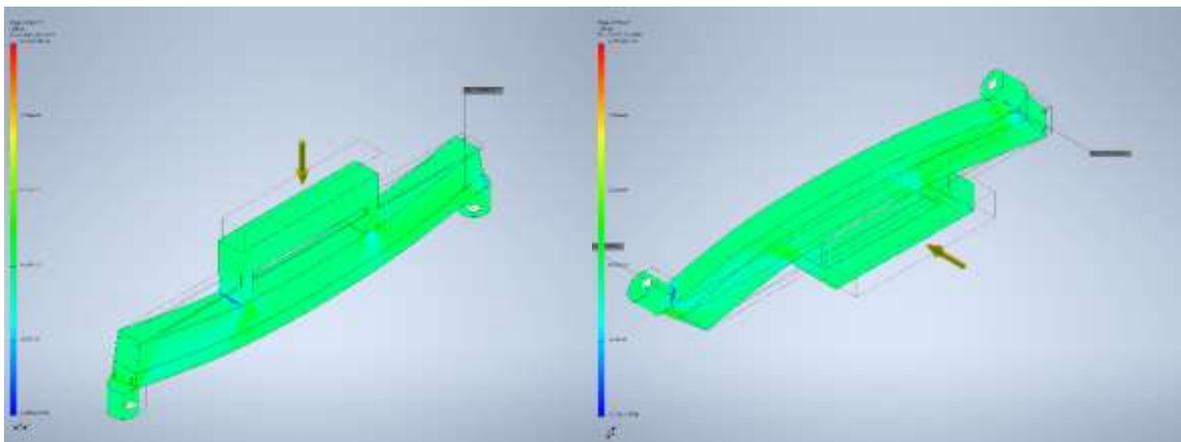
Strain XZ



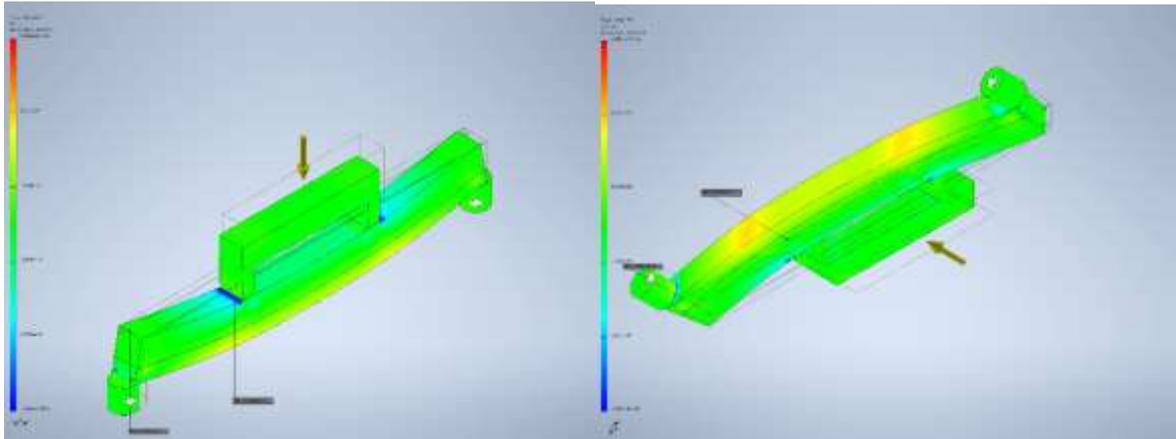
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



3.4 Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 40-120

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Frictionless Constraint:1	5003,07 N	0 N	462,098 N m	-462,097 N m
		5003,07 N		0 N m
		0 N		-0,724295 N m
Fixed Constraint:1	4998,41 N	0 N	464,467 N m	464,463 N m
		4998,41 N		1,61046 N m
		0 N		0,685825 N m

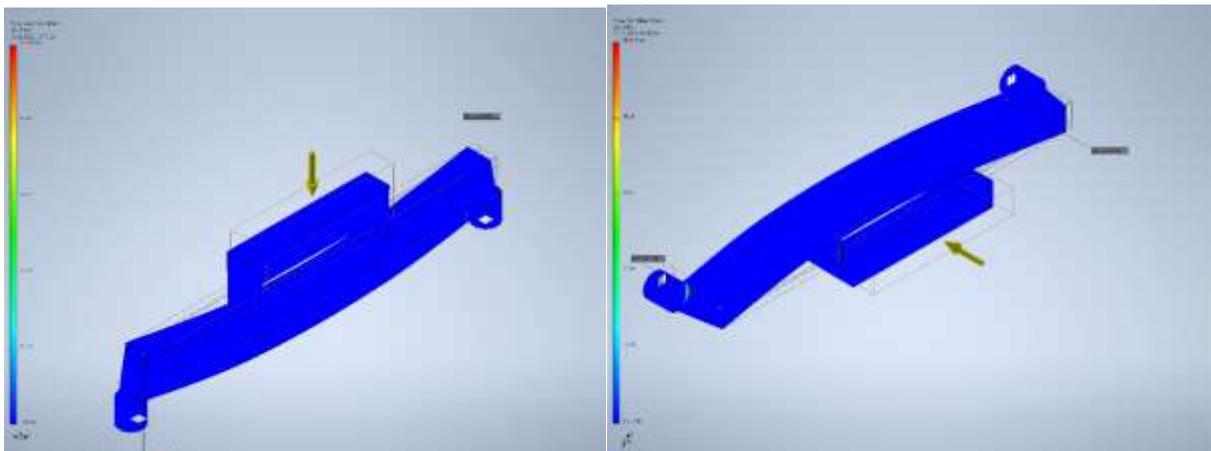
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	32570800 mm ³	
Mass	98,6957 kg	
Von Mises Stress	0,00582511 MPa	56,4442 MPa
1st Principal Stress	-45,322 MPa	51,0831 MPa
3rd Principal Stress	-103,355 MPa	11,0342 MPa
Displacement	0 mm	0,31088 mm
Safety Factor	0,215479 ul	15 ul
Stress XX	-52,1785 MPa	14,9258 MPa
Stress XY	-13,9853 MPa	14,1699 MPa
Stress XZ	-17,0809 MPa	18,4343 MPa
Stress YY	-88,2112 MPa	45,3584 MPa

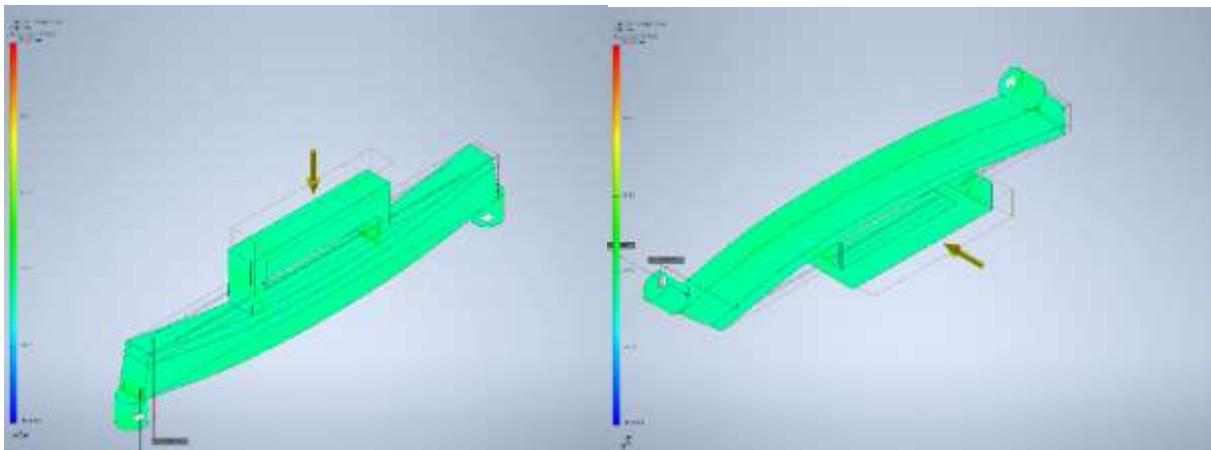
Stress YZ	-25,1065 MPa	24,4742 MPa
Stress ZZ	-60,4867 MPa	37,0386 MPa
X Displacement	-0,00149332 mm	0,00519709 mm
Y Displacement	-0,304911 mm	0,0130154 mm
Z Displacement	-0,121776 mm	0,000151119 mm
Equivalent Strain	0,000000190784 ul	0,000548148 ul
1st Principal Strain	-0,0000010815 ul	0,000485674 ul
3rd Principal Strain	-0,000662866 ul	0,00000151401 ul
Strain XX	-0,0000661016 ul	0,0000687987 ul
Strain XY	-0,000143568 ul	0,000100143 ul
Strain XZ	-0,000183066 ul	0,000113264 ul
Strain YY	-0,000462397 ul	0,000439764 ul
Strain YZ	-0,000332361 ul	0,000323989 ul
Strain ZZ	-0,000341438 ul	0,000224428 ul

Figures

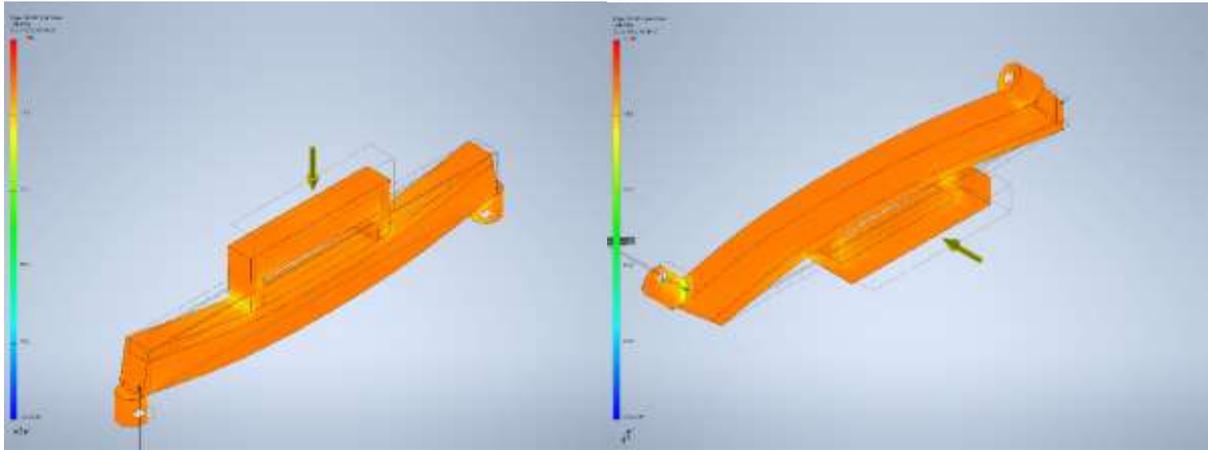
Von Mises Stress



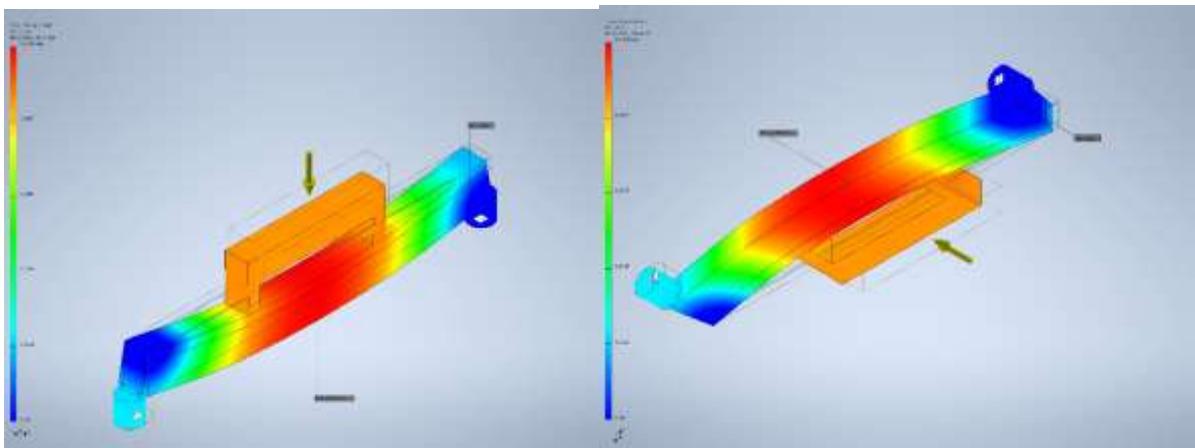
1st Principal Stress



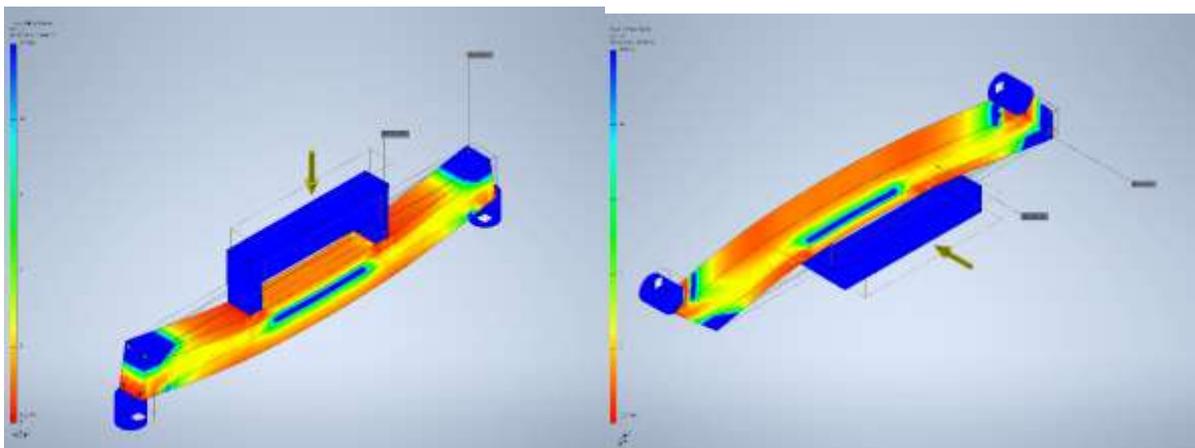
3rd Principal Stress



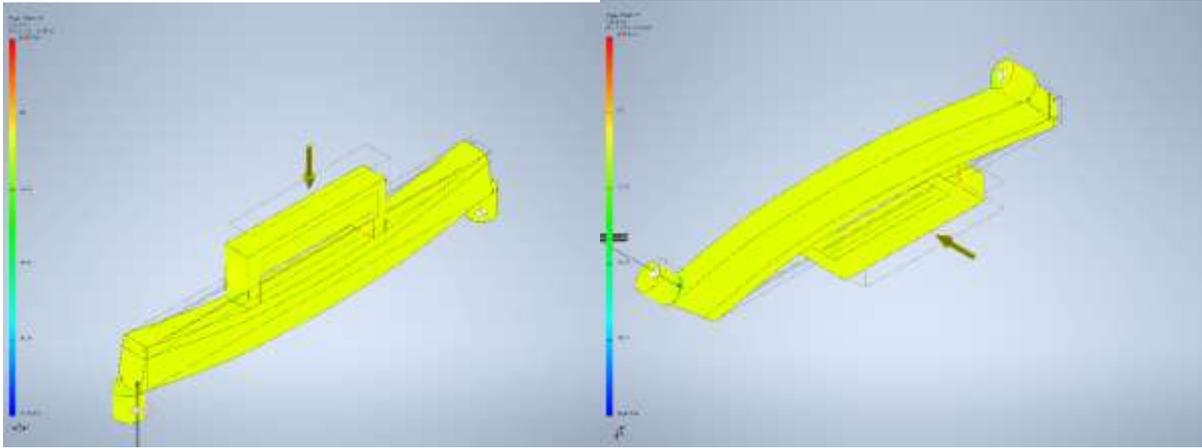
Displacement



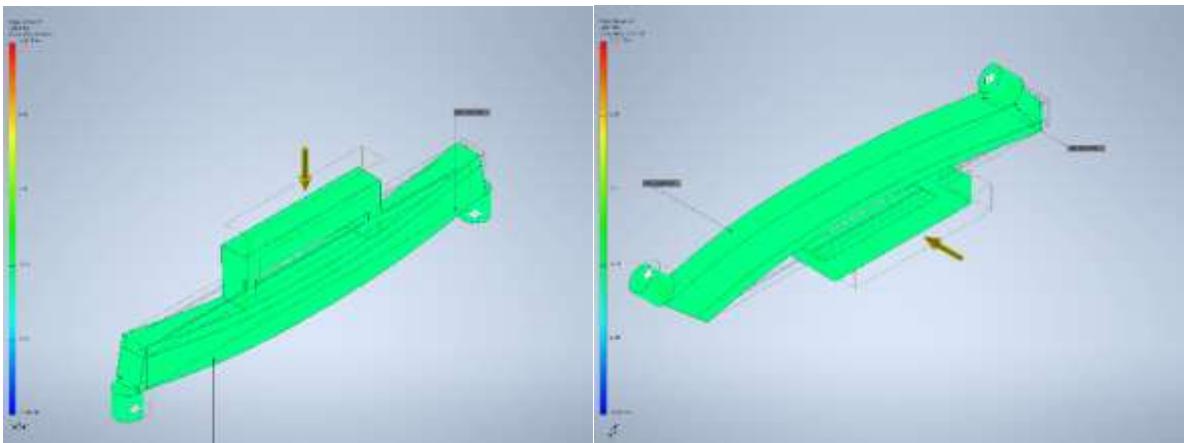
Safety Factor



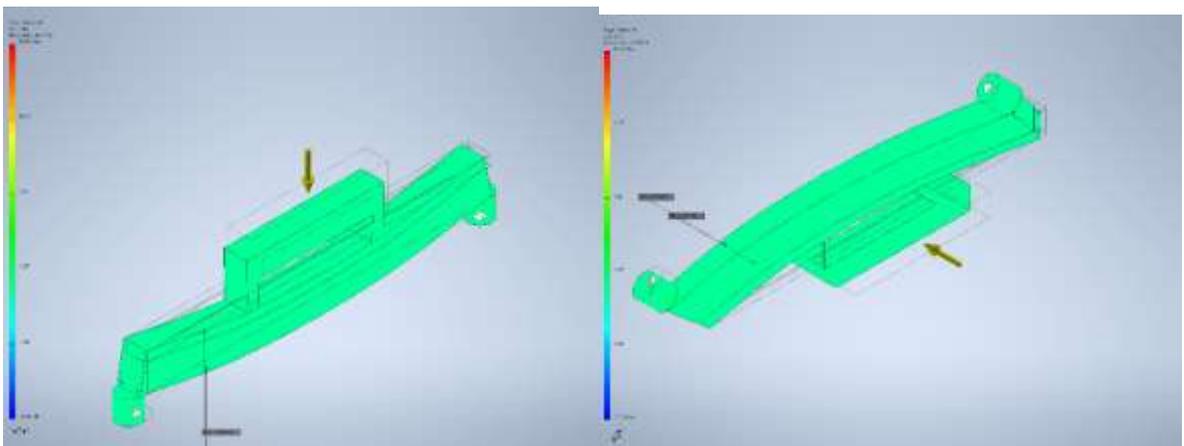
Stress XX



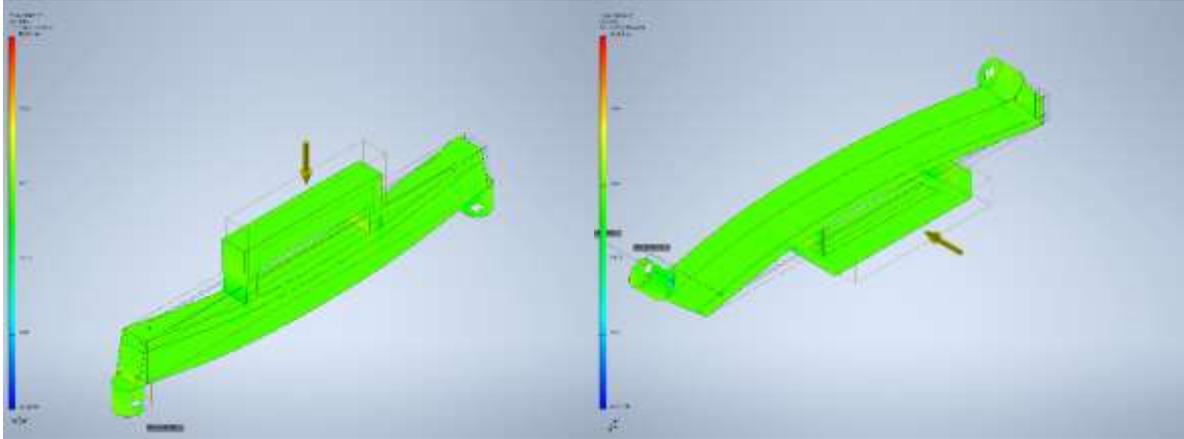
Stress XY



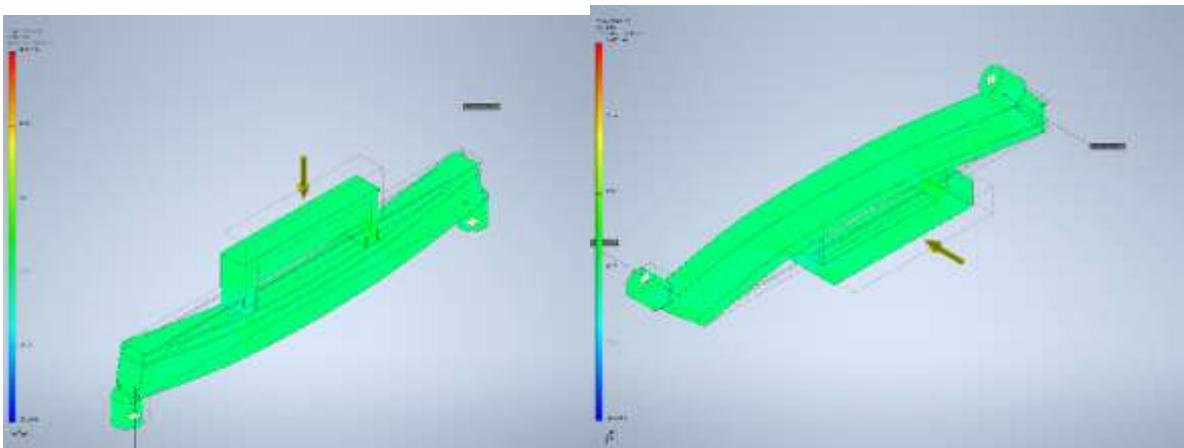
Stress XZ



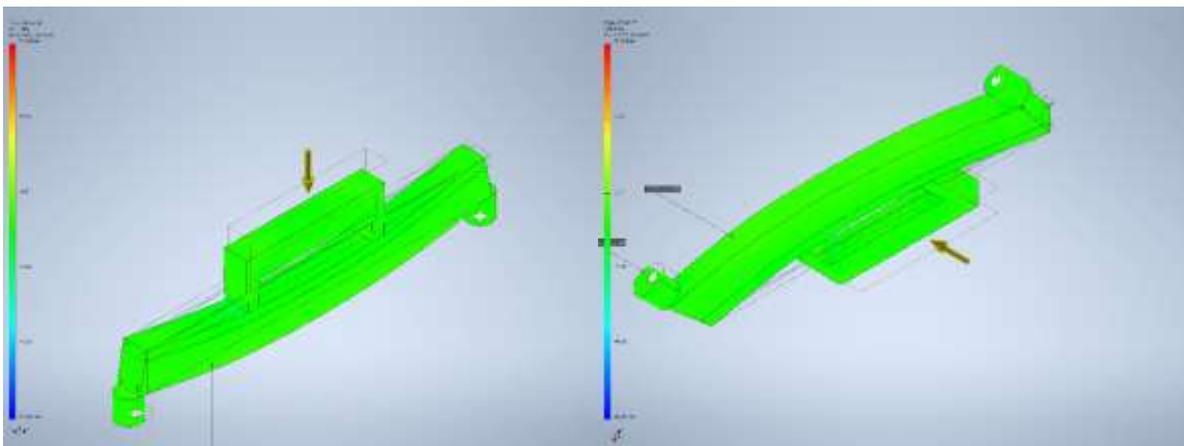
Stress YY



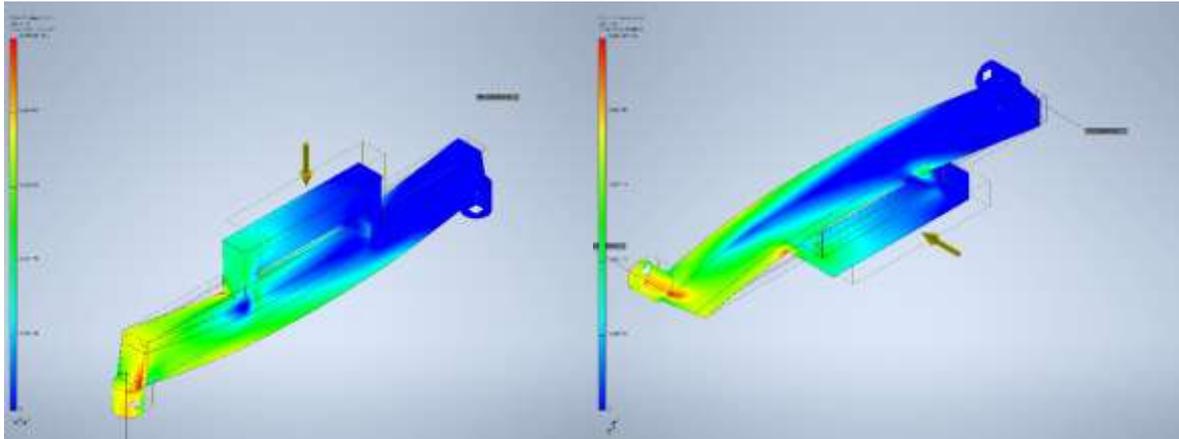
Stress YZ



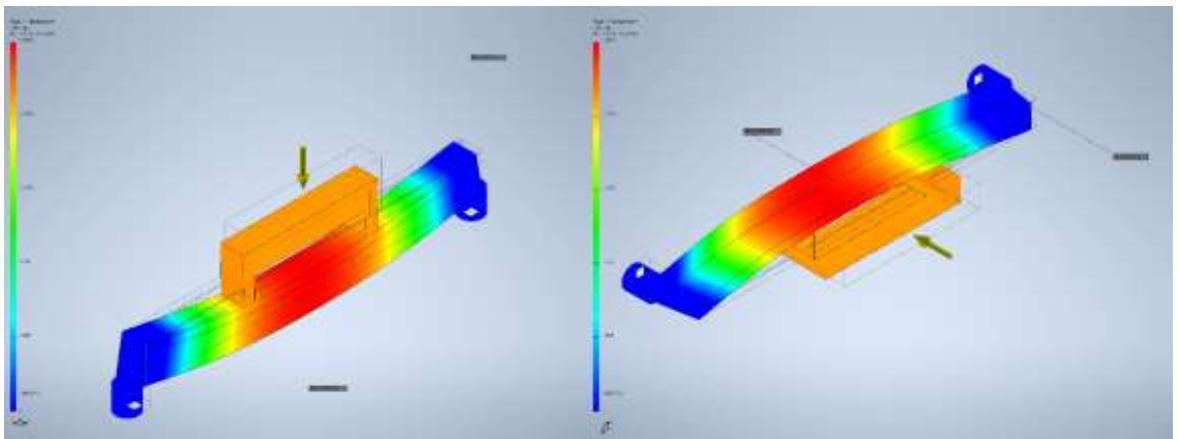
Stress ZZ



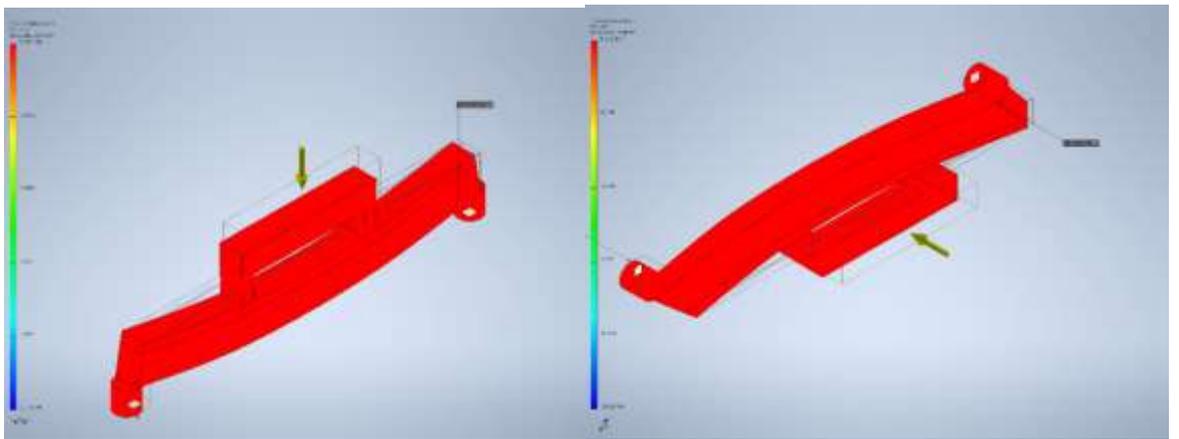
X Displacement



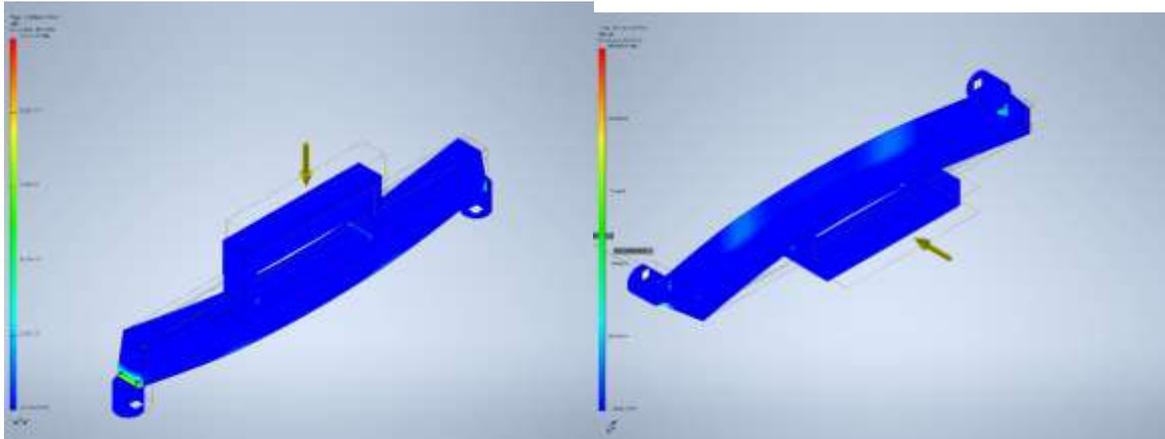
Y Displacement



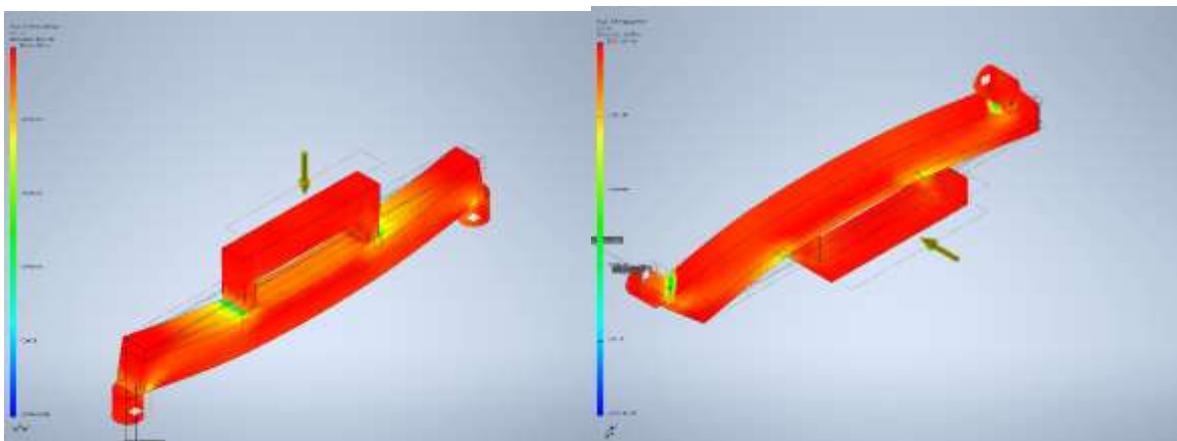
Z Displacement



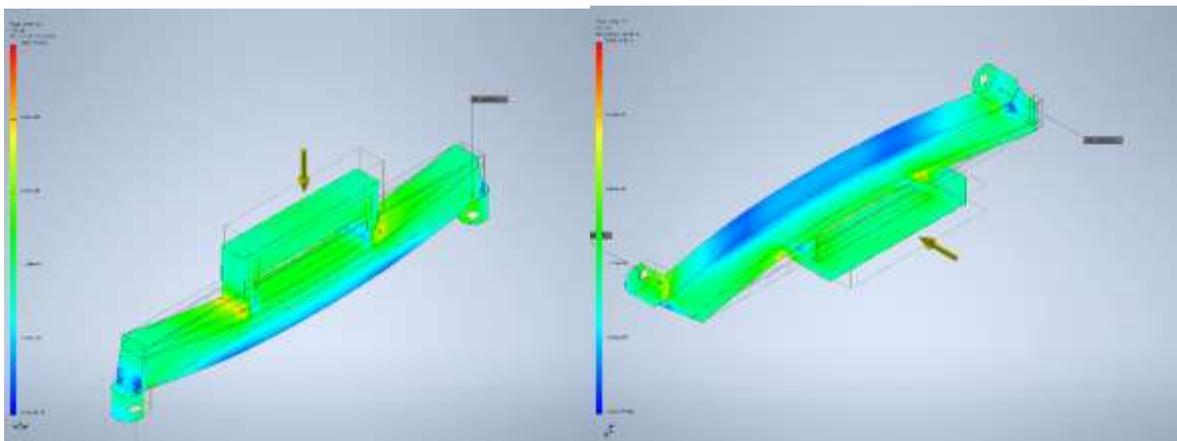
1st Principal Strain



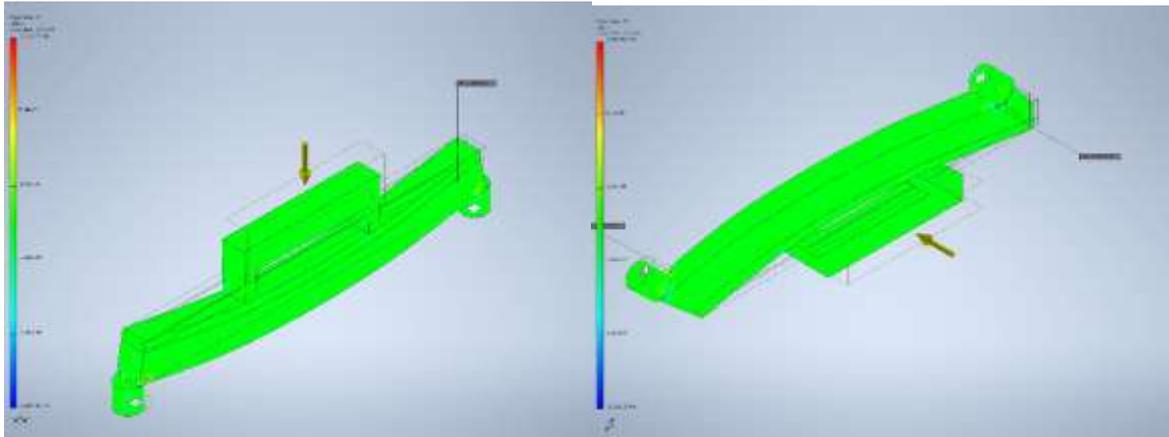
3rd Principal Strain



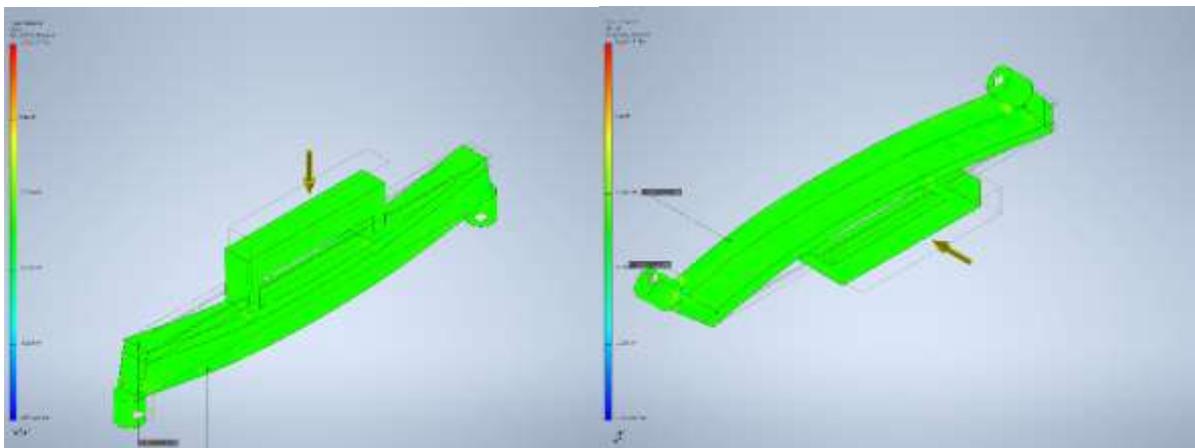
Strain XX



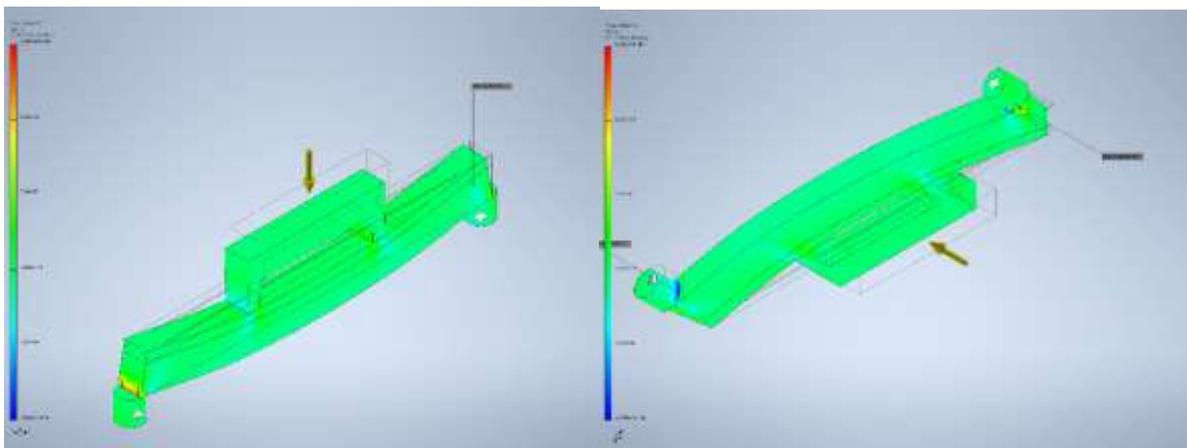
Strain XY



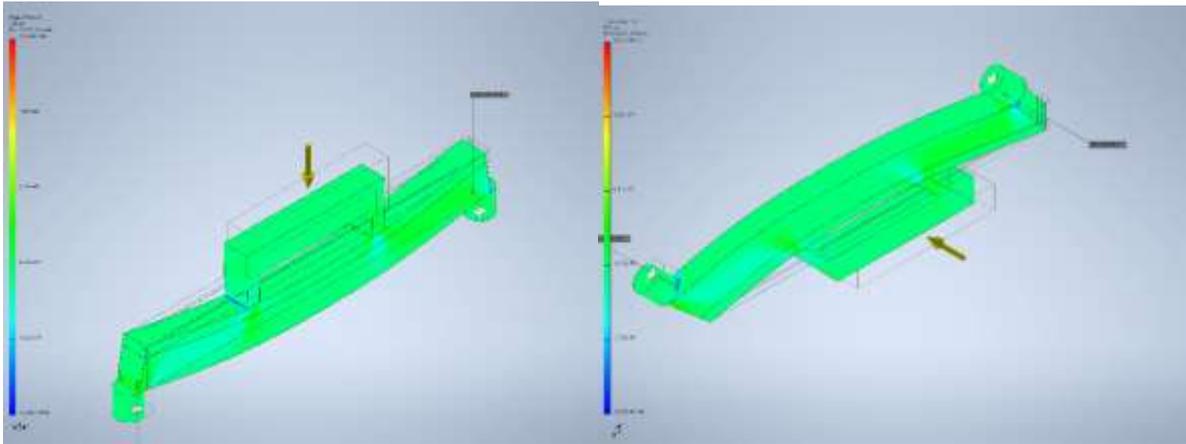
Strain XZ



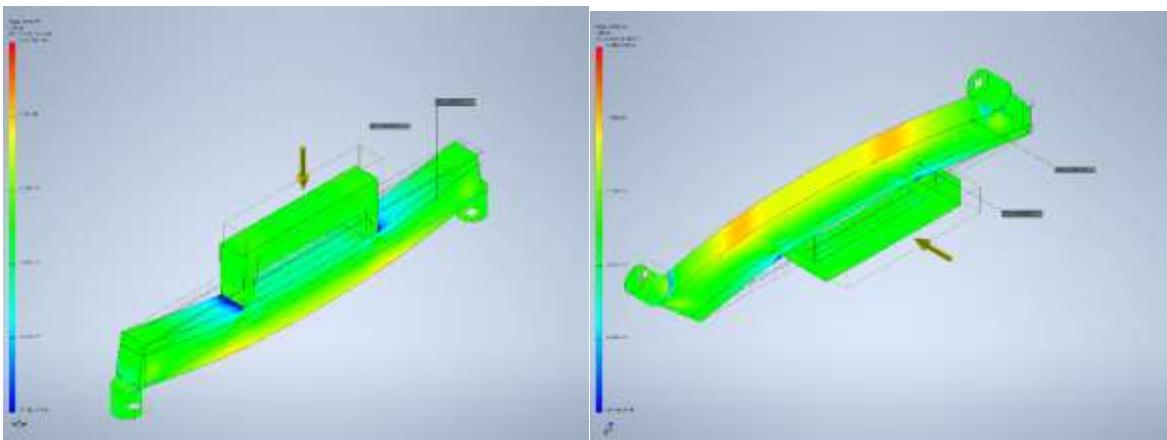
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



3.5 Аналіз скінченно-елементного розрахунку моделі бібетонної армованої балки марки 120-40

Results

Reaction Force and Moment on Constraints

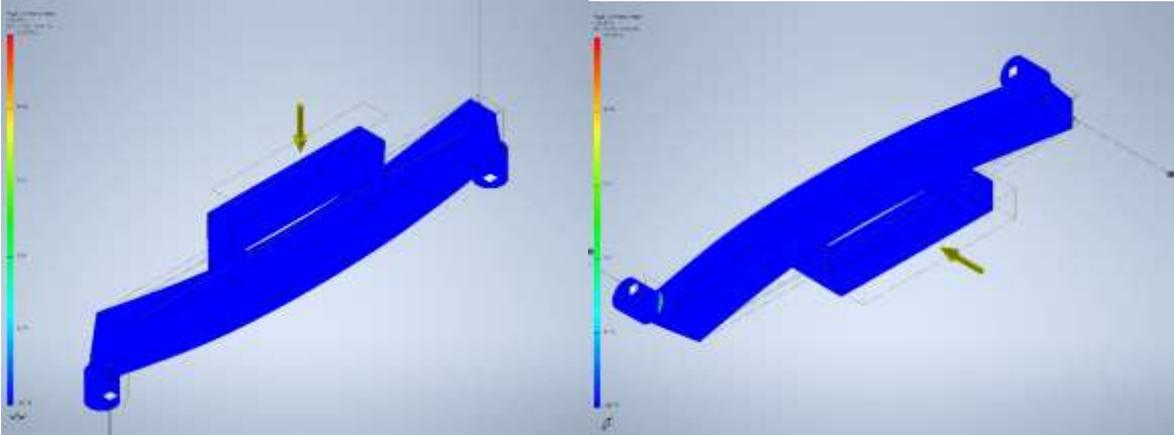
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Frictionless Constraint:1	4975,81 N	0 N	440,892 N m	-440,892 N m
		4975,81 N		0 N m
		0 N		0 N m
Fixed Constraint:1	5024,73 N	0 N	461,013 N m	461,007 N m
		5024,73 N		0,500356 N m
		0 N		2,43755 N m

Result Summary

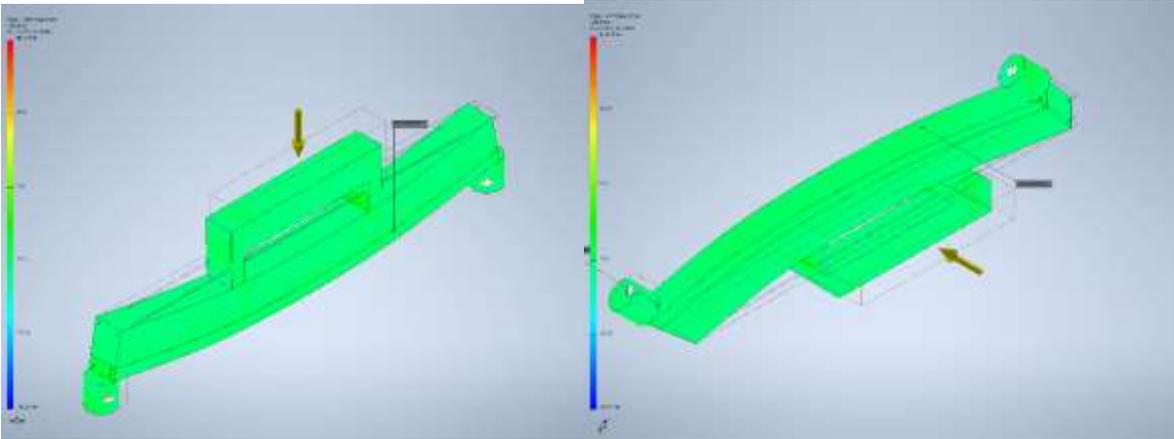
Name	Minimum	Maximum
Volume	32570800 mm ³	
Mass	98,6957 kg	
Von Mises Stress	0,00651256 MPa	53,7292 MPa
1st Principal Stress	-45,2581 MPa	44,6532 MPa
3rd Principal Stress	-100,718 MPa	9,46672 MPa
Displacement	0 mm	0,290586 mm
Safety Factor	0,248179 ul	15 ul
Stress XX	-51,1682 MPa	13,1486 MPa
Stress XY	-11,4545 MPa	9,91239 MPa
Stress XZ	-21,0997 MPa	22,2342 MPa
Stress YY	-83,4351 MPa	22,3933 MPa
Stress YZ	-25,1306 MPa	25,533 MPa
Stress ZZ	-61,9251 MPa	41,3213 MPa
X Displacement	-0,00347732 mm	0,00147336 mm
Y Displacement	-0,284881 mm	0,0122682 mm
Z Displacement	-0,115253 mm	0,00014913 mm
Equivalent Strain	0,000000259743 ul	0,000534888 ul
1st Principal Strain	-0,0000024724 ul	0,000493804 ul
3rd Principal Strain	-0,000647198 ul	0,00000546486 ul
Strain XX	-0,0000621954 ul	0,0000760775 ul
Strain XY	-0,000107268 ul	0,00013039 ul
Strain XZ	-0,000144828 ul	0,000155718 ul
Strain YY	-0,000414438 ul	0,000451211 ul
Strain YZ	-0,000332679 ul	0,000338006 ul
Strain ZZ	-0,000336521 ul	0,000185548 ul

Figures

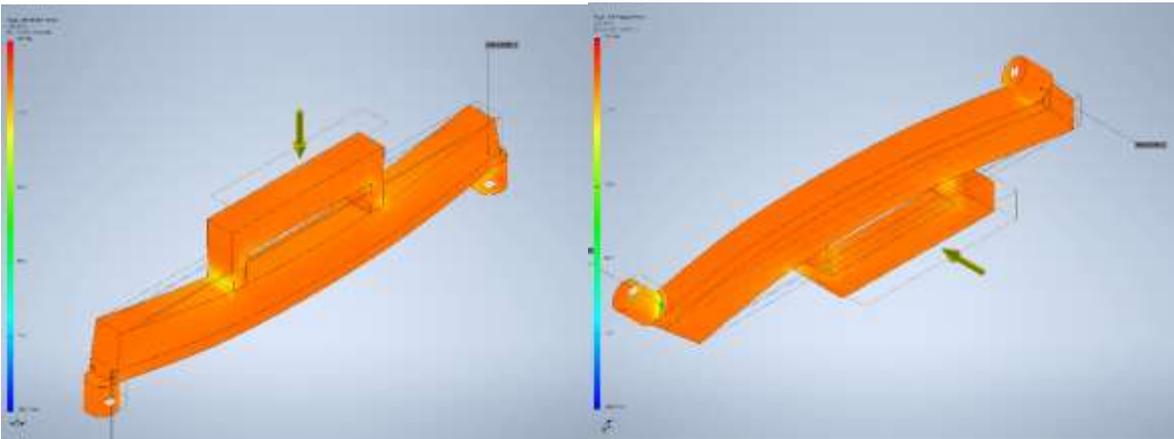
Von Mises Stress



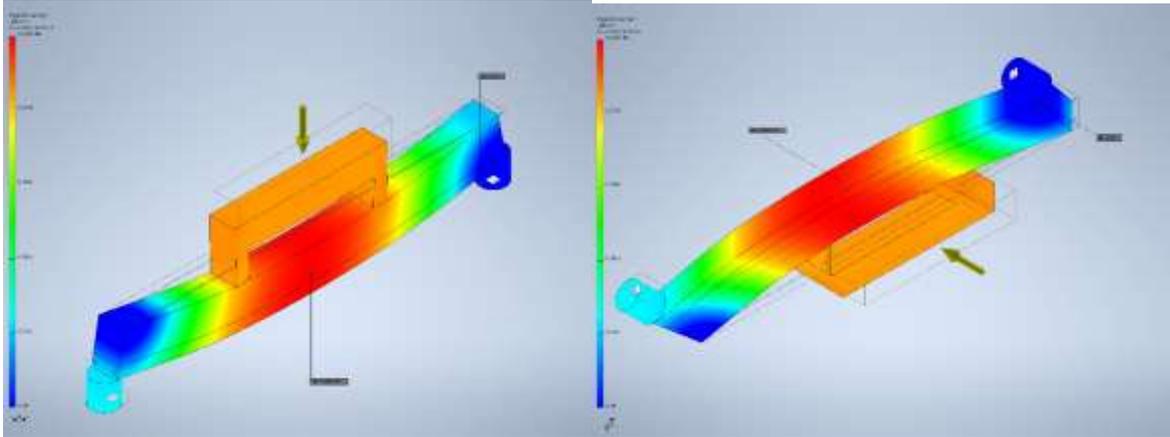
1st Principal Stress



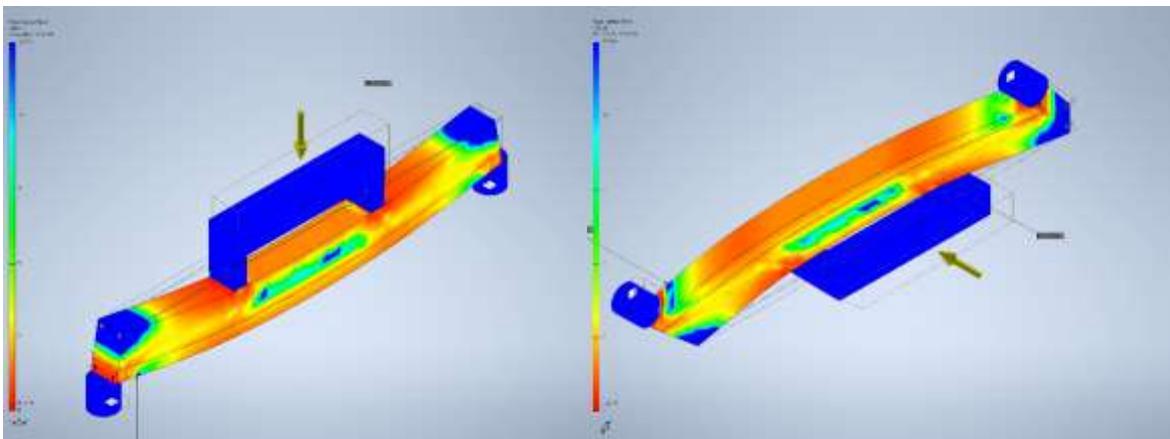
3rd Principal Stress



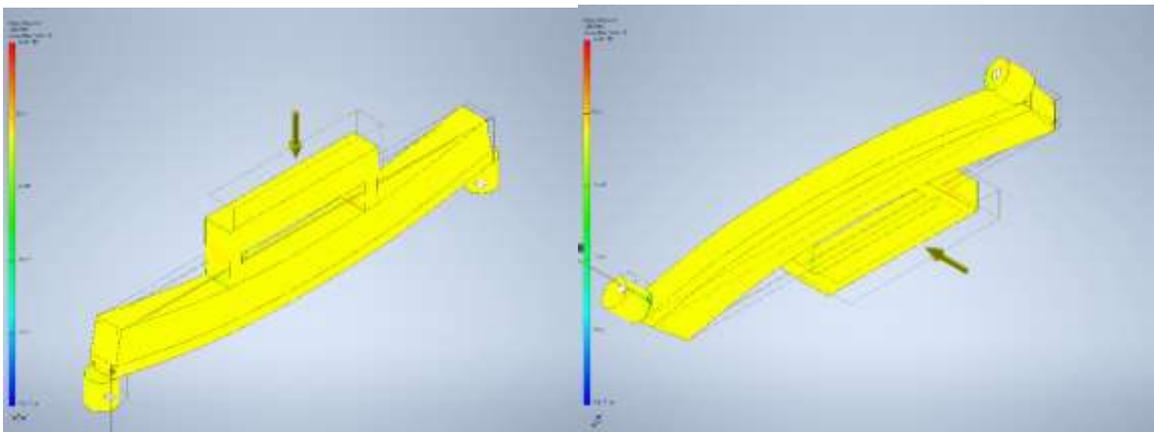
Displacement



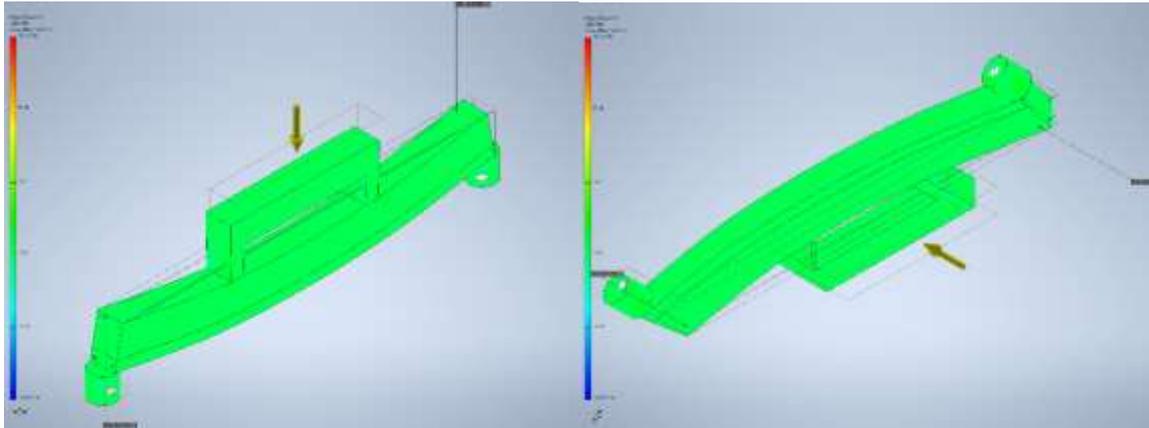
Safety Factor



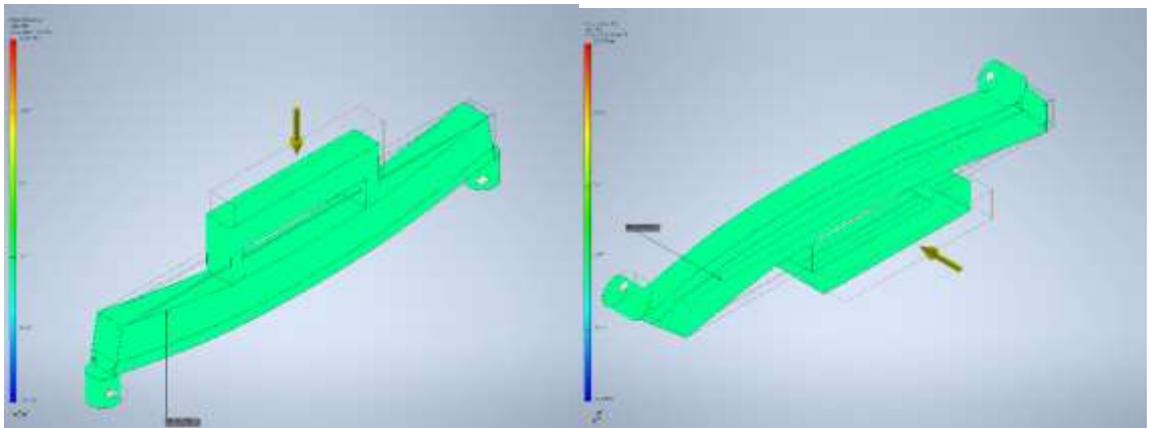
Stress XX



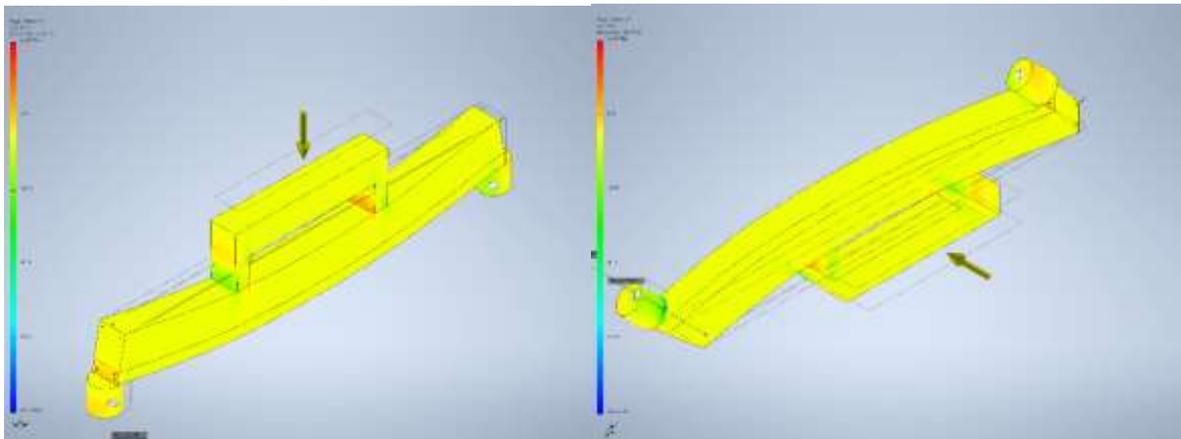
Stress XY



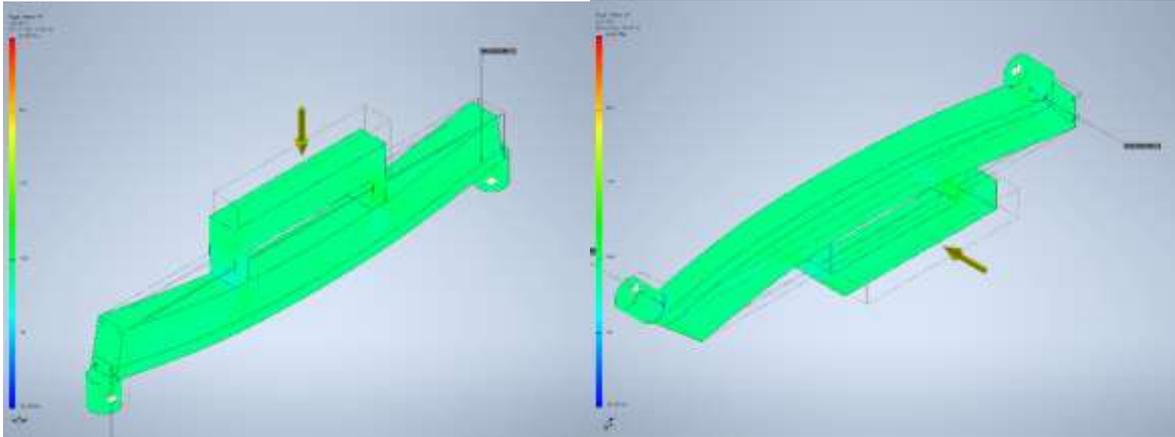
Stress XZ



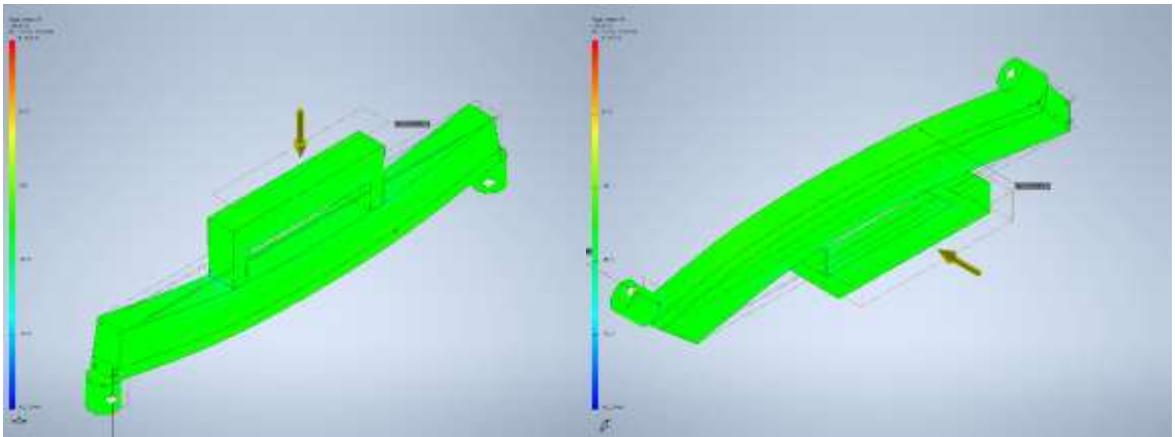
Stress YY



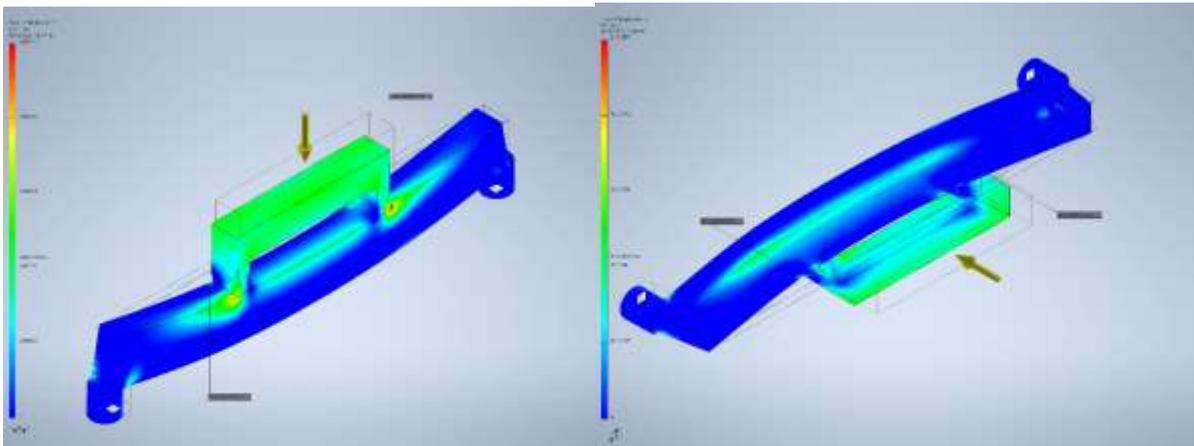
Stress YZ



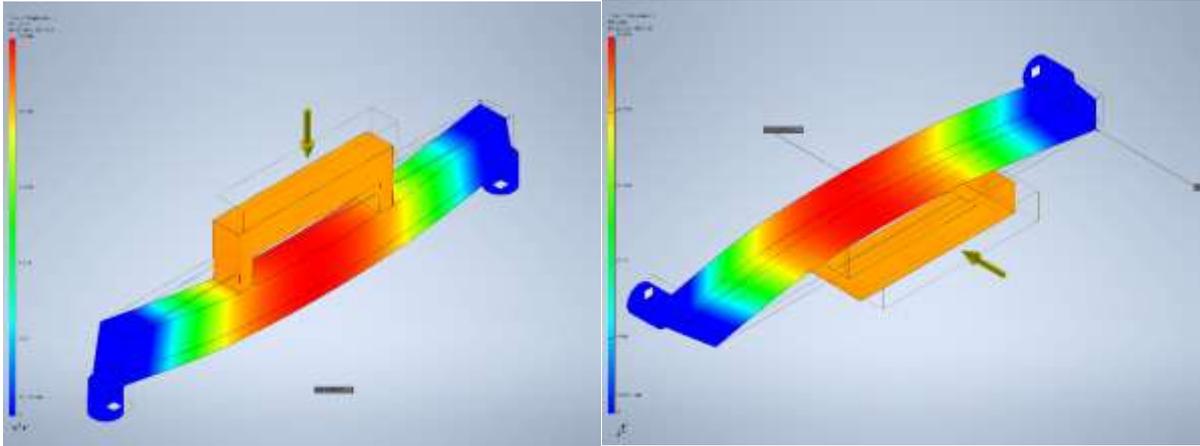
Stress ZZ



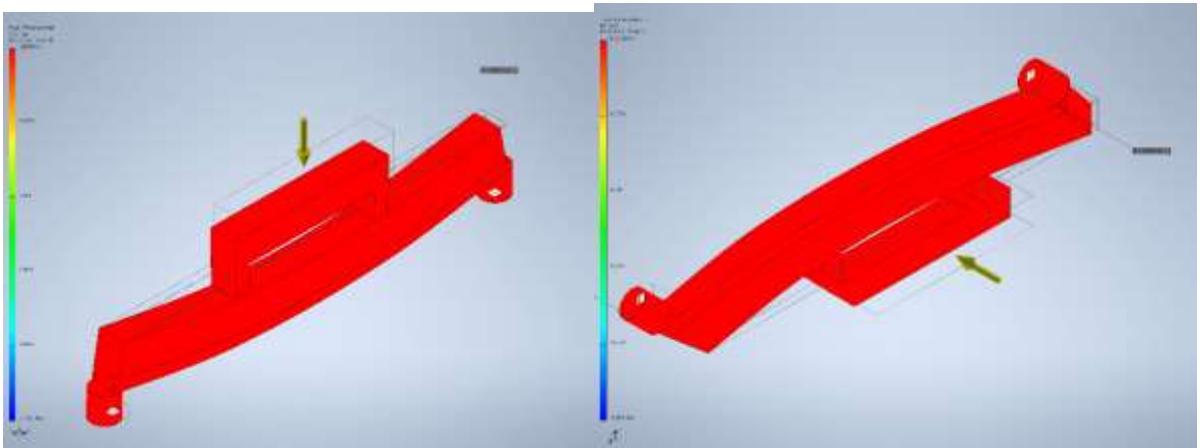
X Displacement



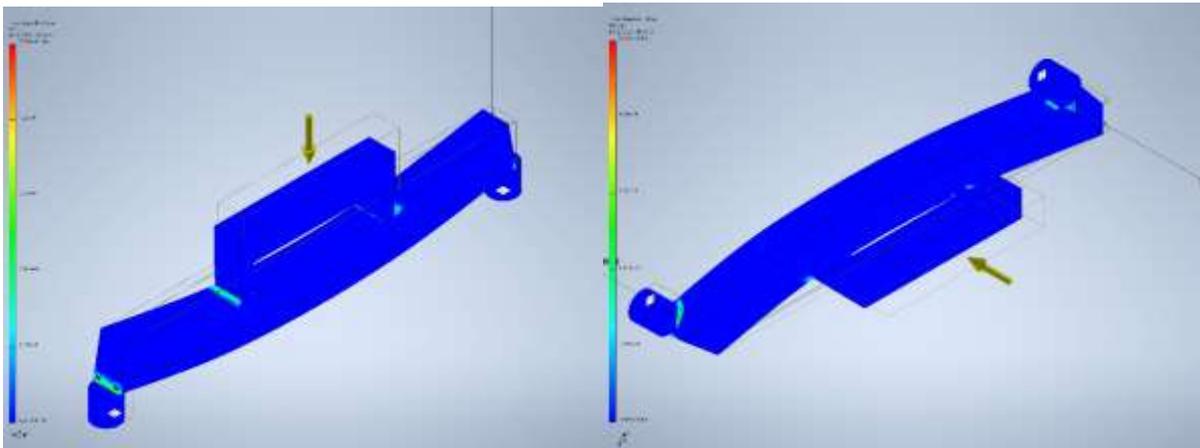
Y Displacement



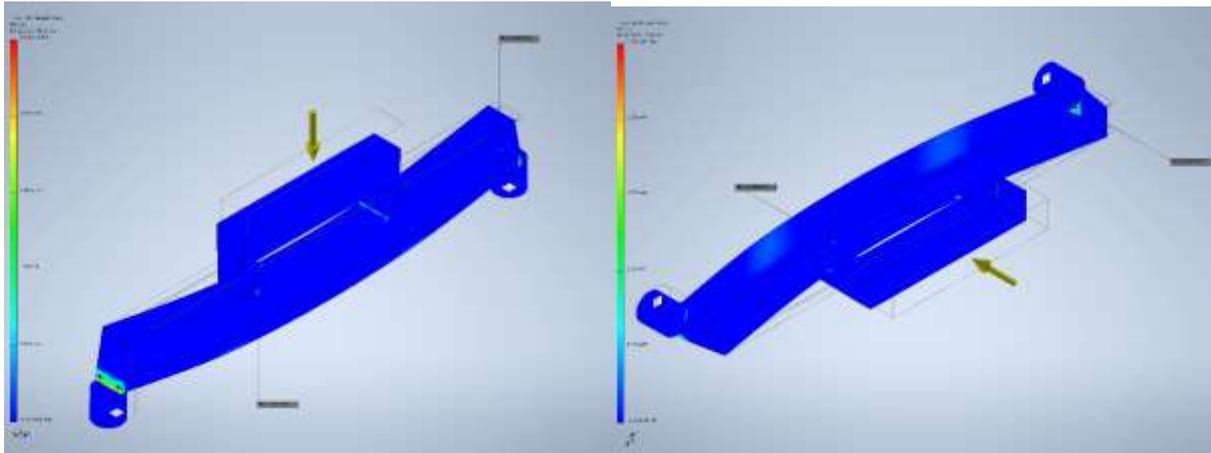
Z Displacement



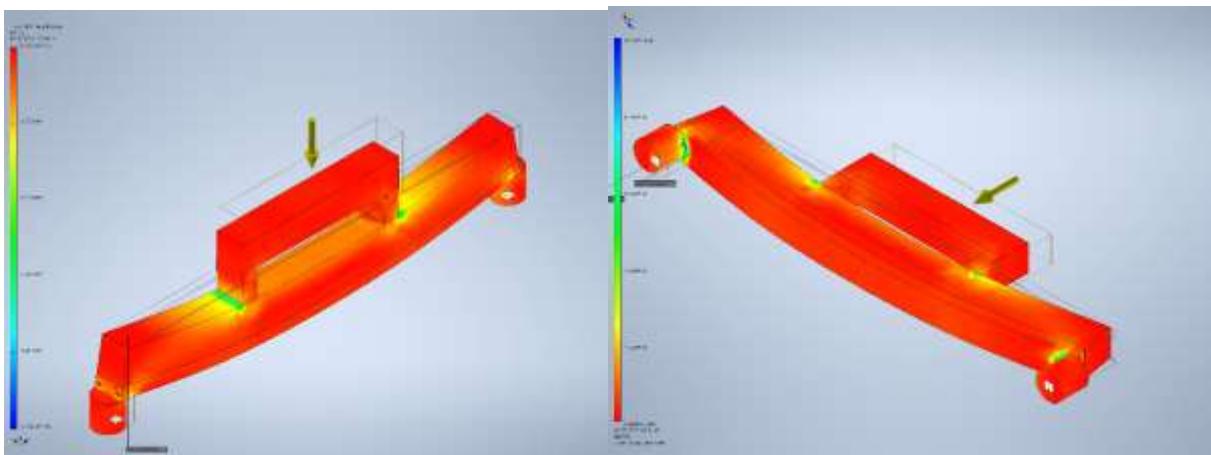
Equivalent Strain



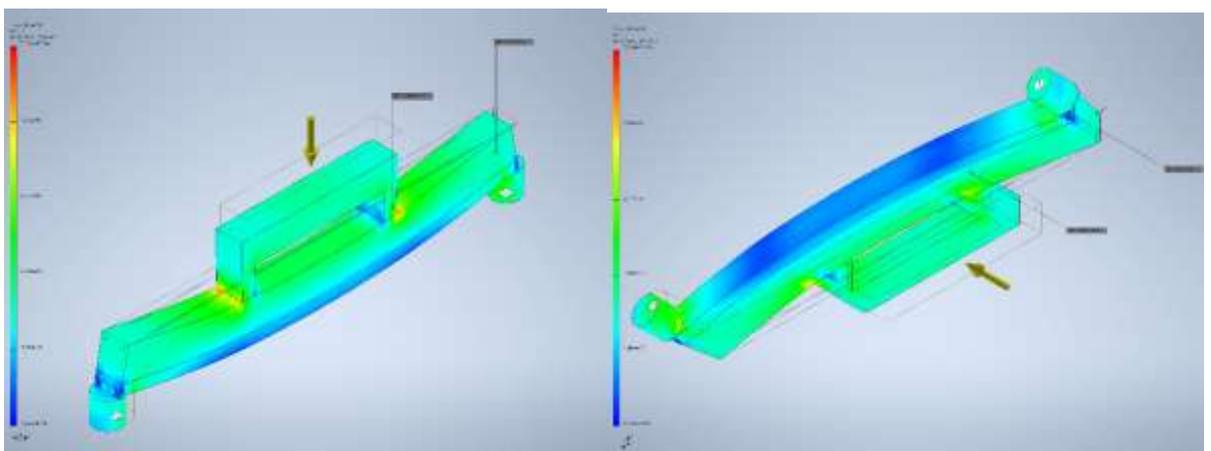
1st Principal Strain



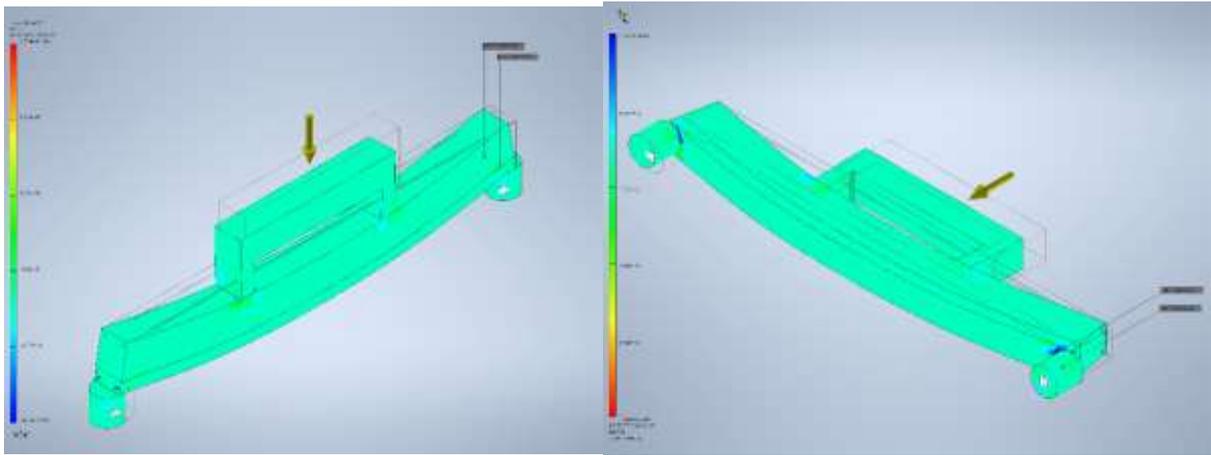
3rd Principal Strain



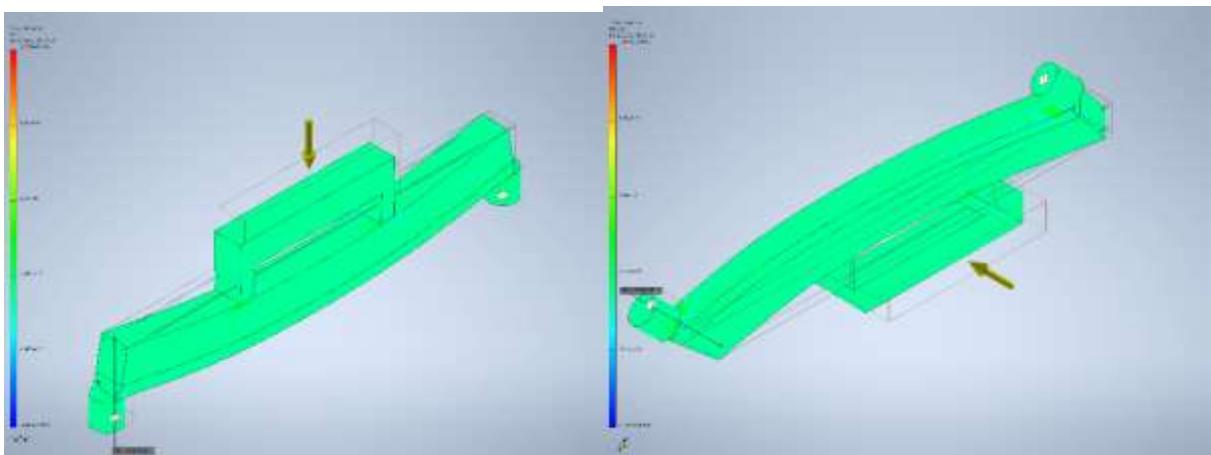
Strain XX



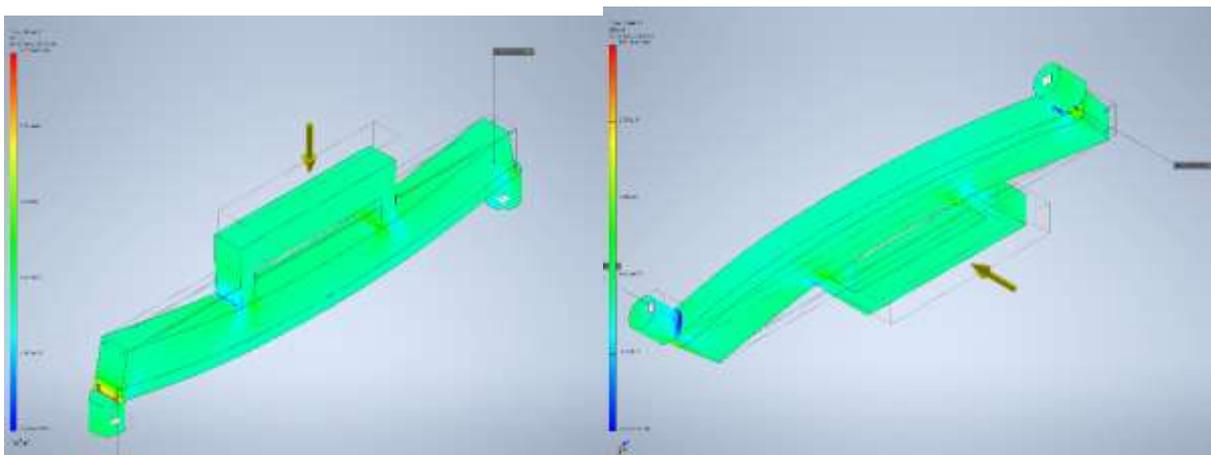
Strain XY



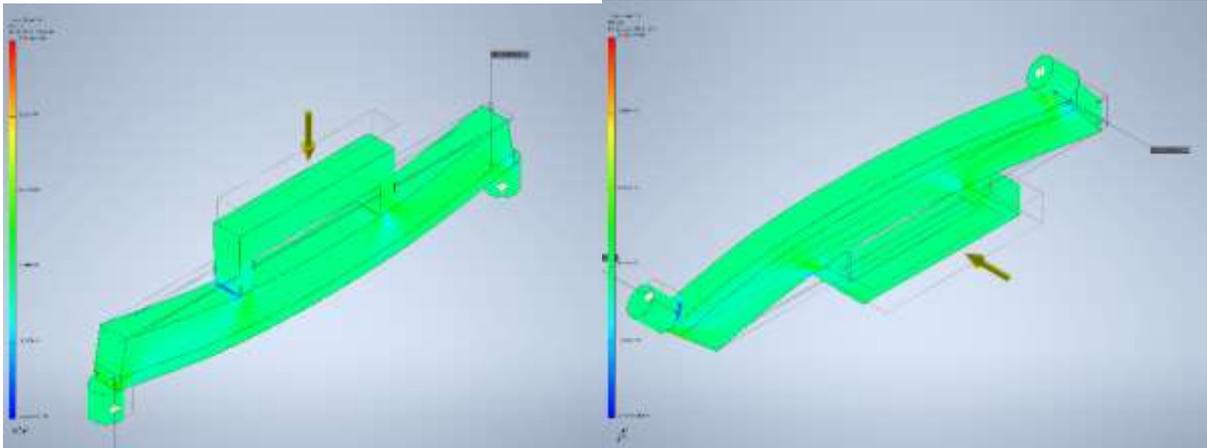
Strain XZ



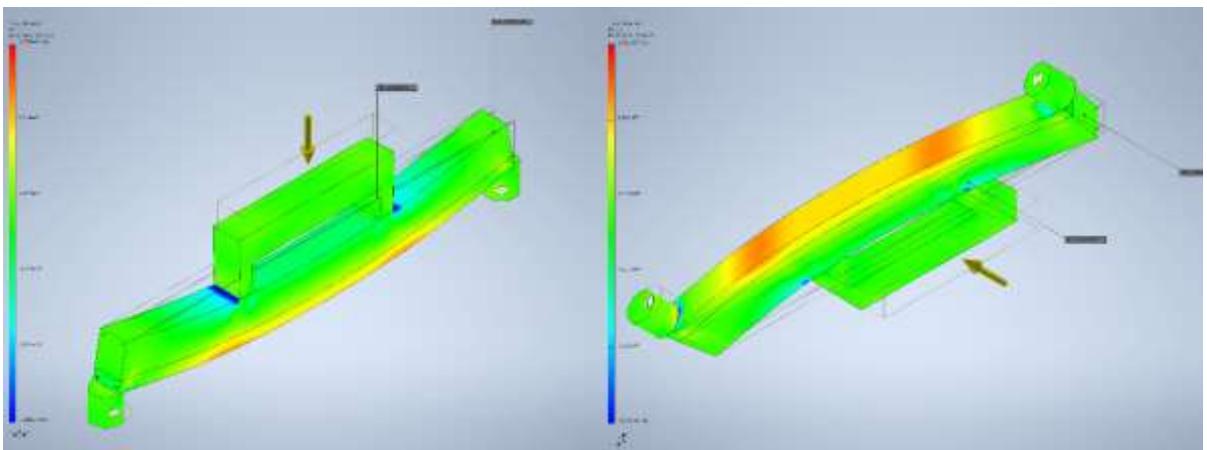
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



Висновки до третього розділу

1. За результатами виконаного чисельного моделювання реконструйованих мостових конструкцій визначено наступне.

1.1. Балка 80/80:

Стійкість: Коефіцієнт стійкості - 0.18734, найнижчий серед усіх.

Деформації: Максимальне переміщення - 0.309397 mm.

Напруження: Максимальний Von Mises Stress - 52.9947 МПа.

1.2. Балка 55/105:

Стійкість: Коефіцієнт стійкості - 0.193951, нижчий порівняно з іншими.

Деформації: Максимальне переміщення - 0.308554 mm.

Напруження: Максимальний Von Mises Stress - 52.9947 МПа.

1.3. Балка 105/55:

Стійкість: Коефіцієнт стійкості - 0.215479, середній показник.

Деформації: Максимальне переміщення - 0.31088 mm.

Напруження: Максимальний Von Mises Stress - 53.7292 МПа.

1.4. Балка 40/120:

Стійкість: Коефіцієнт стійкості - 0.248179, високий рівень стійкості.

Деформації: Максимальне переміщення - 0.290586 mm.

Напруження: Максимальний Von Mises Stress - 53.7292 МПа.

1.5. Балка 120/40:

Стійкість: Коефіцієнт стійкості - 0.248179, високий рівень стійкості.

Деформації: Максимальне переміщення - 0.290586 mm.

Напруження: Максимальний Von Mises Stress - 53.7292 МПа.

2. Балка 120/40 та балка 40/120 виявилися з найбільшим запасом несучої здатності, маючи високий коефіцієнт стійкості та прийнятні рівні максимальних переміщень та напружень. Найнадійнішою в цьому аналізі є балка 120/40, так як вона має високий коефіцієнт стійкості та одні з найнижчих значень максимальних напружень і переміщень порівняно з іншими балками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Метод скінченних елементів добре зарекомендував себе за останні 50-60 років, як числова техніка знаходження розв'язків інтегральних та диференціальних рівнянь у частинних похідних. За допомогою цих програм можливо із достатньою точністю враховувати реальні умови та навантаження на мостові споруди.
2. Виконано розгляд пошкоджень мостових конструкцій, що виникають під час експлуатації. Особливу увагу приділено пошкодженням мостових конструкцій, що виникли в результаті воєнних дій на території України. . За своїм характером руйнування мостів можна поділити на наступні основні групи: 1) повне руйнування мосту на всій його довжині; 2) повне руйнування мосту на частині його довжини; 3) руйнування окремих елементів мосту (прогонових будов, опор, тощо); 4) дрібні пошкодження мосту, що не викликали обвалення його частин.
3. Детально розглянуто алгоритм та виконано створення скінченно-елементної моделі бібетонної армованої балки у програмному комплексі Autodesk Inventor Pro 2021. Просторова скінченно-елементна модель бібетонної армованої балки складалася із двох бетонів та сталевих арматурних стержнів. При цьому геометрія повнотілих арматурних стержнів виокремлювалася із геометрії бетону.
4. За результатами виконаного чисельного моделювання реконструйованих мостових конструкцій визначено наступне. Балка 120/40 та балка 40/120 виявилися з найбільшим запасом несучої здатності, маючи високий коефіцієнт стійкості та прийнятні рівні максимальних переміщень та напружень. Найнадійнішою в цьому аналізі є балка 120/40, так як вона має високий коефіцієнт стійкості та одні з найнижчих значень максимальних напружень і переміщень порівняно з іншими балками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прокопенко Ю. В., Татарчук Д. Д., Казміренко В. А. Обчислювальна математика: *Навчальний посібник*. – К.: Видавництво, 2013. – 224 с.
2. Легостаєв А.Д. Метод скінченних елементів: *конспект лекцій*. К.: КНУБА, 2004. – 112 с.
3. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: *Навчальний посібник*. Чернігів: ЧДТУ, 2007. – 288 с.
4. Мусинова В.Ц. MSC/NASTRAN. *Керівництво користувача*. – The MacNeal-Schwendler Corporation, 1995. – 188 с.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 97 с.
6. Павліков А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косо завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: *монографія*. Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 259 с.
7. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Розрахункові моделі споруд та можливість їх аналізу. Київ, вид-во “Сталь”. – 600 с.
8. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М., Стабровський О.О. Визначення прогнозованої вартості проведення ремонтів мостів з використанням аналітичної експертної системи управління мостами. *Збірник «Дороги і мости»*. Київ, 2016. Випуск 16. С. 28–35.
9. Види штучних споруд на автомобільних і міських дорогах. *URL: https://vuzlit.ru/1087176/vidi_shtuchnih_sporud_avtomobilnih_miskih_dorogah* (дата звернення: 27.11.2021).
10. Безпечні дороги: на Львівщині відбулась дискусія щодо модернізації та підвищення безпеки дорожнього руху. *URL: <https://loda.gov.ua/news?id=39600>* (дата звернення: 28.11.2021).

11. Регіональна програма розвитку та безпеки дорожнього руху в Донецькій області до 2020 року. Розробник: Департамент розвитку базових галузей промисловості облдержадміністрації. Донецьк, 2019. – 14 с.
12. У 2020 році було відновлено 213 штучних споруд. Прес центр Укравтодор.
https://ukravidor.gov.ua/press/news/u_2020_rotsi_bulo_vidnovleno_213_sh_tuchnykh_sporud.html (дата звернення: 25.11.2021).
13. Безпека руху: Службою посилено нагляд за організацією дорожнього руху в місцях проведення ремонтних робіт. Прес центр Укравтодор.
https://dn.ukravidor.gov.ua/press/news/bezpeka_rukhu_sluzhboiu_posyleno_nahliad_za_orhanizatsiieiu_dorozhnoho_rukhu_v_mistsiakh_provedennia_remontnykh_robit.html (дата звернення: 25.11.2021).
14. Мости Києва. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/mosti-kieva/#12> (дата звернення: 25.09.2021).