

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

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

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Моделювання поведінки залізобетонних елементів за дії  
вибухового навантаження»

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

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Гришков Д.Ю.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Ясній В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

Рецензент   
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

Кафедра Будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр  
(назва освітнього ступеня)

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

студенту Гришкову Денису Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання поведінки залізобетонних елементів за дії вибухового навантаження

Керівник роботи Ясній Володимир Петрович, д.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Спосіб дослідження напружено-деформованого стану методом скінчених елементів, розрахункові комплекси LS-DYNA, ANSYS та Abaqus

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)  
Огляд літературних джерел пов'язаних із дослідженням залізобетону вибуховим методом та псевдопружними сплавами пам'яті форми. Встановлення задач для проведення власних досліджень. Методика дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних балок під дією динамічного навантаження. Виконання встановлених досліджень. Аналіз отриманих результатів досліджень. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)  
Мультимедійна презентація відповідно до кваліфікаційної роботи, що включає: опис концепцій захисту конструкцій від вибухового навантаження та застосування NiTi СПФ у будівництві; результати розробки методології аналізу НДС залізобетонних балок в програмному комплексі ANSYS; результати дослідження залізобетонних балок з різними типами армування та розмірами вставки NiTi в ANSYS; аналіз отриманих результатів; заходи для охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; висновки

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 10.04.2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

(підпис)

Гришков Д.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Ясній В.П.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИБУХОВИМ МЕТОДОМ. ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У БУДІВНИЦТВІ .....	7
1.1 Поведінка бетону під дією вибухового навантаження .....	7
1.2 Небезпека явища вибуху для конструкцій .....	10
1.3 Моделювання поведінки бетону засобами САПР .....	13
1.4 Практичне використання досліджень методом вибуху у будівництві.....	20
1.5 Використання «розумних систем» в будівництві .....	23
1.6 Висновок до розділу 1 .....	25
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ВИБУХУ .....	26
2.1 Вибір програмного комплексу .....	26
2.2 Створення моделі та задання параметрів.....	31
2.3 Створення об'ємної моделі досліджуваного елемента.....	35
2.4 Задання параметрів розрахункової моделі .....	37
2.5 Висновок до розділу 2 .....	41
РОЗДІЛ 3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ПІД ДІЄЮ ВИБУХУ .....	42
3.1 Загальна інформація щодо дослідження .....	42
3.2 Напружено-деформований стан балки з різними видами армування.....	42
3.3 Аналіз напружено-деформованого стану вставки Ni-Ti.....	56
3.4 Висновок до розділу 3 .....	71
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	72
4.1 Загальні положення .....	72
4.2 Охорона праці при роботі з ручним та електричним інструментом.....	73
4.3 Правила розміщення та улаштування сховищ .....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	77
БІБЛІОГРАФІЯ .....	78

## ВСТУП

Вибухові та осколкові навантаження характеризуються швидкими перехідними процесами та великими фізичними значеннями і можуть викликати відповідну реакцію в залізобетонній конструкції, яка зазнала впливу такого явища. Даний тип навантаження суттєво відрізняється від статичного. Та окрім зміни поведінки на структурному рівні, динамічні ефекти також сильно впливають на реакцію на рівні матеріалу. Висока швидкість такого навантаження та вплив інерції матеріалу спричиняють локального накопичення високих рівнів граничного тиску. Поведінка бетону є дуже чутливою до тиску і швидкості деформації, при цьому майже миттєвий характер навантаження призводить до підвищеної міцності і пластичності [1].

Однак, високі рівні тиску спричиняють значні деформації та нелінійну поведінку матеріалу. За досить високого рівню тиску і короткої тривалості навантаження, ефекти поширення хвиль можуть спричинити утворення і подальше поширення так званих ударних хвиль у матеріалі, що також впливає на реакцію матеріалу. Таким чином, реакція бетону, що зазнав впливу вибуху та осколкового навантаження, є дуже складною, і, незважаючи на десятиліття досліджень у цій галузі, явища пов'язані з цим, ще не дуже добре вивчені.

Для того, щоб охарактеризувати і дослідити реакції бетонних конструкцій, що зазнали впливу вибуху та/або осколків, використовувалися різні підходи. Традиційно, цей тип досліджень був переважно експериментальним. Однак, в останні роки використання методів чисельного моделювання стало більш поширеним і сьогодні є важливим доповненням до фізичних випробувань [1].

Використання чисельного моделювання має ряд переваг, головною з яких є можливість знизити вартість, особливо у випадку дослідження параметрів, а також перспектива спостерігати за реакцією в сповільненому русі, що є другим суттєвим плюсом. Однак, перевірка та правильне задання числової моделі є надзвичайно трудомісткими і необхідними процесами, що говорить нам про неможливість повної заміни фізичних випробувань.

**Актуальність теми** кваліфікаційної роботи полягає у загальній потребі в конструкціях, які будуть стійкі до динамічного навантаження. Оскільки останніми роками зростає важливість проектування з метою зменшення множинних небезпек, дослідження заходів захисту та підсилення конструкцій, які допомагають зберегти життя людей під час вибухів, є важливою темою у галузі будівельної інженерії.

Такі технології необхідні для зменшення наслідків дії детонації при аваріях на підприємствах, спрацюванні саморобних вибухових пристроїв тощо. Коли вибух та супутні його чинники можуть легко спричинити прогресуюче обвалення недостатньо захищеної конструкції через руйнування слабких несучих елементів споруди [2]. Також вивчення поведінки бетону та його підсилення є актуальним для військового призначення, а саме: для побудови стійких до вибухового навантаження конструкцій та винайденні нових методів забезпечення їх надійності та міцності [3].

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконане згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки ТНТУ ім. І. Пулюя та державними програмами надійності і економічності будівельних виборів, матеріалів і конструкцій.

**Метою кваліфікаційної роботи** є виявлення закономірностей при дії вибухового навантаження на залізобетонну конструкцію з різними методами підсилення.

Мету роботи можна поділити на такі **задачі**:

1. проаналізувати існуючі дослідження та праці за темою і зробити висновки про перспективність подальших розробок в галузі;
2. розглянути наявні системи автоматизованого проектування, порівняти їх можливості та визначити найбільш актуальні для дослідження вибухового навантаження;
3. розробити методику для оцінки напружено-деформованого стану (ндс) запропонованого зразка залізобетонної балки;
4. дослідити різні способи розміщення армування в балці, їх вплив на загальні результати ндс;

5. запропонувати свій спосіб підсилення конструкції, проаналізувати його ефективність та економічну доцільність;

**Об'єктом дослідження** є залізобетонна балка з різними способами армування та вставкою із псевдопружного NiTi сплаву пам'яті форми (СПФ) із, що розташована на двох опорах.

**Предметом дослідження** є напружено-деформований стан залізобетонної балки із NiTi вставкою.

**Методи дослідження.** полягає у моделюванні та аналізі напружено-деформованого стану залізобетонної балки методом скінчених елементів у програмному комплексі ANSYS 2019 R2.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у використанні інших методів армування та матеріалів арматури, у порівнянні з іншими дослідженнями у сфері підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані дані відкривають можливість для подальших досліджень, змінюючи діаметр, розташування арматури та вставки з NiTi сплаву.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості застосування отриманих результатів при підсиленні конструкцій та надання перспективи подальших суміжних досліджень і розвитку запропонованих ідей.

**Апробація результатів магістерської роботи** виконана на VI Міжнародній студентській науково-технічній конференції ТНТУ мені Івана Пулюя, "Природничі та Гуманітарні Науки. Актуальні Питання" 27-28 квітня 2022 року.

**Публікація** роботи виконана в збірнику вищевказаної конференції.

**Ключові слова:** псевдопружний сплав з пам'яттю форми, метод скінчених елементів, залізобетонна балка, напружено-деформований стан.

# РОЗДІЛ 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИБУХОВИМ МЕТОДОМ. ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У БУДІВНИЦТВІ

### 1.1 Поведінка бетону під дією вибухового навантаження

Для того, щоб проаналізувати і змоделювати поведінку бетону під дією вибухового навантаження, необхідно знати його властивості в цих умовах. Вибухові навантаження можуть викликати деформації високої швидкості і створюють сильний граничний тиск у матеріалі, що зазнав впливу (рис. 1.1).

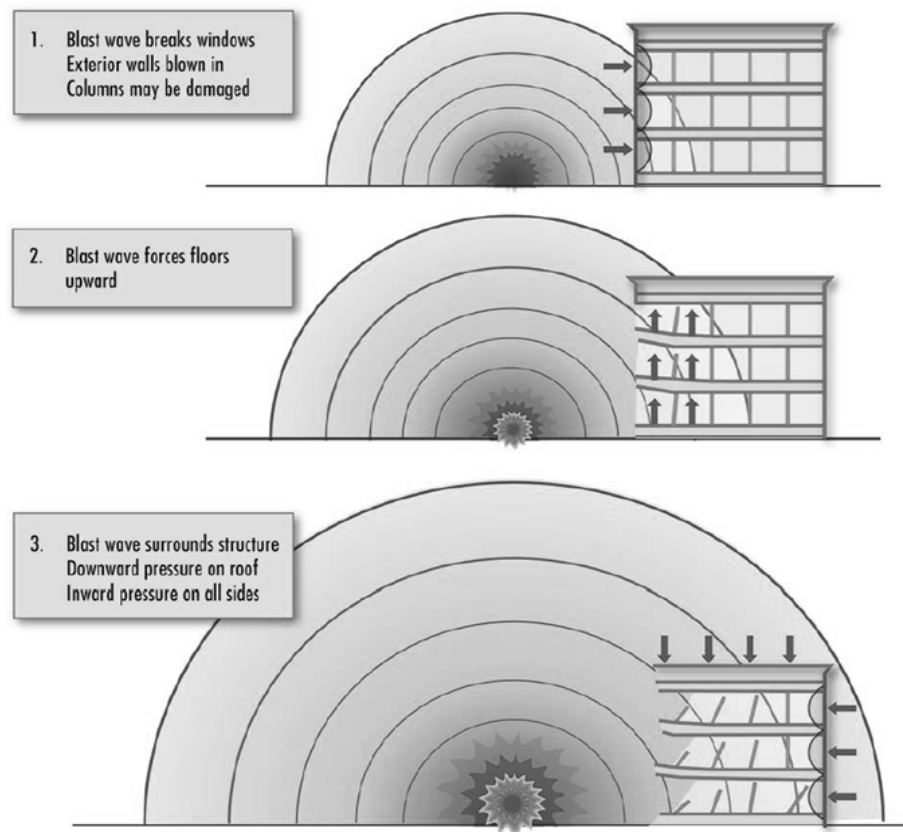


Рисунок 1.1 – Вплив тиску вибухової хвилі на будівлю [2]

Крім того, велика інтенсивність навантажень і подальше зростання рівнів тиску можуть призвести до формування і поширення ударних хвиль, що викликають майже миттєві стрибки характеристик матеріалу, а саме: стану, щільності і температури.



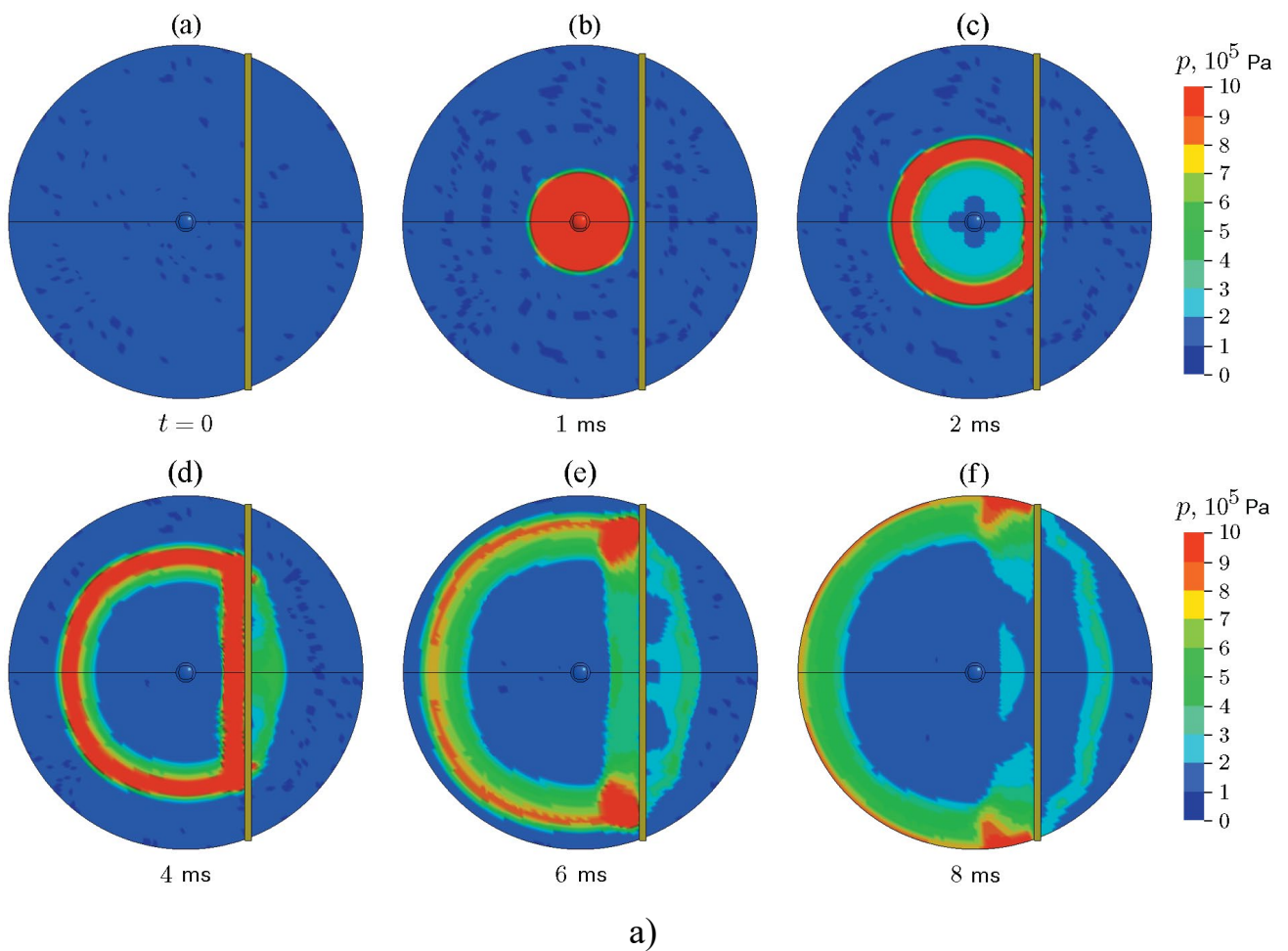
Однак, коли інтенсивність основного навантаження зменшується і конструкція звільняється, бетон піддається нижчим, або вторинним рівням напружень (рис. 1.1). Це також стосується частин конструкцій, які знаходяться відносно далеко від джерела навантаження. Таким чином, поведінка бетону повинна бути описана для широкого діапазону напружених станів. А для того, щоб правильно розпізнати та зафіксувати явища, що відбуваються під час навантаження, комплексність випробувань бетону повинна бути мінімальною. На практиці це означає, що складні випробування проводяться під квазістатичним навантаженням, яке доповнюється динамічними випробуваннями з чітко визначеними умовами напруження. Однак, через обмеження випробувальних установках та полігонів, максимальний граничний тиск, що досягається під час квазістатичного навантаження, часто обмежується менш ніж 1 ГПа, а частіше від 0,5 до 0,7 ГПа [4,5].

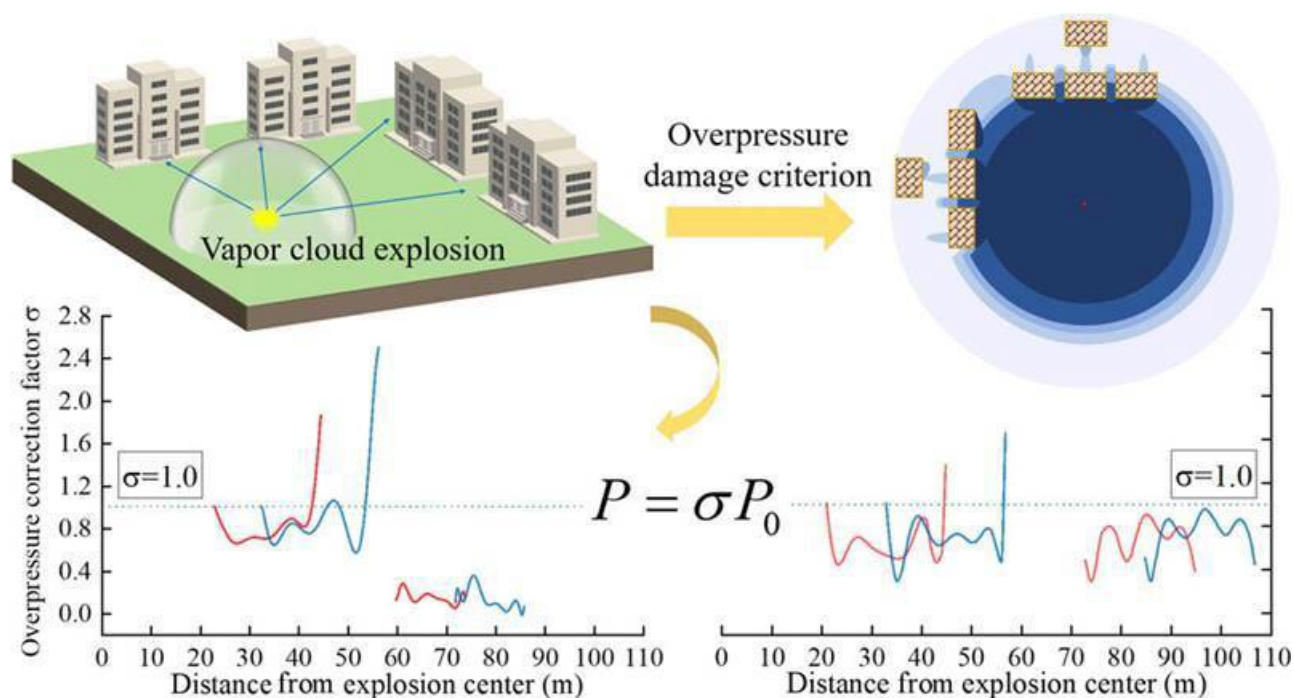
Динамічні випробування, що включають детонацію або високошвидкісний удар, використовують для опису поведінки за вищих рівнів граничного тиску. Вони оцінюються в припущенні одновимірного поширення ударної хвилі, але вплив температури і швидкості деформації важко відрізнити від міцності матеріалу в цих випробуваннях, тому вони не завжди точні.

Як правило, вибухи спричиняють два типи навантаження на об'єкт: вибухове навантаження та ударне навантаження від осколків. Осколки можуть бути первинними або вторинними, тобто спричинені фрагментацією матеріалу, що утворює вибух, або викликані руйнуванням навколишніх об'єктів і споруд. Первинні осколки утворюються, коли оболонка розривається після послідовного розбухання, спричиненого високим внутрішнім тиском, що виникає при перетворенні вибухової речовини на гарячий газ під час ініціювання вибуху. Під час розбухання утворюються радіальні тріщини розтягу на зовнішній стороні і тріщини зсуву на внутрішній стороні оболонки вибухівки. Коли вони зустрічаються або поширюються до вільного краю, утворюються осколки, які починають поширюватися навколо в напрямку від точки детонації [6].

Коли оболонка руйнується, гарячий газ та його залишкова енергія вивільняються і поширюються навколо, спричиняючи ударну хвилю в повітрі. На властивості вибухової хвилі впливають об'єкти або конструкції, що заважають вибуху (рис. 1.2). Взаємодія вибухової хвилі з ними також може призвести до утворення вторинних осколків. Таким чином, навантаження на конструкцію, спричинене вибухом, може бути комплексним і залежати, наприклад, від типу і кількості вибухової речовини, розмірів, форми і матеріалу оболонки, що вибухнула, і відстані до центру детонації.

Коли вибухова хвиля поширюється в навколишнє середовище, завдяки опору повітря енергія розсіюється, а інтенсивність вибухової хвилі зменшується зі збільшенням відстані (рис. 1.1-1.2).





б)

а) – нефограма поширення тиску [7]; б) – зменшення енергії хвилі через перешкоди [8].  
Рисунок 1.2 – Поширення вибухової хвилі та надлишкового тиску на будівлі

## 1.2 Небезпека явища вибуху для конструкцій

Важливо захищати об'єкти критичної інфраструктури, залізничні станції та метрополітен від пошкодження, знищення або руйнування внаслідок навмисних терористичних актів, злочинної діяльності та зловмисної поведінки. Хоча деякі вибухові події є випадковістю (наприклад, загоряння витоку газу чи аварії мереж), типовою подією, від якої проектувальник будівлі хоче убезпечитися, є навмисна, зловмисна детонація вибухового пристрою.

Найнебезпечніші вибухові події пов'язані з використанням вибухових пристроїв, що перевозяться на автомобілях або вантажівках (рис. 1.3), які дозволяють відносно непомітно доставити велику кількість вибухових матеріалів безпосередньо до цілі. При такому типі атаки найбільш вразливими до пошкодження або руйнування вибухом є елементи конструкцій на рівні землі, або першого поверху.

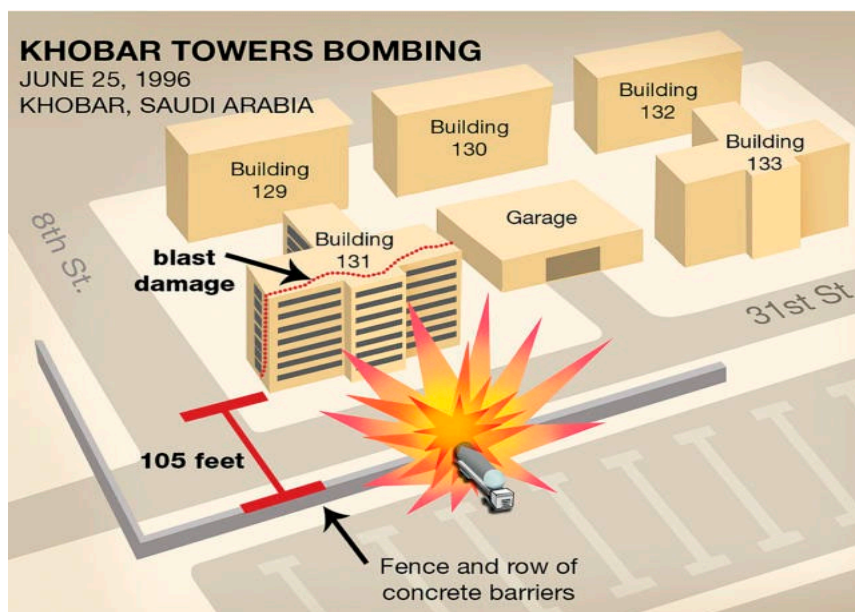


Рисунок 1.3 – Схема терористичного акту в м. Ель-Хубар з використанням вибухівки у вантажівці [9]

Однак, якщо територія навколо споруди захищена надійною системою безпеки – всі під'їзди до вразливих ділянок недоступні, фізично забарикадовані або перевірені співробітниками служби безпеки [10] – ризик успішного застосування такого великого вибухового пристрою значно знижується. Отже, при проектуванні споруди для пом'якшення наслідків вибуху необхідно врахувати і захист від менших вибухових пристроїв, таких як ті, що можна переносити вручну, ховати під одягом, сховати у валізах і рюкзаках або доставити поштою. Під час вибуху саморобного вибухового пристрою (СВП) терорист запускає детонатор, що містить малочутливу первинну вибухову речовину, яка створює високошвидкісну ударну хвилю, що на надзвуковій швидкості проходить через основний заряд вторинної вибухівки, спричиняючи дуже швидку і стабільну хімічну реакцію. Ця швидкість відома як швидкість детонації і може досягати 8000 м/с для високоякісних військових вибухових речовин.

Потрібно враховувати ризик травмування мешканців від таких небезпек, як уламки, що переносяться повітрям, вибухової хвилі і вдихання диму [11], життєво важливим фактором також є загальна стійкість пошкодженої споруди.

Якщо вибух руйнує несучі елементи, а решта елементів не в змозі компенсувати зміну траєкторії навантаження, решта конструкції ризикує зазнати прогресуючого обвалення, яке спричинить пошкодження, значно непропорційні тим, що спровокував вибух (рис. 1.4). Важливість врахування прогресуючого руйнування підтверджується такими подіями, як часткове обвалення будівлі, спричинене випадковим вибухом природного газу під час катастрофи в м. Ронан-Пойнт в 1968 році [12], або підрив будівлі №133 у м. Ель-Хубар в 1996 році [9] (рис. 1.3-1.4). В обох випадках пошкодження, спричинені початковим вибухом (втрата однієї збірної бетонної стіни в м. Ронан-Пойнт та руйнування першого поверху в м. Ель-Хубар), були нівельовані прогресуючим обваленням одразу після детонації, що і спричинило катастрофічні наслідки (рис. 1.4).

Сталось це через катастрофічну нездатність споруди навіть тимчасово витримати збільшене навантаження, яке потягнуло за собою решту непошкоджених структурних елементів, через відсутність запасу міцності та стійкості [12].



Рисунок 1.4 – Наслідки вибуху та прогресуючого руйнування будівлі внаслідок пошкодження несучих конструкцій, м. Ель-Хубар, 1996 р. [13]

Беручи до уваги ці та інші приклади, якщо структура, ймовірно, не зможе витримати локальне руйнування без прогресуючого колапсу, однією з стратегій зменшення ймовірності непропорційної шкоди – це захист найбільш вразливих

елементів структури таким чином, щоб зменшити силу вибуху і збільшити залишкову міцність та стійкість конструкції. Такими структурними елементами є фундамент, колони та несучі стіни першого поверху. Їх зазвичай і намагаються зміцнити, або знайти інші методи надання залишкової стійкості чи властивостей гасіння вибухової хвилі. Звичайні нормативні акти та будівельні норми, як правило, не враховують ці загрози.

Для захисту інфраструктури необхідні методи кількісної оцінки стійкості структурних елементів конструкцій до вибухового навантаження та оцінки небезпек, що виникають в результаті руйнування елемента. Застосовні сучасні методи можуть бути або експериментальними, або чисельними, або їх комбінаціями [14]. Розроблення заходів захисту від вибуху часто прямо суперечить сейсмічному проектуванню: як правило, важкі конструкції добре протистоять вибуховим навантаженням, оскільки перехідний процес пройде до того, як маса конструкції зможе відреагувати на збудження, в той час як легкі конструкції є кращими для сейсмічного проектування, оскільки зменшують бічні навантаження від інерції, що виникають при розгойдуванні конструкції, тому проектування з урахуванням обох ризиків вимагає обережного застосування інженерних даних і попереднього досвіду.

### **1.3 Моделювання поведінки бетону засобами САПР**

Останнім часом комп'ютери та програмне забезпечення поширилися в усіх галузях промисловості, зараз докладаються значні зусилля для підвищення безпеки шляхом застосування новітніх інженерних рішень. Для вирішення проблем, пов'язаних з вивільненням великої кількості енергії за дуже короткий проміжок часу, наприклад, вибухів і швидкісних ударів, існує три загальні підходи [15]. І оскільки ці проблеми найчастіше є нелінійними і вимагають інформації про поведінку матеріалу за надвисоких швидкостей навантаження, яка, як правило, недоступна, більша частина роботи є експериментальною і може спричинити величезні витрати часу та ресурсів.

Аналітичні підходи можливі, якщо геометрія задачі відносно проста і якщо навантаження можна описати за допомогою граничних умов, початкових умов або їх комбінації. Чисельні розв'язки є набагато більш узагальненими і усувають будь-які труднощі, пов'язані з геометричними параметрами [16]. Для конструкцій, що зазнають ударних навантажень, чисельне моделювання виявилось надзвичайно корисним. Воно може надати точні кількісні дані про напруження та деформації, які було б дуже дорого або складно отримати експериментальним шляхом. У цих дослідженнях використовуються диференціальні рівняння, які керуються основними фізичними принципами збереження маси, імпульсу та енергії. Рівняння, що розв'язуються, залежать від часу і є нелінійними за своєю природою, а разом із складовими моделями, що описують поведінку матеріалу, і набором початкових і граничних умов, визначають повну систему для моделювання ударів і зіткнень. Такі види рівнянь необхідно розв'язувати як у часовій, так і в просторовій областях одночасно.

Розв'язок у часовій області може бути досягнутий за допомогою явного методу, де розв'язок в заданий момент часу виражається як функція змінних і параметрів системи, без вимог до матриць жорсткості і мас. Таким чином, обчислення на кожному часовому кроці є швидким, але для отримання повного розв'язку може знадобитися багато часових кроків.

Всього існує два види інтегрування часу: неявний (Implicit) та явний (Explicit). Перший метод також називають інверсія матриці (або еквівалентні процеси). Коли задача нелінійна, розв'язок отримують за декілька кроків, і рішення для поточного кроку базується на розв'язку з попереднього. Для великих моделей інвертування матриці є дуже затратним і потребує вдосконалених ітераційних розв'язувачів. Такий спосіб розв'язку є доволі стабільним і дозволяє працювати проміжками часу в цілі секунди, хвилини та навіть години. Незважаючи на цю перевагу, неявні методи можуть бути надзвичайно трудомісткими при розв'язанні динамічних та нелінійних задач. Явний аналіз має на меті знайти прискорення елементів моделі та у більшості випадків матриця мас розглядається як

діагональна. Інверсія діагональної матриці є простою в обчисленні і включає в себе лише інверсію елементів на діагоналі.

Після обчислення прискорень на  $n$ -му кроці, швидкість на  $n+1/2$  кроці та переміщення на  $n+1$  кроці обчислюються відповідно. У цих розрахунках схема не є безумовно стійкою, і тому потрібні менші кроки за часом (Time step). Точніше кажучи, часовий крок у явному аналізі скінченних елементів повинен бути меншим за часовий крок Куранта (тобто час, за який звукова хвиля проходить через елемент), в той час як неявний аналіз не має таких обмежень (рис. 1.5).

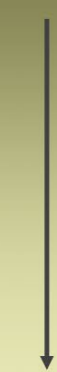
Solution	Impact Velocity (m/s)	Strain Rate (/s)	Effect
Implicit  Explicit	< 50	$< 10^{-5}$	Static / Creep
	50 - 1000	$10^{-5} \cdot 10^{-1}$	Elastic
	1000 - 3000	$10^{-1} \cdot 10^1$	Elastic-Plastic (material strength significant)
	3000 - 12000	$10^5 \cdot 10^6$	Primarily Plastic (pressure Level $\geq$ material strength)
	> 12000	$10^6 \cdot 10^8$	Hydrodynamic (pressure Level $\gg$ material strength)
		$> 10^8$	Vaporization of colliding solids

Рисунок 1.5 – Відмінності між системами інтегрування часу [17]

Таблиця 1.1 – Результати порівняння методів інтегрування часу

Критерій	Неявний метод (Implicit)	Явний метод (Explicit)
Стабільність	Безумовно стабільний. Розв'язок не залежить від розміру часового кроку.	Умовно стабільний. Приріст часу має бути доволі малим.
Розмір кроку часу	Можливі великі часові проміжки та кроки.	Необхідні малі проміжки часу та кроки.
Ітераційні методи	Необхідні для нелінійного обчислення.	Не потрібні.
Застосування та можливості	Лінійна та нелінійна поведінка матеріалу. Задачі з низькою динамікою руху. Модальний аналіз.	Сильна нелінійна поведінка матеріалу. Задачі з високою динамікою руху.



Другим важливим фактором є вибір системи обрахунку. Розв'язок для просторової області всередині моделі може бути отриманий з використанням різних просторових дискретизацій, таких як метод Лагранжа (Lagrange), Ейлера (Euler) [18], Довільний Лагранж-Ейлер (Arbitrary Lagrange Euler, ALE) [19], або безсіткових методів [20]. Кожен з цих методів має свої унікальні можливості, але також і обмеження. Як правило, не існує єдиного методу, який може впоратися з усіма режимами задачі.

Найбільш часто застосовують метод Лагранжа, який розбиває об'єкт на просторову сітку, що закріплена на об'єкті і рухається разом з ним. Якщо на вузол діють сили, він зміщується, і таким чином сили передаються на сусідні вузли, що призводить до деформацій сітки. Також доступні чіткі межі матеріалу, а тому простір за межами матеріалу не потребує додаткової сітки і отже, автоматично виконується закон збереження маси. Загалом він найкраще підходить для складної геометрії і конструкцій, снарядів та інших твердих тіл. Недоліком методу Лагранжа є виникнення сильних викривлень елементів сітки при великих навантаженнях та низька точність результатів внаслідок цього (рис. 1.6). Також слід зазначити, що такий викривлений елемент може негативно вплинути на тривалість та стабільність обрахунку симуляції, оскільки крок за часом пропорційний розміру найменшого елемента.

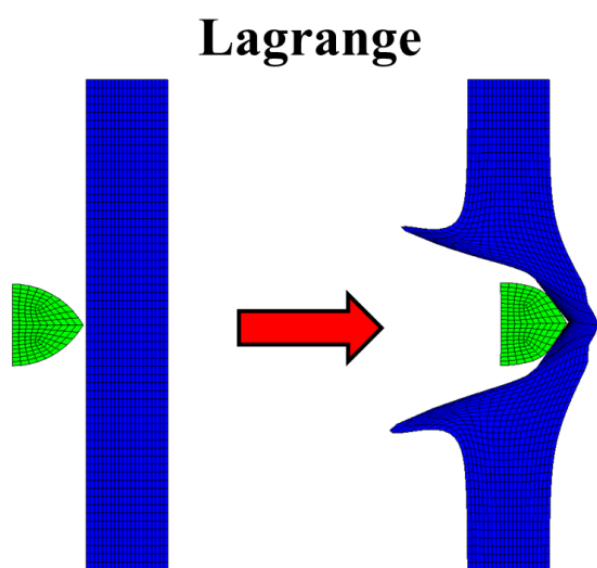


Рисунок 1.6 – Метод Лагранжа [21]

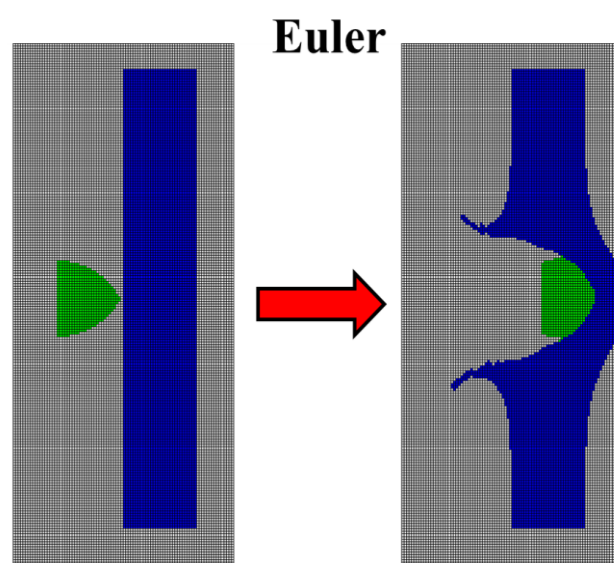


Рисунок 1.7 – Метод Ейлера [21]

У методі Ейлера координати вузлів фіксовані і утворюють собою сітку області, що розв'язується. Під час моделювання матеріал об'єктів переміщується крізь сітку (рис. 1.7), в той час як просторові координати і вузли залишаються фіксованими. Це є причиною того, що в методі Ейлера неможливе спотворення елементів. Загалом цей метод використовується для моделювання поширення газів і рідин в результаті вибуху або удару. При дослідженні твердих тіл методом Ейлера необхідні додаткові обчислення для перенесення тензора напружень і історії матеріалу через решітку, що є значним недоліком. Адже, у такому випадку розрахунок потребує більшої обчислювальної продуктивності і менших елементів для обрахунку ударних хвиль, що виникають при цьому.

Метод довільного Лагранжа-Ейлера (ALE) – це суміш методів Лагранжа та Ейлера. Він дозволяє довільну зміну сітки на кожному кроці розрахунку. Можна задавати різні рухи сітки, наприклад, вільні (Лагранжа), фіксовані (Ейлера), екіпотенціальні, з рівними інтервалами та ін. Головна перевага полягає в тому, що можна уникнути викривлень, та з іншого боку, необхідні додаткові обчислювальні кроки для переміщення та перетворення сітки. У порівнянні з чистим методом Лагранжа (рис. 1.6), тут не відбувається спотворень решітки (рис. 1.8). Також слід зазначити, що метод підтримується не всіма програмними комплексами, та вимагає великої потужності для обчислення, що є доволі суттєвими мінусами.

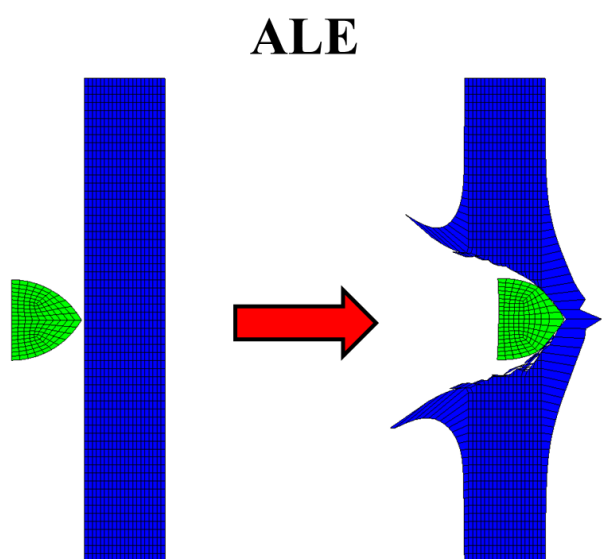


Рисунок 1.8 – Метод ALE [21]

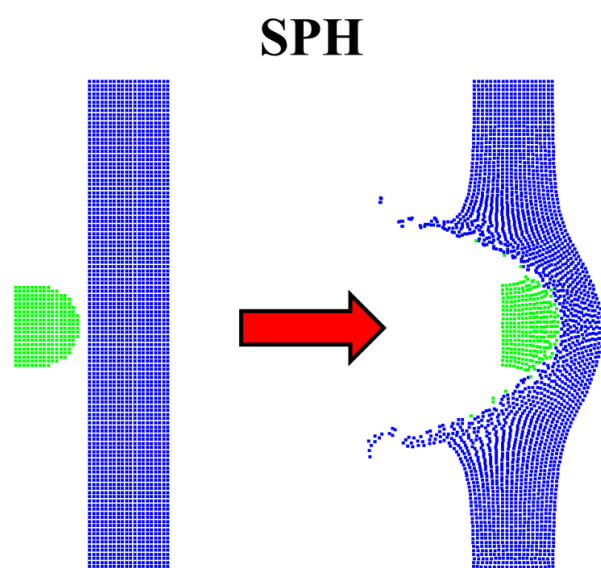


Рисунок 1.9 – Метод SPH [21]

Гідродинаміка згладжених частинок (SPH, Smooth Particle Method) – це метод, який базується не на фіксованій топологічній решітці, а на скінченній множині частинок. Ці частинки вбудовуються в матеріал подібно до вузлів методу Лагранжа, але їхні зв'язки не є фіксованими. Однак частинки є не лише точками маси, але й точками інтерполяції для обчислення фізичних змінних. Розрахунки базуються на даних сусідніх частинок і масштабуються за допомогою вагової функції. На відміну від Лагранжа, в SPH не може виникнути спотворення сітки, оскільки сітки не існує (рис. 1.9). Метод SPH виявився особливо корисним при моделюванні процесів удару крихких матеріалів [15]. Для розрахунку задач динамічної взаємодії структури рідини (Dynamic fluid-structure interaction, FSI) та удару, як правило, не існує єдиного найкращого чисельного методу, який можна застосувати до всіх частин задачі, слід обирати їх для кожного тіла окремо.

Методи поєднання різних типів чисельних розв'язувачів в одній симуляції можуть дозволити використовувати найбільш підходящий для кожної області задачі [21]. Наприклад, використання Ейлерового методу для тіл, які піддаються сильній деформації та спотворенню і використання методу Лагранжа для твердого тіла з меншою деформацією сітки (рис. 1.10).

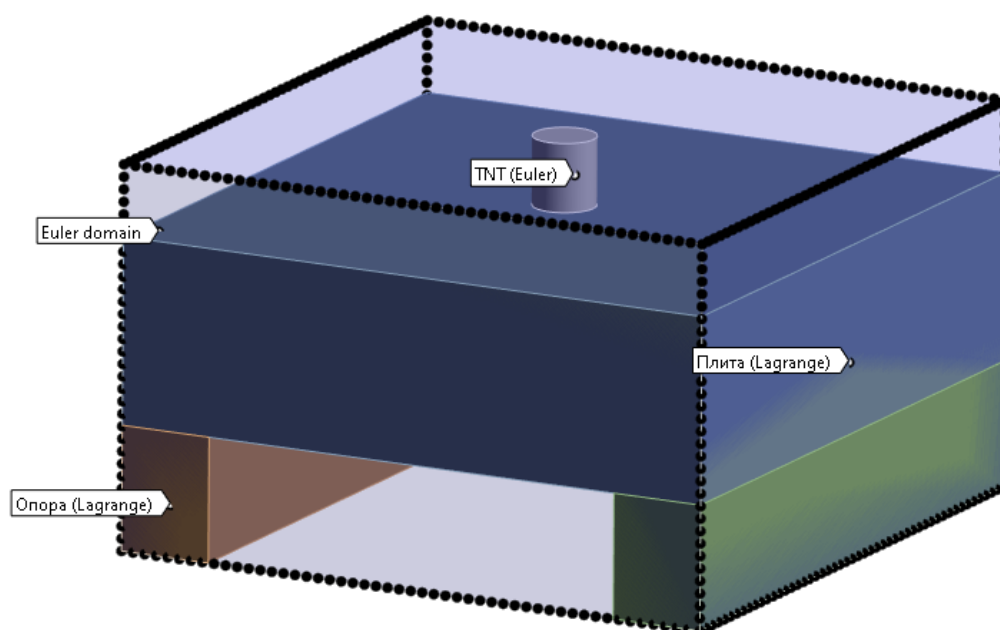


Рисунок 1.10 – Комбіноване використання тіл з методами розрахунку Лагранж та Ейлер

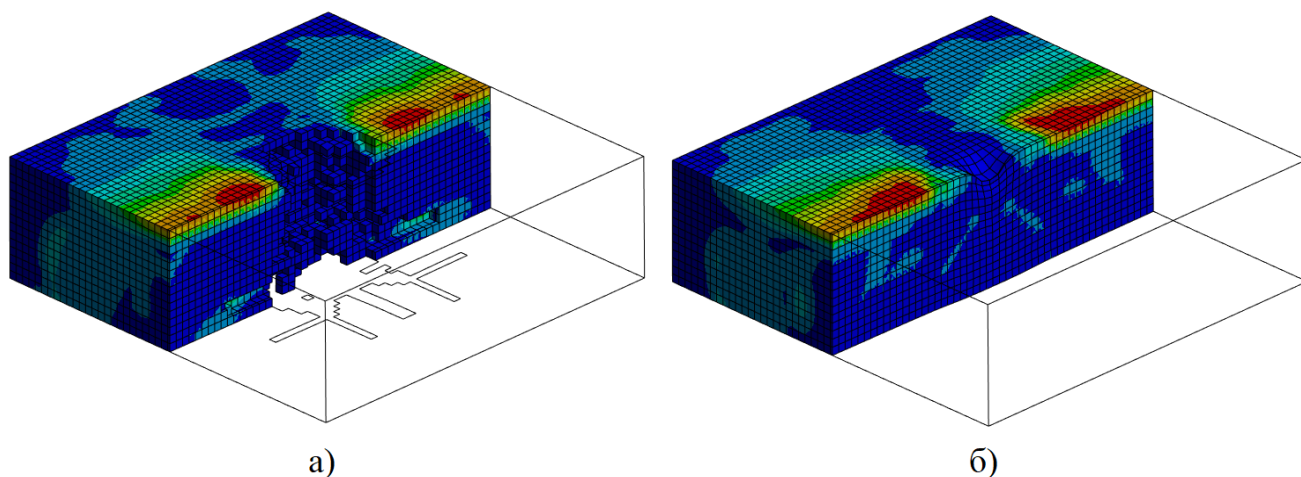
Точність чисельних результатів значною мірою залежить від здатності моделей матеріалу реалістично описувати поведінку матеріалу під час вибухового та ударного навантаження. Протягом багатьох років було розроблено ряд моделей матеріалу для бетону, що піддається високому динамічному навантаженню. Ці моделі часто використовують одну або декілька характеристик відомих моделей матеріалів, розроблених для моделювання статичного або низького перехідного навантаження, наприклад, Друкер і Прагер (1952), Вільям і Варкне (1975), Оттосен (1979), Осборн (1982) і Чен (2007), які були адаптовані і доповнені для врахування поведінки матеріалу, пов'язаної з високим перехідним навантаженням.

Незважаючи на те, що бетон, як правило, вважається крихким матеріалом, який допускає відносно невеликі деформації перед руйнуванням, пластична частина цієї деформації є відносно великою порівняно з пружною частиною, принаймні, для напруженого стану при стисканні. Таким чином, теорія пластичності, за допомогою якої можна описати незворотні деформації, є корисною для опису поведінки матеріалу. Однак, коли бетон досягає своєї граничної міцності, він демонструє ефект розм'якшення зі зменшенням здатності нести навантаження при збільшенні деформацій. Під час цього процесу жорсткість бетону при розвантаженні також зменшується. Таку поведінку не можна описати за допомогою моделі пластичності, тому її часто описують за допомогою моделі механіки руйнування.

Таким чином, теорії пластичності та механіки руйнування часто поєднують для опису поведінки бетону, і більшість моделей бетонних матеріалів, розроблених для високих динамічних навантажень, як правило, враховують вищеописані процеси. Найпростіші моделі часто вимагають меншої кількості вхідних параметрів моделі, але вони обмежені певними випадками навантаження, де складність є низькою. Більш складні моделі матеріалів в більшій мірі здатні описувати різноманітну поведінку бетонного матеріалу при різних і складніших умовах навантаження, але за рахунок більшої кількості параметрів моделі [1].

Коли ж очікується значна деформація елементів конструкції та його руйнування, постає питання ерозії матеріалу, особливо при використанні

Лагранжевого методу обчислення. При великих змінах форми та розмірів елемента можна зіткнутися з проблемами при їх обробці. Умова ерозії елементів виключає їх з розрахунку при заданому значенні пластичної або геометричної деформації. Процес слід постійно контролювати, і коли деформація моделі вона занадто висока, слід замінити Лагранжевий метод розрахунку на Ейлеровий (рис. 1.11).



а) – з увімкненою ерозією по матеріалу; б) – без ерозії.

Рисунок 1.11 – Руйнування зразка внаслідок дії вибухового навантаження

#### 1.4 Практичне використання досліджень методом вибуху у будівництві

Існує два основні способи використання даних, що отримані від досліджень дії вибухового навантаження на конструкцію: покращення ефективності способів знесення та руйнації застарілих або аварійних будівель та подальша розробка методів підсилення споруд, щоб ті могли краще протидіяти певному виду навантаження. Також подібні розрахунки є корисними при побудові стійких та міцних конструкцій, таких як: бункери, військові склади, арсенал тощо.

Підривання спеціально розміщених контактних зарядів широко використовується для досліджень бетонних конструкцій, знесення старих споруд та військових операцій у міській місцевості. Через ризики, пов'язані з цим явищем і його поширення в галузі, воно стало об'єктом нових праць [6-8].

Тут і постає питання вивчення явища, його роботи та дії. Важливо згадати внесок таких вчених, як: Акерс С. А., Ременніков А. М., Юе С. та інших. Вони

розробили чисельні процедури та методи експериментів для оцінки пошкодження залізобетонної стіни в результаті детонації вибухового пристрою С4, розміщеного на її поверхні. Проаналізували теоретичні аспекти контактних вибухів, представивши формулу для прогнозування збитків від такого роду подій. Розробили аналітичний спосіб оцінювання пошкоджень на бетонній плиті, розглядаючи вибух тротилу сферичної форми та інше. Ці праці, в більшості своїй, направлені на пошук нових застосувань та корисних наслідків ефектів близького вибуху. Розглядаючи близькі вибухи, застосування такої технології показує себе, як потужний інструмент руйнування, коли детонація відбувається в безпосередній близькості до ключових структурних елементів або інших міських споруд, що значно обмежує використання великих підривних зарядів. Правильне розташування вздовж елемента, що підлягає руйнації, і визначення їх маси є важливими факторами з точки зору оптимізації використання енергії детонації і безпеки прилеглих структурних елементів (рис. 1.12).

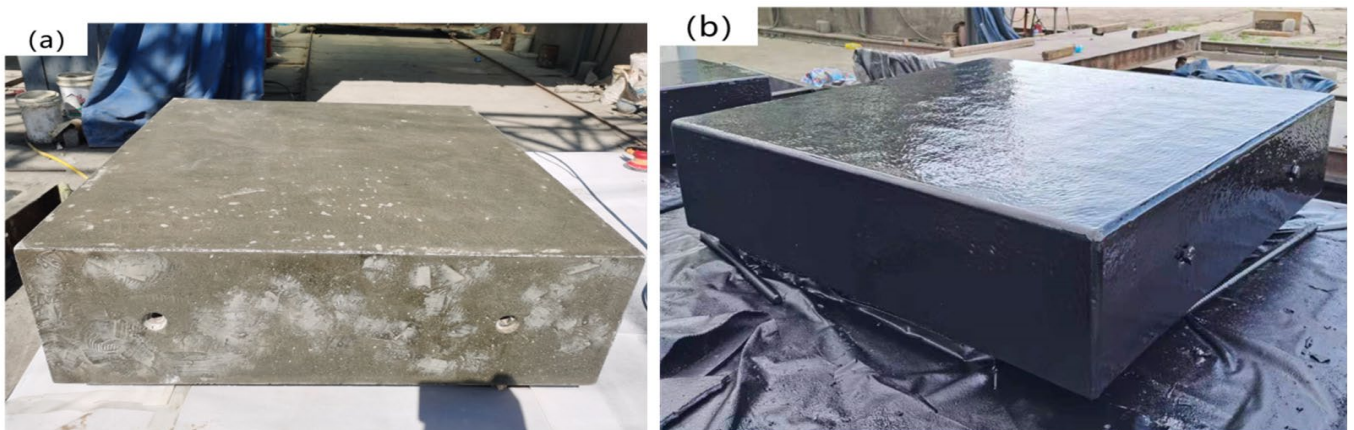


Рисунок 1.12 – Руйнування будівлі вибуховим методом [22]

Враховуючи ризики і витрати, пов'язані з експериментальними підходами до вивчення такого роду явищ, чисельне моделювання постає як ефективна, безпечна та дешева альтернатива реальним випробуванням, та все ще не може повністю замінити їх в достовірності результатів та комплексності поставленої задачі.

Іншим, не менш важливим, способом використання даних, отриманих досліджень природи дії вибуху, є можливі розробки методів підсилення конструкцій та запобігання їх руйнації. Вони можуть виражатися в різних ідеях та наукових моделях, що зачіпають структуру матеріалу, його покриття, зміну параметрів внутрішнього армування та інші.

Популярним напрямком розробок захисту від вибуху є розробка спеціальних покриттів, шарів та напилень для бетону. Вибух спричиняє високі температури і сильні ударні хвилі, які розсіюються у навколишньому просторі. Тому для забезпечення вибухозахисту покриття матеріалу повинно не тільки витримувати високу температуру і сильне нагрівання, але також протистояти розтягуванню та розриву, спричиненими вибуховим навантаженням (рис. 1.13). Таким чином, теплофізичні та механічні властивості матеріалів покриттів є основними умовами для їх вибухозахисного ефекту [23].



а) – підготовка плити; б) – покриття плити досліджуваною речовиною.

Рисунок 1.13 – Дослідження розробленого покриття для протидії вибуху [23]

Вибухові дослідження залізобетону також відкривають простір для розробки різних нестандартних способів гасіння та зупинки вибухової хвилі, або зменшення її руйнівної дії на споруду. Це можуть бути конструкції спеціальної форми, що розсіюють енергію або захисні елементи для огороження конструкції, наприклад, кожух з води, який гаситиме енергію вибуху [2]. Така конструкція призначена для того, щоб дати матеріалу, що гаситиме хвилю, можливість розширюватися в бік,

паралельно напрямку тиску, збільшуючи його здатність перетворювати тиск вибуху в кінетичну енергію. Важливим елементом при протидії вибуховому навантаженню є також його внутрішнє підсилення чи армування. Наприклад, використання сталевих волокон замість традиційної арматури, або в комбінації з нею. Це, як показали випробування, покращує поведінку бетону після утворення тріщин (рис. 1.14). Дослідження також показали, що механізми уповільненого руйнування армованого сталевими волокнами бетону краще зменшують кількість уламків, ніж звичайний залізобетон, що піддається вибуховому навантаженню [24].

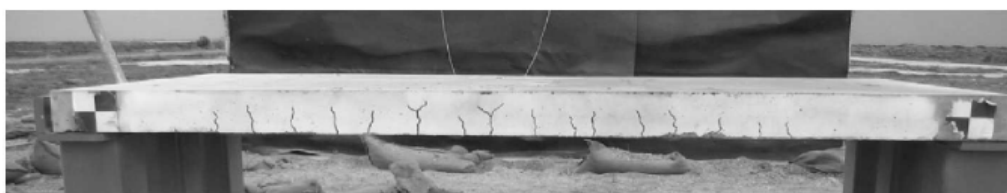


Рисунок 1.14 – Дослідження залізобетонної плити, що підсилена сталевим волокном, на стійкість до вибуху [24]

### **1.5 Використання «розумних систем» в будівництві**

Разом із пасивними системами підсилення конструкцій, які описані в розділі 1.5, з'являється і новий тип підсилення – активне. Розумні системи для цивільних споруд описуються як системи, які можуть автоматично коригувати структурні характеристики у відповідь на зовнішні збурення та/або неочікувані серйозні навантаження з метою забезпечення структурної безпеки, продовження терміну служби та експлуатаційної придатності [25].

Однією з ключових технологій для досягнення цієї мети є розробка і впровадження "розумних" матеріалів, які можуть бути інтегровані в конструкції і виконувати такі функції, як зондування, активація та інформаційні процеси, необхідні для моніторингу, самоадаптації та відновлення конструкцій. Прикладами "розумних" матеріалів є п'єзокераміка, сплави з пам'яттю форми або СПФ (SMA), магнітореологічні (MR) та електрореологічні (ER) рідини.



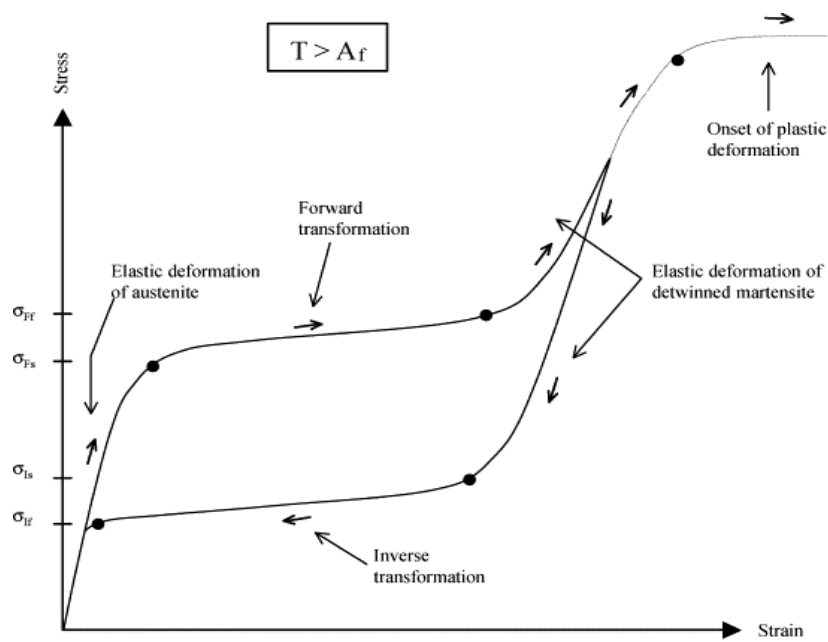


Рисунок 1.15 – Крива напружено-деформованого стану псевдопружного NiTi сплаву [26]

Ефект пам'яті форми – це здатність сплаву відновлювати певну фіксовану початкову форму при подальшому нагрівання вище температури переходу, якщо він піддавався деформації при низьких температурах (рис 1.15) [27].

Надпружність або псевдопружність – це ще одна відмінна властивість подібних сплавів. Вона виражається у здатності матеріалу відновлювати оборотні високі значення деформації, що значно перевищують ніж у класичних металів або сплавів. Поведінку СПФ можна змінювати, контролювати шляхом зміни складу, розміру зерна та проведенням відповідної термічної обробки.

Найбільш популярним матеріалом з ефектом СПФ є Нікельтитан (Ni-Ti) або просто Нітинол. Завдяки ефекту пам'яті форми (ЕПФ) та надвисокої еластичності, він має широке застосування та цілком придатний для автоматичних приводів, космічних апаратів, електричних пристроїв та мікроелектромеханічних систем тощо. СПФ знайшли застосування в багатьох сферах завдяки високій щільності потужності, твердотільній активації, високій демпфуючій здатності, довговічності та стійкості до втоми. Інтегровані в цивільні споруди, СПФ можуть бути пасивними, напівактивними або активними компонентами для зменшення шкоди, спричиненої впливом навколишнього середовища або землетрусами (рис. 1.16).

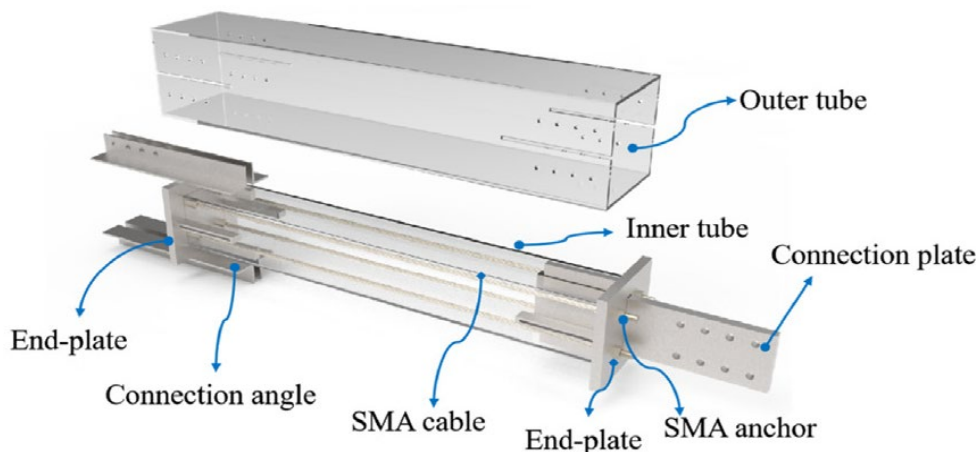


Рисунок 1.16 – Часткова схема гібридних утримувачів з використанням сплаву пам'яті форми у вигляді троса [28]

Сплави пам'яті форми продемонстрували доволі привабливі характеристики для застосування в цивільному будівництві, такі як чудова стійкість до втоми, висока міцність на розрив, значна відновлювана деформація та ряд інших переваг. Хоча більшість досліджень застосування СПФ в цивільних спорудах все ще перебувають на лабораторній стадії, деякі з них були реалізовані для польових застосувань і виявилися ефективними [29].

## 1.6 Висновок до розділу 1

Незважаючи на труднощі аналізу поведінки бетону за нелінійних та високошвидкісних умов, актуальність подібних досліджень росте з кожним роком. Суспільство розуміє небезпеку, яку для споруд несуть різного роду терористичні акти, аварійні ситуації та військові дії, де шанс участі вибухонебезпечних речовин значно збільшується. Звідки і суспільний запит на технології, які дозволять хоч частково вберегтися від загрози та зберегти людські життя. І хоч подібні дослідження все ще не достатньо поширені, не розроблена уніфікована матеріальна база та окремі відповідні будівельні норми, дослідження продовжуються і очікується зростання їх попиту в майбутньому, що тільки позитивно вплине на розвиток галузі будівництва та довіру до неї.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ВИБУХУ

#### 2.1 Вибір програмного комплексу

Для дослідження залізобетонних елементів було розглянуто декілька програмних комплексів, що мають підходящий та достатньо широкий для цього функціонал. Який полягає в можливість обрахунку методом скінченних елементів (Finite Element Modeling, FEA), високошвидкісному аналізі та можливості моделювання нелінійної поведінки. Включаючи можливість дослідження самого процесу детонації та застосування додаткових елементів, зокрема сплавів з пам'яттю форми. Також враховувалися трудомісткість при роботі з інтерфейсом програмного забезпечення і наявність академічної версії ліцензії.

Таблиця 2.1 – Порівняння основних можливостей програмного забезпечення, що базується на методі скінченних елементів.

Програмне забезпечення	Implicit метод	Explicit метод	Метод дискретизації			Інші функції
			Lagrange	Euler	Lag/Eul	
RADIOSS (Altair Engineering)	X	X	X			
ANSYS (ANSYS)	X	X	X	X	X	
AUTODYN (ANSYS)		X	X	X	X	SPH
LS-DYNA (ANSYS)	X	X	X	X	X	SPH, AMR
CASTEM (CEA)	X	X	X			
OURANOS (CEA)		X	X	X	X	
EUROPLEXUS (CEA + JRC)		X	X	X	X	SPH, AMR
COMSOL (Comsol)	X	X				
Abaqus FEA (Dassault Systems)	X	X	X	X	X	SPH, AMR
ASTER (EDF)	X		X			
Apollo Blast Simulator (EMI)		X		X		AMR
SOPHIA (EMI)		X	X			SPH
PAM CRASH (ESI)	X	X	X			
IMPETUS (Impetus)		X	X			SPH
NASTRAN (MSC)	X	X	X			

Серед розглянутих програмних комплексів було виділено три найбільш підходящих системи: ANSYS 2022 R2, LS-DYNA, що віднедавна входить в комплекс ANSYS, та Abaqus FEA. Ці продукти давно зарекомендували себе на ринку інженерного програмного забезпечення та мають широкий спектр можливостей для виконання дослідів неявного та явного способу інтегрування. Кожен з них має власний набір модулів та логіку роботи, та все ж між ними є спільні риси, що дозволяють провести порівняння та зрозуміти, що саме вам необхідно для отримання бажаного результату. Слід відокремити два основних фактори вибору програмного забезпечення: спектр можливостей роботи програми та зручність і швидкість роботи з нею.

LS-DYNA – це передовий універсальний програмний пакет для мультифізичного моделювання, основною компетенцією якого є високонелінійний динамічний перехідний аналіз методом скінченних елементів з використанням явної інтеграції за часом. Програма використовується в автомобільній, аерокосмічній, будівельній та цивільній галузях, військовій, виробничій та біоінженерії (рис. 2.1).

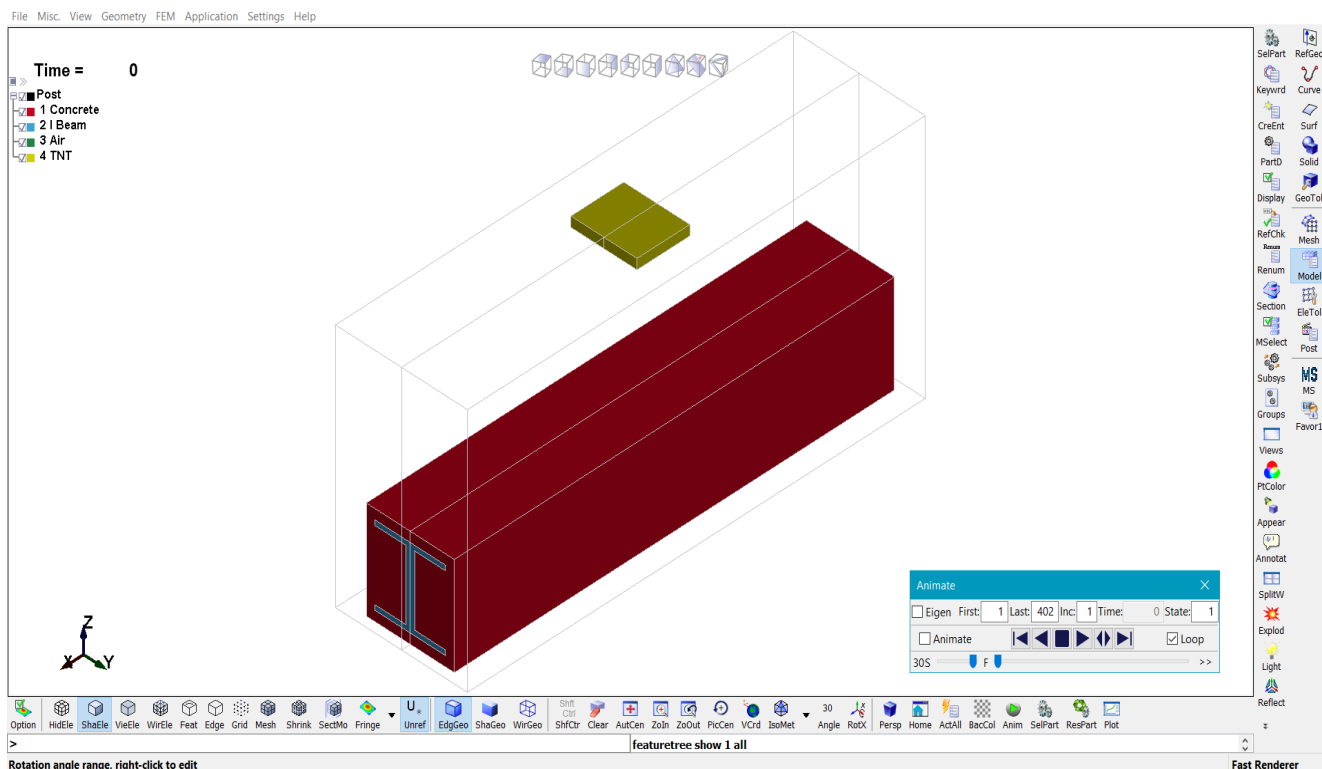


Рисунок 2.1 – Загальний інтерфейс програми LS-DYNA

Її ключовими відмінностями є широкий спектр можливих операцій з моделлю та її пост-обробки, велика бібліотека матеріалів та наявність безкоштовної студентської версії. Недоліками ж є не дружній до кінцевого користувача інтерфейс (рис. 2.2), майже повна неможливість внесення змін у вже існуючі елементи моделі і її параметри, що негативно впливає на гнучкість роботи і затрати часу на виконання, та велика потреба ресурсів комп'ютера для обрахунку.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 TNTv2.k) Setting

\*MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3\_(TITLE) (072R3) (1)

TITLE  
Concrete

1	MID	RO	PR					
	1	2.800e-06	0.2000000					
2	FT	A0	A1	A2	B1	OMEGA	A1F	
	0.0014000	-0.0320000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	Slambda	NOUT	EDROP	RSIZE	UCF	LCRATE	LOCWIDTH	NPTS
	0.0	0.0	0.0	0.0393700	1.450e+05	0	50.000000	0.0
4	lambda1	lambda2	lambda3	lambda4	lambda5	lambda6	lambda7	lambda8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	lambda09	lambda10	lambda11	lambda12	lambda13	B3	A0Y	A1Y
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	eta1	eta2	eta3	eta4	eta5	eta6	eta7	eta8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	eta09	eta10	eta11	eta12	eta13	B2	A2F	A2Y
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Рисунок 2.2 – Меню задання параметрів матеріалу та його поведінки в LS-DYNA

ANSYS – це універсальна програмна система аналізу методом скінченних елементів, що існує та розвивається протягом останніх 30 років. Є доволі популярною серед спеціалістів у сфері автоматизованих інженерних розрахунків (САПР, або САЕ) та розв'язування лінійних та нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла й механіки конструкцій. Включно з нестаціонарними геометрично й фізично нелінійними задачами контактної взаємодії елементів конструкцій, задач механіки рідин та газів, механіки конструкцій, фізики тощо.

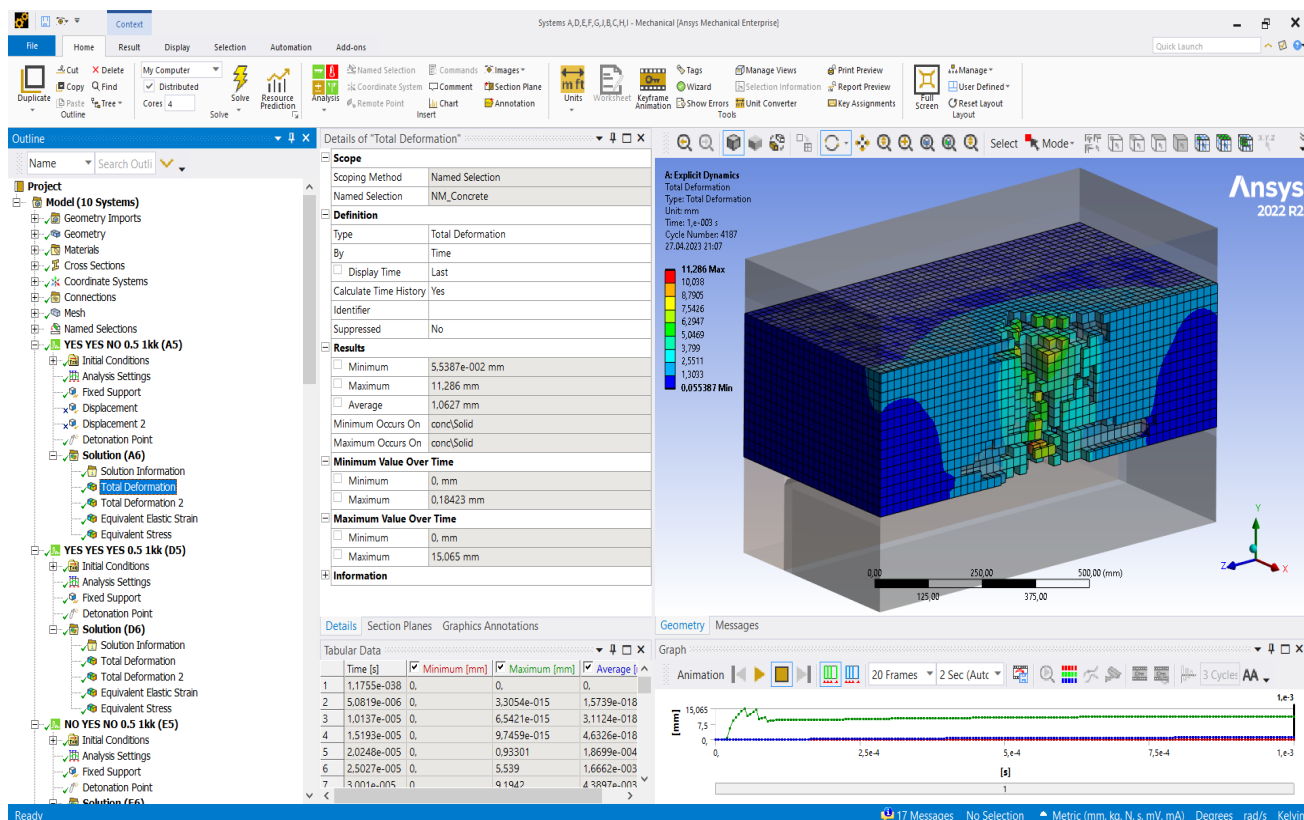


Рисунок 2.3 – Інтерфейс модуля Explicit Dynamics в ANSYS Mechanical Enterprise 2022 R2

До позитивних якостей продукту слід віднести найбільший, серед конкурентів, список модулів для роботи та можливість їх комбінування, сучасний та відносно простий інтерфейс (рис. 2.3) та велику кількість навчального матеріалу. Негативні риси являють собою низьку швидкість роботи в певних умовах, велику кількість зайнятого простору на накопичувачі та нестабільність і обмеженість в деяких задачах. Наприклад, неможливість обрахунку методом SPH в середовищі Mechanical, та доступність цього методу в застарілому модулі Autodyn.

Abaqus FEA – це програмний пакет для скінченно-елементного аналізу та автоматизованого проектування, вперше випущений у 1978 році. Пакет складається з п'яти основних програмних продуктів: "Complete Environment", "Standard", "Explicit", "CFD" та "Electromagnetic". Комплекс чудово справляється з запуском користувацьких доповнень, має високу швидкість роботи в нескладних задачах та низькі системні вимоги.

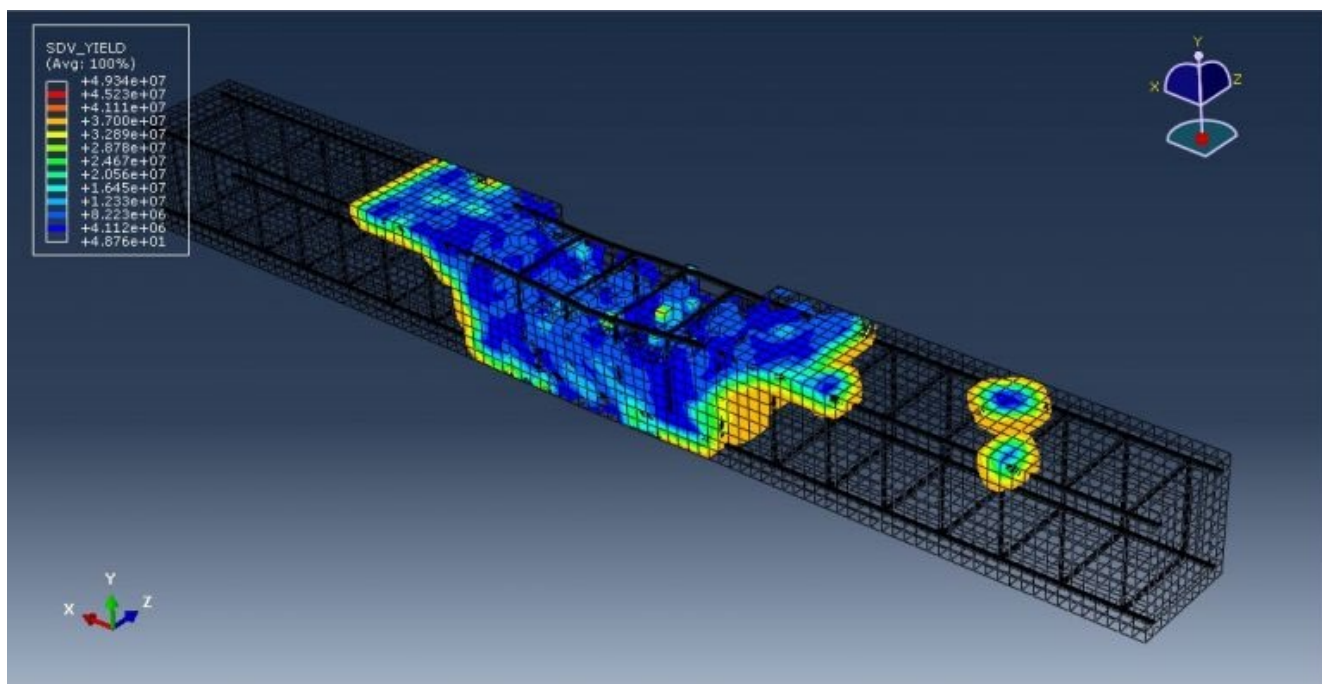


Рисунок 2.4 – Вигляд робочого середовища системи Abaqus CAE [30]

Однією з ключових відмінностей між програмними пакетами є те, що ANSYS може моделювати поширення вибуху, а Abaqus (рис. 2.4), на відміну від конкурента, цього не робить, хоч і має певні можливості в цьому [30]. Крім того, їхня направленість хоч і пересікається, та є доволі різною. Наприклад, Abaqus і CATIA, програмне забезпечення САПР, яке також поширюється компанією Dassault Systems, переважно використовується в автомобільній промисловості і забезпечує можливості для моделювання цілих транспортних засобів. З іншого боку, ANSYS пропонує широкий спектр складних можливостей моделювання в області CFD, що включає моделювання та імітацію вибухових детонацій і подальшого поширення ударних хвиль [31].

Отже, після детальної перевірки можливостей роботи різних програмних комплексів та враховуючи згадані обмеження було зроблено вибір на користь ANSYS 2022 R2, як найбільш підходящого інструменту виконання поставленої задачі. Він має достатньо широкі можливості для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, здатний проводити високоточні дослідження на малих проміжках часу та за високої динаміки руху і пропонує студентську ліцензію, якщо не має можливості отримати звичайну.

## 2.2 Створення моделі та задання параметрів

Аналітична система ANSYS 2022 R2 має обширний перелік модулів для вирішення широкого спектру задач в різних інженерних галузях, а також дозволяє комбінувати розрахунки і проводити порівняння, оптимізацію та аналіз конструкції на основі цих даних. Після завантаження програми відкривається робоче середовище Workbench, де за замовчуванням відкритий пустий проєкт. Він містить три робочі вікна: вікно Toolbox з наборами модулів; вікно Project Schematic для розміщення модулів; вікно властивостей проєкту Properties of Project Schematic.

Для створення розрахункової моделі та аналітичної схеми обираємо загальний модуль Explicit Dynamics та імпортуємо в нього інженерні дані (рис. 2.5). Вибір модуля для роботи зумовлений природою дослідження та типом задачі і був описаний в пункті 1.3. Перш за все необхідно задати матеріали для моделювання та їх властивості, для цього служить розділ Engineering Data (рис. 2.5), який потрібно імпортувати для охоплення параметрів усіх модулів, а не тільки Explicit.

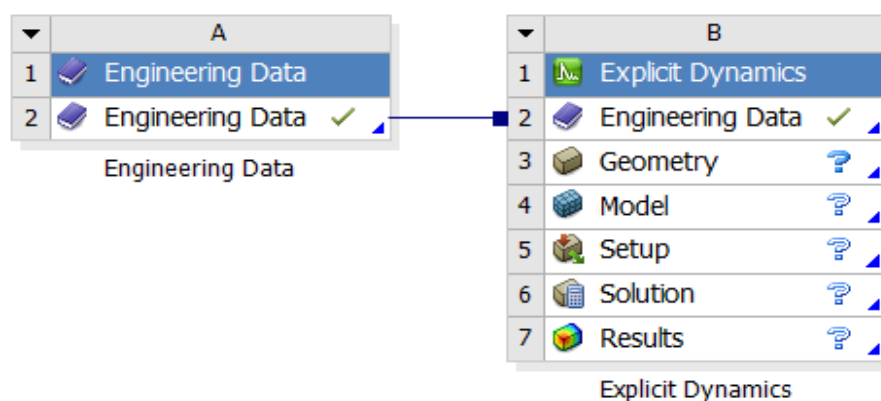


Рисунок 2.5 – Модуль явного інтегрування в просторі проєкту

Досліджуваним конструктивним елементом є залізобетонна балка, яка оперта на дві опори. Для її створення необхідні наступні матеріали з відповідними властивостями: Бетон С35 з бібліотеки матеріалів Explicit Materials, він має властивості нелінійної поведінки та відповідні рівняння стану; арматура А400С та А240С з властивостями нелінійної поведінки; сплав NiTi з ефектом надпружності (рис. 2.6-2.11).



Outline of Schematic M2, N2: Engineering Data						
	A	B	C	D	E	
1	Contents of Engineering Data				Source	Description
2	Material					
3	TNT		<input type="checkbox"/>	Explicit_Materials.xml	JWL Equations of State Coeffs. for High Explosives Lee Finger & Collins. UCID -16189. January 1763	
4	Арматура A240C		<input type="checkbox"/>	C:\ANSYS TNT\BEAM test		
5	Арматура A400C		<input type="checkbox"/>	C:\ANSYS TNT\BEAM test		
6	Бетон C35		<input type="checkbox"/>	Explicit_Materials.xml	Riedel et al. "Penetration of Reinforced Concrete" ISIEMS'99 pp315. Riedel W. "Beton unter dynamischen Lasten" Ed. Fraunhofer EMI, IRB-Verlag, 2004, ISBN 3-8167-6340-5 Riedel, et al. "Numerical Assessment for Impact Strength" DII 36 (2009) pp283.	
7	Сплав Ni-Ti		<input type="checkbox"/>	C:\ANSYS TNT\BEAM test		
*	Click here to add a new material					

Рисунок 2.6 – Таблиця матеріалів проекту, їх опис, походження та вікно керування характеристиками

Властивості кожного матеріалу подано у вікні Properties of Outline Row, де окремо зазначено надані властивості матеріалу (Property), величину наданої характеристики (Value) та одиниці обчислення (Unit), які можна змінити окремо для кожного параметру, або обрати уніфіковані для всього проекту (рис. 2.6-2.11).

Properties of Outline Row 7: TNT					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1630	kg m <sup>-3</sup>		<input type="checkbox"/>
4	Explosive JWL			<input type="checkbox"/>	
5	Parameter A	3,7377E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
6	Parameter B	3,7471E+09	Pa		<input type="checkbox"/>
7	Parameter R1	4,15			<input type="checkbox"/>
8	Parameter R2	0,9			<input type="checkbox"/>
9	Parameter W	0,35			<input type="checkbox"/>
10	C-J Detonation Velocity	6930	m s <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
11	C-J Energy / unit mass	3,681E+06	J kg <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
12	C-J Pressure	2,1E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
13	Burn on compression fraction	0			<input type="checkbox"/>
14	Pre-burn bulk modulus	0	Pa		<input type="checkbox"/>
15	Adiabatic Constant	0			<input type="checkbox"/>
16	Additional specific energy / unit mass	0	J kg <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
17	Begin Time	0	s		<input type="checkbox"/>
18	End Time	0	s		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.7 – Властивості вибухівки TNT









Properties of Outline Row 3: Бетон C35				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	 Table		
3	 Density	2314	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
4	 Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	654	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
5	<input checked="" type="checkbox"/> RHT Concrete Strength			<input type="checkbox"/>
6	Use cap on Elastic Surface	Yes		
7	Compressive Strength f <sub>c</sub>	3,5E+07	Pa	<input type="checkbox"/>
8	Tensile Strength f <sub>t</sub> /f <sub>c</sub>	0,1		<input type="checkbox"/>
9	Shear Strength f <sub>s</sub> /f <sub>c</sub>	0,18		<input type="checkbox"/>
10	Intact Failure Surface Constant A	1,6		<input type="checkbox"/>
11	Intact Failure Surface Exponent n	0,61		<input type="checkbox"/>
12	Tension/Compression Meridian Ratio Q2.0	0,6805		<input type="checkbox"/>
13	Brittle to Ductile Transition BQ	0,0105		<input type="checkbox"/>
14	Hardening Slope	2		<input type="checkbox"/>
15	Elastic Strength/f <sub>t</sub>	0,7		<input type="checkbox"/>
16	Elastic Strength/f <sub>c</sub>	0,53		<input type="checkbox"/>
17	Fracture Strength Constant B	1,6		<input type="checkbox"/>
18	Fracture Strength Exponent m	0,61		<input type="checkbox"/>
19	Compressive Strain Rate Exponent α	0,032		<input type="checkbox"/>
20	Tensile Strain Rate Exponent δ	0,036		<input type="checkbox"/>
21	Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1E+20		<input type="checkbox"/>
22	Damage Constant D1	0,04		<input type="checkbox"/>
23	Damage Constant D2	1		<input type="checkbox"/>
24	Minimum Strain to Failure	0,01		<input type="checkbox"/>
25	Residual Shear Modulus Fraction	0,13		<input type="checkbox"/>
26	 Bulk Modulus	3,527E+10	Pa	<input checked="" type="checkbox"/>
27	 Shear Modulus	1,67E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
28	<input checked="" type="checkbox"/> Polynomial EOS			<input type="checkbox"/>
29	Parameter A1	3,527E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
30	Parameter A2	3,958E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
31	Parameter A3	9,04E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
32	Parameter B0	1,22		<input type="checkbox"/>
33	Parameter B1	1,22		<input type="checkbox"/>
34	Parameter T1	3,527E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
35	Parameter T2	0	Pa	<input type="checkbox"/>
36	<input checked="" type="checkbox"/> P-alpha EOS			<input type="checkbox"/>
37	Solid Density	2750	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
38	Porous Soundspeed	2920	m s <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
39	Initial Compaction Pressure P <sub>e</sub>	2,33E+07	Pa	<input type="checkbox"/>
40	Solid Compaction Pressure P <sub>s</sub>	6E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
41	Compaction Exponent n	3		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.8 – Властивості Бетону C35










Properties of Outline Row 5: Арматура C250C				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	 Table		
3	 Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>  Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
5	 Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>  Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	2,1E+05	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>  Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
13	Active Table	Plastic		
14	Yield Strength	225	MPa	<input type="checkbox"/>
15	Tangent Modulus	2500	MPa	<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.9 – Властивості Арматури А240С










Properties of Outline Row 6: Арматура C400C				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	 Table		
3	 Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>  Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
5	 Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>  Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	2,1E+05	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>  Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
13	Active Table	Plastic		
14	Yield Strength	365	MPa	<input type="checkbox"/>
15	Tangent Modulus	4000	MPa	<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.10 – Властивості Арматури А400С

Нелінійна поведінка арматури надана параметром Bilinear Isotropic Hardening, який задається у вікні Table of Properties. Окремо для кожного виду арматури необхідно обрати потрібні значення (рис. 2.9-2.10).

Properties of Outline Row 4: Сплав NiTi				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	6,45	g cm <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	52700	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,36		
10	Bulk Modulus	6,2738E+10	Pa	
11	Shear Modulus	1,9375E+10	Pa	
12	Superelasticity			
13	Sigma SAS	450	MPa	
14	Sigma FAS	460	MPa	
15	Sigma SSA	190	MPa	
16	Sigma FSA	100	MPa	
17	Epsilon	0,06	m m <sup>-1</sup>	
18	Alpha	0		
19	Es	30000	MPa	

Рисунок 2.11 – Властивості NiTi сплаву

Надпружність для NiTi сплаву задаємо у вікні інструментів Toolbox. У розділі Shape Memory Alloy обираємо параметр Superelasticity (рис. 2.11). Задаємо йому значення характеристик, що визначалися експериментально за допомогою деформування розтягом за температури 18 °C [32].

### 2.3 Створення об'ємної моделі досліджуваного елемента

Для створення просторової моделі було обрано середовище Design Modeler, що є спеціально розробленим інструментом твердотілого моделювання у просторі ANSYS Workbench. Після переходу в розділ для редагування моделі під назвою Geometry (рис. 2.12), буде запущено середовище Design Modeler (рис. 2.13).

В подальшому необхідно створити просторову модель підсилену арматурою балки, що розташована на двох опорах та має розташований на верхній грані вибуховий елемент. Характеристичні розміри конструкції:  $a = 1200$  мм,  $b = 80$  мм,  $h = 140$  мм; опори  $a, b, h = 80$  мм; вибухівка  $a, b = 20$  мм,  $h = 31$ .

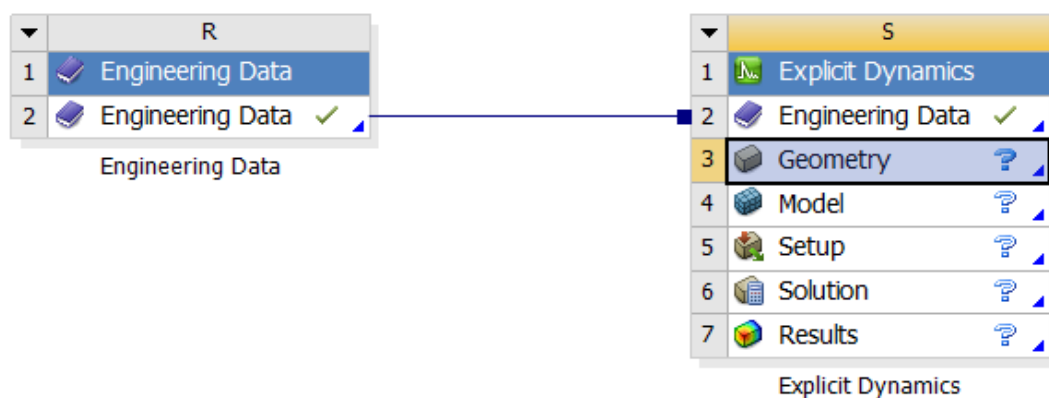


Рисунок 2.12 – Розділ Geometry у проєкті

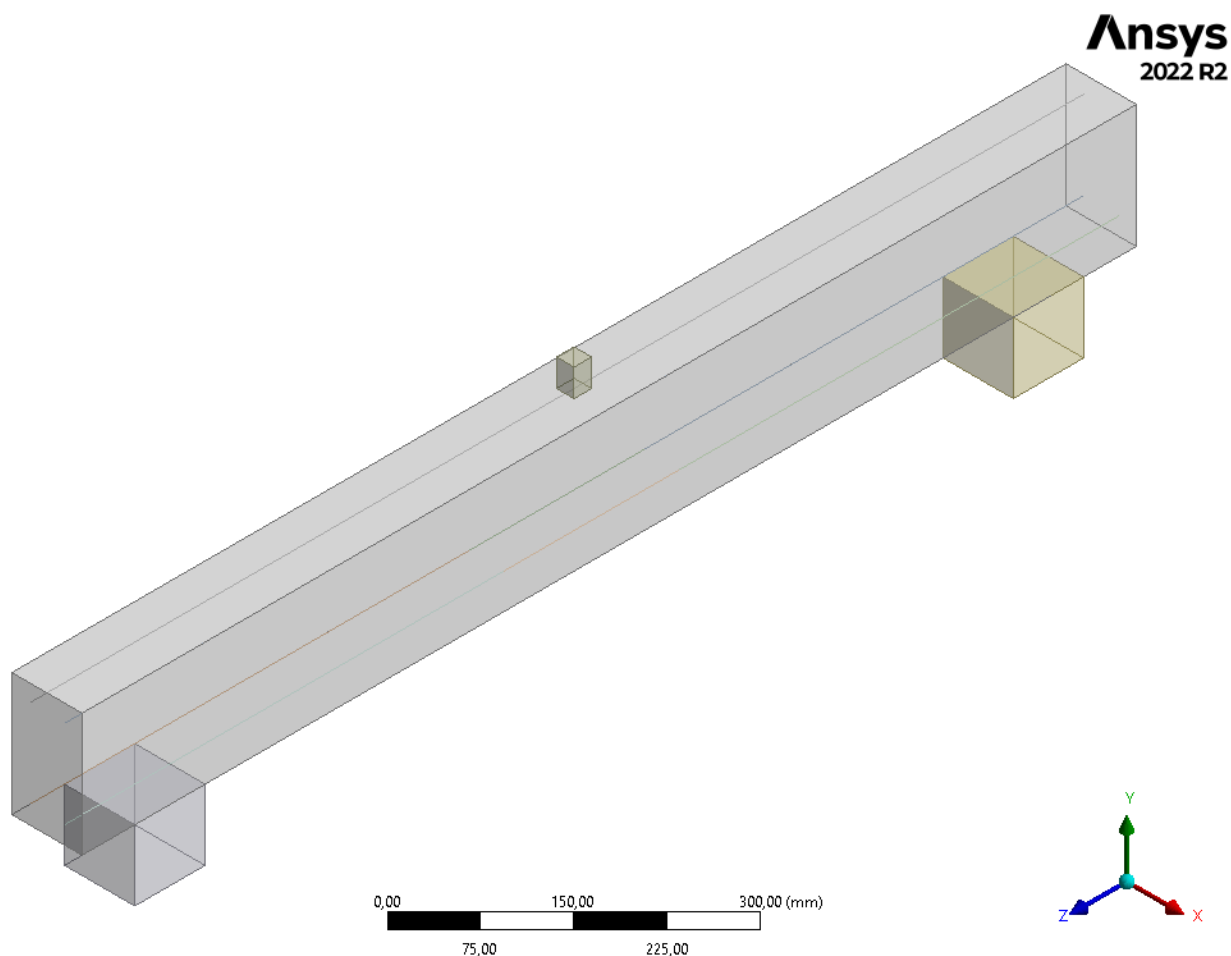


Рисунок 2.13 – Модель балки на двох опорах з вибухівкою в центрі

Арматуру всередині балки розташуємо на відстані 20 мм по осях X та Y, вибуховий елемент розміщаємо в центрі балки на верхній стороні по осі Y, опори на відстані 60 мм від кожного краю (рис. 2.13). Дані параметри у моделі змінюватися не будуть, змінюватимемо армування. Детальніше це описується в розділі 3.2.

## 2.4 Задання параметрів розрахункової моделі

Для задання параметрів розрахункової моделі використовується середовище ANSYS Mechanical Enterprise (рис. 2.14), що розроблено компанією ANSYS для моделювання методом скінченних елементів. Програма дозволяє задати умови роботи матеріалів, впливи на них та провести аналіз отриманих результатів.

Перейти в неї можна через розділ Model модуля Explicit Dynamics (рис. 2.5). Після запуску можна бачити дерево проєкту Project, властивості елементів Details та вікно виду створеної моделі Geometry (рис. 2.13). Після розгортання гілки моделі можна провести огляд геометрії, яку можна автоматично імпортувати зі середовища Design Modeler (рис. 2.13).

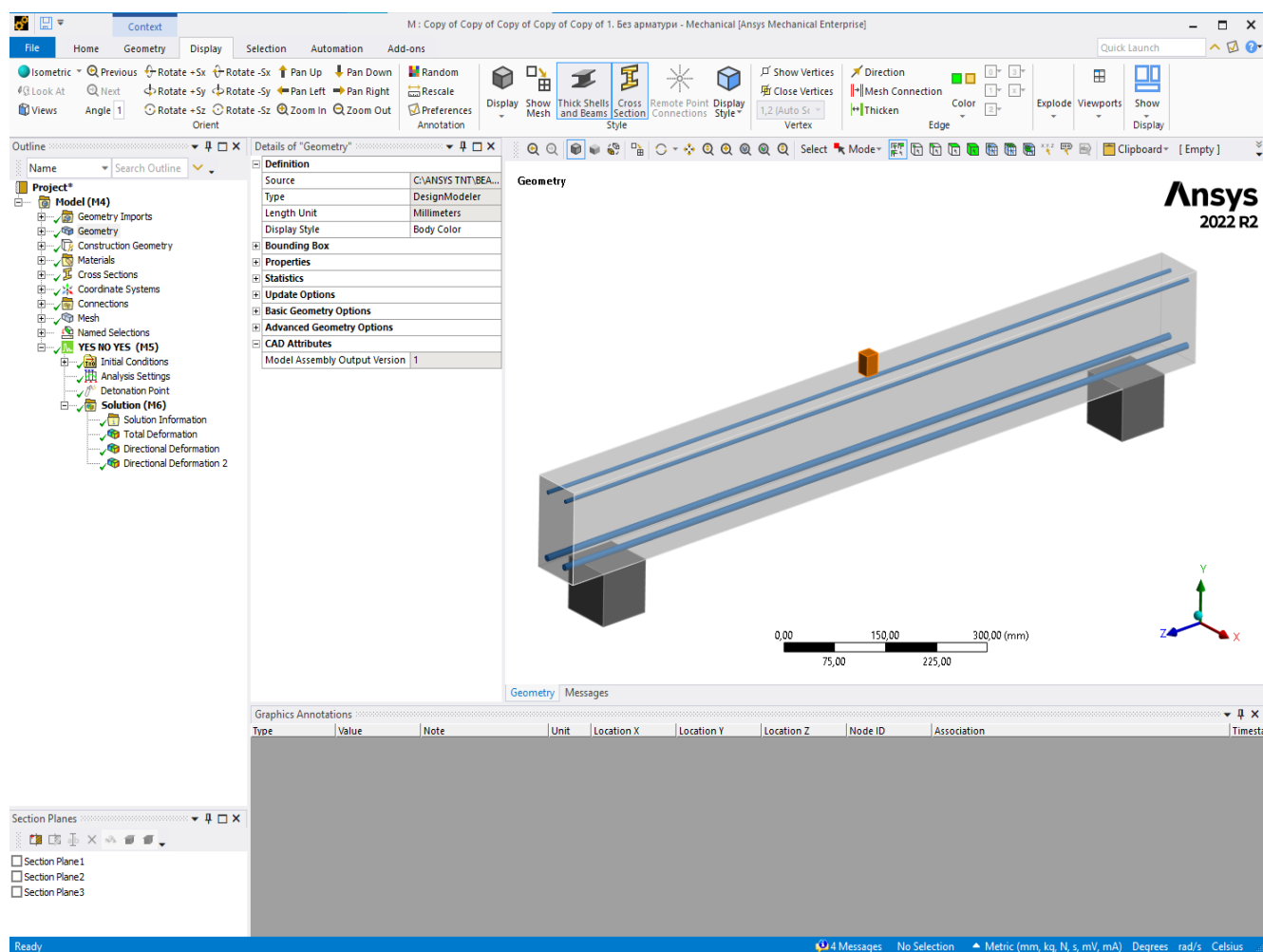


Рисунок 2.14 – Робоче вікно програми ANSYS Mechanical Enterprise

Для частин конструкції призначають відповідні імена та матеріали за допомогою параметру Assignment, що знаходиться у властивостях кожного окремого елемента в розділі Material, вкладки Details (рис. 2.16).

Також у вікні Details, в розділі Definition можна задати систему дискретизації, про які детальніше йшла мова в розділі 1.3. В даній моделі використаємо їх комбінацію та призначимо твердій геометрії метод Лагранжа, а вибухівці – Ейлера.

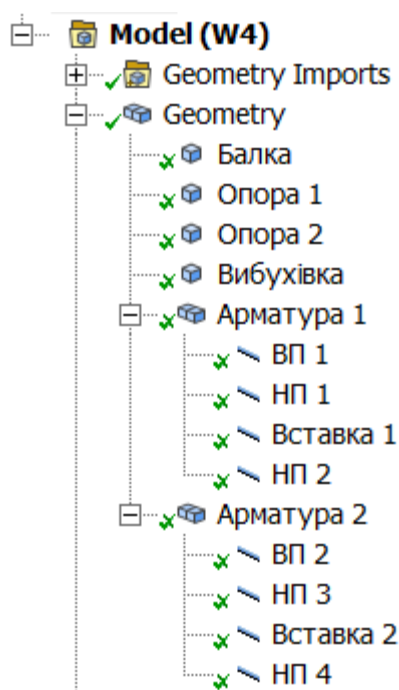


Рисунок 2.15 – Імпортоване дерево геометрії проекту

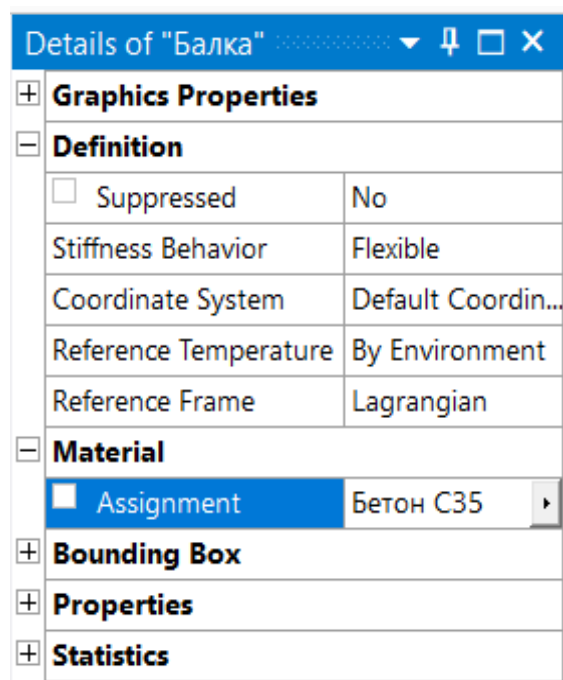


Рисунок 2.16 – Надання елементу властивостей відповідного матеріалу

Перевірити задані в Design Modeler прив'язки перерізів арматури, які діють на лінійні тіла, можна зробити у розділі Cross Sections (рис. 2.14).

Гілка проекту Connections створюється автоматично, а відповідає вона за взаємодію між елементами моделі, що перетинаються, або є дотичними (рис. 2.14).

Наявна взаємодія між опорами та балкою і між балкою та TNT. Та в модулі Explicit їх використання не доцільне, тому потрібно видалити автоматично створені контакти в розділі Contacts та задати загальні для всієї моделі зв'язки Body Interactions для спрощення розрахунку та уніфікації.

В подальшому необхідно виставити їх параметри на Frictionless для задання всім тілам контакту без тертя, та Reinforcement для зчеплення лінійних тіл з твердим тілом бетону і їх спільної роботи в моделі (рис. 2.17)

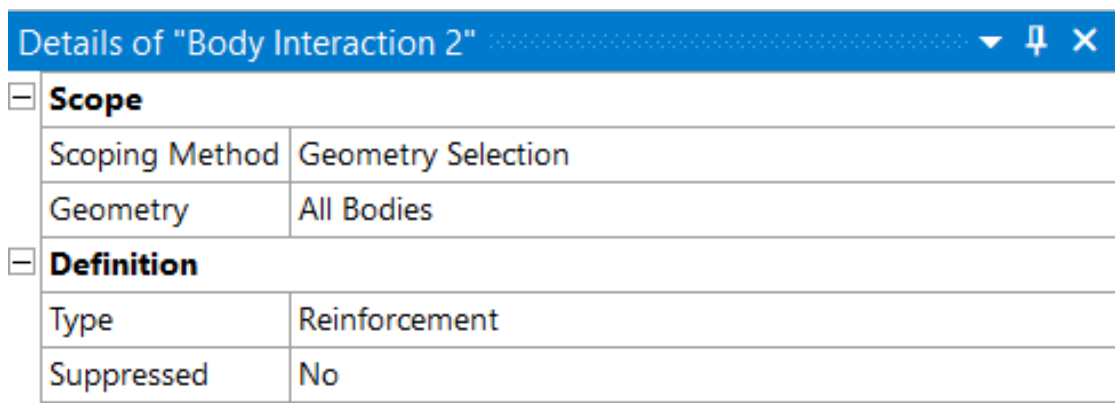


Рисунок 2.17 – Зчеплення арматури з допомогою Reinforcement

У гілці Mesh показано поділ моделі на скінченні елементи за заданим алгоритмом та розміром елемента. Оскільки арматура задана лінійними тілами, то на сітку балки вона не впливає, що дозволяє досягнути однакових розмірів елементів по всій балці, що є дуже важливим саме для Explicit Dynamic, адже від цього залежить крок часу при розв'язку. Необхідно призначити загальну сітку розміром 10 мм для всіх елементів, та 5 мм для арматури окремо, що кратно основним розмірам моделі, а тому не викличе спотворень (рис. 2.18).

Також потрібно зафіксувати опори, на яких лежить балка, за допомогою опції Stiffness Behavior та параметра Rigid (рис. 2.16) , що заборонить деформацію та будь-яке переміщення опор. Використаємо інструмент Detonation Point для задання точки детонації вибухового заряду та встановимо час запалу на 0 секунд, адже при обрахунку в модулі Explicit збільшення часового проміжку серйозно впливає на розрахунковий час задачі в цілому.

Для полегшення подальшого аналізу необхідно провести по нижній грані балки лінію, по якій проходитиме обрахунок значень прогинів. Зробити це можна за допомогою гілки Construction Geometry в загальному дереві та інструменту Path, детальніше про це йдеться в розділі 3.2.



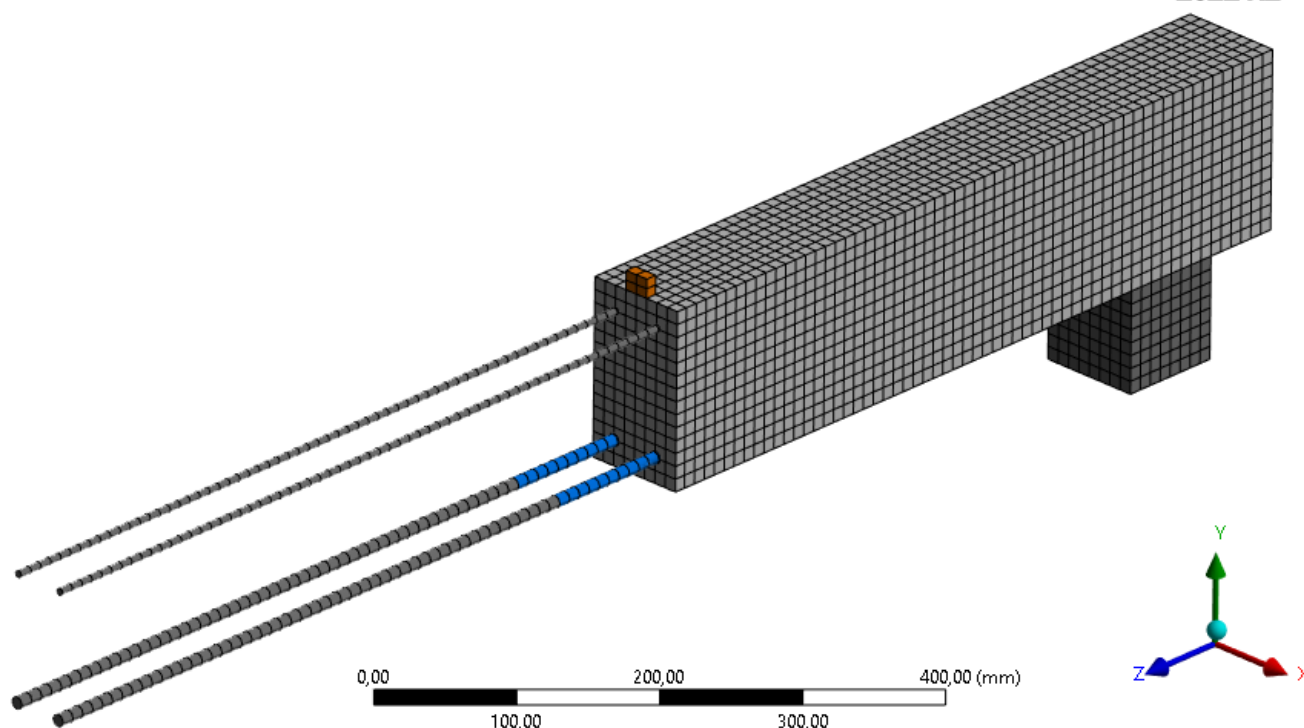


Рисунок 2.18 – Поділ моделі на скінченні елементи

У гілці Analysis Settings необхідно встановити час закінчення обрахунку 0,005 сек у вкладці Step Controls і ерозію матеріалу при досягненні певного геометричного видовження у вкладці Erosion Controls. Ця умова допоможе запобігти сильному зменшенню параметру кроку часу (time step), що може призвести до збільшення часу обрахунку, видачі недостовірних результатів та дострокового його завершення, це детальніше розглядалося у розділі 1.4.

Також слід звернути увагу на вкладку Euler Domain, яка відповідає за розмір та щільність області Ейлера. Кожна точка навколо моделі відповідає поділу на умовний елемент розрахунку, а матеріали, що вийдуть за її межі, будуть видалені з розрахунку. Необхідно встановити розміри зони навколо нашої моделі відповідно до координат об'єктів та часу детонації і встановити розмір однієї комірки області 10 мм, чого буде цілком достатньо для моделювання поширення вибухової хвилі. Збільшення кількості елементів може суттєво збільшити час обрахунку моделі.

О: 5. Вставка 1,2  
Analysis Settings  
Time: 1,e-003 s

**Ansys**  
2022 R2

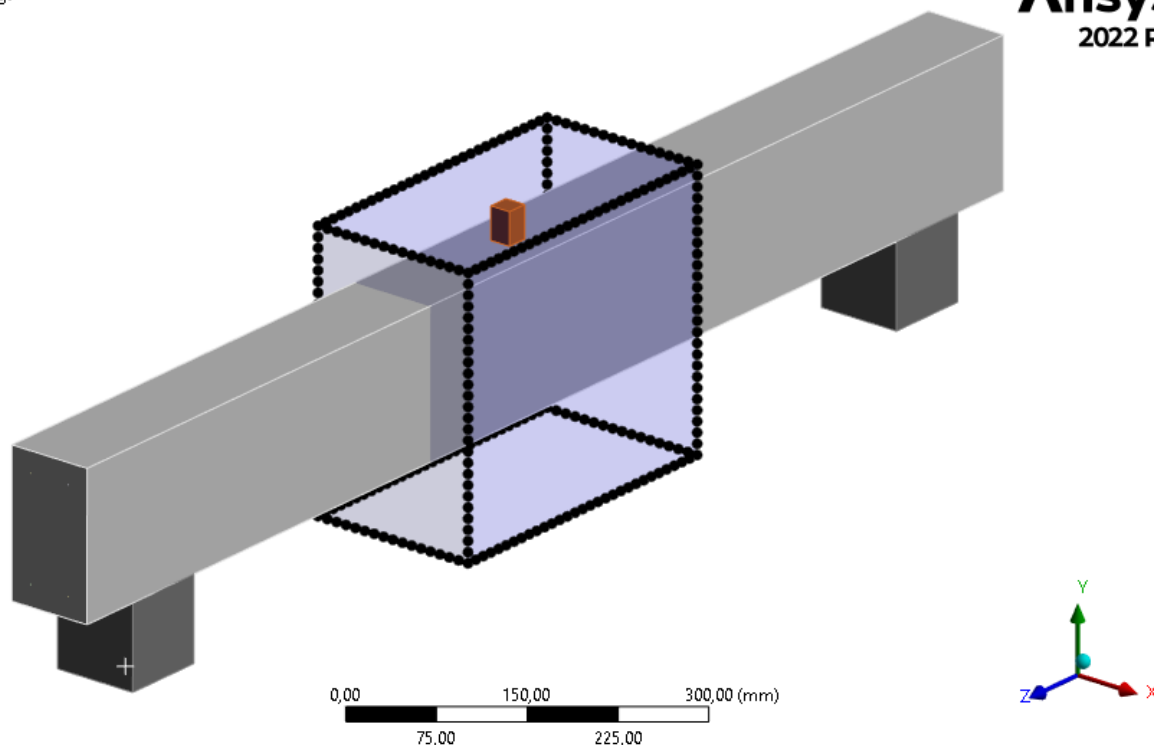


Рисунок 2.19 – Вигляд домену Ейлера в просторі моделі

Ейлерову область розміщено в межах дії вибухового пристрою, враховуючи обраний часовий проміжок моделі в Analysis Settings. Зменшення його об'єму не вплине на кінцевий результат, але прискорить обрахунок задачі приблизно на 30% (рис. 2.19).

## 2.5 Висновок до розділу 2

Порівняння різних програмних комплексів показало, що для виконання поставленої задачі можливості ANSYS R2 2022 є найбільш підходящими та достатніми з розглянутих програм. Він дозволяє проаналізувати поведінку моделі в надзвичайно малі проміжки час та за великих швидкостей взаємодії матеріалів. Було описано методику побудови моделі, поділу її на скінченні елементи та задання відповідних параметрів поведінки матеріалів для обрахунку.

## **РОЗДІЛ 3**

### **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ПІД ДІЄЮ ВИБУХУ**

#### **3.1 Загальна інформація щодо дослідження**

Після обґрунтування вибору програмного комплексу потрібно підготувати 4 зразка балок з різним армуванням та провести їх обрахунок в середовищі ANSYS Mechanical 2022 R2. За необхідності можна імпортувати отримані результати обрахунків задачі у вбудований модуль ANSYS Autodyn для отримання додаткових даних.

Метою дослідження є проаналізувати напружено-деформований стан залізобетонної балки за вибухового навантаження. А саме: оцінити вплив підсилення арматурою різних типів та матеріалів на напружено-деформований стан конструкції, задля знайдення шляхів мінімізації пошкоджень, продовження роботи конструкції та економічної доцільності.

Дослідження проведено методом скінченних елементів з використанням комбінованих способів просторових дискретизацій. Була змодельована балка довжиною 1,2 м, яка встановлена на дві опори та має вибуховий заряд на верхній площині. Змінюватися в дослідженні будуть: розміщення арматури і її характеристики (сталь A400C, сталь A240C та псевдопружний NiTi сплав) у кожного зразка окремо.

#### **3.2 Напружено-деформований стан балки з різними видами армування**

Для першого етапу дослідження було підготовано чотири моделі балок з різноманітним розташуванням армування, марками сталі та площею січення стержнів. Арматура підбиралася таким чином, щоб мати близьке значення площі поперечного січення, для можливості подальшого порівняння з іншими зразками та визначення найбільш оптимального типу.

Представлені варіації балки (рис. 3.1):

- A0 — Без арматури;
- A1 — Нижній пояс 2Ø12 мм (A400С);
- A2 — Нижній пояс 2Ø10 мм (A400С), верхній пояс – 2Ø6 мм (A240С);
- A3 — Нижній пояс 2Ø10 мм (A400С) + 300 мм вставка з псевдопружного NiTi СПФ, верхній пояс 2Ø6 мм (A240С).

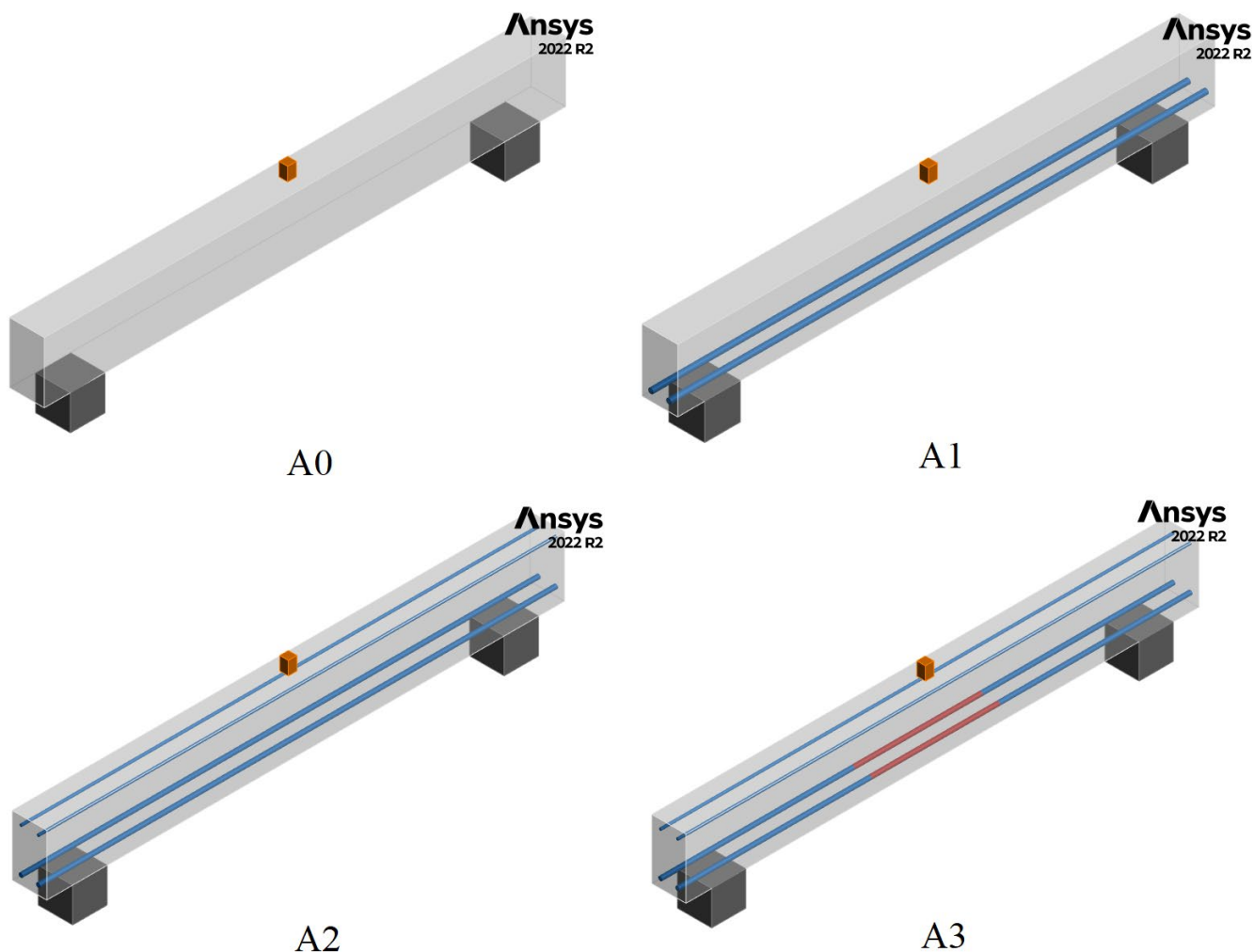


Рисунок 3.1 – Варіації балки з різними типами армування (A0 – A3)

На балку діє вибухове навантаження від детонації елемента TNT розміром 20x20x31 мм та масою 0,02 кг, що спричиняє виникнення близько 90 МПа надлишкового тиску на поверхні балки (рис. 3.2). На рисунку 3.3 представлено розподіл полів переміщень в кожному досліджуваному зразку по осі Y.

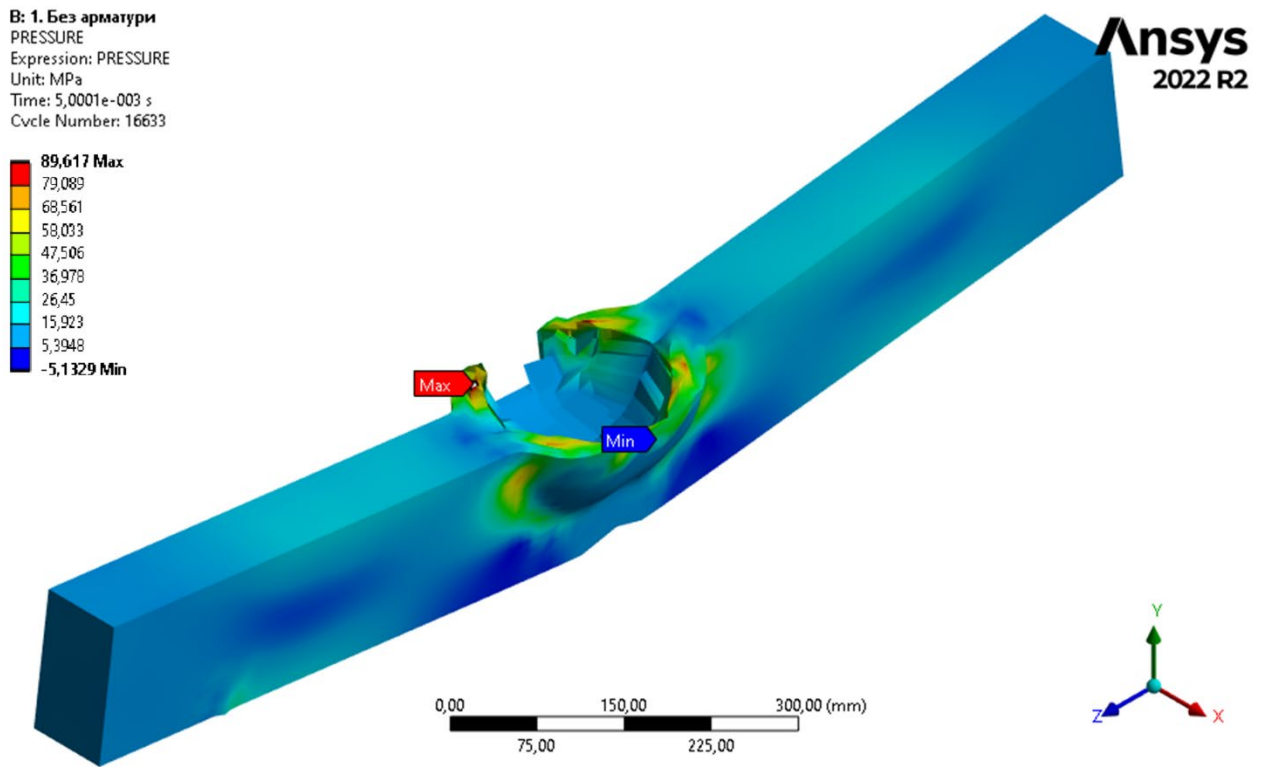
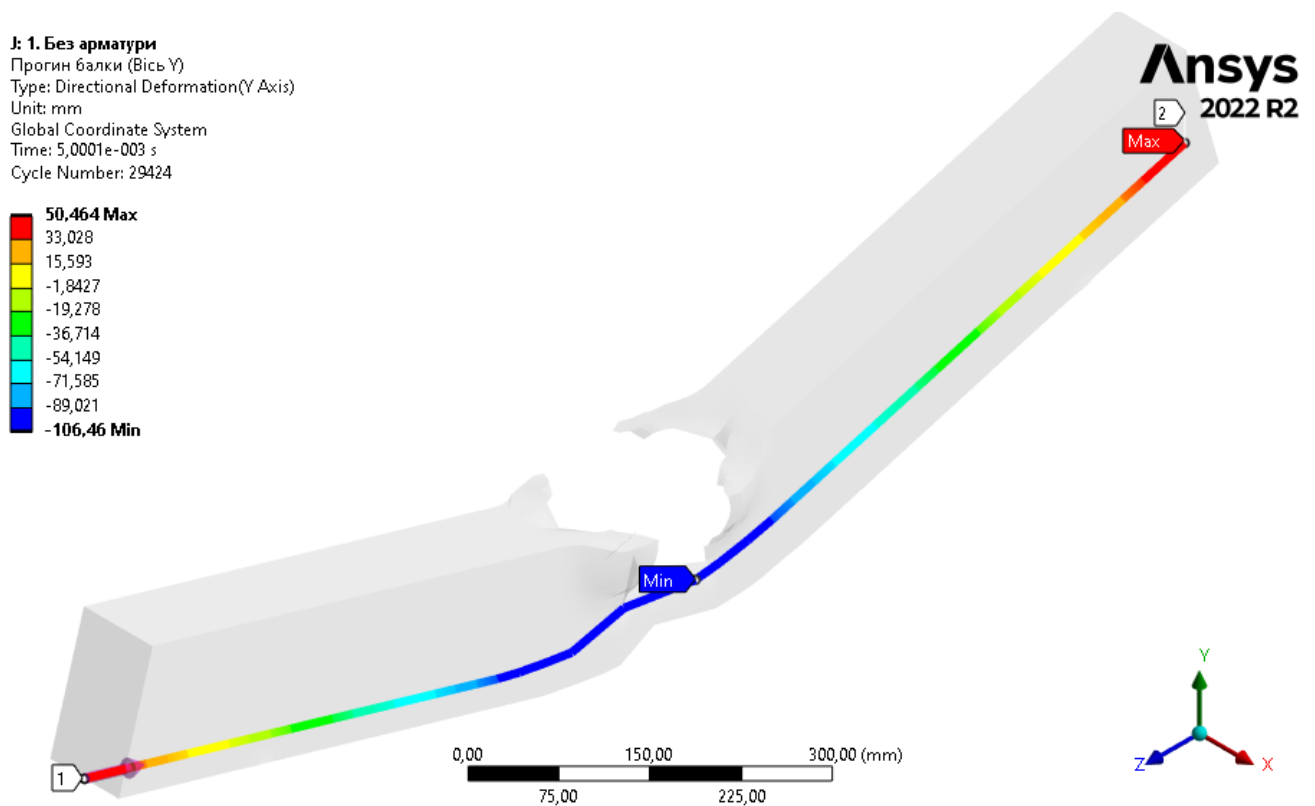


Рисунок 3.2 – Тиск на поверхні балки А0 від дії вибухового навантаження, МПа

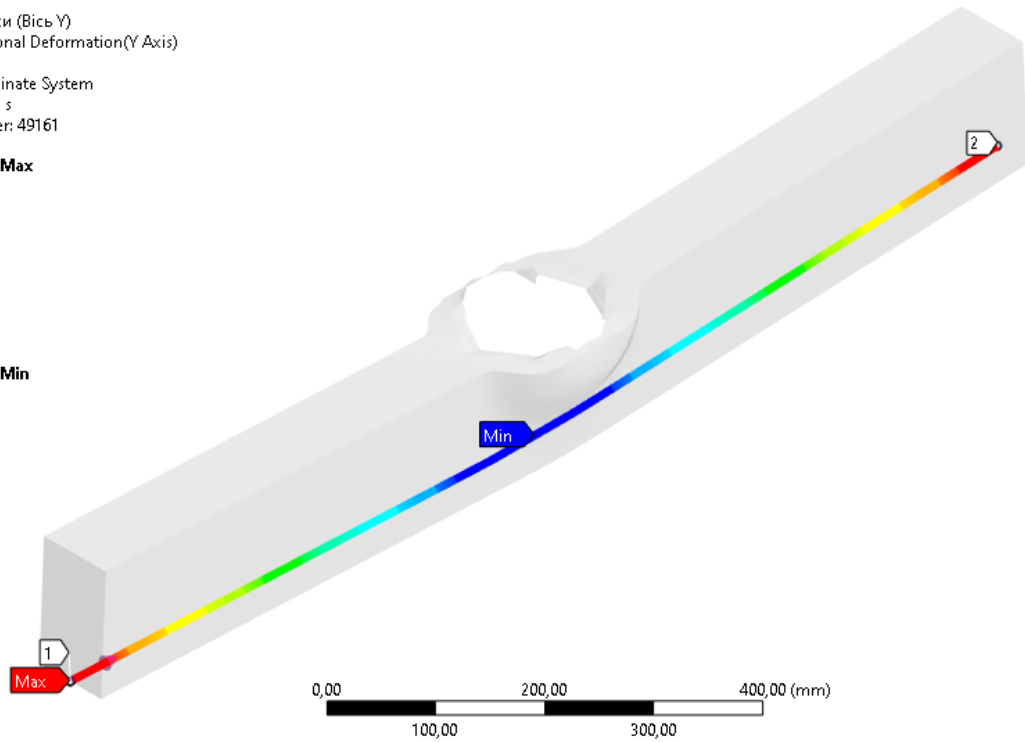
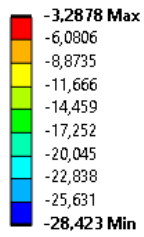


a)

**F: 2. НП**

Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5, e-003 s  
 Cycle Number: 49161

**Ansys**  
 2022 R2

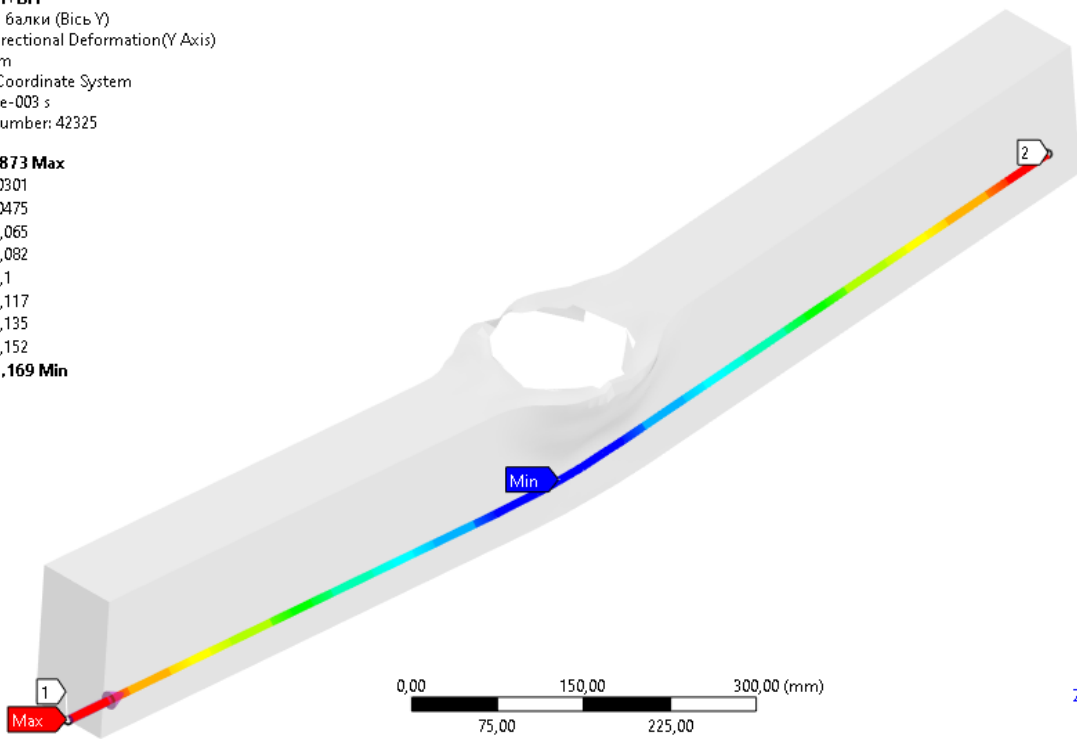
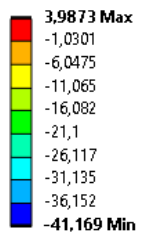


б)

**H: 3. НП+ВП**

Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5, e-003 s  
 Cycle Number: 42325

**Ansys**  
 2022 R2



в)

**J: 1. Вставка 300 мм**

Прогин балки (Вісь Y)

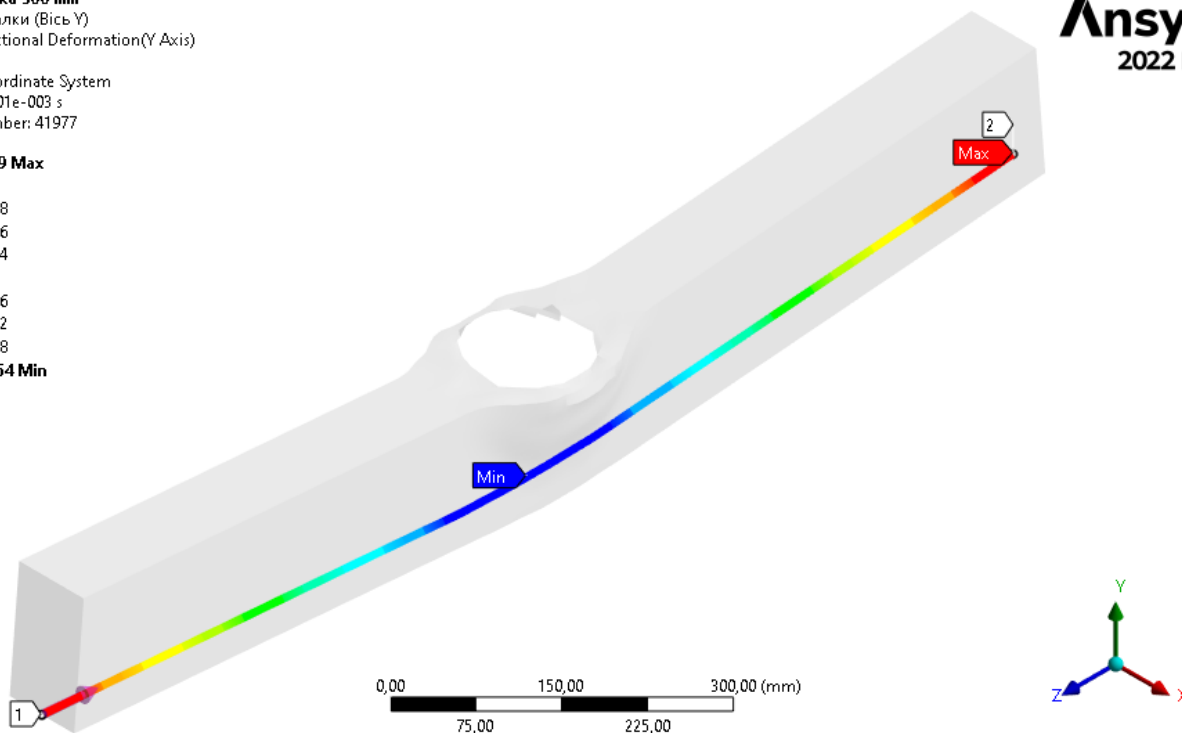
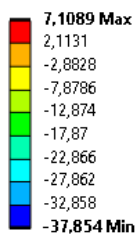
Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 5,0001e-003 s

Cycle Number: 41977

**Ansys**  
2022 R2

г)

а) – без арматури,

б) – тільки нижній пояс, в) – нижній та верхній пояс, г) – зі вставкою СПФ.

Рисунок 3.3 – Максимальний прогин балки по осі Y, мм

Аналіз деформацій буде проводитися тільки на проміжку часу 0,005 сек. На діаграмі (рис. 3.4) показано прогини кожного представленого зразка балки.

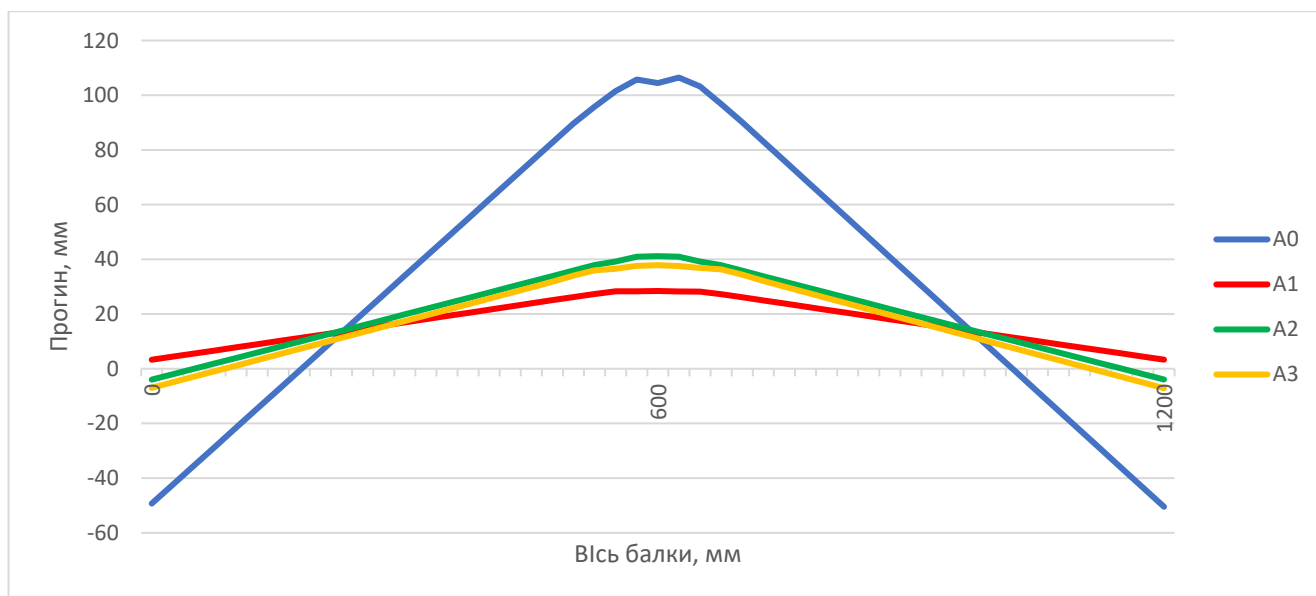
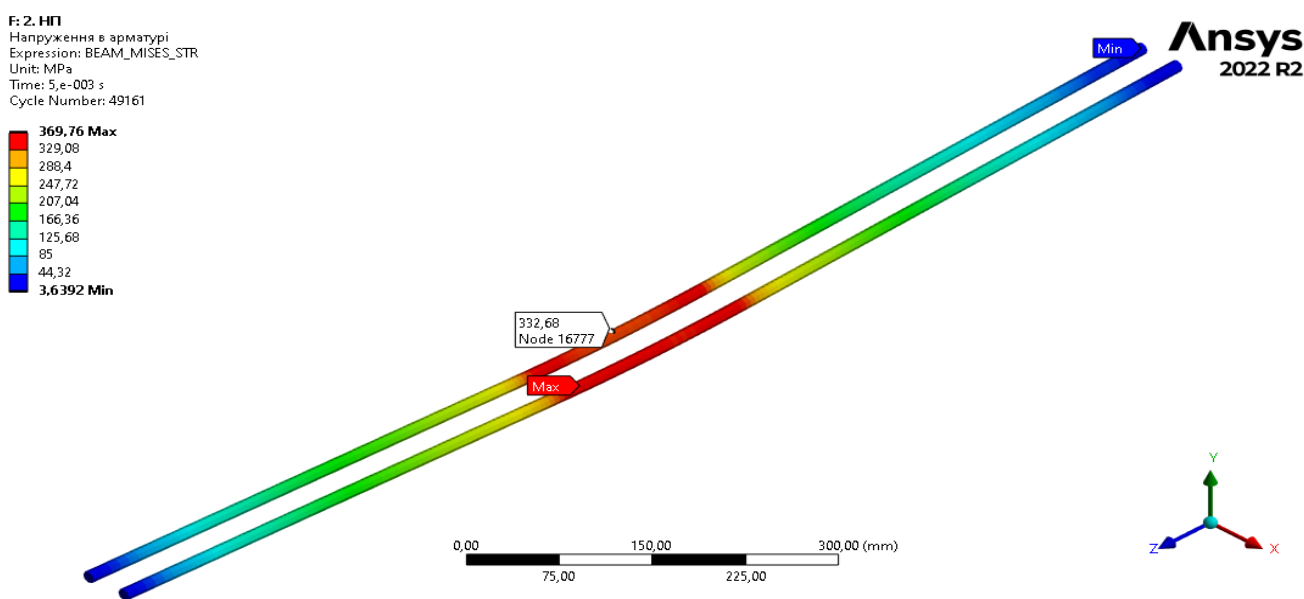


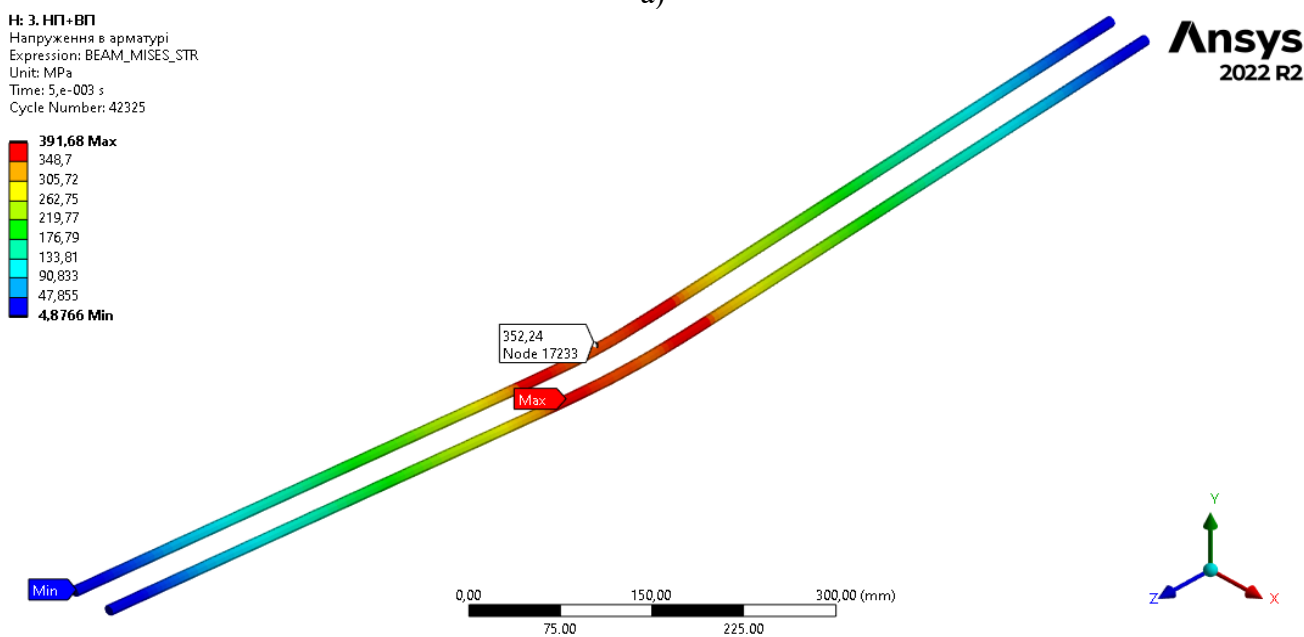
Рисунок 3.4 – Графік прогинів в балках А0 – А3, мм

Згідно графіка 3.4 найбільші прогини показує зразок А0 (рис.3.3 (а)) без арматури, вони досягають 106 мм. Балка А3 (рис.3.3 (г)) з СПФ має більші деформації, ніж зразок А1 (рис.3.3 (б)) з нижнім поясом арматури. Це зумовлено їх характеристиками, адже псевдопружний NiTi СПФ має меншу жорсткість, порівняно з арматурою А400С (рис. 2.10), а його модуль пружності менший майже в 4 рази (рис. 2.11).

Необхідно також проаналізувати напруження всередині арматури. На рисунку 3.5 показано розподіл полів еквівалентних напружень в кожному зразку.



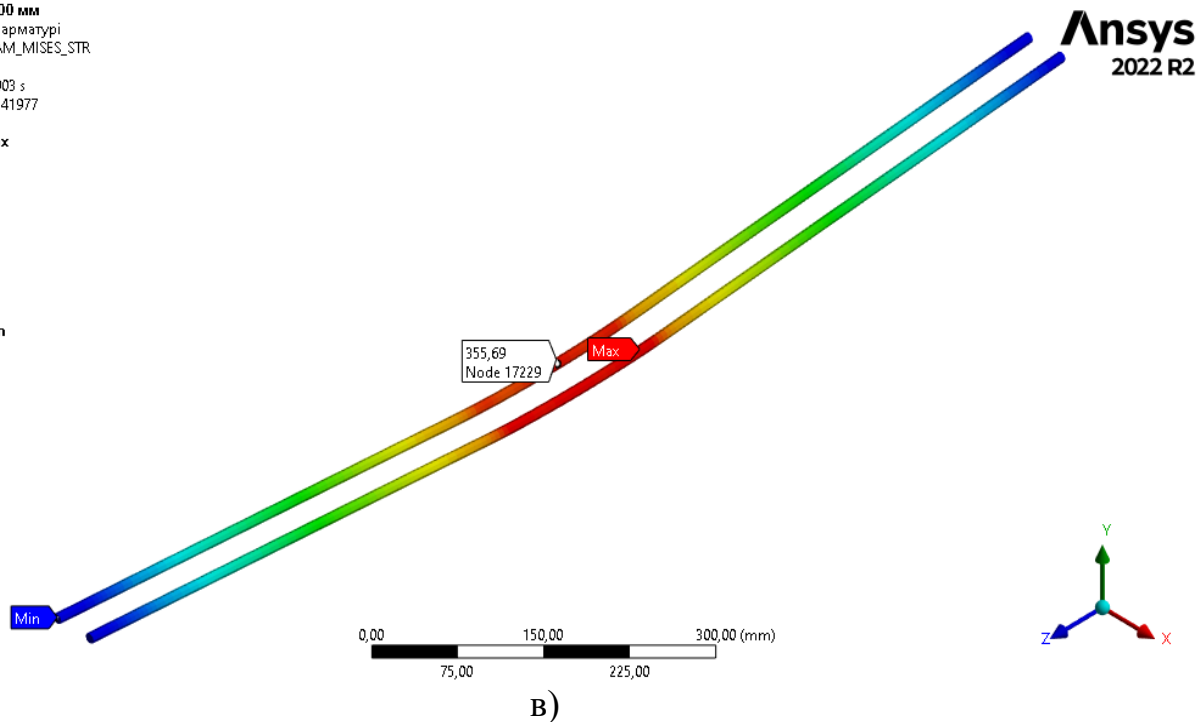
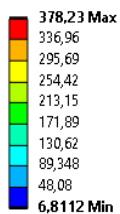
а)



б)



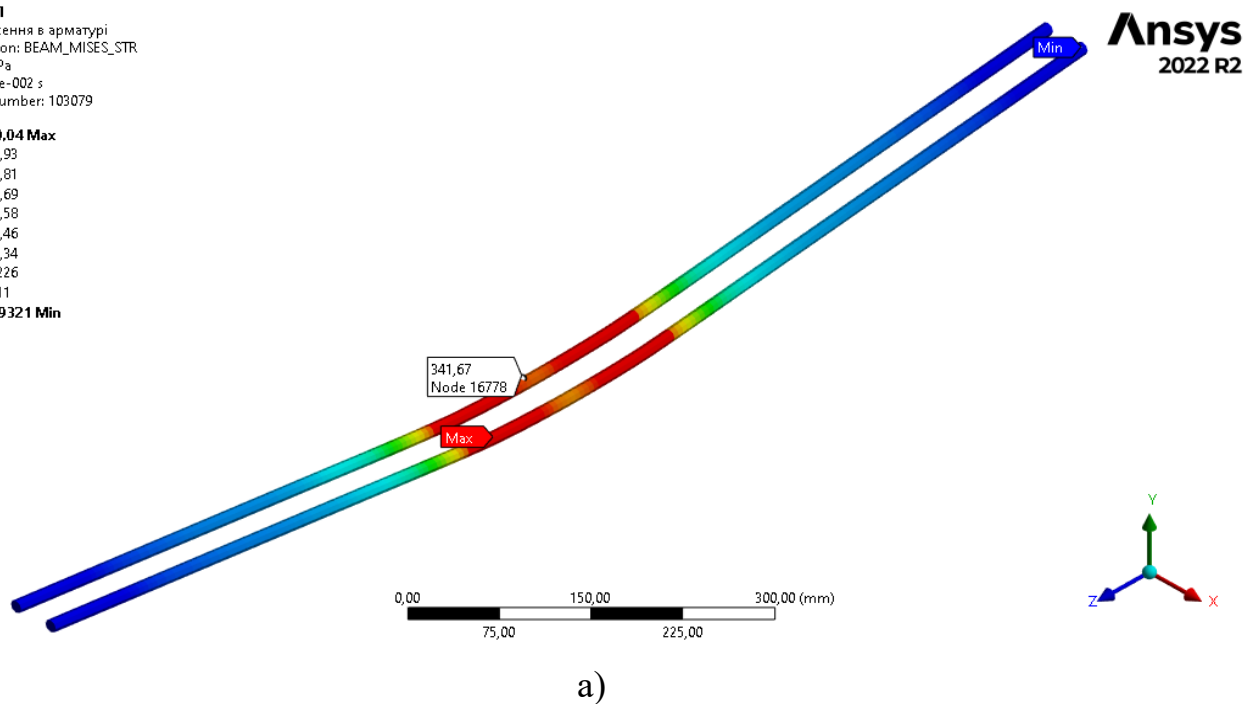
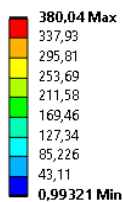
**J: 1. Вставка 300 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41977



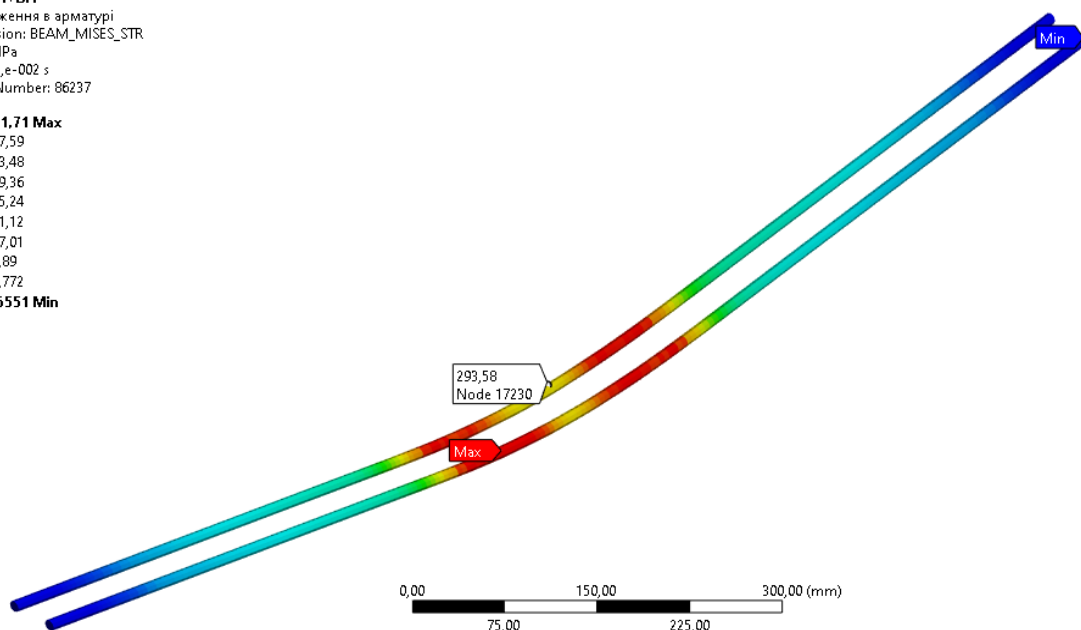
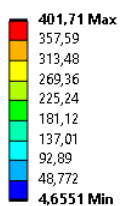
а) – тільки нижній пояс, б) – нижній та верхній пояс, в) – зі вставкою СПФ.  
 Рисунок 3.5 – Еквівалентні напруження робочої арматури в балках,  
 0,005 сек, МПа

Потрібно також розглянути напруження на проміжку 0,01 сек (рис. 3.6) та порівняти їх з відрізком 0,005 сек (рис. 3.5).

**D: 2. НП**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 1,e-002 s  
 Cycle Number: 103079

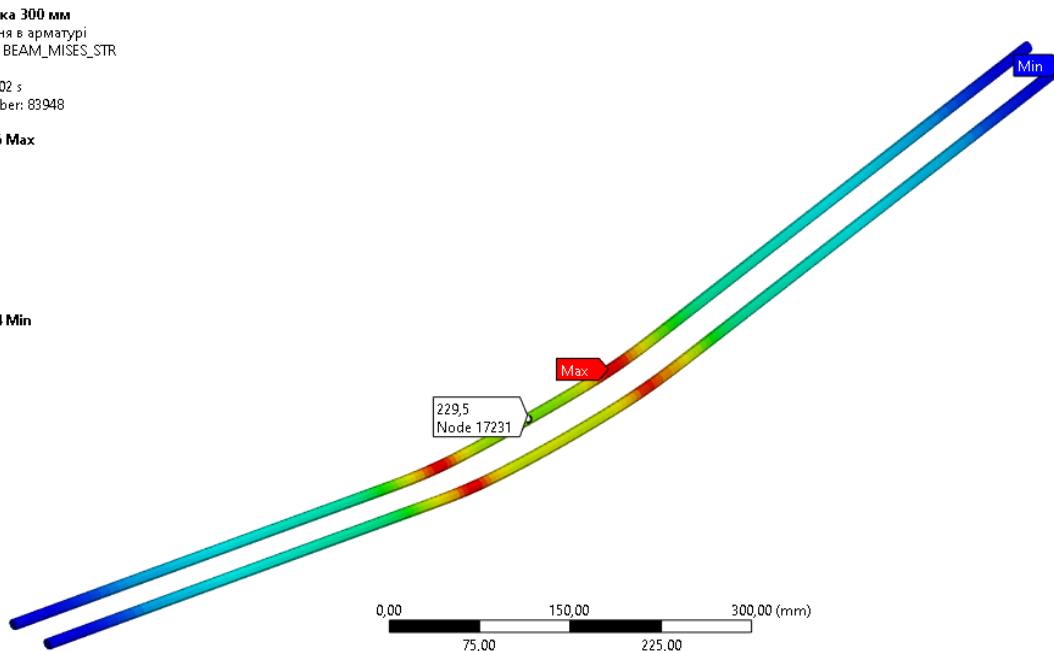
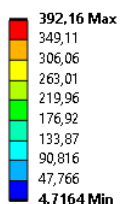


F: 3. НП+ВП  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: МПа  
 Time: 1,е-002 s  
 Cycle Number: 86237



б)

H: 1. Вставка 300 мм  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: МПа  
 Time: 1,е-002 s  
 Cycle Number: 83948



в)

а) – тільки нижній пояс, б) – нижній та верхній пояс, в) – зі вставкою СПФ.

Рисунок 3.6 – Еквівалентні напруження робочої арматури в балках, 0,01 сек, МПа

З аналізу можна зробити висновок, що протягом часу 0,005 сек найбільші еквівалентні напруження виникають в арматурі зразка А2 (рис. 3.5 (б)), де встановлено верхній та нижній пояси арматури. Вони досягають значення ( $\sigma = 392$  МПа), що значно більше межі текучості арматури А400 ( $\sigma_{0,2} = 365$  МПа), а

отже викликає появу пластичних деформацій. Найменші значення еквівалентних напружень спостерігаються у зразку А1 (рис. 3.5 (а)) ( $\sigma = 369$  МПа), де встановлено тільки нижній пояс арматури. Зразок А3 (рис. 3.5 (в)) зі вставкою СПФ показав посередні результати еквівалентних напружень ( $\sigma = 378$  МПа), що не перевищує напруження завершення аустенітної фази і є менше 19% (рис. 1.15, 2.11).

На великих проміжках часу сплави пам'яті форми здатні зменшувати залишкові розтягуючі напруження в декілька разів. Проте через обмеження системи обрахунку Explicit показати це проблематично. Порівнюючи значення полів напружень можна помітити, що найкращу тенденцію до спадання залишкових напружень показує балка зі вставкою СПФ (рис. 3.6 (в)). На проміжку часу 0,01 сек значення в центрі стержня знизилися до 229 МПа, порівняно з відрізком 0,005 сек, де воно становило 392 МПа.

Представлено графік отриманих результатів еквівалентних напружень в арматурі (рис. 3.7), що дозволяє детальніше оцінити тенденцію до зміни еквівалентних напружень в часі. Часовий проміжок було обрано 0,01 сек для представлення повних результатів двох аналізів, а значення кривих – середні та максимальні напруження.

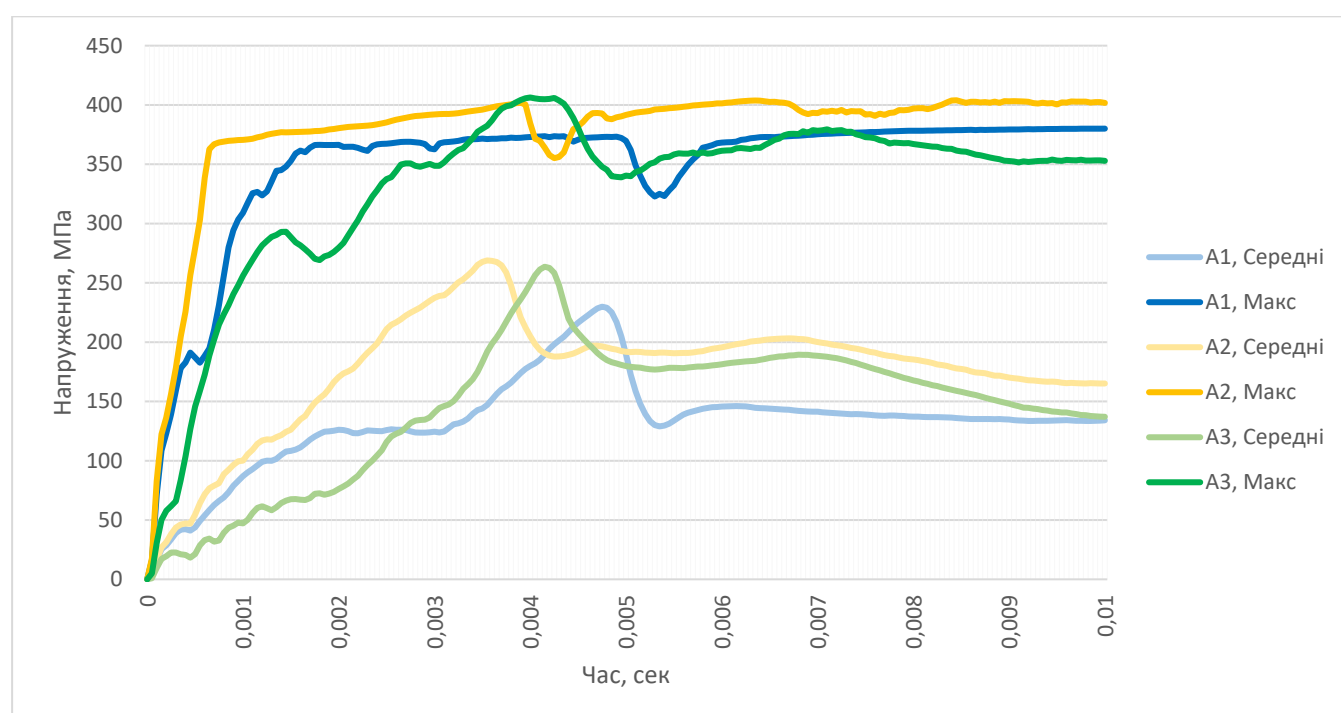
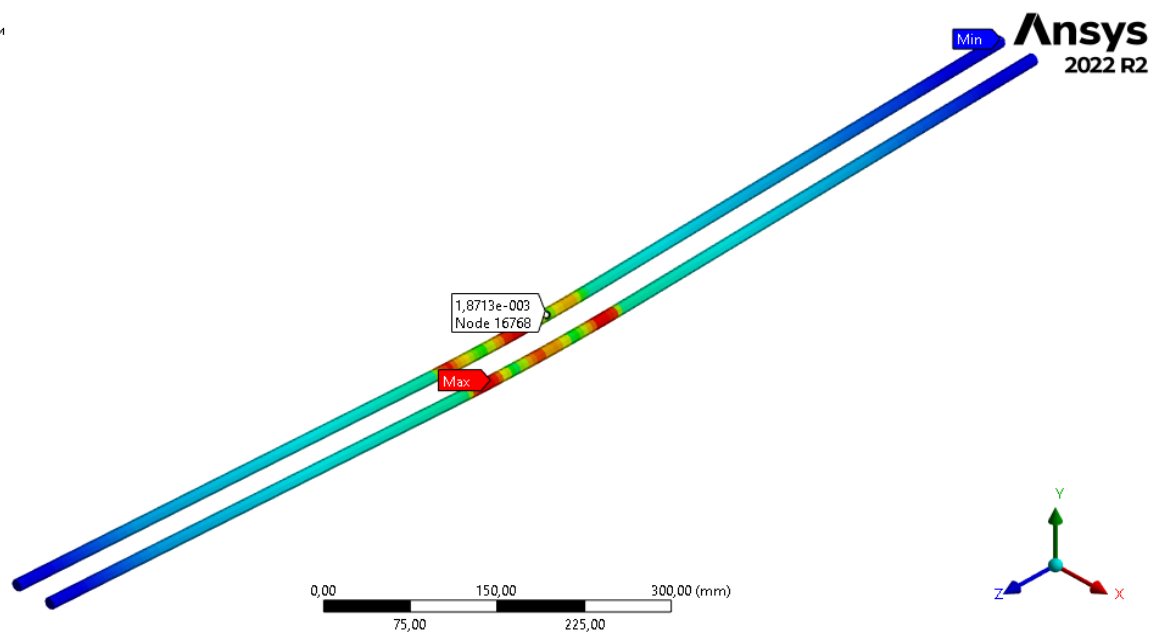
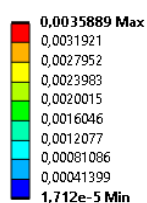


Рисунок 3.7 – Графік еквівалентних напружень в арматурі зразків А1 – А3, МПа

Згідно рисунка 3.7, найкращі результати спадання еквівалентних напружень з часом показує зразок АЗ зі вставкою СПФ, він має найбільш стрімку тенденцію зменшення середніх та максимальних значень напружень.

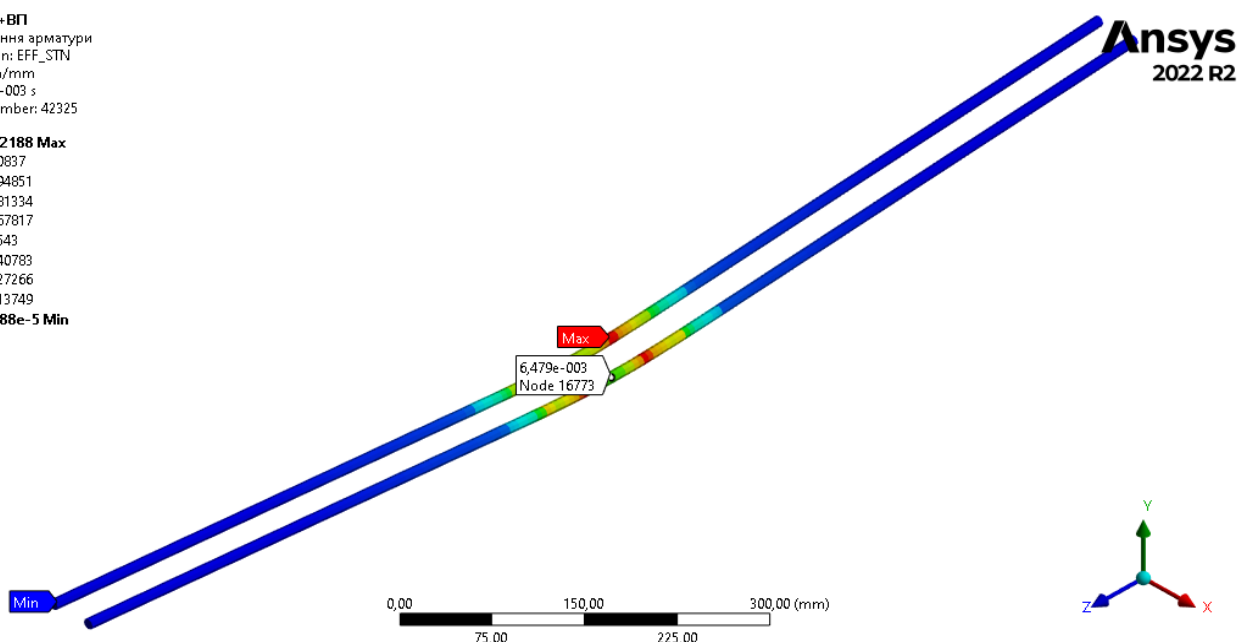
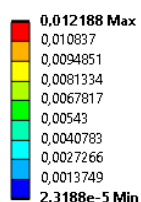
Наступним етапом необхідно провести аналіз поздовжніх деформацій арматури. На рисунку 3.8 зображено еквівалентне відносне видовження арматури на часовому проміжку 0,005 сек.

F: 2. НП  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 5,e-003 s  
Cycle Number: 49161



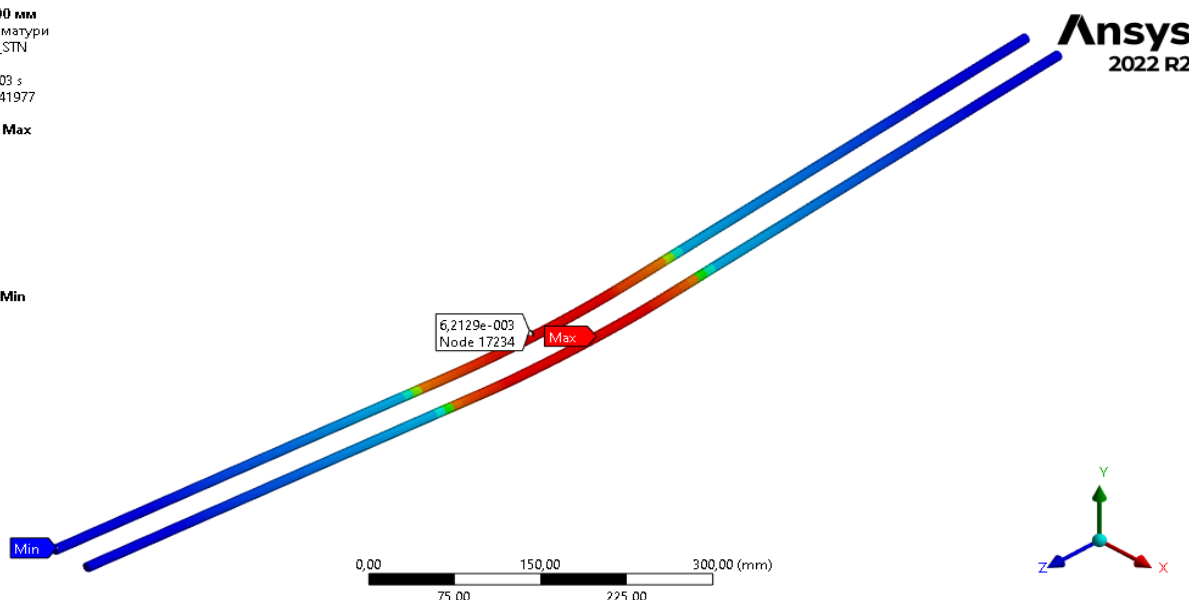
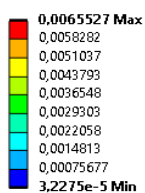
a)

H: 3. НП+ВП  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 5,e-003 s  
Cycle Number: 42325



б)

J: 1. Вставка 300 мм  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 5,0001e-003 s  
Cycle Number: 41977



в)

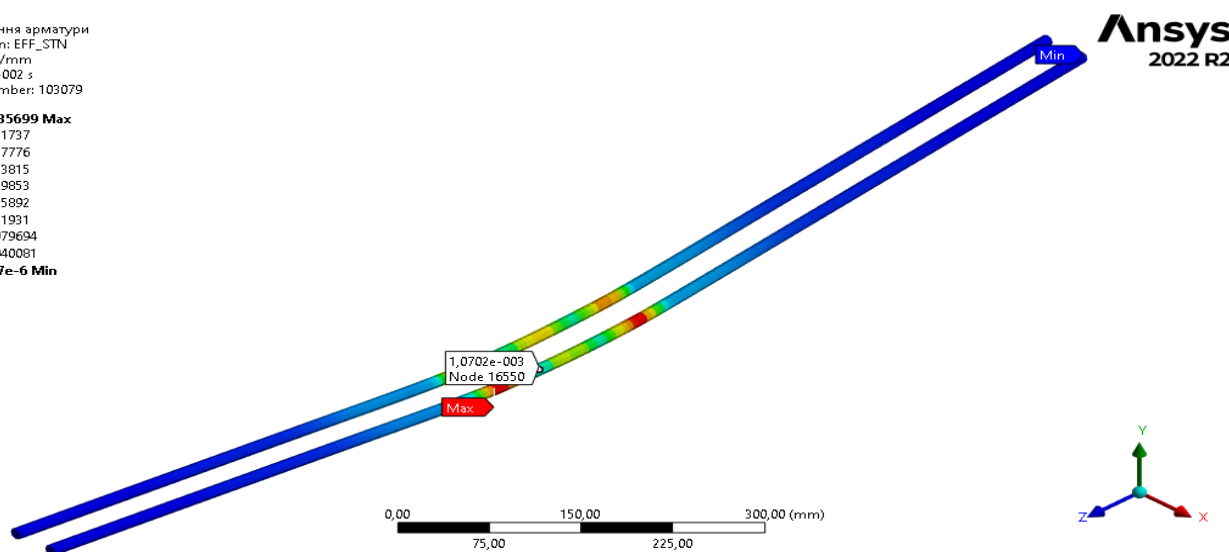
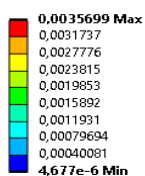
а) – тільки нижній пояс, б) – нижній та верхній пояс, в) – зі вставкою СПФ.

Рисунок 3.8 – Еквівалентне відносне видовження арматури, час 0,005 сек, мм/мм

З рисунку 3.8 можна побачити, що найбільше видовження стержнів виникає в зразку А2 (рис. 3.8 (б)), воно становить 0,012, а відповідно найменше значення в зразку А1 (рис. 3.8 (а)), всього 0,0035. Балка А3 (рис. 3.8 (в)) має значення 0,0065, що враховуючи діаграму стану матеріалу є закономірним результатом.

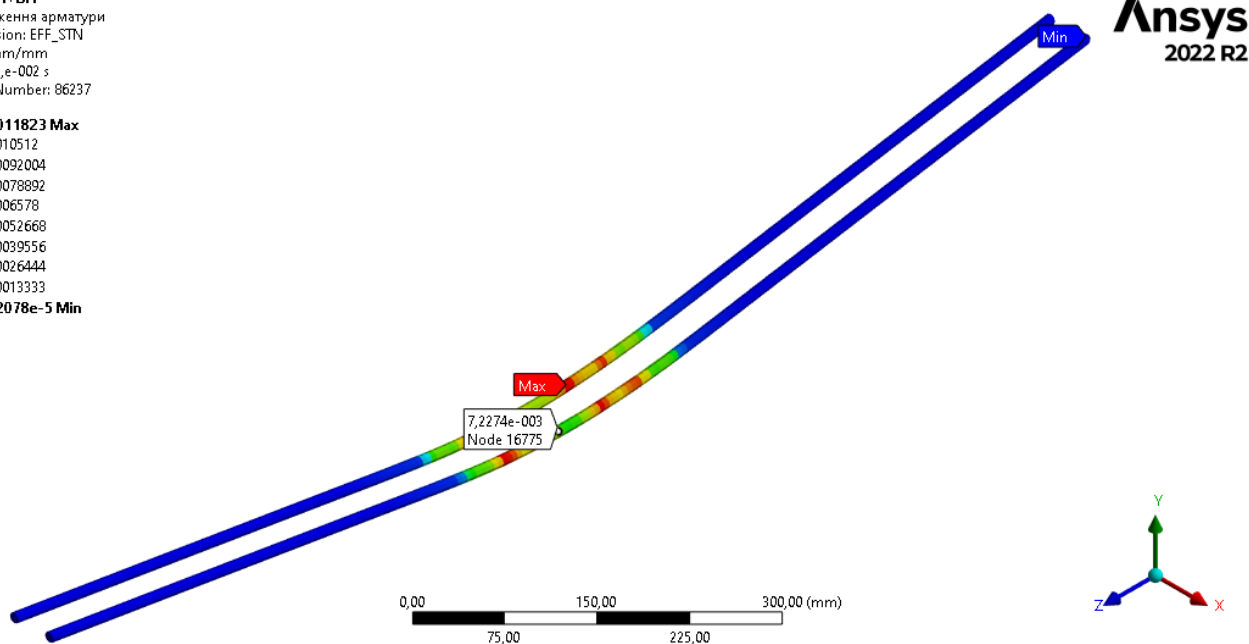
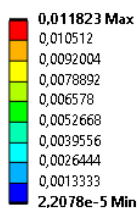
Необхідно також розглянути еквівалентне відносне видовження арматури на часовому проміжку 0,01 сек (рис. 3.9) та порівняти результати 0,005 сек (рис. 3.8).

D: 2. НП  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 1e-002 s  
Cycle Number: 103079



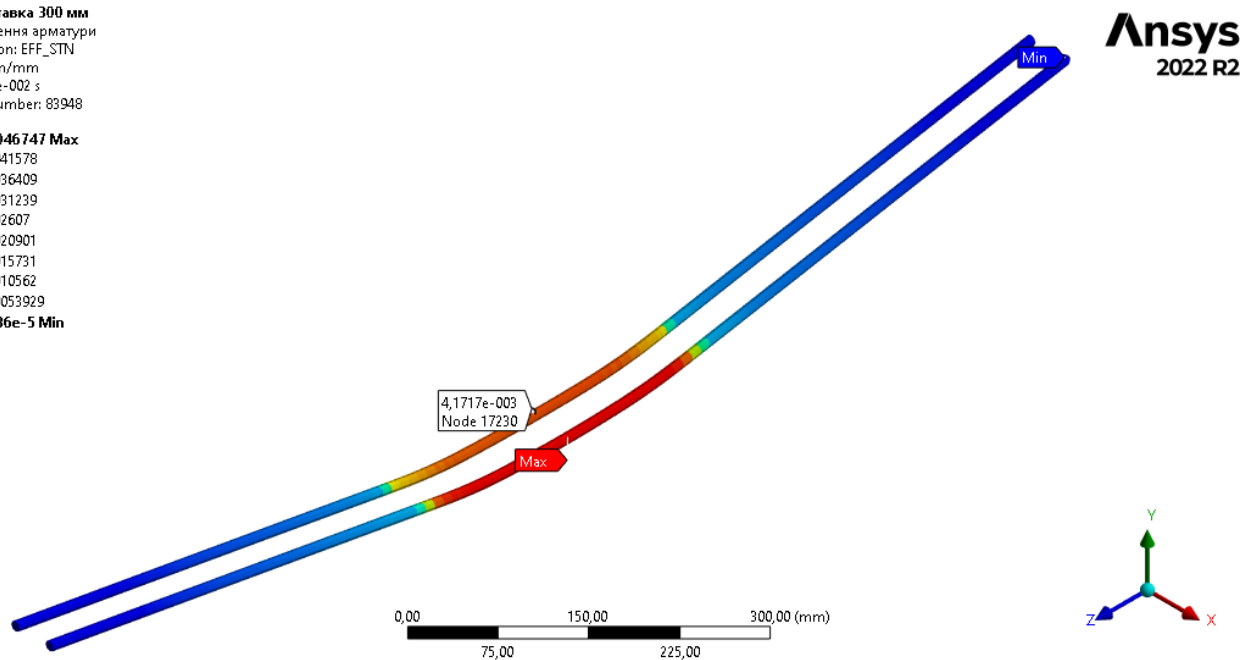
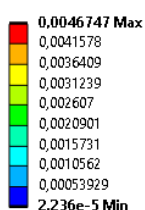
а)

F: 3. НП+ВП  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 1,e-002 s  
Cycle Number: 86237



б)

H: 1. Вставка 300 мм  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 1,e-002 s  
Cycle Number: 83948



в)

а) – тільки нижній пояс, б) – нижній та верхній пояс, в) – зі вставкою СПФ.

Рисунок 3.9 – Еквівалентне відносне видовження арматури, час 0,01 сек, мм/мм

Аналізуючи розподіл полів видовження на рисунку 3.8 та рисунку 3.9 можна зробити висновок, що максимальні значення видовження арматури на проміжках часу 0,005 сек та 0,01 сек майже не змінюються, а отже досягають свого піку.

Найкращі результати показує зразок балки А3 (рис. 3.8 (в), 3.9 (в)) зі вставкою СПФ, максимальне значення видовження якого зменшилося з 0,0065 до 0,0046, що становить близько 30%. У зразках А1 (рис. 3.8-3.9 (а)) та А2 (рис. 3.8 (б), 3.9 (б)) це значення становить всього 0,99 % та 0,97% відповідно. Значення максимального напруження у зразку А1 (рис. 3.8 (а), 3.9 (а)) зменшилося з 0,00358 до 0,00356, а у зразку А2 (рис. 3.8 (б), 3.9 (б)) з 0,0121 до 0,0118.

При порівнянні результатів зразків на проміжках часу 0,005 сек та 0,01 сек можна помітити, що звичайна несуча арматура А400С, монтажна А240С і псевдопружний сплав з пам'яттю форми NiTi мають майже ідентичні значення максимального еквівалентного відносного видовження на початку вибухового навантаження. Та коли пікове значення навантаження спадає, СПФ показує значно більшу здатність до повернення початкової форми. Вставка розміром 300 мм з NiTi сплаву з часом здатна зменшити видовження арматури в 30 разів.

Результати представлено у вигляді графіка еквівалентного відносного видовження арматури, було проаналізовано максимальні та середні значення кожного зразка відповідно (рис. 3.10).

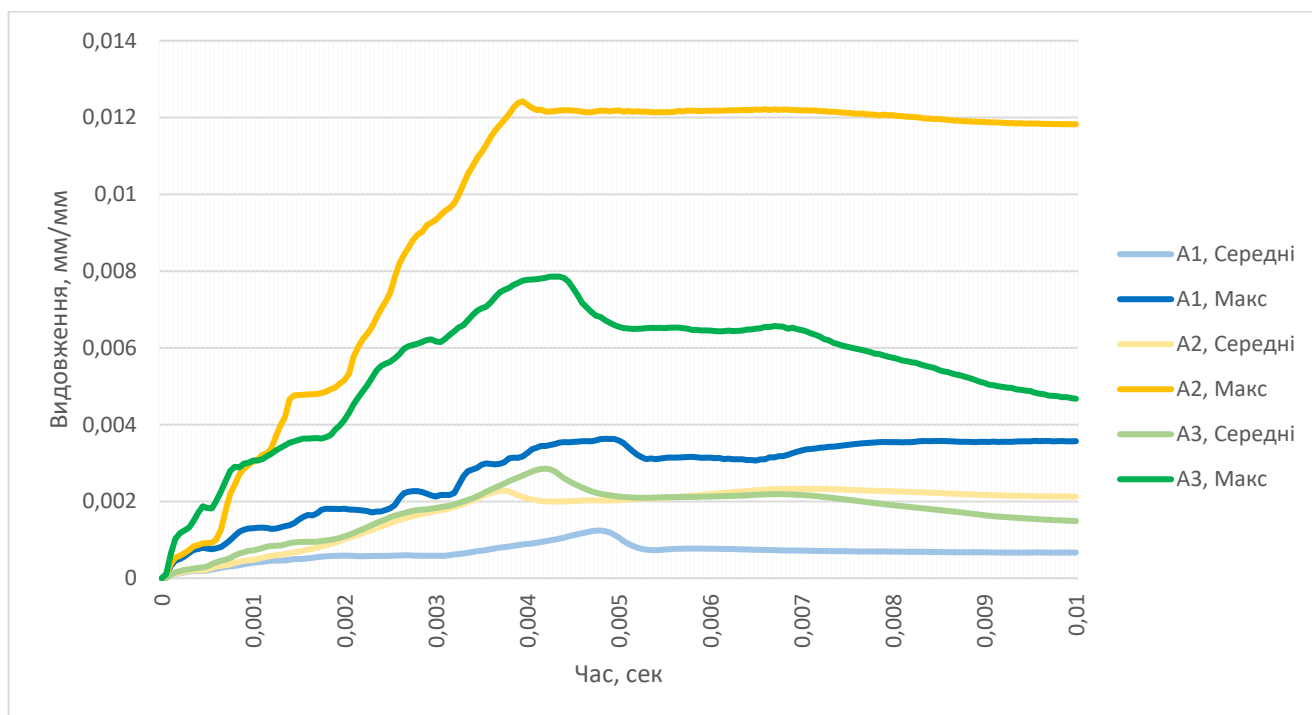


Рисунок 3.10 – Графік еквівалентного видовження арматури в балках А1 – А3,  
мм/мм

Результати дослідження у розділі 3.2 подано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Чисельні результати першого дослідження

№	Прогини балки, мм	Час, сек	Напруж. арм., МПа		Видовж. арм., мм/мм		Площа арматури, см <sup>2</sup>		
			Центр	Макс	Центр	Макс.	Верхня	Нижня	Заг.
A0	106,4	0,005	-	-	-	-	-	-	-
		0,01	-	-	-	-			
A1	28,4	0,005	332	369	0,00187	0,00358	-	2,262	2,262
		0,01	341	380	0,00170	0,00356			
A2	41,2	0,005	352	391	0,00647	0,01218	0,283	0,503	2,136
		0,01	293	401	0,00722	0,01182			
A3	37,8	0,005	355	378	0,00621	0,00655	0,283	0,503	2,136
		0,01	229	392	0,00417	0,00467			

Аналізуючи таблицю 3.1 можна побачити, що при майже однаковій площі поперечного січення арматури всіх тестових зразків, саме балка А3 зі вставкою псевдопружного NiTi СПФ довжиною 300 мм має найкращі показники в проведених аналізах. Зразок А3 показав здатність краще відводити напруження після навантаження та відновлювати форму після видовження. Недоліками такого матеріалу є нижча за звичайну арматуру здатність чинити опір деформаціям та більші значення початкового видовження, що з часом компенсується.

Отже, можна зробити такі висновки:

- вставка СПФ зменшує залишкові напруження на 32%;
- відносне еквівалентне видовження зменшується у 30 разів;
- напруження у центрі балки на проміжку часу від 0,005 сек до 0,01 сек зменшуються на 22% ефективніше, ніж без вставки;
- прогини зросли на 25%, порівняно з балкою без верхнього поясу зразка А1, та впали на 9%, порівняно з аналогічною балкою А2, що не має вставки СПФ.



### 3.3 Аналіз напружено-деформованого стану вставки Ni-Ti

Другим важливим етапом дослідження є встановлення ефективності збільшення розміру вставки СПФ в нижньому пояс робочої арматури. Необхідно проаналізувати яку ефективність дають вставки різних розмірів та в подальшому зробити висновки про економічну доцільність таких рішень.

Представлені варіації балки (рис. 3.11):

- A3 — довжина вставки 300 мм;
- A4 — довжина вставки 600 мм;
- A5 — довжина вставки 900 мм;
- A6 — довжина вставки 1200 мм (весь нижній пояс);

У кожному зразку встановлено аналогічну за площею перерізу арматуру: нижній пояс 2Ø10 мм А400С та 2Ø6 мм А240С, ці параметри в подальшому не змінюватимуться, натомість змінюватиметься довжина вставки СПФ (рис. 3.11).

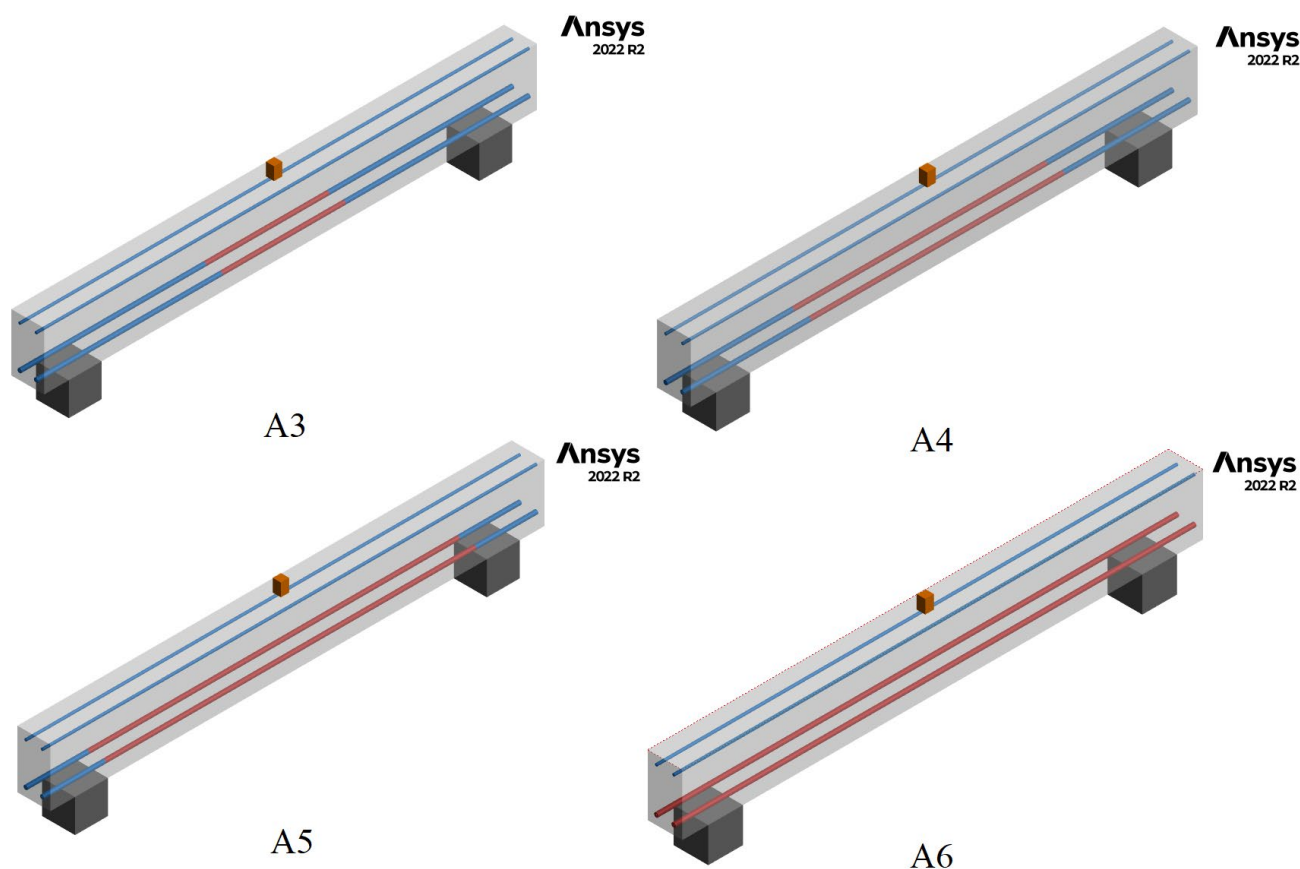
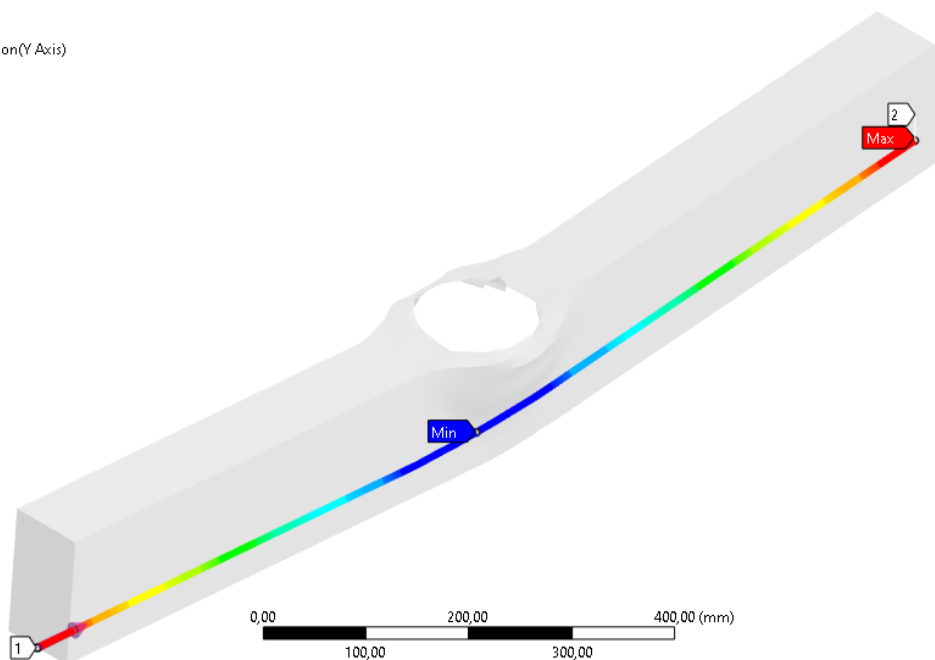
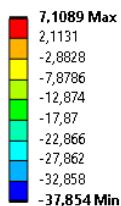


Рисунок 3.11 – Варіації балки з різними розмірами вставки СПФ (A3 – A6)

Аналіз прогинів балок, аналогічно до розділу 3.2, проводимо тільки на проміжку часу 0,005 сек. На рисунку 3.12 показано розподіл полів деформацій в кожному досліджуваному зразку.

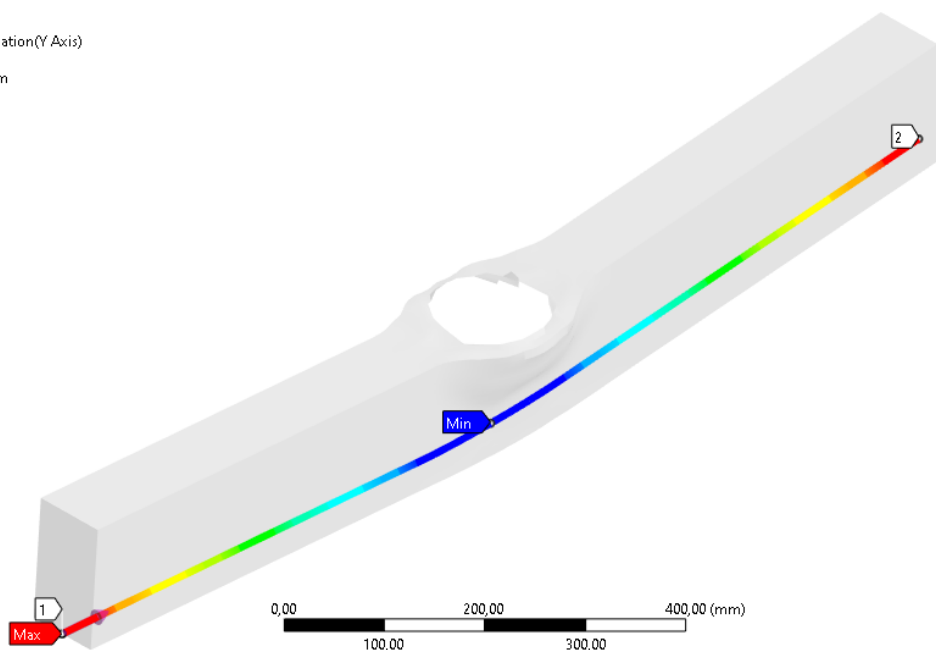
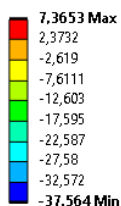
**J: 1. Вставка 300 мм**  
 Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41977



**Ansys**  
2022 R2

a)

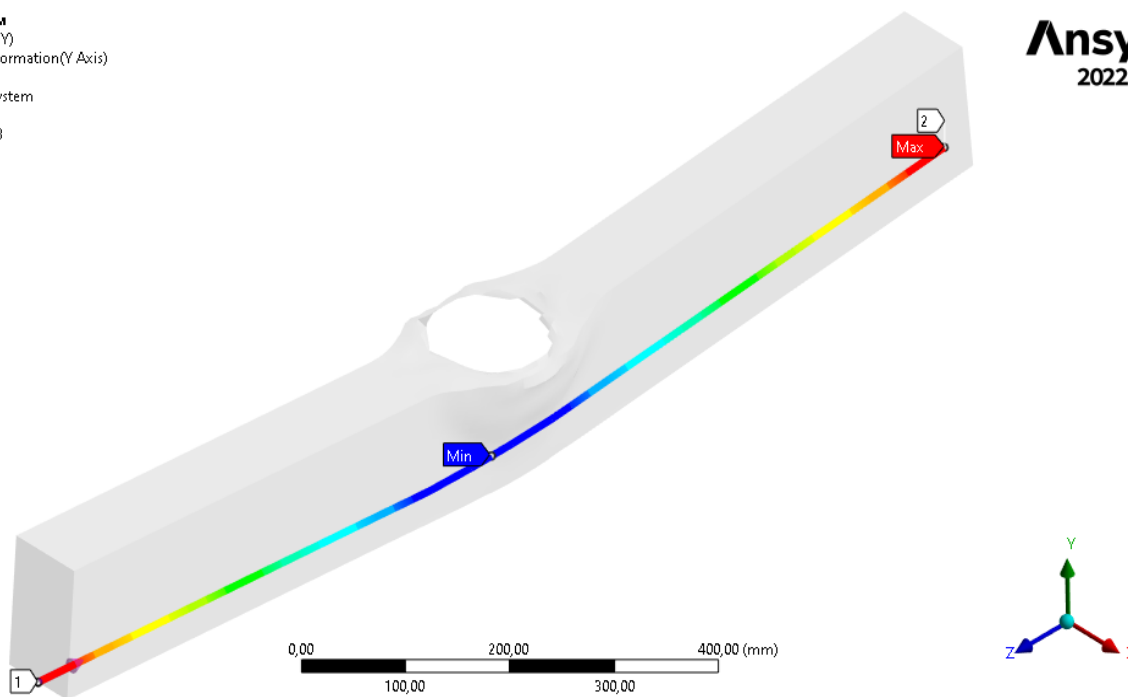
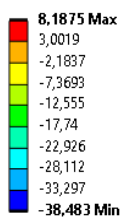
**N: 2. Вставка 600 мм**  
 Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41558



**Ansys**  
2022 R2

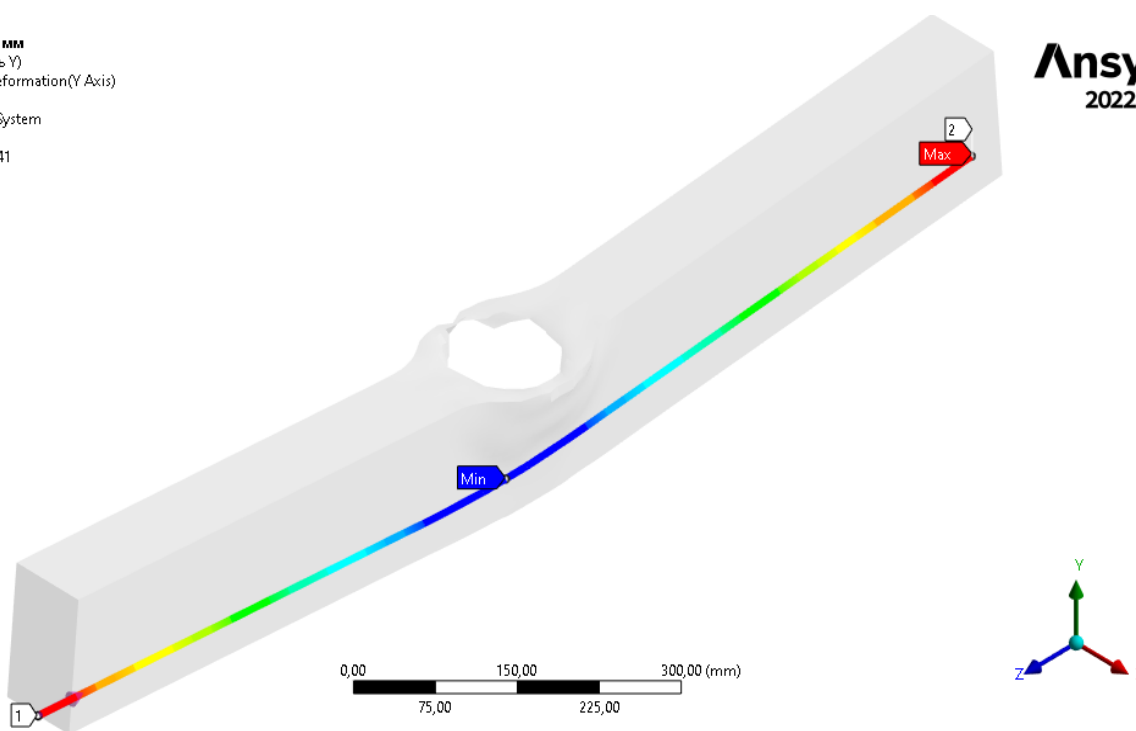
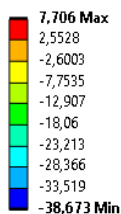
б)

**L: 3. Вставка 900 мм**  
 Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5,e-003 s  
 Cycle Number: 42843



В)

**P: 4. Вставка 1200 мм**  
 Прогин балки (Вісь Y)  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5,e-003 s  
 Cycle Number: 33441



Г)

а) – вставка 300 мм, б) – вставка 600 мм, в) – вставка 900 мм, г) – вставка 1200 мм.

Рисунок 3.12 – Максимальний прогин балки по осі Y, мм

На діаграмі (рис. 3.13) показано значення прогинів кожного зразка балки з різною довжиною вставки СПФ.

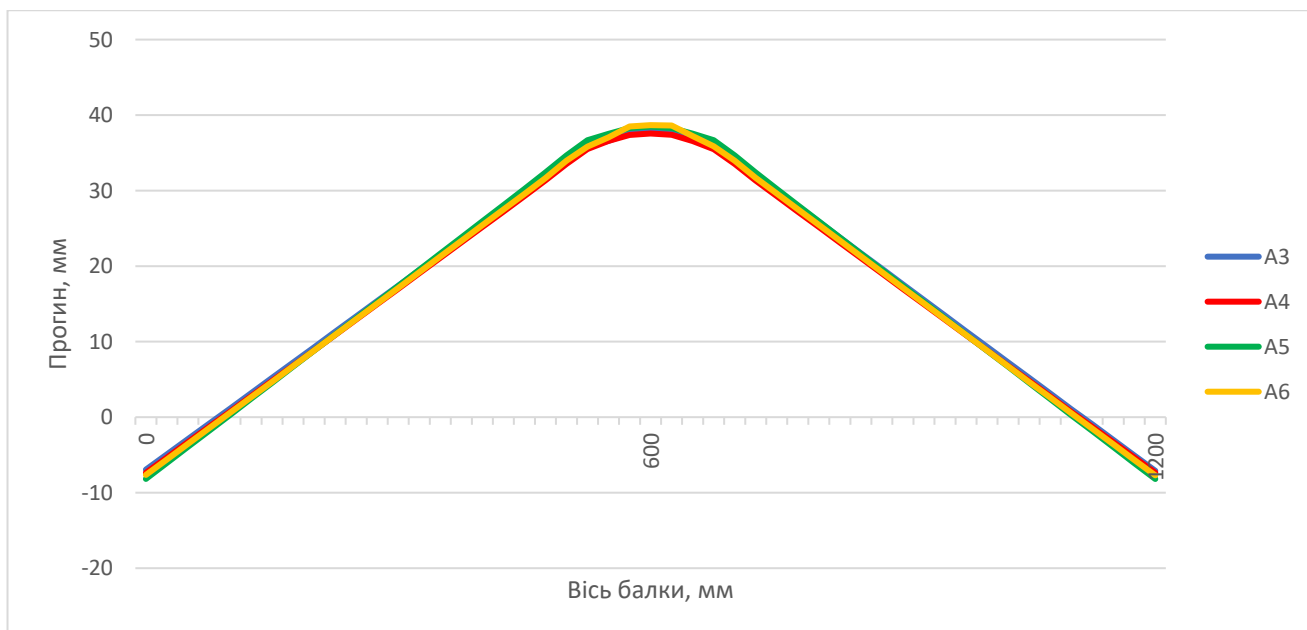
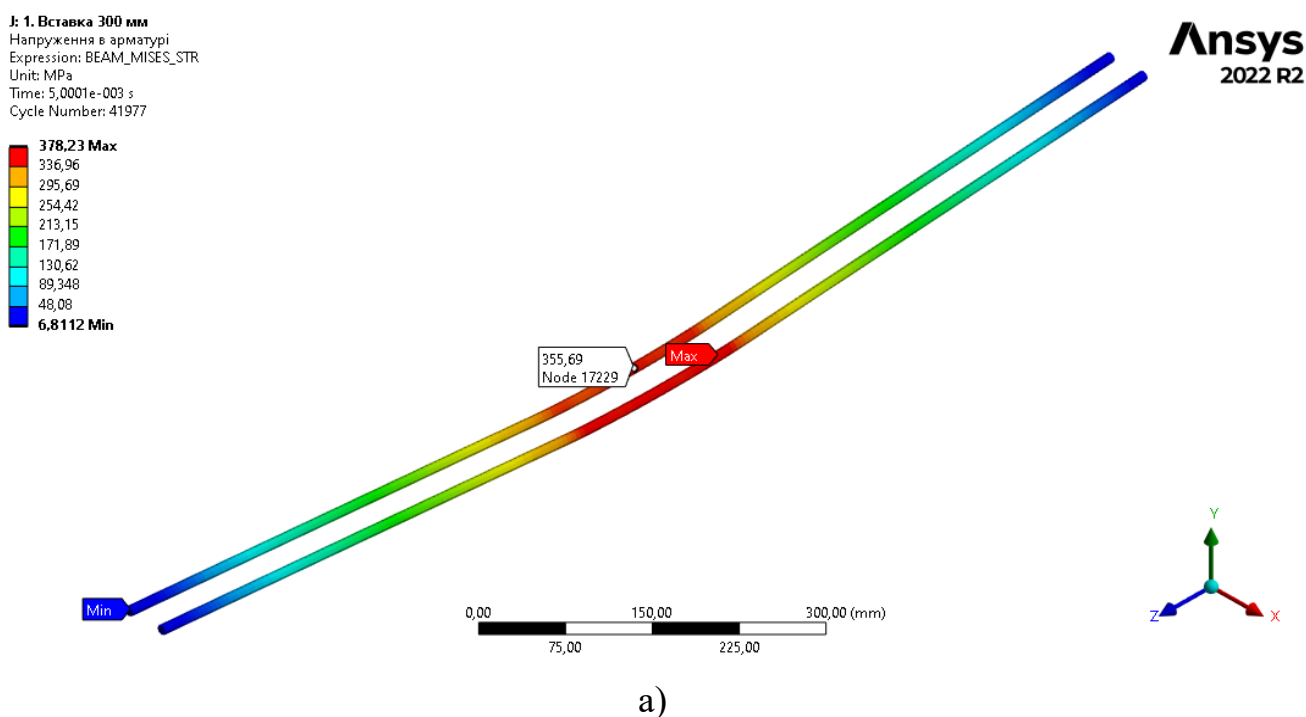


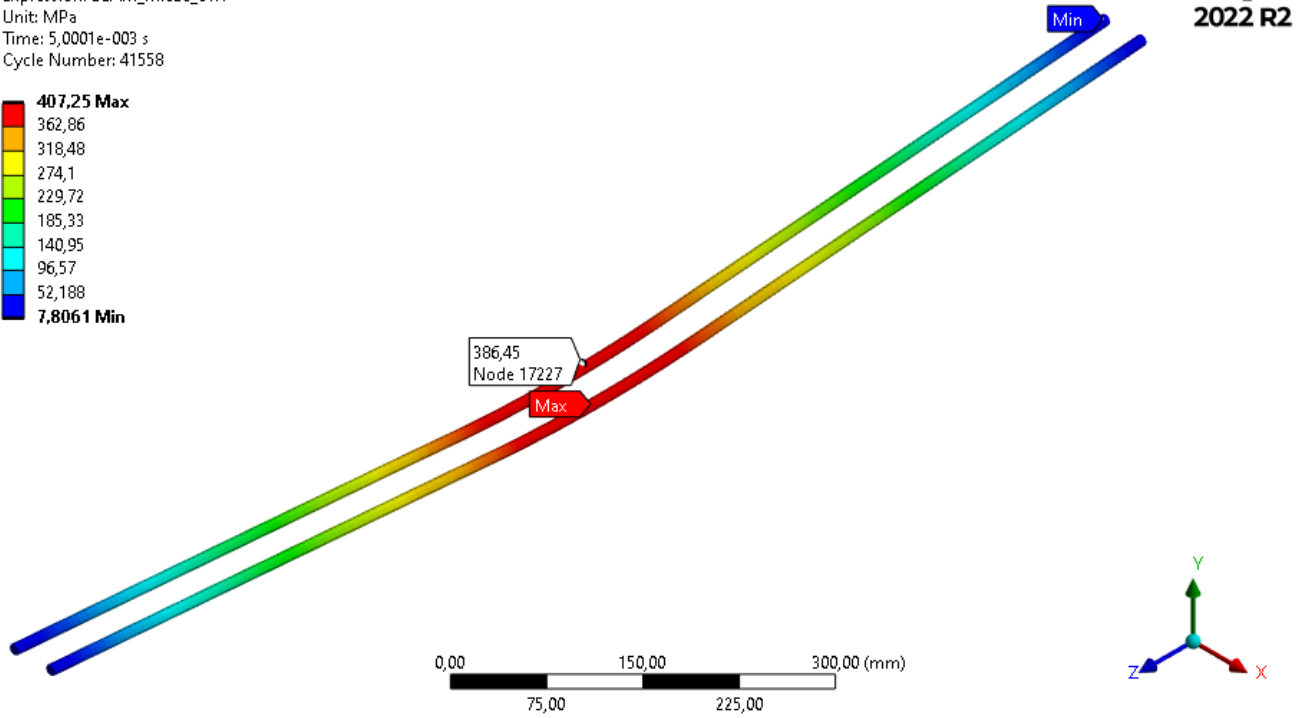
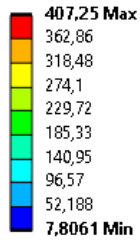
Рисунок 3.13 – Графік прогинів в балках A3 – A6, мм

Рисунку 3.13 показує, що всі балки зі вставкою СПФ мають схожі значення деформації (рис. 3.11). Найбільший прогин має балка A6 (рис. 3.12 (а)) зі вставкою 1200 мм, такі значення деформацій зумовлені властивостями псевдопружного СПФ (рис. 2.11), що не є сильною стороною матеріалу.

Необхідно проаналізувати напруження в арматурі, на рисунку 3.14 зображено розподіл еквівалентних напружень в кожному зразку балки (рис. 3.11).

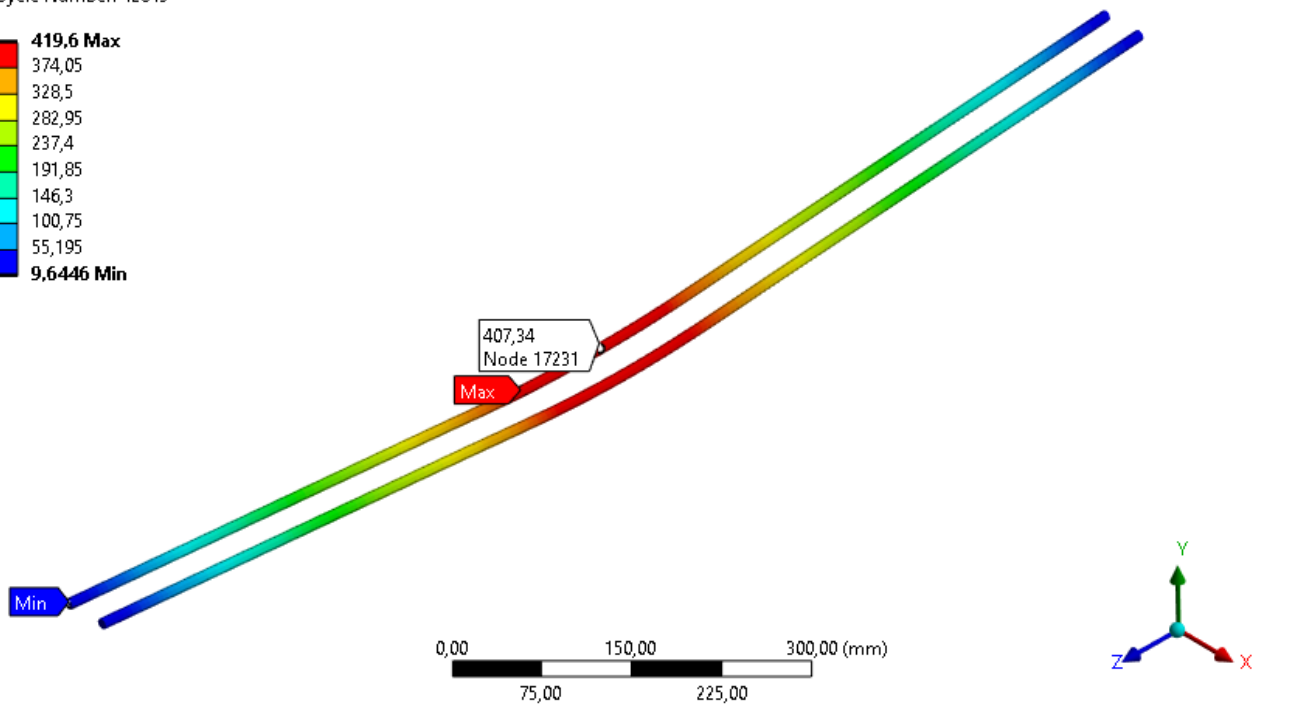
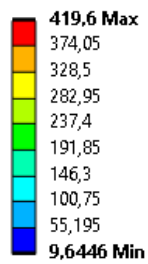


**N: 2. Вставка 600 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41558



б)

**L: 3. Вставка 900 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 5,e-003 s  
 Cycle Number: 42843



в)

**P: 4. Вставка 1200 мм**

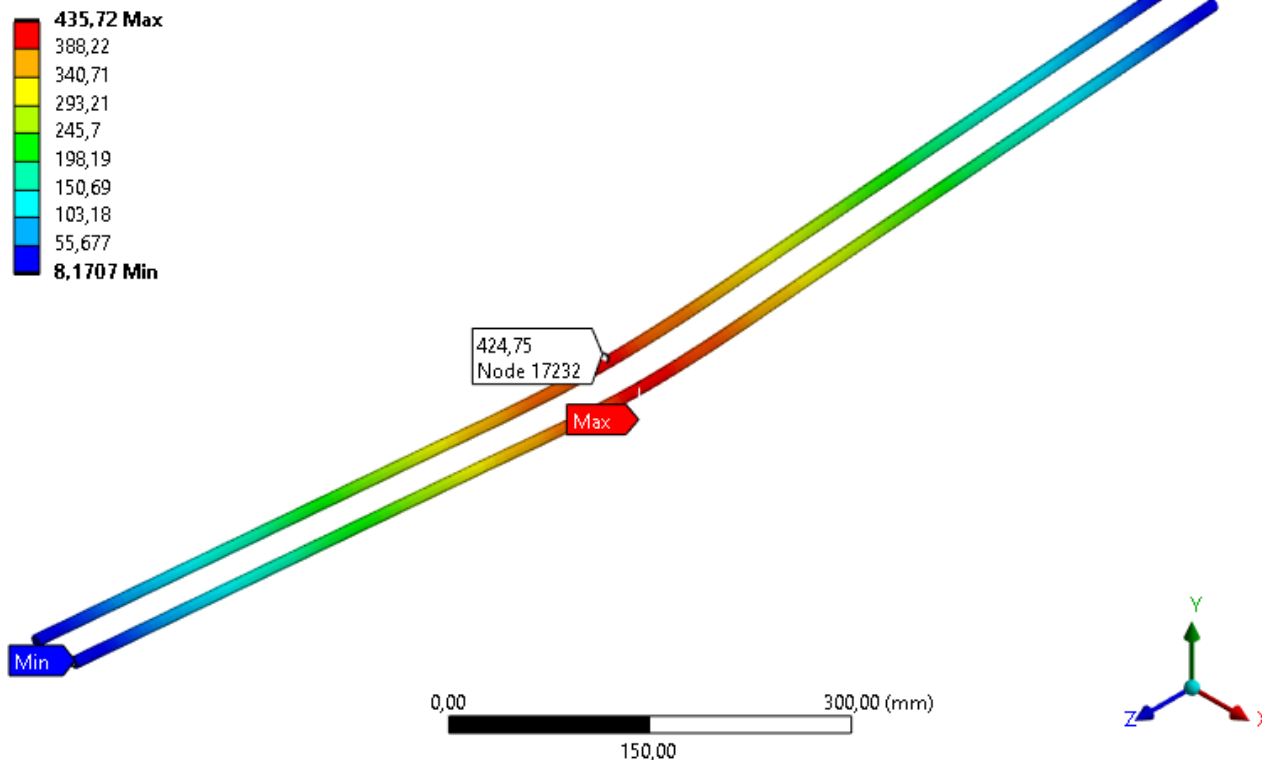
Напруження в арматурі

Expression: BEAM\_MISES\_STR

Time: 5,e-003 s

Cycle Number: 33441

**Ansys**  
2022 R2



г)

а) – вставка 300 мм, б) – вставка 600 мм, в) – вставка 900 мм, г) – вставка 1200 мм.

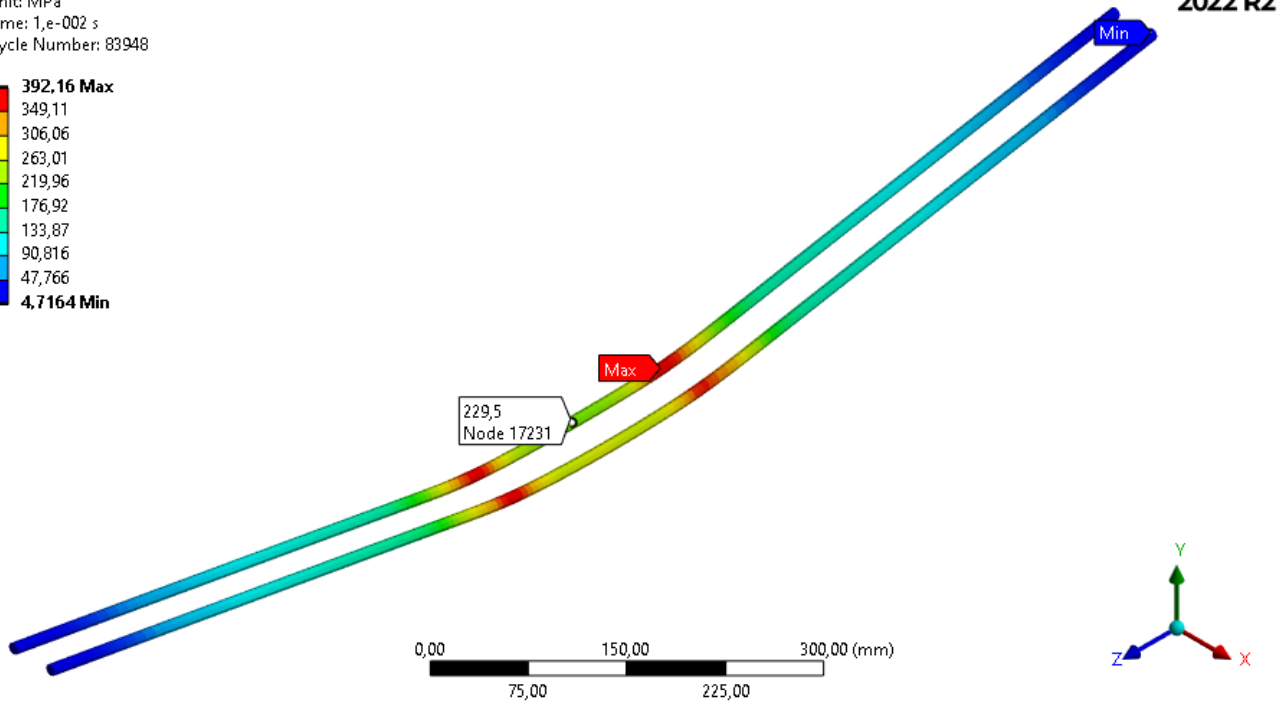
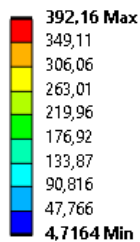
Рисунок 3.14 – Еквівалентні напруження робочої арматури в балках,

0,005 сек, МПа

Проаналізувавши наведені зображення полів навантажень на арматурі балок на проміжку часу 0,005 сек можна сказати, що спостерігається чітка тенденція збільшення значень еквівалентного навантаження залежно від довжини вставки СПФ. Таким чином найбільші значення навантаження припадають на балку А6 (рис. 3.14 (г)), де його значення становить 435 МПа, а найменші на балку А3 (рис. 3.14 (а)), де значення 378 МПа. Еквівалентні напруження в центрі балки виглядають аналогічно і центральна точка арматури має найбільші показники в зразку А6, а найменші в зразку А3.

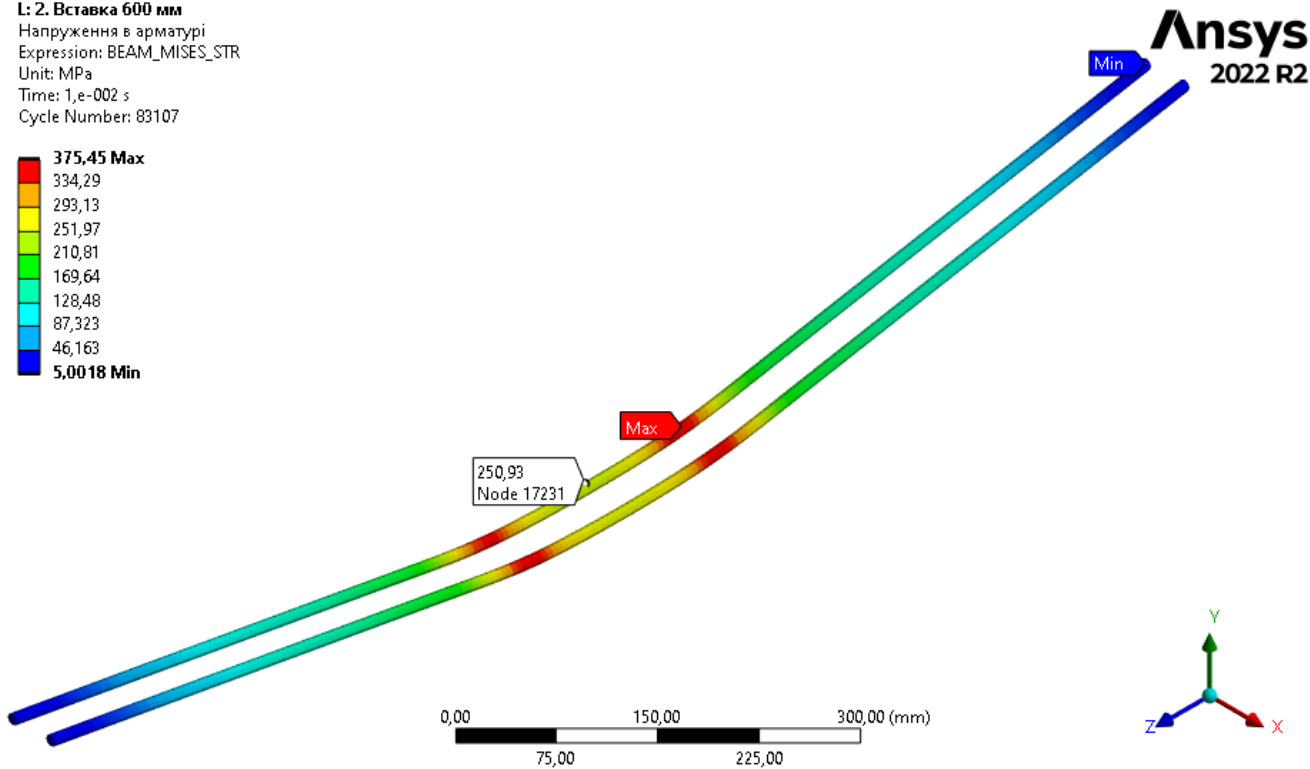
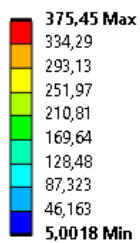
Також необхідно проаналізувати еквівалентні напруження в арматурі на проміжку часу 0,01 сек (рис. 3.15).

**H: 1. Вставка 300 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 1, e-002 s  
 Cycle Number: 83948



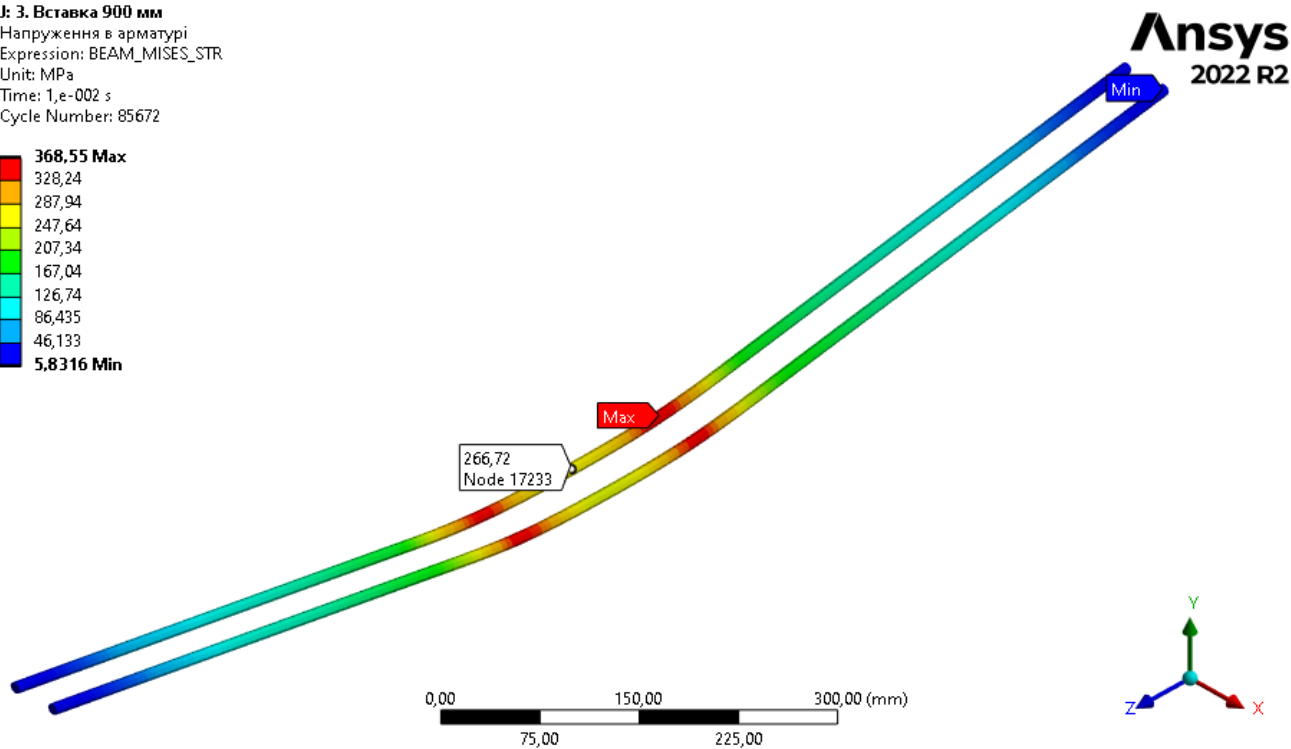
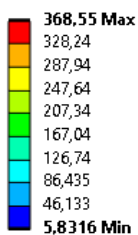
a)

**L: 2. Вставка 600 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: MPa  
 Time: 1, e-002 s  
 Cycle Number: 83107



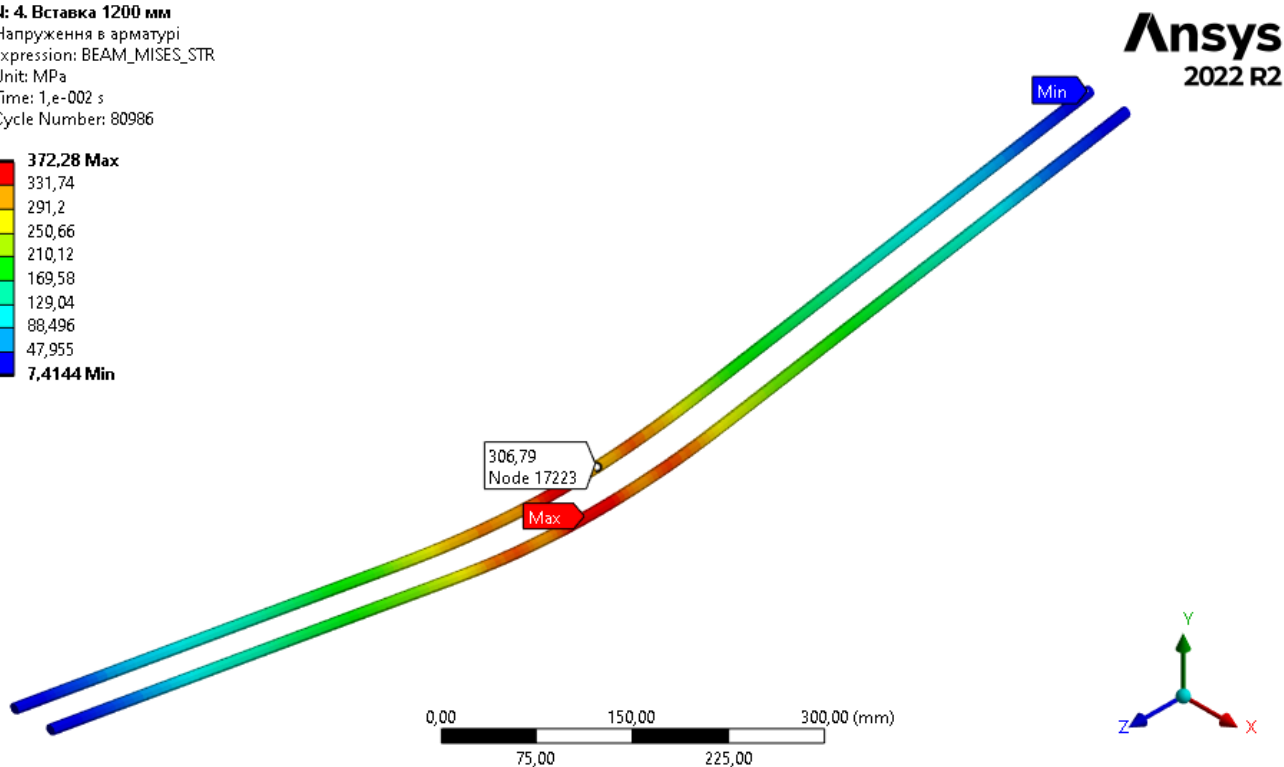
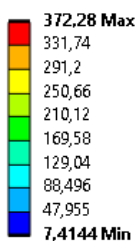
б)

**J: 3. Вставка 900 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: МПа  
 Time: 1,е-002 s  
 Cycle Number: 85672



В)

**N: 4. Вставка 1200 мм**  
 Напруження в арматурі  
 Expression: BEAM\_MISES\_STR  
 Unit: МПа  
 Time: 1,е-002 s  
 Cycle Number: 80986



Г)

а) – вставка 300 мм, б) – вставка 600 мм, в) – вставка 900 мм, г) – вставка 1200 мм.

Рисунок 3.15 – Еквівалентні напруження робочої арматури в балках,

0,01 сек, МПа



Згідно з зображеними полями еквівалентних навантажень, прослідковується збільшення напружень на 15% на проміжку часу 0,005 сек для зразка А6 (рис. 3.14-3.15 (г)), порівняно з результатами зразка А3 (рис. 3.14-3.15 (а)). Та на проміжку часу 0,01 ситуація відрізняється і найменші значення спостерігаються у зразку А5 (рис. 3.14-3.15 (в)), 368 МПа. Максимальне значення навантаження склало 392 МПа у балки А3 (рис. 3.14-3.15 (а)).

При аналізі розвантаження центральної зони несучої арматури можна зробити висновок, що тенденція аналогічна. На першому відрізку часу різниця між значеннями еквівалентних напружень в арматурі балок А3 та А6 складає 17% на користь А3, а на другому проміжку вона становить 26%.

Отримані значення середніх та максимальних еквівалентних напружень на проміжку часу 0,01 сек представимо у вигляді графіка (рис. 3.16).

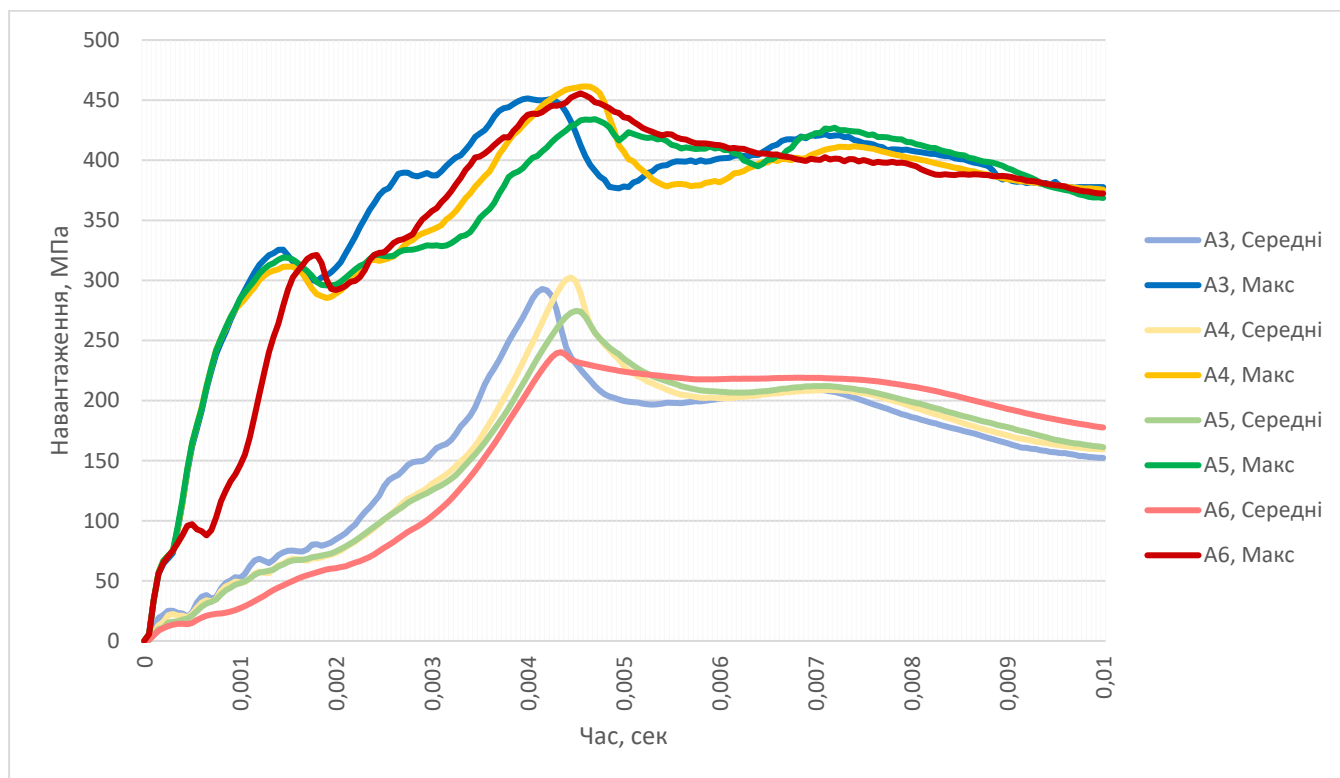
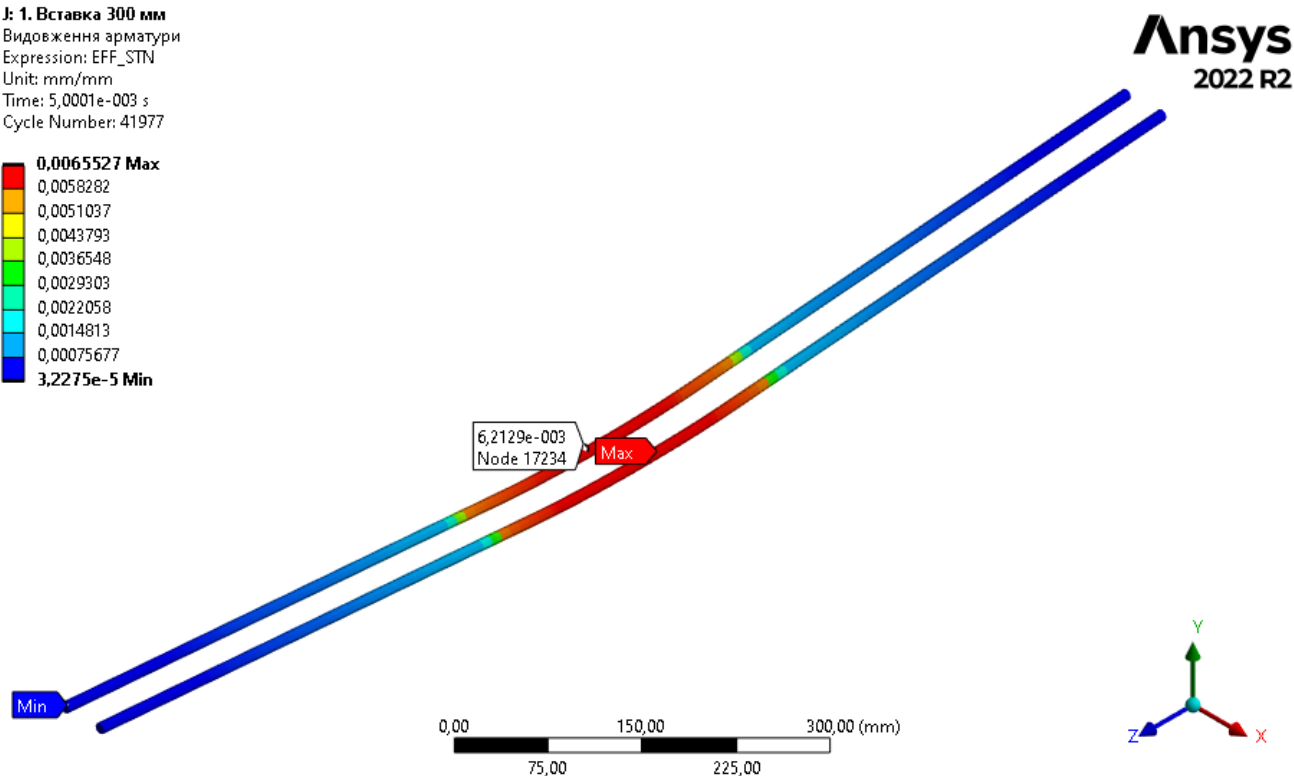
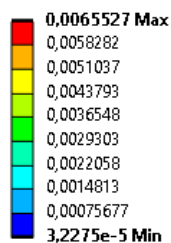


Рисунок 3.16 – Графік внутрішніх напружень в арматурі зразків А3 – А6, МПа

Найкращу тенденцію спаду середніх значень напруження в арматурі демонструє балка А3 зі вставкою СПФ розміром 300 мм. Падіння максимальних значень у всіх зразків знаходиться майже на одному рівні, з різницею 1-3%.

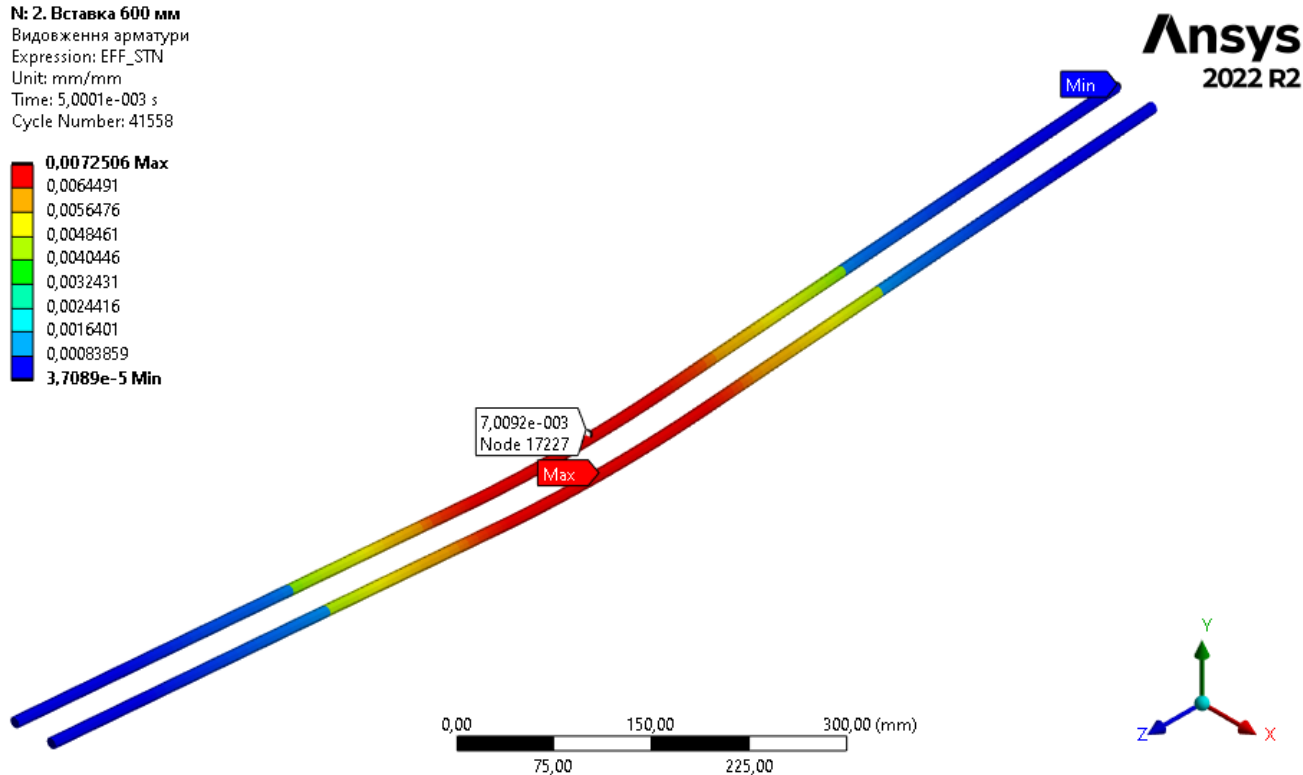
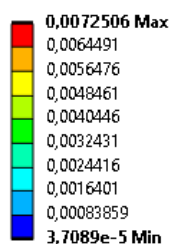
Відповідно до попереднього розділу, необхідно проаналізувати відносне еквівалентне видовження стержнів арматури на проміжку часу 0,005 сек (рис. 3.17).

**J: 1. Вставка 300 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Unit: mm/mm  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41977



a)

**N: 2. Вставка 600 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Unit: mm/mm  
 Time: 5,0001e-003 s  
 Cycle Number: 41558

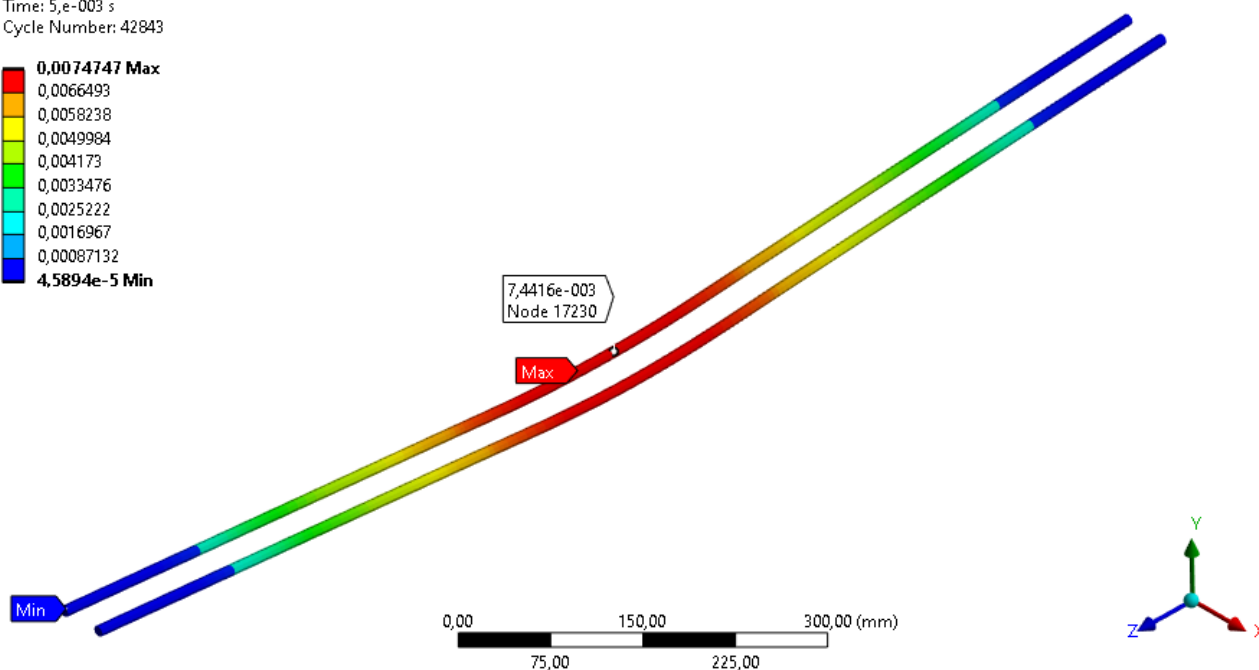


б)

**L: 3. Вставка 900 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Unit: mm/mm  
 Time: 5,e-003 s  
 Cycle Number: 42843

**Ansys**  
 2022 R2

0,0074747 Max  
 0,0066493  
 0,0058238  
 0,0049984  
 0,004173  
 0,0033476  
 0,0025222  
 0,0016967  
 0,00087132  
 4,5894e-5 Min

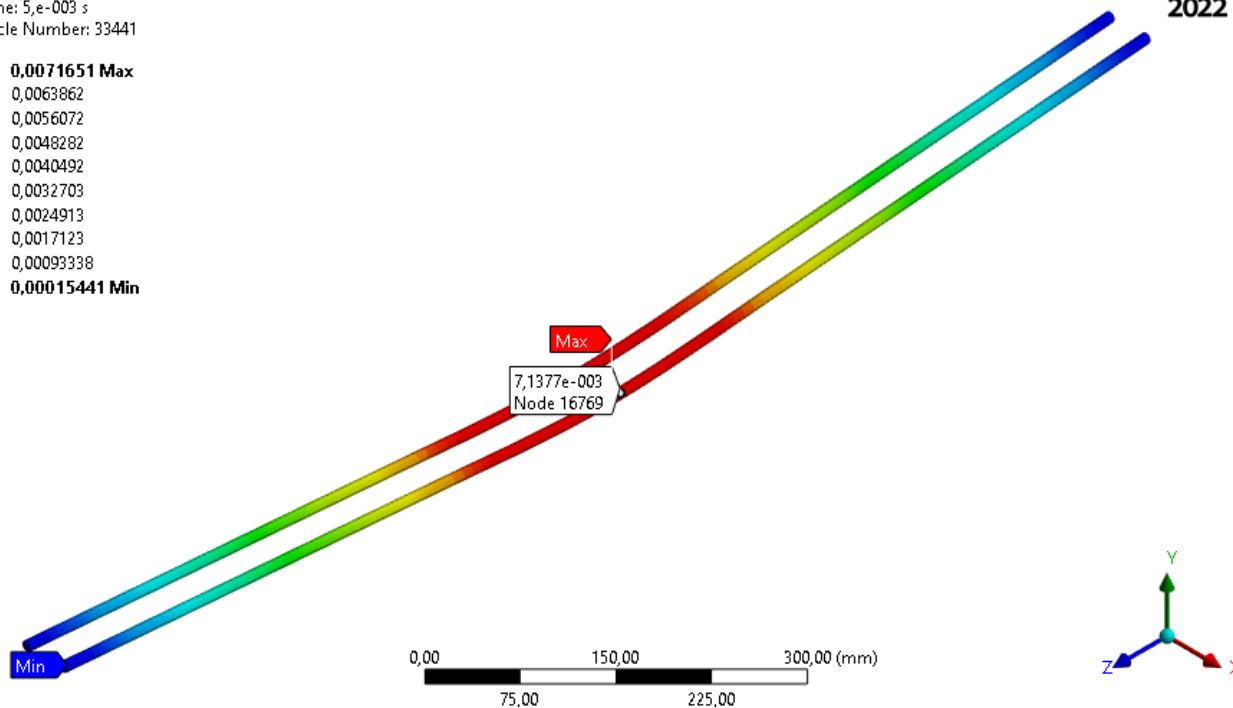


В)

**P: 4. Вставка 1200 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Time: 5,e-003 s  
 Cycle Number: 33441

**Ansys**  
 2022 R2

0,0071651 Max  
 0,0063862  
 0,0056072  
 0,0048282  
 0,0040492  
 0,0032703  
 0,0024913  
 0,0017123  
 0,00093338  
 0,00015441 Min



Г)

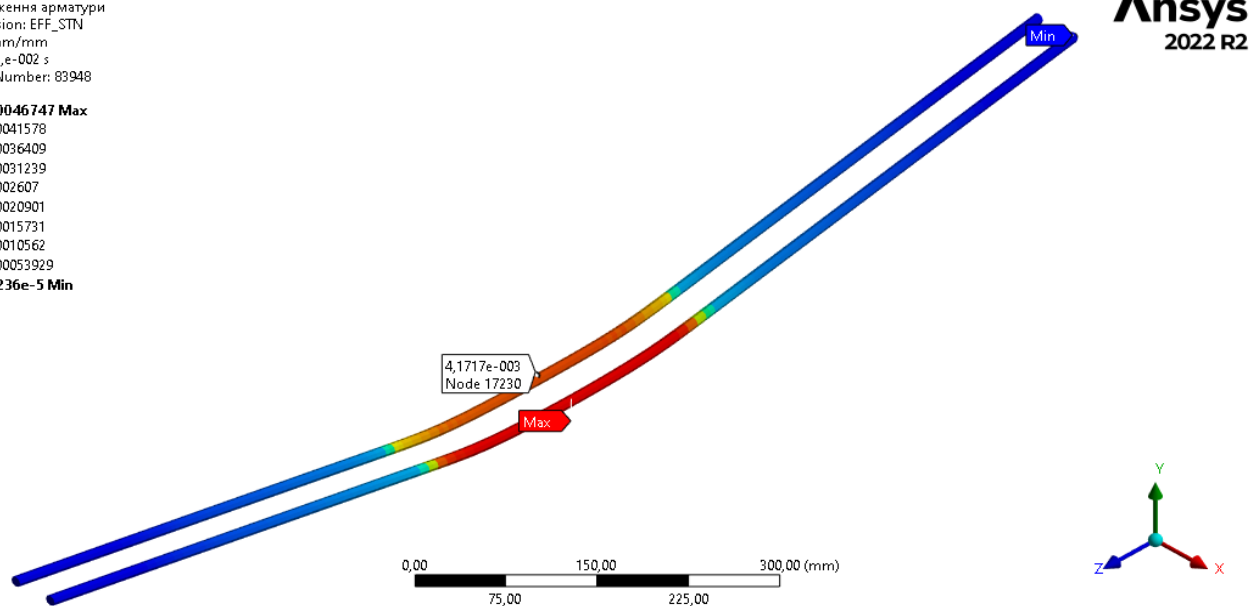
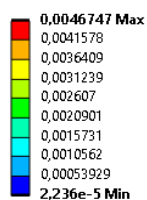
а) – вставка 300 мм, б) – вставка 600 мм, в) – вставка 900 мм, г) – вставка 1200 мм.

Рисунок 3.17 – Еквівалентне відносне видовження арматури, час 0,005 сек, мм/мм

Проаналізувавши наведені зображення (рис. 3.17) розподілу полів відносного видовження можна помітити, що найменші максимальні значення демонструє вставка 300 мм, зразок А3 (рис. 3.17 (а)), 0,0065. Найбільші відносні еквівалентні видовження арматури спостерігаються в балці А5 (рис. 3.17 (в)), 0,0074, результати на середній частині стержнів мають аналогічну тенденцію.

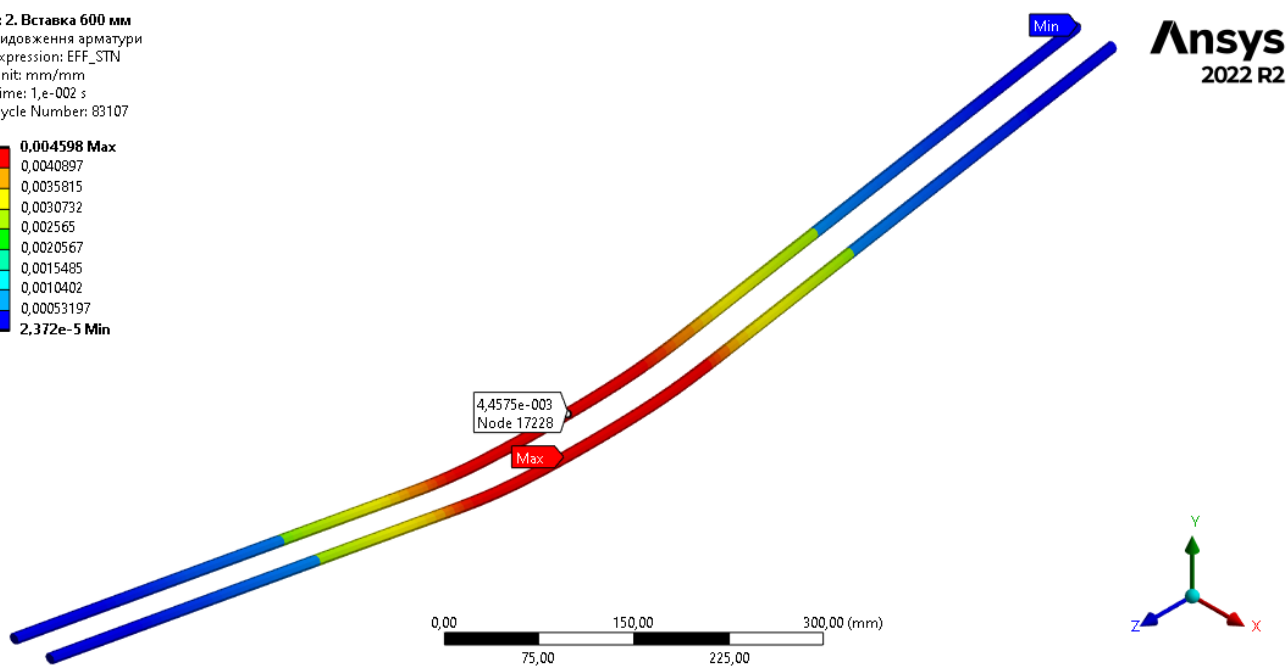
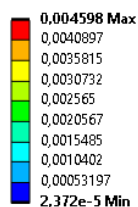
Необхідно також розглянути еквівалентне відносне видовження арматури на відрізьку часу 0,01 сек (рис. 3.18).

**Н: 1. Вставка 300 мм**  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 1,e-002 s  
Cycle Number: 83948



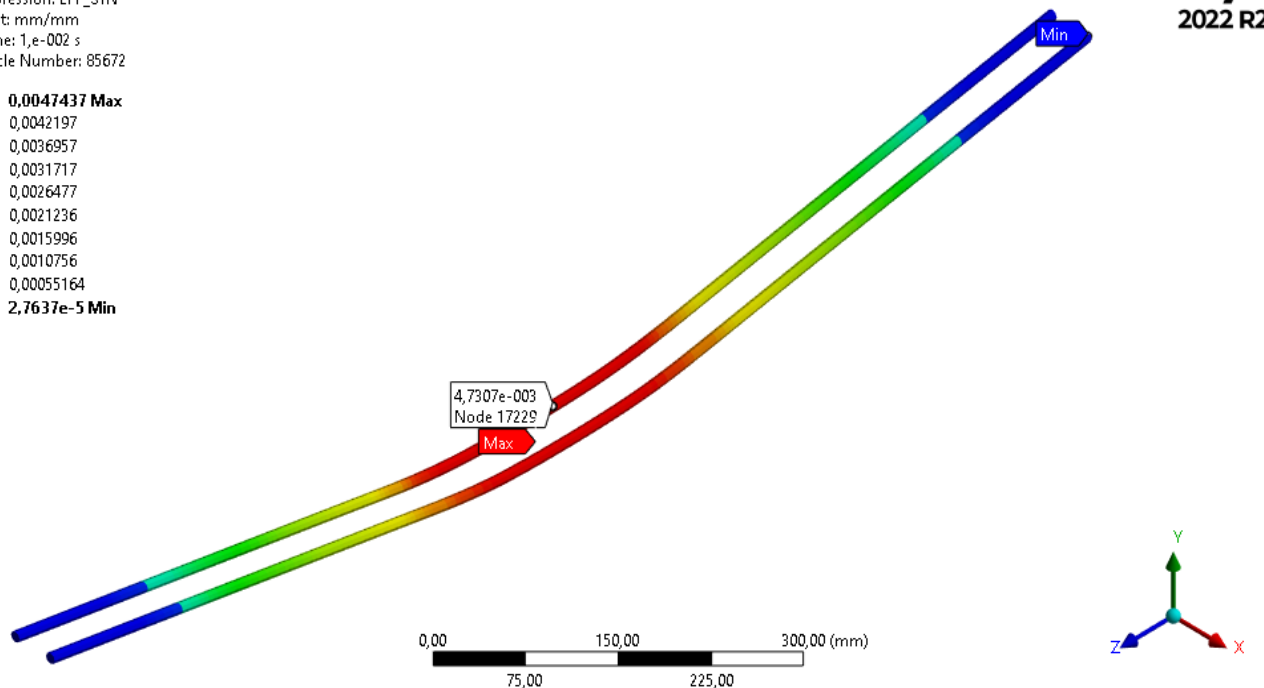
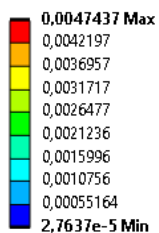
а)

**Л: 2. Вставка 600 мм**  
Видовження арматури  
Expression: EFF\_STN  
Unit: mm/mm  
Time: 1,e-002 s  
Cycle Number: 83107



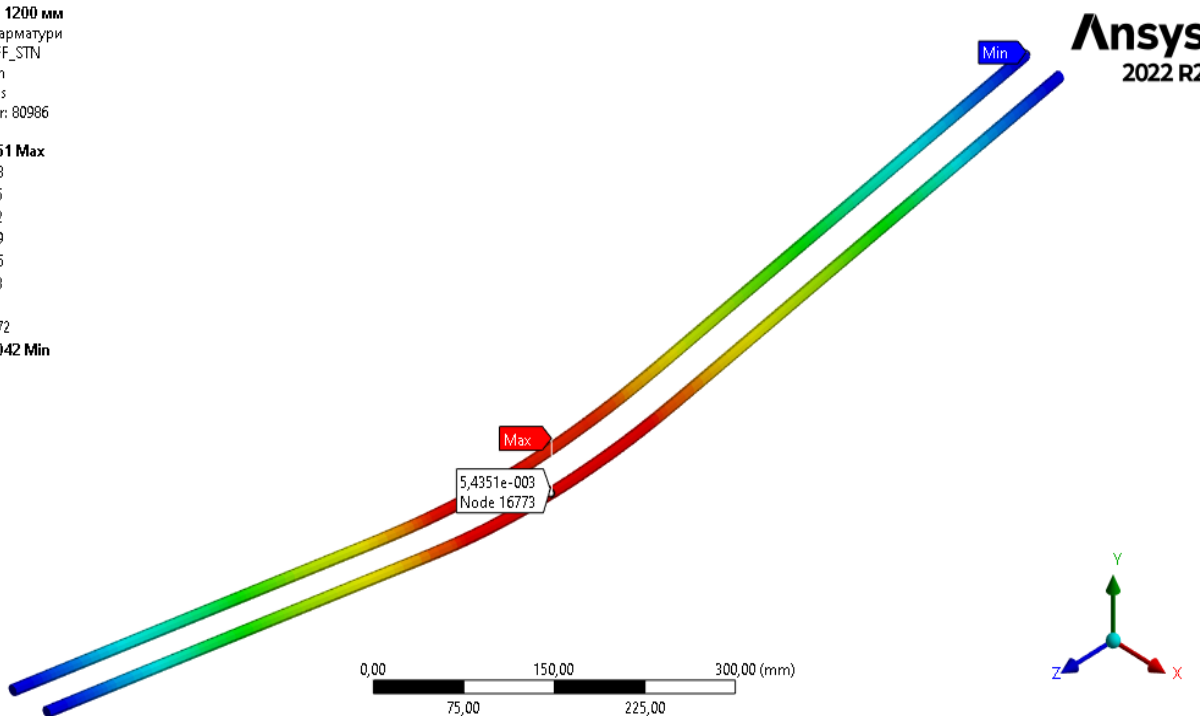
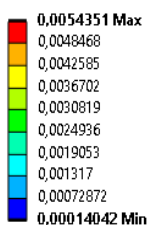
б)

**Ж: 3. Вставка 900 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1,e-002 s  
 Cycle Number: 85672



В)

**Н: 4. Вставка 1200 мм**  
 Видовження арматури  
 Expression: EFF\_STN  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1,e-002 s  
 Cycle Number: 80986



Г)

а) – вставка 300 мм, б) – вставка 600 мм, в) – вставка 900 мм, г) – вставка 1200 мм.  
 Рисунок 3.18 – Еквівалентне відносне видовження арматури, час 0,01 сек, мм/мм

Аналізуючи рисунок 3.18 можна зробити висновок, що найменші максимальні значення видовження спостерігаються у зразка А4 (рис. 3.18 (б)), 0,0045. Найбільші має варіант А6 (рис. 3.18 (г)) зі вставкою СПФ довжиною 1200 мм, 0,0054. Найкраще показники зменшенням видовження з часом показала вставка А5 (рис. 3.18 (в)) розміром 600 мм, її ефективність складає 39% зменшення залишкового видовження порівняно з аналогічною балкою на відрізьку часу 0,005 сек (рис. 3.17).

Необхідно сформуванати графік значень еквівалентного відносного видовження арматури у всіх зразках та проаналізувати його (рис. 3.19).

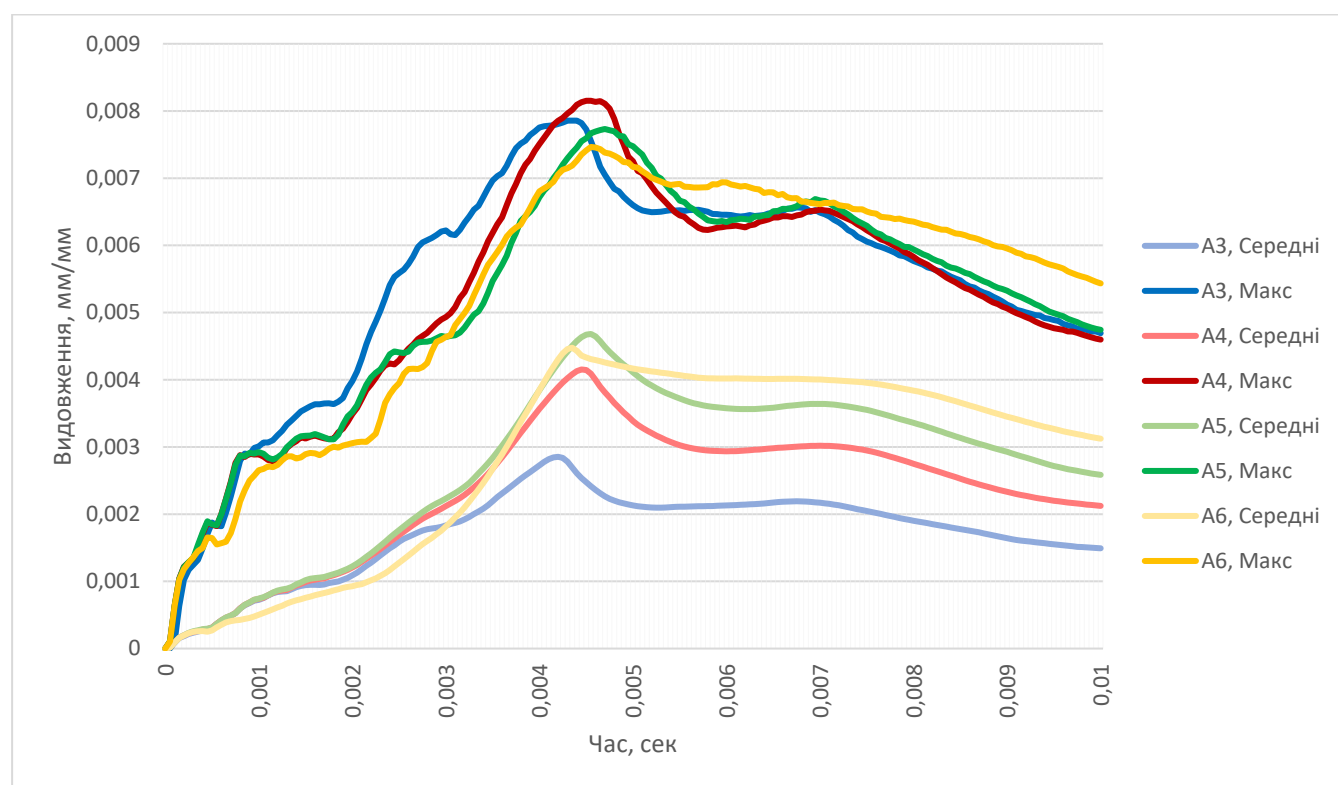


Рисунок 3.19 – Графік видовження арматури в зразках А3 – А6, мм/мм

Згідно графіка видовження арматури (рис. 3.19), найкраще себе показує зразок А3 зі вставкою СПФ 300 мм. Її середній розмір видовження за 0,01 сек має найменше значення серед всіх представлених зразків (рис. 3.11). Максимальне значення видовження зразків зі вставками різної довжини знаходиться майже на однаковому рівні, та зразок А6 зі вставкою 1200 мм показує найгіршу тенденцію спаду поздовжніх деформацій.

Результати другого дослідження, а саме: дослідження доцільності збільшення розміру вставки СПФ, представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Чисельні результати другого дослідження

№	Прогини балки, мм	Час, сек	Напруж. арм., МПа		Видовж. арм., мм/мм		Вага арм., кг		Ціна, грн
			Центр	Макс	Центр	Макс.	Сталь	Ni-Ti	
A3	37,85	0,005	355	378	0,00621	0,00655	1,642	0,306	4 968
		0,01	229	392	0,00417	0,00467			
A4	37,56	0,005	386	407	0,00700	0,00725	1,272	0,612	9 845
		0,01	250	375	0,00445	0,00459			
A5	38,48	0,005	407	419	0,00744	0,00747	0,902	0,918	14 722
		0,01	266	368	0,00473	0,00474			
A6	38,67	0,005	424	435	0,00713	0,00716	-	1,224	19 572
		0,01	306	372	0,00543	0,00543			

Прийнявши до уваги таблицю 3.3, вищеописані графіки НДС та попередні висновки можна з впевненістю сказати, що збільшення вставки зі СПФ не дає суттєвих переваг, порівняно з раніше дослідженою вставкою 300 мм.

Отже, збільшення розміру частини з 300 мм до 1200 мм призводить до:

- зростання максимальних еквівалентних напружень на 14% на проміжку часу 0,005 сек;
- зростання значень еквівалентних напружень на середині балки 17% на проміжку 0,005 сек;
- зниження максимальних напружень на 5% на проміжку часу 0,01 сек, та не слід забувати, що деякі зони армування вже перейшли межу текучості і цим нівелюють цей спад;
- зростання значень напружень на середині балки 25% на проміжку 0,01 сек, що дуже суттєво вплине на запас міцності та стійкості балки;

- збільшення максимального еквівалентного відносного видовження на 10% на проміжку часу 0,005 сек та на 14% на відрізку 0,001 сек;
- збільшення еквівалентного відносного видовження середньої частини арматури на 17% на проміжку часу 0,005 сек та на 24% на відрізку 0,001 сек;
- зростання вартості армування в 4 рази.

### **3.4 Висновок до розділу 3**

Проаналізувавши результати дослідження балок з різними способами підсилення можна сказати, що використання вставки з псевдопружного NiTi СПФ є корисним. Це призводить до зменшення залишкових напружень, еквівалентного відносного видовження та збільшення здатності центральної частини арматури розсіювати напруження з часом. Це підтверджує доцільність та користь від застосування підсилення таким методом.

Одночасно з цим збільшення довжини вставки від 300 мм до 600-1200 мм не спричинило ефекту покращення несучої здатності, а навпаки призводить до погіршення певних властивостей. Разом з тим збільшення довжини вставки із псевдопружного NiTi СПФ підвищує ціну виготовлення таких балок до 4-х разів. Що з економічної точки зору є не доцільним.

Отримані результати відкривають простір для нових досліджень, змінюючи розмір, діаметр та спосіб з'єднання вставки, її розташування та форму. Також результати роботи дають змогу в подальшому дослідити вплив СПФ на залізобетон під іншими видами навантажень, їх швидкості та умов дії.



## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Загальні положення

Будівництво це одна з тих галузей, що мають підвищену небезпеку на робочому місці. Для збереження здоров'я працівників та зменшення кількості травм на підприємствах були прийняті комплекси заходів що до охорони праці на робочих місцях та забезпечення їх належного контролю.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [33].

Працівник зобов'язаний виконувати такі вимоги:

- дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства;
- знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту;
- проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні огляди.

Відповідальним за безпеку працівника на підприємстві також є роботодавець, що надає працівнику робоче місце, обладнання та обов'язки. Роботодавці незалежно від форм власності будівельних організацій зобов'язані забезпечити виконання ДБН А.3.2-2-2009 «Система стандартів безпеки праці. Промислова безпека у будівництві. Основні положення» працівниками цих організацій і залученими до будівництва іншими особами. Відповідальність за невиконання працівником правил насамперед лягає на нього.

З метою запобігання отримання травм та погіршенню стану здоров'я працівників роботодавець насамперед зобов'язаний:

- організувати проведення обов'язкових попередніх (під час прийняття на роботу) і періодичних медичних оглядів працівників, зайнятих на важких роботах та роботах зі шкідливими умовами праці, за власний рахунок; проводити навчання з питань охорони праці працівників;
- забезпечити проведення атестації робочих місць на відповідність вимогам нормативно-правових актів з охорони праці;
- забезпечити працівників спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту, що відповідають встановленим вимогам;
- забезпечити працівників аптечками першої медичної допомоги.

#### **4.2 Охорона праці при роботі з ручним та електричним інструментом**

При створення будівельної продукції використовується велика кількість ручних інструментів. Тому питання безпеки пов'язане з надзвичайними ситуаціями за участі подібних речей стоїть дуже гостро.

До ручного інструмента відносяться: молотки, кувалди, зубила, гайкові ключі, торцеві ключі, пробивачі, кернери, напилки, викрутки, гострогубці, плоскогубці, лопати, ножівки тощо. При виконанні робіт ручним інструментом робітник повинен бути проінструктованим по даній інструкції додатково до інструкції з охорони праці по основній професії.

Результати інструктажу повинні бути зафіксовані в «Журналі інструктажів з питань охорони праці»; в журналі після інструктажу повинні бути підписи інструктуючого та робітника, який користується ручним інструментом. Інструктаж по роботі з інструментами та пристроями повинен проводитися в терміни, передбачені для проходження інструктажу за основною професією робітника, а також у разі порушення вимог цієї інструкції.

Під час експлуатації будівельних машин, засобів механізації, пристроїв, оснащення, ручних машин, інструменту повинні бути передбачені заходи та засоби

із запобігання впливу на працюючих небезпечних та шкідливих виробничих факторів (ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007).

Експлуатація ручного електроінструменту дозволяється у разі дотримання таких вимог [34]:

- перед кожною видачею інструменту в роботу повинна бути перевірена його комплектність та надійність кріплення деталей, справність захисного кожуху, кабелю (рукава);
- перед початком роботи повинна бути перевірена справність вимикача та машини на холостому ході;
- під час перерв у роботі, після закінчення роботи, під час змащування, очищення, заміни робочого елемента інструменту ручні машини необхідно вимкнути та від'єднати від електричної мережі;
- ручні машини, маса яких із розрахунку на руки працюючого, перевищує 10 кг, повинні мати пристрій для підвішування;
- під час роботи з ручними машинами на висоті необхідно використовувати засоби під-мощування (помости);
- нагляд за експлуатацією ручних машин необхідно доручати спеціально призначеній для цього особі.

### **4.3 Правила розміщення та улаштування сховищ**

Захисні споруди цивільного захисту призначаються для захисту в мирний час персоналу, який переховується від наслідків аварій, катастроф та стихійного лиха, які загрожують масовому ураженню людей, а також у воєнний час – від сучасної зброї масового ураження. В мирний час захисні споруди використовуються для господарчих потреб.

Сховища слід розміщувати у підвальних та цокольних поверхах будинків та споруд. Будівництво окремо розташованих занурених та розташованих над поверхнею землі (з зануренням підлоги менше ніж 1,5 м від планувальної відмітки землі) сховищ допускається, якщо немає можливості зробити вбудовані сховища,

або при спорудженні об'єктів у складних гідрогеологічних умовах при відповідному обґрунтуванні. Для розміщення протирадіаційних укриттів необхідно використовувати приміщення як в існуючих, так і в будинках та спорудах промислового та цивільного призначення, які будуються, і розташовані в місцях постійного перебування людей. При проектуванні приміщень, пристосованих під захисні споруди, необхідно передбачати більш економічні об'ємно-планувальні та конструктивні рішення. Габарити приміщень слід призначати мінімальними, які забезпечують дотримання вимог щодо ефективного використання вказаних приміщень у мирний час для потреб народного господарства.

Конструкції повинні прийматися з урахуванням їх економічної доцільності в умовах конкретного будівельного майданчика. Склад приміщень захисних споруд, які розміщуються у захищеній частині будівлі або в окремо розташованій заглибленій споруді, повинен бути визначений з урахуванням експлуатації їх у мирний час, при цьому площа вказаних приміщень не повинна перевищувати площі, яка необхідна для захисних споруд.

Вбудовані сховища по можливості слід розміщувати під будинками найменшої поверховості з тих, що будуються на цьому майданчику, а окремо розташовані – на відстані від будинків і споруд, яка дорівнює їх висоті.

У маловологих ґрунтах низ покриття слід розташовувати не вище рівня планувальної відмітки землі. При наявності ґрунтових вод допускається розміщувати низ покриття вище планувальної відмітки землі з обвалуванням виступаючих стін та покриття землею. При цьому заглиблення сховищ (рівень підлоги) слід передбачати не менше ніж 1,5 м від планувальної відмітки землі.

У вбудованих сховищах прокладання вказаних мереж інженерних комунікацій, що пов'язані з системами будинків (споруд), в яких вбудовані сховища, допускається за умови встановлення вимикаючих та інших пристроїв, які виключають можливість порушення захисних властивостей сховищ. Каналізаційні стояки повинні бути вмішені у сталеві труби або залізобетонні коробки, надійно замуrowані у покриття і підлогу сховища. При проектуванні вбудованих сховищ

слід передбачати підсіпку землі по покриттю шаром до 1 м. Мережі водопостачання, опалення і каналізації будинку, які проходять над покриттям вбудованого сховища, повинні прокладатися у спеціальних колекторах (бетонних або залізобетонних каналах), доступних для огляду та виконання ремонтних робіт при експлуатації цих мереж у мирний час.

Розрахунок несучих конструкцій захисних споруд повинен виконуватись з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалів - граничний стан першої групи. Граничний стан конструкцій першої групи в пружно-пластичній стадії характеризується початком руйнування бетону стиснутої зони у найбільш напружених перерізах, розтягнута арматура при цьому перебуває у стадії розвитку непружних (пластичних) деформацій. Допускається виникнення залишкових переміщень та наявність у бетоні розтягнутої зони розкриття тріщин. За граничним станом першої групи розраховуються елементи основних несучих і огорожувальних конструкцій сховищ, тунелі аварійних виходів.

Граничний стан конструкцій другої групи за пружною стадією роботи арматури характеризується досягненням у розтягнутій арматурі напружень, які дорівнюють розрахунковому динамічному опору арматури, при цьому напруження у бетоні стиснутої зони, як правило, менше розрахункового динамічного призмового опору бетону.

Розрахунок залізобетонних конструкцій за граничним станом другої групи забезпечує відсутність у них залишкових деформацій. За граничним станом другої групи слід розраховувати конструкції сховищ, розташованих у водонасиченому ґрунті.

Для збірних і монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій сховищ повинен прийматися важкий бетон середньої щільності більше 2000 кг/м<sup>3</sup> класу не нижче В 15, а для колон і ригелів - не нижче В 22,5. Бетонні блоки для стін заввишки 2,4 м слід передбачати класу не нижче В 12,5. Розчин для замурування швів збірних залізобетонних конструкцій приймати класу не нижче В 12,5, а для кладки стін - не нижче М 50 [35].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано літературні джерела про дослідження методом вибуху, наявні способи захисту споруд та стан нормативної бази у цій темі.
2. Встановлено, що використання вставки з псевдопружного NiTi сплаву з ефектом пам'яті форми є корисним для покращення характеристик традиційних способів армування залізобетонних конструкцій, якщо конструкція зазнала дії вибухового навантаження.
3. Досліджено, що можливостей програмного комплексу ANSYS R2 2022 достатньо для аналізу псевдопружних сплавів під дією вибухового навантаження і він має більший спектр можливостей аналізу, ніж представлені конкуренти.
4. Запропоновано метод точного аналізу залізобетонних балок під дією вибухового навантаження, що полягає в уніфікації розташування скінченних елементів, попередньому розрахунку розміру області і часу вибуху, це допомагає отримати однаково точні результати з економією близько 30-40% часу на розрахунок задачі.
5. Обґрунтовано доцільність заміни частини нижнього поясу арматури на NiTi сплав. Згідно з отриманими даними вставка з псевдопружного сплаву з ефектом пам'яті форми зменшує максимальні залишкові напруження на 32%, напруження у центрі арматури спадають на 22% ефективніше, а еквівалентне відносне видовження стержнів зменшується у 30 разів.
6. Досліджено доцільність збільшення розміру вставки псевдопружного матеріалу у нижньому поясі несучої арматури. Отримані дані показали, що при збільшенні довжини вставки відбувається зростання максимальних напружень на 14%, значень напруження у центрі балки на 25% та видовження деяких частин арматури на 24%.
7. Порівняно техніко-економічні характеристики різних розмірів вставки NiTi сплаву. Використання розміру вставки 300 мм виявилось у 4 рази вигіднішим, ніж збільшення довжини вставки до 600-1200 мм.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. U. Nyström, Modelling of Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Loading / Department of Civil and Environmental Engineering, Halmers University of Technology, Sweden, 2013. P. 1–72.
2. Nicholas J. Carlson, An innovative protective jacket for structures subject to blast loads: A comprehensive experimental and simulation study / – 2013. — P. 10-13.
3. Michael J. Roth, P.E., Thomas R. Slawson, Design and Validation of Modular, Reinforced Concrete Bunkers, PhD, P.E. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 39180, P. 1–8.
4. A. Persson, A. Rustan, R. Holmberg, B. Aaro, I. Marklund, E. Pehrsson, L. Ottosson, G. Almgren, Rock Fragmentation by Blasting / — Luleå : First International Symposium On Rock Fragmentation By Blasting, 1983. — P. 10-17. — (Preprint / Luleå University of Technology).
5. Burns, K. ,Gabet E., The Rheology of Vegetative Ash-laden Debris Flows, AGU Fall Meeting Abstracts, P. 8.
6. Donald R. Curran, Simple fragment size and shape distribution formulae for explosively fragmenting munitions // International Journal of Impact Engineering, Volume 20, Issues 1–5, 1997, ISSN 0734-743X. P. 197-208.
7. Lin, S.-C & Gao, Shan & Han, J.-Q., Effect of the Reinforced Concrete Slab on the Blast Shock Wave Properties. / 2011. P. 734.
8. M. Chi, H. Jiang, X. Lan, T. Xu, Y. Jiang, Study on Overpressure Propagation Law of Vapor Cloud Explosion // ACS Omega, 6, 2021. P. 34003–34020.
9. Survivors recall Saudi bombing – Albuquerque Journal. Website. URL: <http://www.bit.ly/3Mssxgg>
10. Committee on Feasibility of Applying Blast-Mitigating Technologies and Design Methodologies from Military Facilities to Civilian Buildings // National Academy Press, Washington, D.C., 1995, P. 26–96.
11. Hadden, D., Overview of blast mitigation design measures / Doug Sunshine Defense Threat Reduction Agency, 2003. P.8.

12. R. Shankar Nair, Preventing Disproportionate Collapse // Journal of Performance of Constructed Facilities, 20, 2006. P. 309– 314.
13. Khobar Towers bombing. Website. URL: <http://www.bit.ly/41RZtmV>
14. Kevin C., A. Doormaal, C. Haberacker, G. Hüsken, M. Larcher, A. Saarenheimo, G. Solomos, A. Stolz, L. Thamie, G. Valsamos, Resistance of structures to explosion effects: Review report of testing methods / European Commission - Joint Research Centre, Ispra – M., 2013. – P. 3.
15. A. Ramezani, H. Rothe, Investigation of Solver Technologies for the Simulation of Brittle Materials, in SIMUL 2014 : The Sixth International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2014). IARIA, Oct. 2014, P. 236–242.
16. J. A. Zukas, Introduction to hydrocodes / Studies in Applied Mechanics. — 2004. — Vol 49. — P. 26–101.
17. Explicit Dynamics. Chapter 1. Intro To Exp Dyn. M06 Explicit Dynamics Analysis Settings and Parameters / ANSYS Corporation // 2009. P. 7.
18. D. J. Benson, Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes, Computer methods in Applied mechanics and Engineering, vol. 99, no. 2-3, 1992, P. 235–394.
19. M. Oevermann, S. Gerber, and F. Behrendt, Euler–lagrange/dem simulation of wood gasification in a bubbling fluidized bed reactor, Particuology, vol. 7, no. 4, 2009, P. 307–316.
20. D. Hicks and L. Liebrock. Sph hydrocodes can be stabilized with shape-shifting, Computers & Mathematics with Applications, vol. 38, no. 5, 1999, P. 1–16.
21. Ramezani, Arash & Hillig, Burghard & Rothe, Hendrik, Simulating Blast Effects on High Security Vehicles with 3D Fluid-Structure Interaction / International Journal on Advances in Security. — 2018. — №11. — P. 140–144.
22. Explosives - Designing Buildings. Website. URL: <http://www.bit.ly/3Mr72MB>
23. Lyu, P., Fang, Z., Wang, X., Huang, W., Zhang, R., Sang, Y., Explosion Test and Numerical Simulation of Coated Reinforced Concrete Slab Based on BLAST Mitigation Polyurea Coating Performance / — 2022. — 15, 2607. P. 3–12.



24. D. Kalman , Use Of Steel Fiber Reinforced Concrete For Blast Resistant Design / B.S., Kansas State University, 2010. P. 1–29.
25. G. Song, N. Ma, H.-N. Li, Applications of shape memory alloys in civil structures / Engineering Structures. — 2006. — Vol 33, Issue 9. — P. 1266.
26. M. Dolce, D. Cardone, Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension / International Journal of Mechanical Sciences, Volume 43, Issue 11, 2001. P. 2657-2677.
27. Z. G. Wei, R. Sandstrom, S. Miyazaki, Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems — Part i shape-memory materials / Journal of Materials Science. — 1998. — Vol 28. — P. 3743.
28. A. Tabrizikahou, M. Kuczma, M. Łasecka-Plura, E. N. Farsangi, M. Noori, S. Li, Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review / Proceedings of Spie. — 2001. — Vol 342. — P. 18.
29. M. Indirli, M. Castellano, P. Clemente, A. Martelli, Demo-application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of the S. Giorgio Church bell tower / Proceedings Of Spie. — 2001. — № 4330. — P. 262–272.
30. Simulation Coupled Eulerian-Lagrangian Explosion over the Reinforced Concrete Beam in Abaqus Website. URL: <http://www.bit.ly/3IdRPMn>
31. Abaqus analysis user guide // A. Documentation / 2016. — P.1-862 .
32. Buckle I.G., Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 / – Bridges. 2006. № January. P. 1–658.
33. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-ХІІ. Вид. офіц. Голос України 1992. 24 лист. № 49, ст. 669.
34. Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : Наказ Міністерства енергетики України від 19.12.2013 р. № 966. Вид. офіц. Офіційний вісник України 2014. 28 бер. № 24, ст. 52.
35. ДБН В.2.2.5-97 Будинки і споруди. Захисні Споруди. Цивільної Оборони. [Чинний від 01.08.2019]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. ст.1–18.