

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних балок із гібридним армуванням

Виконав: студент 6 курсу, групи МБмн-61

спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Зазуляк Д.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Биків Н.З.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мещерякова О.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Качка О.І.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
 Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра Будівельної механіки
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«10» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
 (назва освітнього ступеня)

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

студенту Зазуляку Дмитру Богдановичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних балок із гібридним армуванням

Керівник роботи Биків Назарій Зіновійович, доктор філософії, старший викладач
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «9» квітня 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом роботи _____
 3. Вихідні дані до роботи Існуючі результати досліджень залізобетонних конструкцій зі сплавами із пам'яттю форми під дією згинальних навантажень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Властивості та будова сплавів пам'яті форми. Використання сплавів пам'яті форми у будівництві та цивільній інженерії;

4.2. Метод дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної балки із вставками зі сплаву Ni-Ti під дією згину;

4.3. Напружено-деформований стан залізобетонної балки підсиленої вставками із СПФ під дією згину;

4.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Графічний матеріал подати у вигляді презентації з використанням комп'ютерної техніки.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ СПФ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ.....	9
1.1. Фізико-механічні особливості нітинолу як інтелектуального матеріалу.	9
1.2. Стан питання щодо використання гібридного армування в сейсмостійкому будівництві	11
1.3. Порівняльний аналіз нормативних методик та чисельних методів розрахунку.....	13
1.4. Висновки до розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 ПОСТАНОВКА ТА ВАЛІДАЦІЯ НЕЛІНІЙНОЇ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ В ANSYS WORKBENCH	16
2.1. Побудова геометрії та вибір моделей матеріалів	16
2.2. Налаштування нелінійного розв’язувача та методу контролю переміщень (Displacement Control).....	20
2.3. Верифікація розрахункової схеми на контрольному зразку	24
2.4. Висновки до розділу 2	28
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НДС.....	30
3.1. Порівняння стадій НДС класичної та гібридної балок	30
3.2. Дослідження формування «надпружного шарніра» та ефекту високої деформативності.....	36
3.3. Аналіз напружень у стиснутій зоні бетону та проблема крихкого руйнування.....	43
3.4. Висновки до розділу 3	44

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	46
4.1. Пропозиції щодо конструктивного підсилення стиснутої зони.....	46
4.2. Розрахунок економічної ефективності та живучості конструкції	48
4.3. Висновки до розділу 4	49
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	51
5.1. Правила безпеки при роботі на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100	51
5.2. Оцінка стійкості об'єкта будівництва до впливу ударної хвилі ядерного вибуху і заходи щодо підвищення стійкості	53
5.3. Висновки до розділу 5	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	57
БІБЛІОГРАФІЯ.....	59

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному будівельному проектуванні спостерігається інтенсивний перехід від класичної парадигми «забезпечення міцності» до концепції «забезпечення живучості» (resilience) конструкцій [1–3]. Традиційне сталеве армування, вичерпавши свою пружну стадію під дією екстремальних навантажень (сейсмічних поштовхів, вибухів, техногенних аварій), зазнає незворотних пластичних деформацій. Це призводить до критичного розкриття тріщин, залишкових прогинів та втрати експлуатаційної придатності споруд критичної інфраструктури, вимагаючи їх дороговартісного демонтажу. У зв'язку з цим, актуальним і значущим для розвитку будівельної галузі є впровадження «інтелектуальних» матеріалів, зокрема сплавів з пам'яттю форми (SMA) на основі нікелю та титану (нітинолу) [4–6]. Унікальна здатність нітинолу до надпружних макродеформацій (суперпластичності) та самоцентрування відкриває перспективи створення конструкцій, здатних розсіювати величезну кількість енергії та повертатися до початкового стану після зняття навантаження. З огляду на високу вартість матеріалу, концепція гібридного армування (використання локальних SMA-вставок виключно у зонах пластичних шарнірів) є найбільш раціональною. Однак, складна просторова нелінійна взаємодія надпружних вставок із бетонною матрицею та сталевим каркасом досі залишається недостатньо вивченою. Таким чином, обґрунтування доцільності та аналіз механіки роботи гібридно-армованих згинальних елементів є актуальним науковим та інженерним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до напрямку науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя в межах дослідження механіки руйнування та оцінки напружено-деформованого стану конструкцій із використанням інтелектуальних матеріалів.

Мета й задачі роботи. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу локального гібридного армування (із застосуванням сплавів з пам'яттю

форми) на напружено-деформований стан, деформативність та живучість залізобетонних згинальних елементів на закритичній стадії роботи. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан розв'язання проблеми використання надпружних сплавів у сейсмостійкому будівництві та фізико-механічні особливості нітинолу.

2. Розробити та валідувати просторову нелінійну скінченно-елементну модель залізобетонної балки з урахуванням контактної взаємодії різномодульних матеріалів та механіки пошкодження бетону.

3. Виконати порівняльний аналіз напружено-деформованого стану класичної та гібридної балок, оцінивши індекс деформативності та здатність до дисипації енергії.

4. Виявити критичні фактори вичерпання несучої здатності гібридних згинальних елементів та розробити інженерні рекомендації щодо підсилення їх стиснутої зони.

Об'єкт дослідження. Процес деформування та руйнування залізобетонних згинальних елементів за межею пружності в умовах високодеформативних станів.

Предмет дослідження. Параметри напружено-деформованого стану (зусилля утворення тріщин, прогини, еквівалентні напруження, характер пошкодження матриці) залізобетонних балок із гібридним (сталь та нітинол) армуванням.

Методи дослідження. Для досягнення мети в роботі використано метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований у програмному комплексі ANSYS Workbench. Метод застосовано для комп'ютерного моделювання складного просторового тривісного напруженого стану конструкції. Для адекватного відтворення механіки магістрального тріщиноутворення та роздроблення бетону використано математичну модель Concrete Damage Plasticity, а для відтворення роботи нітинолової вставки в аустенітній та мартенситній фазах – макроскопічну модель Shape Memory Alloy. Використання кінематичного методу завантаження

(Displacement Control) дозволило дослідити поведінку системи на спадній гілці діаграми деформування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розширенні теоретичних знань та вдосконаленні методів чисельного аналізу напружено-деформованого стану залізобетонних згинальних елементів із гібридним армуванням сплавами з пам'яттю форми. У межах магістерської роботи одержано такі нові наукові результати:

1) **вперше виявлено та чисельно обґрунтовано** феномен формування «надпружного шарніра» в залізобетонних балках із локальними гібридними вставками з нітинолу (NiTi). Доведено, що вставка з NiTi досягає напружень 364 МПа, що перевищує поріг ініціації напруженням-індукованого мартенситного перетворення (332 МПа). Перебуваючи у фазі активної трансформації кристалічної ґратки, матеріал акумулює відносні деформації на рівні $\varepsilon = 0,0046$. Це дозволяє збільшити загальну деформативність конструкції у 2,1 раза порівняно з класичним армуванням і надійно захистити основну сталеву арматуру від незворотних пластичних деформацій;

2) **удосконалено** методику скінченно-елементного моделювання роботи залізобетонних згинальних елементів шляхом відмови від спрощених одновимірних (стрижневих) наближень на користь повноцінного об'ємного 3D-моделювання (із застосуванням гексаедричних елементів SOLID186 та спеціалізованої моделі Concrete Damage Plasticity). Це дозволило з високою точністю (похибка визначення несучої здатності 5,1 % порівняно з нормативним розрахунком) відтворити просторовий напружений стан, локальні ефекти контактної взаємодії (Frictionless) та концентрацію напружень (сингулярність) у вузлах муфтового з'єднання матеріалів;

3) **отримав подальший розвиток** механізм оцінки післяруйнівної стадії (деградації жорсткості) залізобетонних балок. На основі аналізу епюр пластичних деформацій чисельно доведено, що вичерпання несучої здатності гібридних балок лімітується виключно передчасним крихким роздробленням бетону стиснутої зони

внаслідок стрімкого підняття нейтральної осі (перевищення межі $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$), що обґрунтовує необхідність обов'язкового непрямого поперечного армування таких конструкцій.

4) Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати чисельного експерименту дозволяють оптимізувати проектування згинальних елементів підвищеної живучості. Розроблено та обґрунтовано конкретні практичні рекомендації щодо застосування непрямого поперечного армування (замкнених хомутив зі зменшеним кроком) у зоні розташування SMA-вставки для запобігання передчасному роздробленню бетону. Результати можуть бути використані проектними організаціями при розробці конструкцій для об'єктів критичної інфраструктури, що зводяться у сейсмічно небезпечних регіонах.

Апробація результатів магістерської роботи. Виконана на IX Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 24-25 квітня 2026 року).

Публікації. Публікація результатів магістерської роботи здійснена у збірнику тез вищезазначеної конференції.

Ключові слова: ЗАЛІЗОБЕТОННА БАЛКА, ГІБРИДНЕ АРМУВАННЯ, НІТИНОЛ, СПЛАВИ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ, ПРУЖНИЙ ШАРНІР, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЖИВУЧІСТЬ.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ СПФ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

1.1. Фізико-механічні особливості нітинолу як інтелектуального матеріалу

У сучасному будівельному матеріалознавстві та проєктуванні стійких до екстремальних впливів конструкцій спостерігається інтенсивний перехід від парадигми «забезпечення міцності» до концепції «забезпечення живучості» (resilience). У цьому контексті перспективним напрямком є інтеграція «інтелектуальних» (smart) матеріалів, здатних адаптивно реагувати на зовнішні силові впливи. Серед широкого спектра таких матеріалів особливе місце посідають сплави з пам'яттю форми (СПФ, англ. Shape Memory Alloys – SMA), зокрема екваіатомний сплав нікелю та титану – нітинол (NiTi) [7, 8].

Використання нітинолу в якості елементів армування або локальних SMA-вставок у пластичних шарнірах залізобетонних балок зумовлене його унікальними фізико-механічними властивостями, які принципово відрізняються від характеристик традиційних будівельних сталей. Фундаментальною основою нелінійної макроскопічної поведінки NiTi є зворотні термопружні мартенситні фазові перетворення. Залежно від температури та рівня напружень, кристалічна ґратка матеріалу перебуває у двох основних станах:

- Аустенітна фаза – високотемпературна фаза з кубічною об'ємно-центрованою кристалічною ґраткою (B2), яка характеризується вищим модулем пружності;
- Мартенситна фаза – низькотемпературна фаза з нижчою симетрією (переважно моноклінна ґратка B19'), що здатна до значних непружних (зсувних) деформацій шляхом двійникування [9].

Для задач цивільної інженерії, і зокрема підвищення несучої здатності та тріщиностійкості згинальних елементів, найбільший інтерес становить явище

надпружності (Superelasticity) [10, 11]. Воно проявляється тоді, коли матеріал експлуатується за температури, вищої за температуру завершення аустенітного перетворення (A_f). Як доведено у дослідженнях [1, 12], при прикладанні механічного навантаження до зразка NiTi відбувається напруженням-індуковане мартенситне перетворення (Stress-Induced Martensitic Transformation – SIMT), яке скасовується при розвантаженні.

Аналіз сучасної світової літератури дозволяє виокремити такі ключові фізико-механічні особливості надпружного нітинолу:

Здатність до макродеформацій (суперпластичність) із повним відновленням. На відміну від традиційної арматурної сталі (наприклад, класу А400С), яка після досягнення межі текучості ($\sigma_y \approx 400$ МПа) переходить у стадію незворотного пластичного течіння, надпружний NiTi здатний сприймати деформації до 6–8 % із практично повним відновленням початкової геометрії після зняття навантаження. Згідно з дослідженнями [13–15], це забезпечує ефект самоцентрування (self-centering) конструкції та фізичне закриття макротріщин у бетоні після припинення дії пікового (наприклад, сейсмічного) навантаження.

Гістерезисний характер деформування. Діаграма деформування «напруження-деформація» ($\sigma - \varepsilon$) для надпружного NiTi має яскраво виражену «прапороподібну» (flag-shaped) форму [16, 17]. Пряме фазове перетворення при навантаженні відбувається за вищого рівня напружень, ніж зворотне перетворення при розвантаженні. Площа утвореної петлі гістерезису є мірою дисипації енергії, що дозволяє локальним SMA-вставкам виконувати функцію вбудованих демпферів [13, 18–20].

Низький та нелінійний модуль пружності. Модуль пружності NiTi є суттєво нижчим за показники сталі ($E_s \approx 200$ ГПа) і змінюється залежно від фазового стану матеріалу. В аустенітній фазі він становить $E_A = 60 \dots 80$ ГПа, а під час фазового переходу та у мартенситній фазі знижується до $E_M = 20 \dots 40$ ГПа [21, 22]. Вплив на роботу балки: Така висока піддатливість SMA-вставки є критичним розрахунковим фактором для гібридного армування. При виході на плато фазового

перетворення відбувається стрімке зростання кривизни осі балки. Це призводить до інтенсивного розкриття нормальних тріщин у розтягнутій зоні та до ризику передчасного крихкого роздроблення стиснутої зони бетону до моменту вичерпання несучої здатності самої арматури.

Асиметрія властивостей при розтягу та стиску. Матеріалу притаманна різна механічна поведінка залежно від знаку напружень. Напруження початку фазового перетворення при стиску ϵ в середньому на 20–30 % вищим, ніж при розтягу [15, 23], що вимагає застосування специфічних моделей матеріалу при скінченно-елементному моделюванні (наприклад, моделі Shape Memory Alloy в ANSYS) [24–26].

Таким чином, використання надпружних властивостей нітинолу в якості вставок дозволяє перевести роботу залізобетонної балки на закритичній стадії з режиму крихкого руйнування в режим контрольованого високодеформативного стану (ductility enhancement) [15, 27–29]. Проте, низька осьова жорсткість сплаву вимагає глибокого аналізу напружено-деформованого стану бетону в стиснутій зоні.

1.2. Стан питання щодо використання гібридного армування в сейсмостійкому будівництві

Незважаючи на унікальні надпружні властивості та здатність до розсіювання енергії, широке впровадження суцільного SMA-армування у практику будівельного проєктування стримується низкою вагомих економічних та технічних обмежень. По-перше, еквіатомний сплав нікелю та титану має надзвичайно високу вартість виробництва, що робить його використання по всій довжині згинальних елементів (наприклад, балок довжиною 1200 мм і більше) економічно недоцільним [30].

По-друге, з точки зору будівельної механіки суцільне використання SMA-стержнів є нераціональним. Максимальні напруження та пластичні деформації у

згинальних залізобетонних елементах локалізуються виключно в зонах утворення пластичних шарнірів (наприклад, у центральній третині прольоту при триточковому згині). Відповідно, використання інтелектуальних сплавів на ділянках, що працюють у пружній стадії, не приносить жодного технічного ефекту.

По-третє, технологічною проблемою є анкерування нітинолу в бетонній матриці. Гладка поверхня SMA-елементів (через складність накатки профілю на мартенситні сплави) зумовлює низький рівень зчеплення з бетоном, що призводить до ризику прослизання арматури до моменту реалізації її повної несучої здатності [16, 31].

Оптимальним інженерним рішенням, що нівелює перелічені недоліки, є концепція гібридного (комбінованого) армування. Даний підхід передбачає використання традиційної сталеві арматури періодичного профілю (наприклад, А400С) на більшій частині прольоту для забезпечення надійного анкерування та базової міцності, із послідовним включенням SMA-вставки з надпружного NiTi (довжиною 300 мм у межах даного дослідження) виключно в зоні максимальних згинальних моментів.

Критичним вузлом такої системи є зона механічного контакту «Сталь – SMA». Як показано у фундаментальних дослідженнях Н. Биківа та співавторів [26, 32], стикування різномодульних матеріалів у бетонному тілі вимагає особливого підходу. Найбільш ефективними методами з'єднання є застосування обжимних механічних муфт (mechanical couplers) або лазерного зварювання, які здатні передавати зусилля, що перевищують межу текучості сталі. Дослідження [33] підтверджує, що коректно законструйований вузол з'єднання запобігає передчасному локальному руйнуванню та дозволяє розглядати цей контакт як абсолютно жорсткий. Саме тому, при подальшому скінченно-елементному моделюванні в ANSYS Workbench контактна пара «Сталь – NiTi» моделюється за допомогою кінематичного зв'язку типу Bonded (Multipoint Constraint – MPC), що адекватно відтворює фізику муфтового з'єднання.

Таким чином, застосування гібридної системи дозволяє досягти синергетичного ефекту: сталева арматура забезпечує загальну просторову

жорсткість та анкерування, тоді як локальна SMA-вставка діє як структурний запобіжник, гарантуючи значне збільшення деформативності балки та суттєво підвищуючи загальну живучість конструкції без її раптового обвалення [15, 34, 35].

1.3. Порівняльний аналіз нормативних методик та чисельних методів розрахунку

Традиційне проектування залізобетонних конструкцій базується на аналітичних та напівемпіричних залежностях, регламентованих чинними нормативними документами, зокрема ДБН В.2.6-98:2009 [36] та EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [37]. Зазначені методики використовують гіпотезу плоских перерізів (гіпотеза Бернуллі) та спрощені – дволінійні або параболічно-прямокутні – діаграми деформування матеріалів. Загальновідомо, що класичні нормативні розрахунки забезпечують достатньо високу точність виключно на пружній стадії роботи згинального елемента та до моменту утворення магістральних тріщин.

Однак, при переході до нелінійної (закритичної) стадії деформування, яка супроводжується масивним тріщиноутворенням та розвитком пластичних деформацій, класичний аналітичний апарат втрачає свою прогностичну здатність. Ще більш критичною ця розбіжність стає при застосуванні інтелектуальних матеріалів. У чинних нормативних документах повністю відсутні математичні алгоритми, здатні описати специфічну поведінку конструкцій із включенням сплавів з пам'яттю форми.

Гібридне армування генерує вкрай складний просторовий напружено-деформований стан. Під час напруженням-індукованого мартенситного перетворення (SMT) нітинолова вставка демонструє різке та нелінійне зниження модуля пружності. Це призводить до інтенсивного перерозподілу внутрішніх зусиль та непередбачуваної концентрації напружень у стиснутій зоні бетону. Новітні дослідження [23, 38] механізмів руйнування та властивостей нітинолу вказують на складну залежність поведінки матеріалу від асиметрії циклів

напружень, що принципово неможливо описати класичними поліноміальними функціями опору матеріалів.

З огляду на це, єдиним релевантним та науково обґрунтованим інструментом для дослідження закритичної поведінки балки з NiTi є метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований у сучасних обчислювальних комплексах, таких як ANSYS Workbench [24, 39]. Використання МСЕ дозволяє відійти від ідеалізованих формул та інтегрувати розширені нелінійні моделі: механіку руйнування бетону (Concrete Damage Plasticity) та феноменологічні моделі надпружності (Shape Memory Alloy). Крім того, застосування кінематичного методу навантаження (Displacement Control) замість традиційного силового (Force Control) забезпечує подолання сингулярностей матриці жорсткості та гарантує збіжність ітераційного процесу на низхідній гілці діаграми деформування. Саме чисельне моделювання дозволяє зафіксувати унікальний ефект «суперпластичності» (широке горизонтальне плато деформацій) та з високою точністю спрогнозувати момент локального крихкого роздроблення бетону задовго до розриву самої арматури.

1.4. Висновки до розділу 1

На основі аналізу сучасного вітчизняного та зарубіжного досвіду встановлено, що інтеграція сплавів з пам'яттю форми (зокрема, надпружного нітинолу NiTi) є передовим інструментом підвищення живучості залізобетонних конструкцій. Здатність NiTi сприймати надвисокі зворотні макродеформації (до 8 %) та активно розсіювати енергію дозволяє трансформувати характер роботи елемента з крихкого у високодеформативний та самовідновлювальний.

Обґрунтовано техніко-економічну доцільність застосування концепції гібридного армування, що базується на комбінації сталеві арматури періодичного профілю та SMA-вставки в зоні пластичного шарніра. Таке конструктивне рішення нівелює високу вартість нітинолу та усуває проблему його недостатнього

анкерування в бетоні, за умови забезпечення надійного жорсткого з'єднання різномодульних стержнів.

Доведено суттєву обмеженість чинних нормативних методик (ДБН, Eurocode) щодо розрахунку гібридно-армованих конструкцій на закритичних стадіях. Встановлено, що для адекватного моделювання фазових перетворень у нітинолі, масивного тріщиноутворення та нелінійного перерозподілу напружень критично необхідним є застосування методу скінченних елементів (ANSYS) із використанням спеціалізованих моделей матеріалів та кінематичного алгоритму навантаження (Displacement Control).

РОЗДІЛ 2

ПОСТАНОВКА ТА ВАЛІДАЦІЯ НЕЛІНІЙНОЇ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ В ANSYS WORKBENCH

2.1. Побудова геометрії та вибір моделей матеріалів

Просторову скінченно-елементну модель залізобетонної балки побудовано в програмному комплексі ANSYS Workbench (використано ліцензію академічного рівня 2025 R2 Student). Базова система одиниць вимірювання, прийнята в рамках моделювання – Metric (mm, g, N, ms, MPa), що забезпечує коректну розмірність вхідних даних для геометричних параметрів та механічних напружень.

Габаритні розміри зразка становлять 1200x140x80 мм (де 140 мм – висота, 80 мм – ширина перерізу). Розрахунковий проліт між центрами опор прийнято рівним 1160 мм.

Використання об'ємної геометрії (Solid Cylinders) для арматури замість спрощеної лінійної (Line Bodies) зумовлене необхідністю високоточного моделювання складних поверхонь контакту між матеріалами. Гібридне армування має комбіновану структуру: по краях розташовані анкерні ділянки традиційної сталі, а в центральній зоні максимальних згинальних моментів змонтовано SMA-вставку з нітинолу (NiTi) довжиною 300 мм (рис. 2.1).

Армування задано виключно в розтягнутій зоні у вигляді двох поздовжніх тривимірних об'ємних тіл (циліндрів) діаметром 10 мм. Центр осі арматури розміщено на відстані 25 мм від нижньої грані бетону (величина захисного шару). Конструктивну арматуру стиснутої зони спеціально вилучено з розрахункової схеми для забезпечення чистоти експерименту: це дозволяє спровокувати роздроблення стиснутого бетону як ключовий механізм руйнування та оцінити вплив гібридної вставки саме на цей процес.

Для суттєвого зменшення кількості рівнянь у розв'язувачі та пришвидшення ітераційних нелінійних розрахунків застосовано умову поздовжньої симетрії (Symmetry Region, рис. 2.2).

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

ANSYS
2025 R2
STUDENT

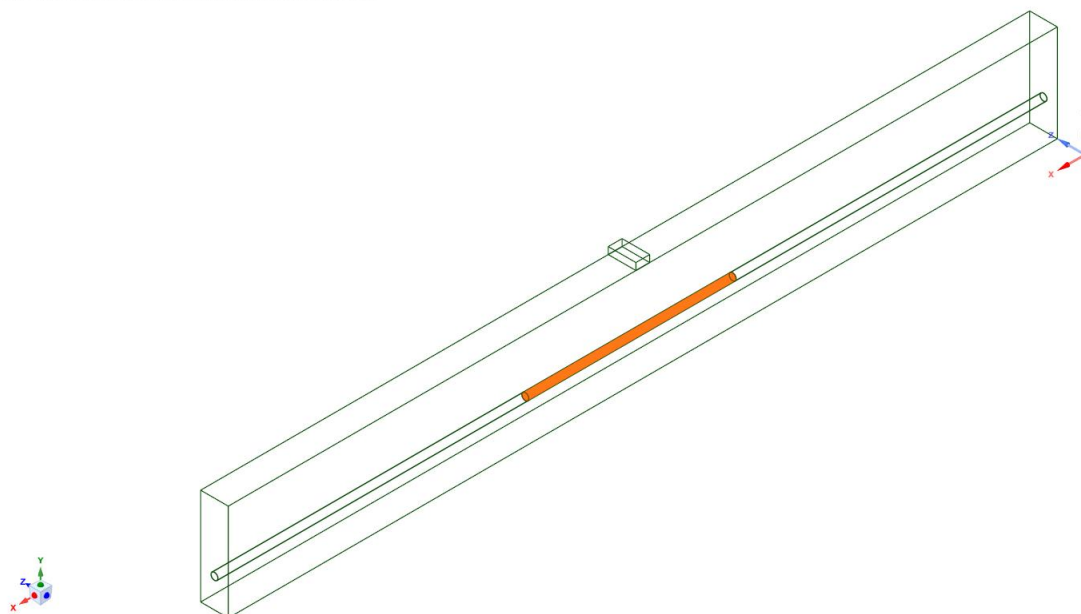


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд просторової геометричної моделі залізобетонної балки з гібридним об'ємним армуванням

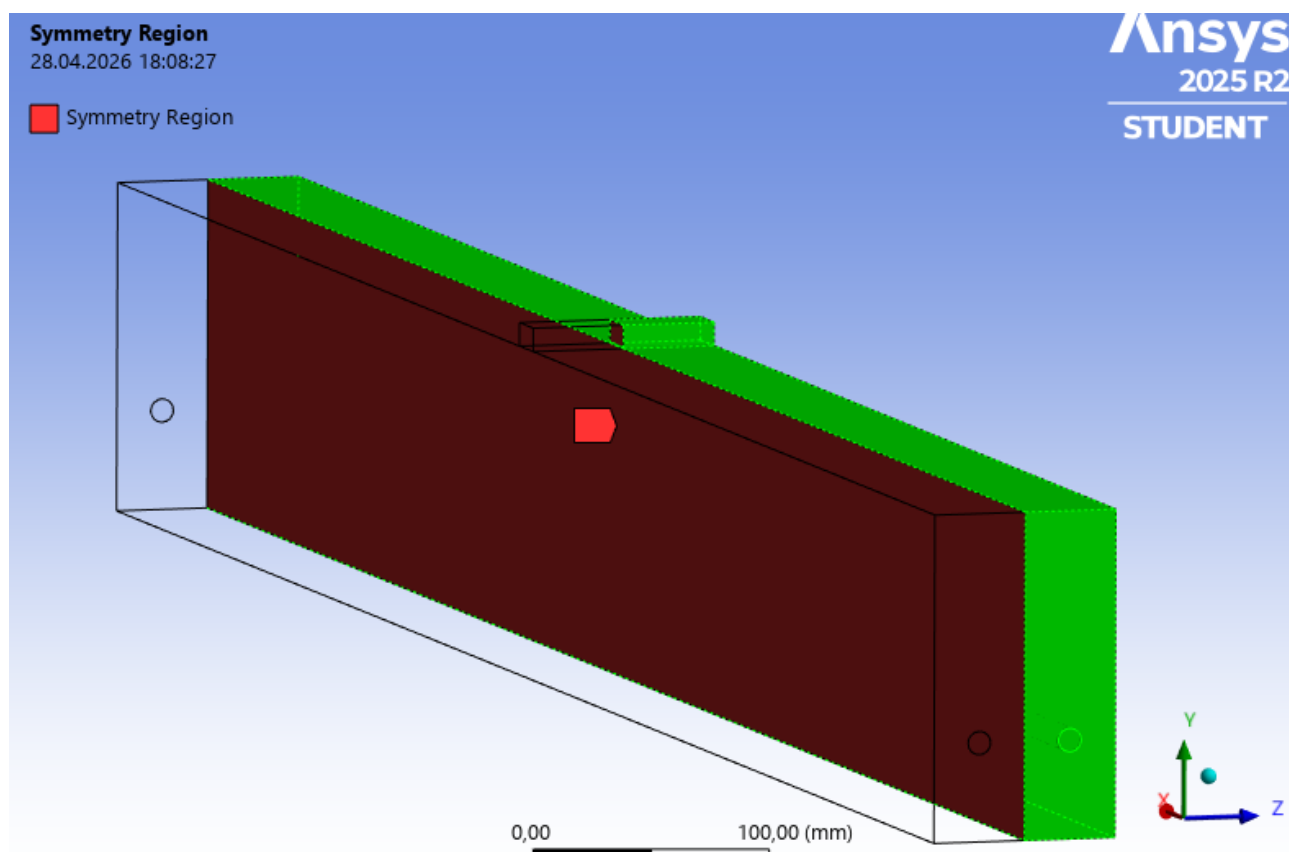
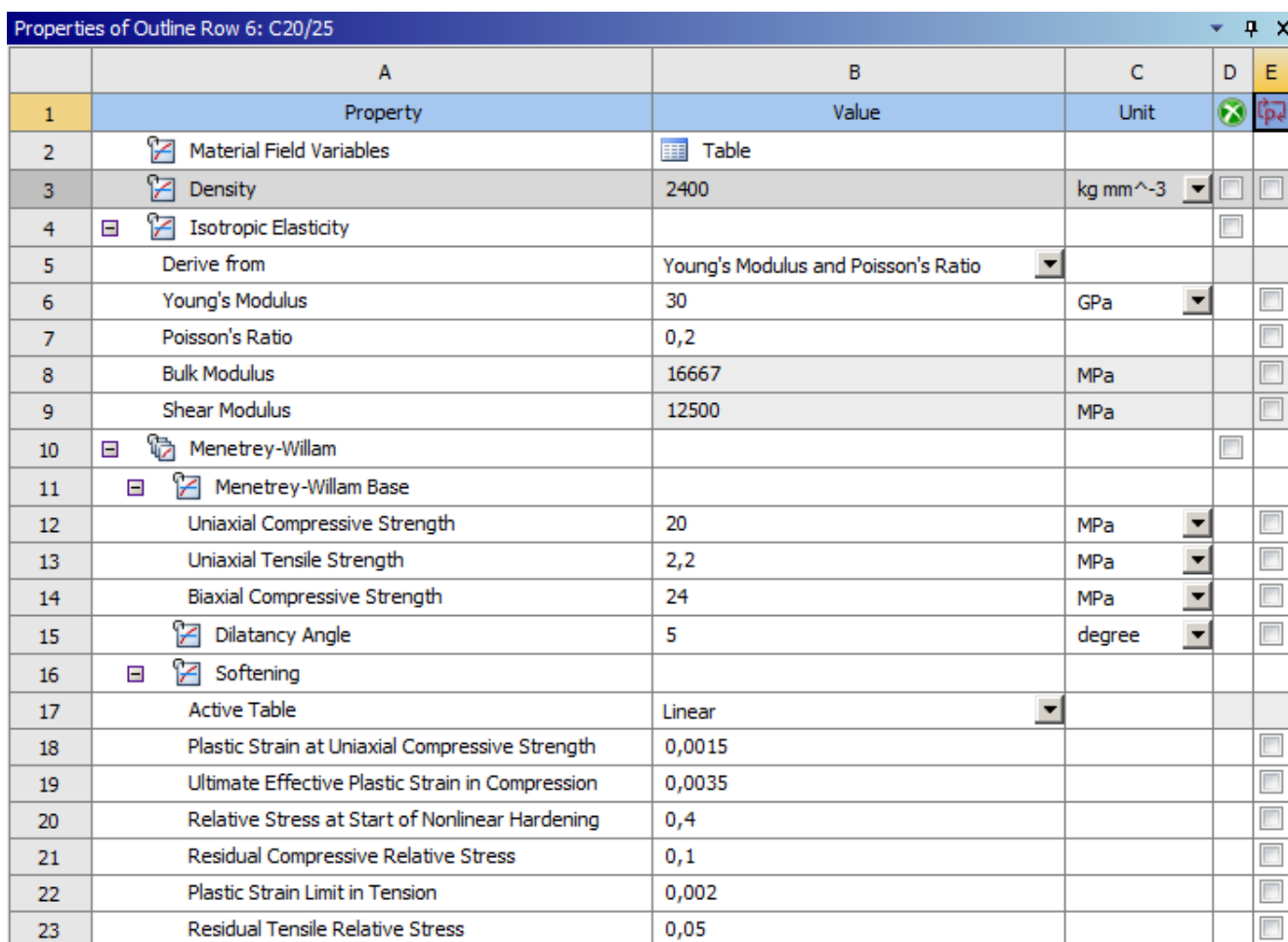


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд залізобетонної балки в середовищі ANSYS Mechanical із застосуванням повздожньої симетрії

Таким чином, фактично моделюється лише половина фізичної балки з перерізом 140x40 мм, а розраховується як повнорозмірна.

Поведінку матеріалів в ANSYS задано через відповідні нелінійні моделі. Для бетону класу міцності C20/25 використано модель Concrete Damage Plasticity на базі поверхні текучості Menetrey-Willam. У модуль Engineering Data введено наступні базові макроскопічні константи бетону: початковий модуль пружності $E_c = 30$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.2$, призмova міцність на стиск $f_{ck} = 20$ МПа та міцність на розтяг $f_{ctm} = 2.2$ МПа. Процеси утворення магістральних тріщин та крихкого роздроблення реалізовані через табличне задання параметрів пошкодження Softening, що описують деградацію матриці жорсткості матеріалу (рис. 2.3).



Properties of Outline Row 6: C20/25				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg mm ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
6	Young's Modulus	30	GPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	16667	MPa	
9	Shear Modulus	12500	MPa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	20	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	2,2	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	24	MPa	
15	Dilatancy Angle	5	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Linear		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,0015		
19	Ultimate Effective Plastic Strain in Compression	0,0035		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,4		
21	Residual Compressive Relative Stress	0,1		
22	Plastic Strain Limit in Tension	0,002		
23	Residual Tensile Relative Stress	0,05		

Рисунок 2.3 – Основні фізико-механічні характеристики бетону класу C20/25 для нелінійного розрахунку

Роботу сталевій арматури класу A400C описано пружно-пластичною моделлю з білінійним ізотропним зміцненням (Bilinear Isotropic Hardening, рис. 2.4). Константи матеріалу прийнято наступними: початковий модуль пружності $E_s = 200$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, межа текучості $f_y = 400$ МПа. Тангенціальний модуль зміцнення задано як 1% від модуля пружності (Young's Modulus). Це усуває ідеальну пластичність, імітує реальне зміцнення арматури та значно покращує збіжність вирішувача.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
5	Young's Modulus	200	GPa	<input type="checkbox"/>	
6	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>	
7	Bulk Modulus	1,6667E+05	MPa	<input type="checkbox"/>	
8	Shear Modulus	76923	MPa	<input type="checkbox"/>	
9	<input checked="" type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>	
10	Tangent Modulus Type	Plastic			
11	Yield Strength	400	MPa	<input type="checkbox"/>	
12	Tangent Modulus	2000	MPa	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 2.4 – Основні фізико-механічні характеристики арматури 400С

Для 300-мм вставки з NiTi застосовано спеціалізовану макроскопічну модель надпружності Shape Memory Alloy. Властивості нітинолу призначено на основі експериментальних даних: модуль пружності аустенітної фази $E_A = 72,4$ ГПа, модуль пружності мартенситної фази $E_M = 36,2$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,36$. Фазові переходи обмежені критичними напруженнями: початок прямого перетворення (Austenite to Martensite Starting Stress) $\sigma_s^{AS} = 332$ МПа, завершення прямого перетворення $\sigma_f^{AS} = 368$ МПа, початок оберненого перетворення (Martensite to Austenite Starting Stress) $\sigma_s^{MS} = 174$ МПа, завершення оберненого перетворення $\sigma_f^{MS} = 103$ МПа. Максимальне видовження до початку утворення пластичних деформацій $\varepsilon_L = 0,054$ [21].

Properties of Outline Row 4: NITI-bar					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
5	Young's Modulus	72,4	GPa		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,36			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	86190	MPa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	26618	MPa		<input type="checkbox"/>
9	Superelasticity			<input type="checkbox"/>	
10	Sigma SAS	332	MPa		<input type="checkbox"/>
11	Sigma FAS	368	MPa		<input type="checkbox"/>
12	Sigma SSA	174	MPa		<input type="checkbox"/>
13	Sigma FSA	103	MPa		<input type="checkbox"/>
14	Epsilon	0,054	m m ⁻¹		<input type="checkbox"/>
15	Alpha	0			<input type="checkbox"/>
16	Es	36,2	GPa		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.5 – Основні фізико-механічні характеристики надпружного нітинолу

2.2. Налаштування нелінійного розв'язувача та методу контролю переміщень (Displacement Control)

Вирішення просторової задачі згинання залізобетонної балки з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів здійснювалося в розрахунковому модулі Static Structural.

Дискретизацію всієї системи – як бетонного масиву, так і об'ємних циліндрів арматури – виконано за допомогою 20-вузлових об'ємних гексаедричних скінченних елементів типу SOLID186. Застосування єдиного типу об'ємних елементів для обох середовищ забезпечує повну сумісність вузлів на межах розподілу матеріалів та високоточну імітацію поверхневої взаємодії (Surface-to-Surface). З метою оптимізації машинного часу застосовано неоднорідну скінченно-елементну сітку (Mesh). Для тіла бетону задано поділ кожного ребра (Edge Sizing) рівно по 10 мм, що утворює правильну прямокутну сітку (рис. 2.6). У місцях закладання арматури, збіжність вузлів із тілом бетону забезпечена функцією багатозонального поділу (MultyZone). Таким чином, вузли сталеві арматури

повністю співпадають із вузлами бетону. Вузли стержнів з нітинолу не зв'язані із вузлами бетону, поділ сітки виконано програмним рівнем.

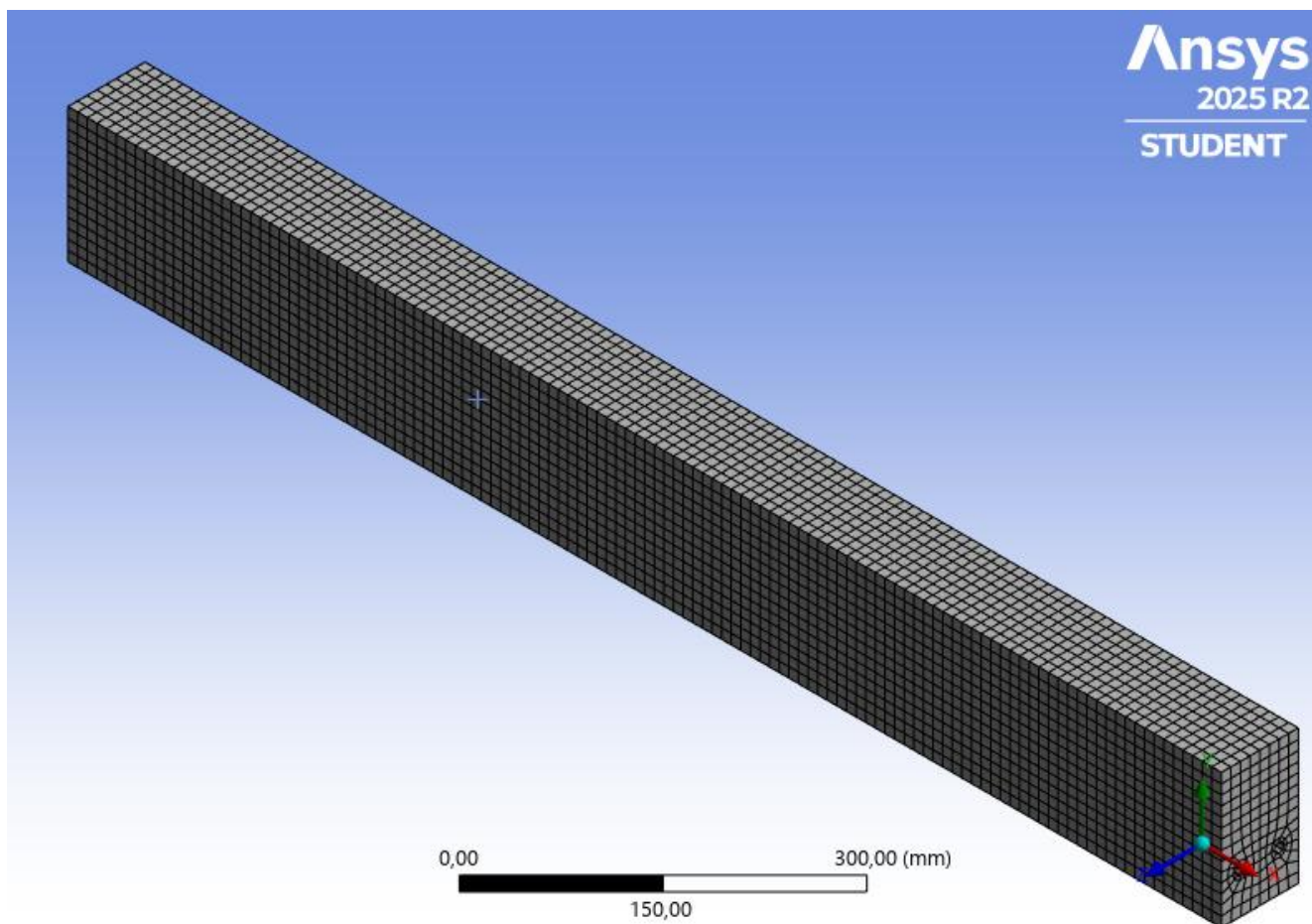


Рисунок 2.6 – Скінченно-елементна сітка тіла бетону

Для забезпечення збіжності ітераційного процесу активовано опцію врахування геометричної нелінійності (Large Deflection). Розв'язок системи нелінійних алгебраїчних рівнянь здійснювався за допомогою повного методу Ньютона-Рафсона (Full Newton-Raphson), який перераховує дотичну матрицю жорсткості на кожній підітерації навантаження. Налаштування вирішувача (Solver Controls) ілюструє рис. 2.7.

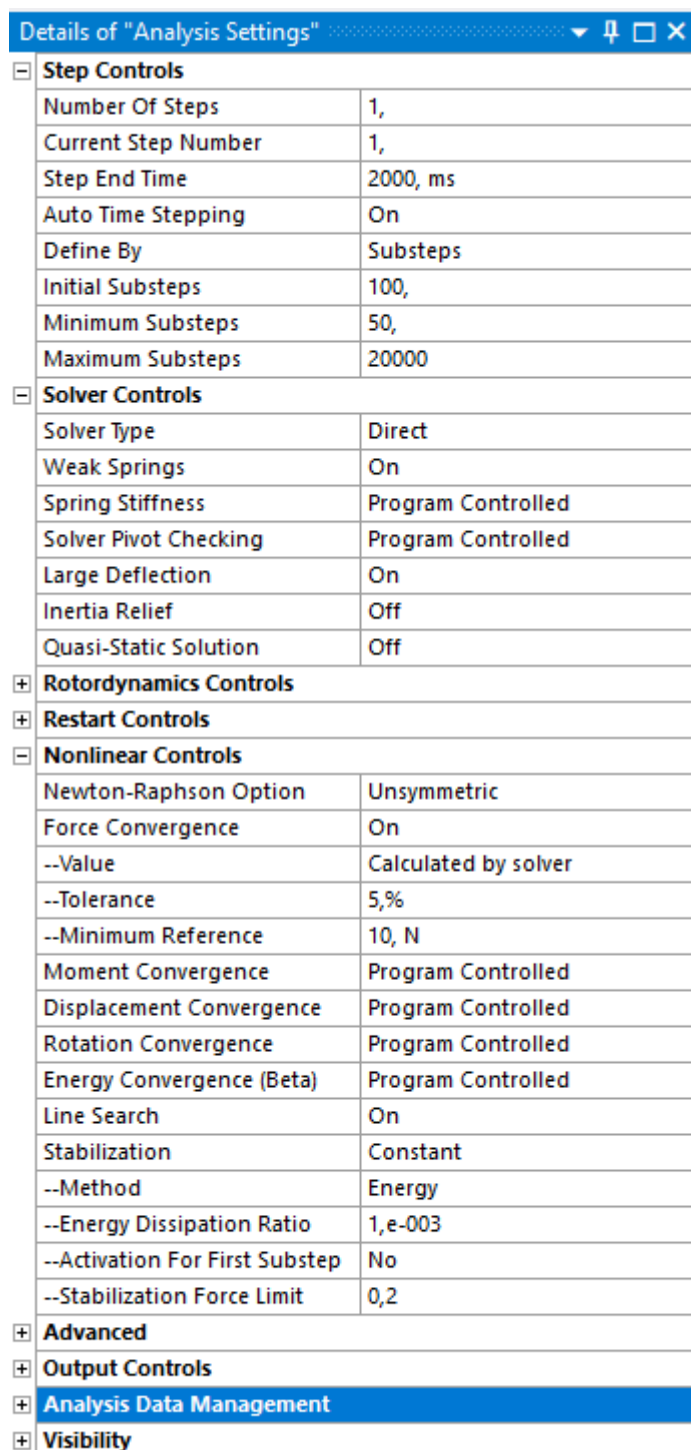


Рисунок 2.7 – Панель налаштувань Analysis Settings із активованими параметрами Large Deflection та алгоритмом Newton-Raphson

Моделювання контактної взаємодії (Contact Regions) відіграло вирішальну роль у задачі:

1) взаємодію традиційної сталеві арматури з бетоном змодельовано кінематичним зв'язком Bonded (жорстке зчеплення);

2) для 300-мм вставки з нітинолу, яка має гладку циліндричну поверхню, застосовано контактну пару типу Frictionless. Завдяки об'ємній геометрії арматури цей контакт повноцінно відпрацьовує по всій поверхні циліндра, дозволяючи SMA-елементу вільно видовжуватися у бетонному каналі (суперпластичність) без локального руйнування прилеглих скінченних елементів бетону;

3) вузол механічного з'єднання «Сталь – NiTi» реалізовано через поверхневий контакт торців циліндрів типу Bonded із математичним формулюванням MPC (Multipoint Constraint), що імітує абсолютно жорстку обжимну муфту.

Головною проблемою комп'ютерного моделювання крихких матеріалів є проходження вирішувачем пікової точки несучої здатності. При використанні традиційного силового навантаження (Force Control) досягнення балкою межі міцності спричиняє сингулярність матриці жорсткості (помилка Divergence). Для обходу цієї нестабільності застосовано кінематичний метод навантаження – Displacement Control. Кінематичне навантаження задавалося вертикально вниз (вектор $-\Delta u$) на вантажну пластину (рис. 2.8). Отримання результуючих зусиль у відповідь на задані переміщення здійснювалося за допомогою інструменту Force Reaction на опорних ділянках.

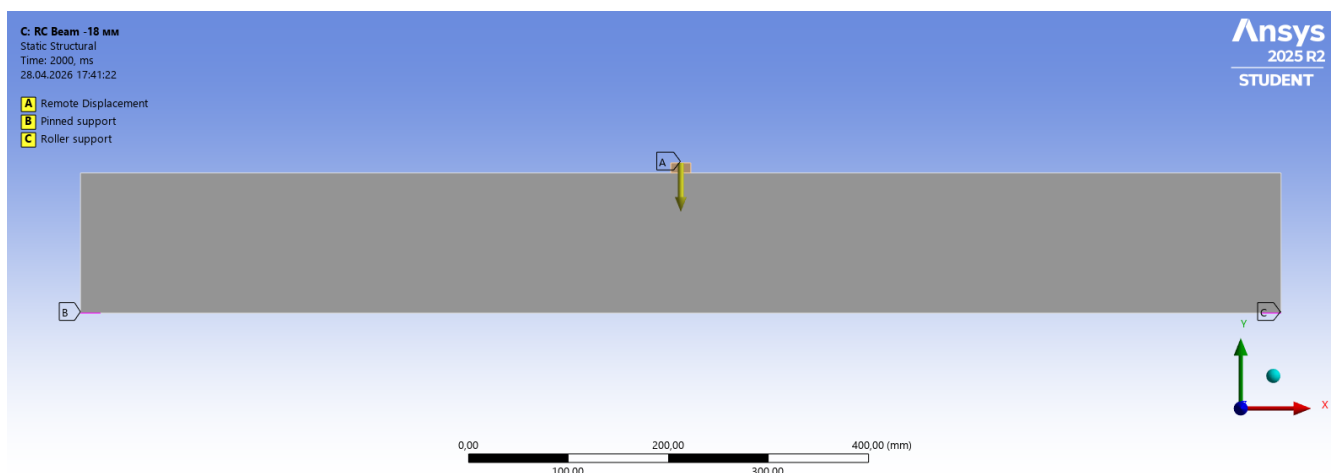


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема навантаження балки

Додатково застосовано механізм енергетичної стабілізації (Energy Dissipation), що згладжує локальні розриви матриці жорсткості при роздробленні

бетону, дозволяючи отримати повну низхідну гілку діаграми "навантаження–прогин".

2.3. Верифікація розрахункової схеми на контрольному зразку

Перед початком дослідження складної просторової роботи залізобетонної балки з гібридним SMA-армуванням, критично важливим етапом є верифікація базової скінченно-елементної моделі. З цією метою в середовищі ANSYS 2025 R2 було згенеровано модель контрольного зразка – класичної залізобетонної балки. Її геометрія (включаючи об'ємні циліндричні тіла арматури), розрахунковий проліт (1160 мм) та параметри сітки були абсолютно ідентичними до досліджуваної балки, проте армування виконано суцільним, використовуючи виключно сталеві стрижні класу A400C із зв'язком Bonded на всій довжині.

Адекватність роботи нелінійного вирішувача та вибраної моделі Concrete Damage Plasticity оцінювалася шляхом порівняння результатів СЕА-моделювання, отриманих у модулі Static Structural, із результатами класичного аналітичного розрахунку згідно з положеннями чинних будівельних норм (ДБН В.2.6-98:2009 / EN 1992-1-1). Для чисельного аналізу значення переміщень вантажної пластини та реакції опор (з інструменту Force Reaction) були експортовані з ANSYS. В аналітичному розрахунку визначалися базові реперні точки: значення несучої здатності (реакції опори R) та переміщень (f) на ключових стадіях роботи балки.

Вихідні характеристичні дані контрольної балки для аналітичного розрахунку:

- Габарити перерізу: $b = 80$ мм, $h = 140$ мм, робоча висота $d = 115$ мм;
- Розрахунковий проліт: $L_0 = 1160$ мм;
- Бетон C20/25: модуль пружності $E_{cm} = 30000$ МПа, міцність на розтяг $f_{ctm} = 2,2$ МПа, міцність на стиск $f_{ck} = 20$ МПа;
- Арматура (2Ø10 A400C): площа $A_s = 157$ мм², модуль пружності $E_s = 200000$ МПа, межа текучості $f_{yk} = 400$ МПа.

Аналітичний розрахунок базових параметрів деформування виконувався згідно з фундаментальними принципами опору залізобетону у два етапи.

Етап 1. Утворення нормальних тріщин (Пружна стадія I) Згинальний момент утворення тріщин у розтягнутій зоні бетону визначається за формулою 2.1:

$$M_{crc} = f_{ctm} \cdot W_I \quad (2.1)$$

де M_{crc} – це згинальний момент, при якому утворюються тріщини, кН·м; f_{ctm} – це середня міцність бетону на розтяг, МПа; W_I – це момент опору суцільного (непошкодженого) перерізу, мм³.

Для досліджуваного перерізу з моментом інерції $I_I = 18,29 \times 10^6$ мм⁴, розрахунковий момент опору становить $W_I = 2,61 \times 10^5$ мм³. Звідси $M_{crc} = 2,2 \cdot 2,61 \times 10^5 \times 10^{-6} \approx 0,57$ кН·м.

Для прийнятої розрахункової схеми триточкового згину загальне зусилля, що викликає утворення тріщини, та відповідний пружний прогин у центрі балки обчислюються за залежностями 2.2 та 2.3:

$$F_{crc} = \frac{4 \cdot M_{crc}}{L_0}; \quad (2.2)$$

$$f_{crc} = \frac{F_{crc} \cdot L_0^3}{48 \cdot E_{cm} \cdot I_I} \quad (2.3)$$

де F_{crc} – це загальне зосереджене зусилля утворення тріщини, кН; L_0 – це розрахунковий проліт балки, мм; f_{crc} – це прогин у момент утворення тріщини, мм; E_{cm} – це початковий модуль пружності бетону, МПа; I_I – це момент інерції непошкодженого перерізу, мм⁴.

Підставивши вихідні значення, отримуємо теоретичне загальне зусилля $F_{crc} = 1,98$ кН, що відповідає реакції опори $R_{crc} = F_{crc}/2 = 0,99$ кН, та пружний прогин $f_{crc} \approx 0,12$ мм.

Етап 2. Досягнення межі текучості арматури (Стадія II) Згинальний момент, що відповідає початку текучості розтягнутої арматури (вичерпанню несучої здатності на згин), розраховується з умов рівноваги перерізу з тріщиною:

$$M_y = A_s \cdot f_{yk} \cdot z \quad (2.4)$$

де M_y – це згинальний момент на початку текучості арматури, кН·м; A_s – це площа перерізу розтягнутої арматури, мм²; f_{yk} – це нормативна межа текучості сталі, МПа; z – це плече внутрішньої пари сил (для наближеного розрахунку приймається $z \approx 0,9d$), мм.

При робочій висоті $d = 115$ мм розрахунковий момент текучості становить $M_y = 6,49$ кН·м. Відповідне загальне зусилля на балку дорівнює $F_y = 22,38$ кН, що створює граничну реакцію опори $R_y = 11,19$ кН. Прогин балки з розкритими тріщинами ($I_{II} = 7,55 \times 10^6$ мм⁴) у цій точці обчислюється як:

$$f_y = \frac{F_y \cdot L_0^3}{48 \cdot E_{cm} \cdot I_{II}} \quad (2.5)$$

де f_y – це прогин на початку текучості арматури, мм; I_{II} – це момент інерції перерізу з тріщиною (Стадія II), мм⁴.

Результат обчислення дає теоретичний прогин $f_y = 3,21$ мм.

Для порівняння теоретичної (нормативної) несучої здатності із результатами комп'ютерного моделювання, отримані дані зведено у порівняльну табл. 2.1. Зазначимо, що в ANSYS фіксувалася реакція половини балки ($R = F/2$) з огляду на використання умови симетрії. Відхилення обчислювалось як процентне співвідношення різниці між числовими показниками СЕА-моделі та аналітичного розрахунку.

Результати порівняльного чисельно-аналітичного аналізу продемонстрували високу точність налаштованої СЕА-моделі щодо визначення головного параметра – граничної несучої здатності. Похибка у визначенні максимальної реакції опори (R_y) між теоретичним розрахунком та моделлю ANSYS склала лише 5,1 %, що є

відмінним показником для нелінійних МСЕ-задач. На діаграмі (рис.2.9) подано криву залежності зусилля $F = 2R_y$ від прогину f .

Таблиця 2.1 – Порівняння реперних точок деформування контрольної балки за нормативним аналітичним розрахунком та СЕА-моделлю (ANSYS)

Стадія роботи балки	Параметр	Аналітичний розрахунок	СЕА-модель (ANSYS)
Утворення тріщин	Прогин f_{crc} , мм	0,12	0,18
	Реакція опори R_{crc} , кН	0,99	1,51
Пік несучої здатності (текучість)	Прогин f_y , мм	3,21	5,41
	Реакція опори R_y , кН	11,19	10,62
Руйнування бетону	Прогин f_{ult} , мм	-	7,35
	Реакція опори R_{ult} , кН	-	7,01

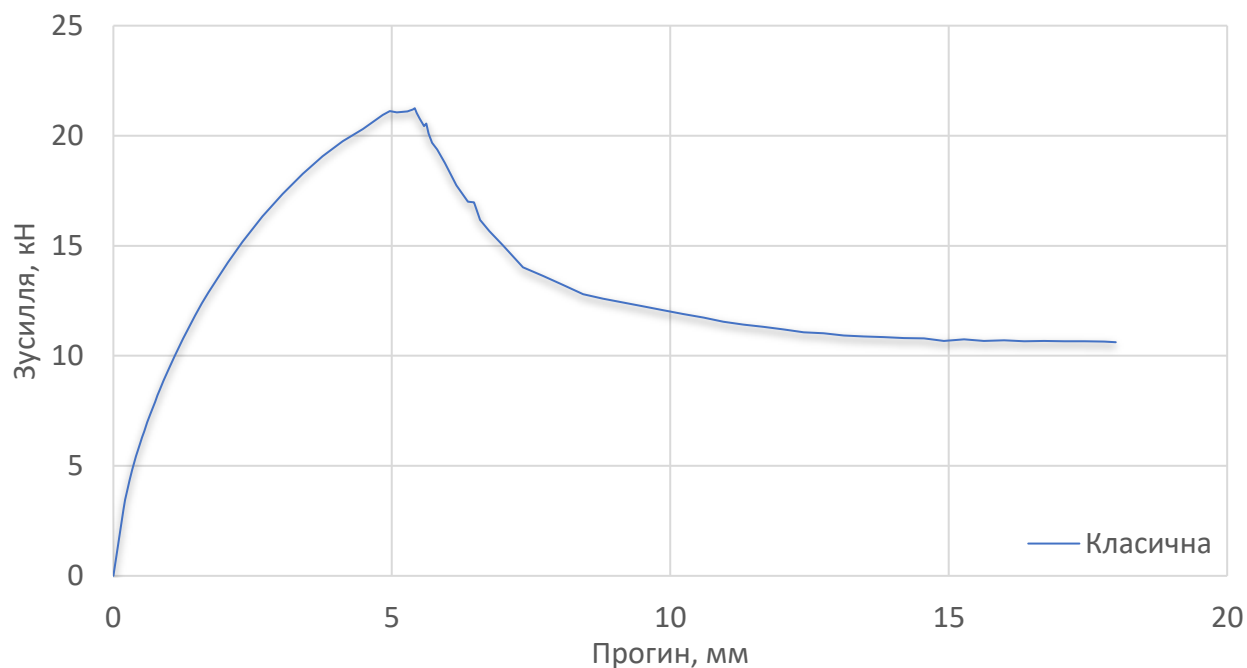


Рисунок 2.9 – Крива залежності зусилля від прогину залізобетонної балки із класичним армуванням

Водночас, зафіксовано значні відхилення у визначенні прогинів (до 68,5 %) та параметрів тріщиноутворення (близько 52,5 %). Така розбіжність є закономірною і має чітке фізичне обґрунтування. По-перше, нормативні формули базуються на жорсткій гіпотезі плоских перерізів і не враховують локальні

контактні деформації зминання під вантажною пластиною та на опорах, які неминуче виникають у тривимірній моделі (SOLID186). По-друге, спрощений аналітичний розрахунок за ДБН/Єврокодом будує ідеальну білінійну модель, де після досягнення текучості передбачається ідеальне горизонтальне плато (або миттєве руйнування). Натомість модель Concrete Damage Plasticity в ANSYS відтворює реальну фізику процесу: при інтенсивному видовженні арматури нейтральна вісь стрімко піднімається, спричиняючи поступове роздроблення бетону стиснутої зони. Це супроводжується деградацією жорсткості (softening branch), що відображається у більшій піддатливості системи (прогин 5,41 мм) та різкому падінні реакції опори до 7,01 кН на етапі повного руйнування. Така здатність відтворювати реальний механізм руйнування робить розроблену CEA-модель об'єктивно кращим та надійнішим інструментом для подальшого аналізу впливу гібридного армування з NiTi.

2.4. Висновки до розділу 2

Розроблено та оптимізовано просторову твердотільну нелінійну модель залізобетонної балки в середовищі ANSYS Workbench (Static Structural, 2025 R2 Student). Використання умов поздовжньої симетрії та застосування об'ємних гексаедричних скінченних елементів типу SOLID186 (як для бетону, так і для тривимірних циліндричних тіл арматури) забезпечило високоточне моделювання поверхневої контактної взаємодії (Surface-to-Surface) між різномодульними матеріалами. Поведінку бетону коректно імітовано за допомогою моделі Concrete Damage Plasticity, а роботу 300-мм гібридної вставки з нітинолу – за допомогою макроскопічної моделі Shape Memory Alloy (Auricchio).

Застосовано ефективний математичний апарат для проходження розрахунку через точки нестабільності. Використання методу кінематичного навантаження (Displacement Control) замість силового та активація алгоритмів енергетичної стабілізації (Energy Dissipation) дозволили подолати сингулярність матриці

жорсткості, викликану роздробленням бетону. Це створило математичні передумови для отримання повної низхідної гілки діаграми деформування (softening branch) за допомогою інструменту Force Reaction.

Проведено успішну верифікацію налаштованої скінченно-елементної схеми на класичному контрольному зразку. Доведено, що розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання (ANSYS) та суворим нормативним розрахунком несучої здатності за ДБН В.2.6-98:2009 становить лише 5,1 %. Різниця у прогинах та падінні реакції на етапі руйнування аргументовано пояснена здатністю МСЕ-моделі враховувати деградацію жорсткості бетону та тривимірні контактні деформації, що підтверджує наукову валідність розробленої моделі для подальшого аналізу впливу гібридного армування з NiTi.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НДС

3.1. Порівняння стадій НДС класичної та гібридної балок

Оцінку ефективності інтеграції сплавів із пам'яттю форми (SMA) виконано шляхом компаративного аналізу результатів нелінійного скінченно-елементного моделювання (СЕМ) двох типів конструктивних систем: контрольної балки (суцільне сталеве армування класу А400С) та інноваційної гібридної балки (із центральною 300-мм вставкою з надпружного NiTi). Інтегральним показником відгуку системи на зовнішнє навантаження обрано функціональну залежність «навантаження–прогин» (Load-Deflection), побудовану на основі даних реакцій опор (Force Reaction) та вузлових переміщень у zenіті балки (рис. 3.1).

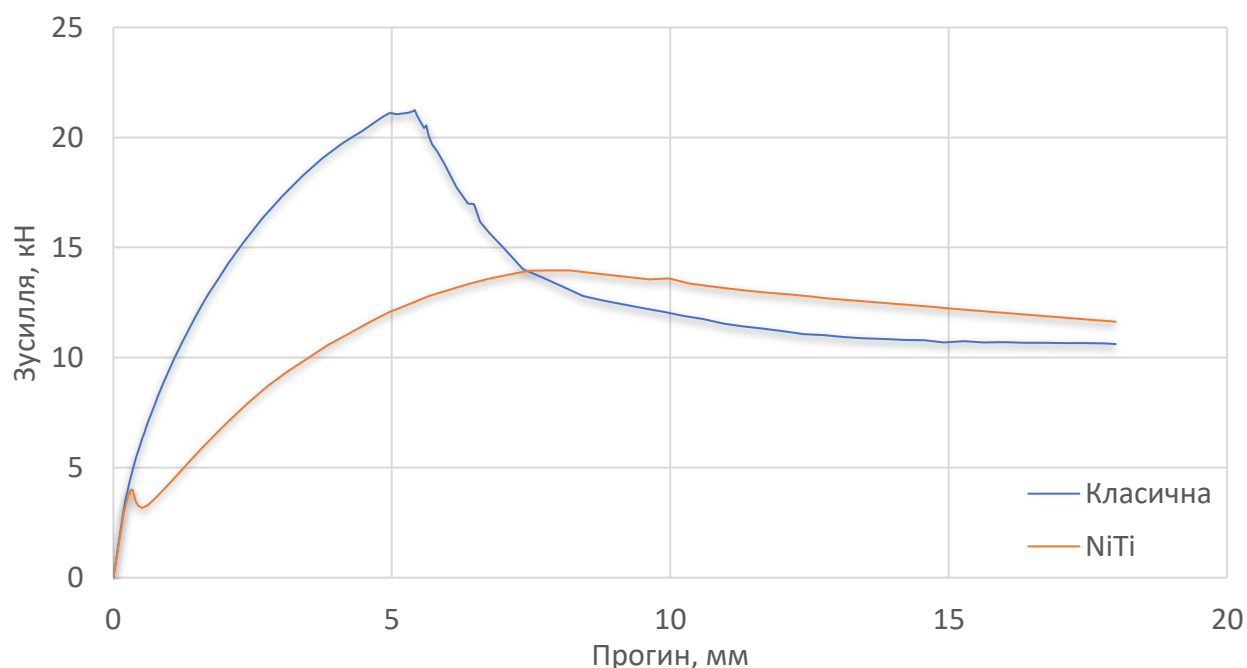


Рисунок 3.1 – Об'єднана діаграма «навантаження-прогин» для класичної та гібридно-армованої балок

Аналіз початкового етапу завантаження свідчить про те, що обидві конструкції демонструють практично ідентичну механічну поведінку на стадії пружної роботи (Стадія I) – до моменту подолання бетоном міцності на розтяг. За

результатами чисельного моделювання, зусилля утворення перших нормальних мікротріщин (F_{crc}) для контрольної балки становить 3,02 кН, а для гібридної – 2,88 кН, що супроводжується незначними прогинами ($\delta_{crc} \approx 0,18$ мм). Кут нахилу кривих на графіку, який характеризує початкову січну жорсткість перерізу, на цій стадії практично збігається (відхилення не перевищує 4,6 %), що підтверджується кількісними даними, зведеними у табл. 3.1.

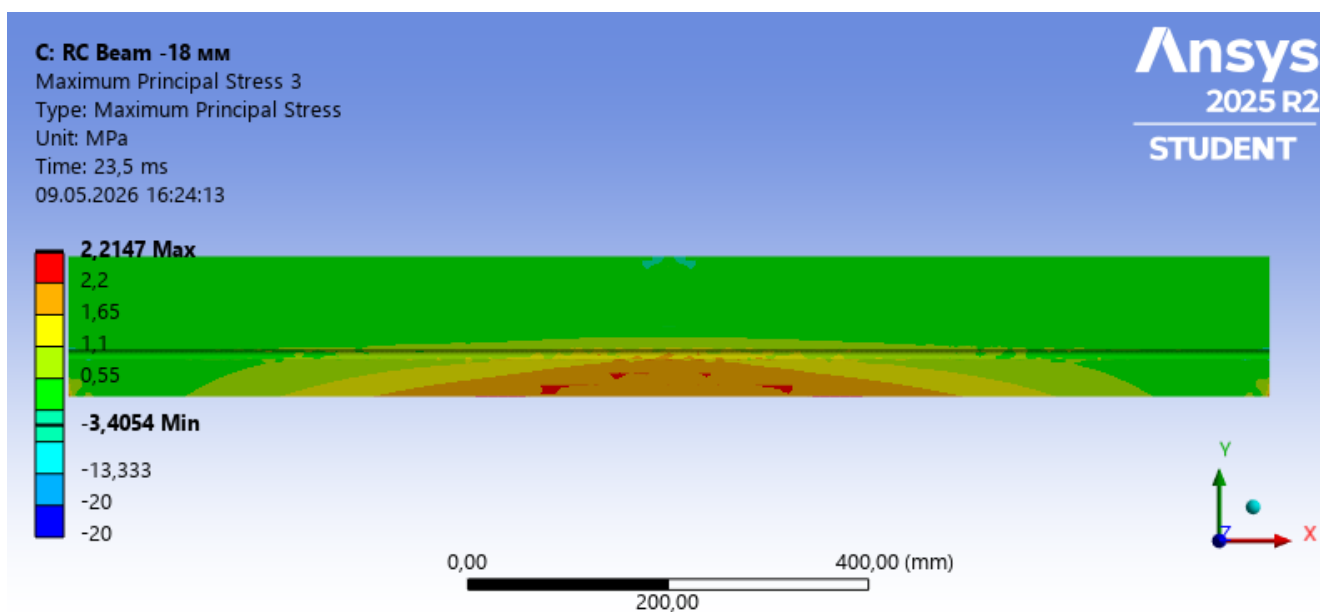
Таблиця 3.1 – Порівняння розрахункових параметрів НДС на межі утворення тріщин для контрольної та гібридної балок

Параметр	Контрольна балка	Гібридна балка
Зусилля утворення тріщин F_{crc} , кН	3,02	2,88
Прогин утворення тріщин δ_{crc} , мм	0,18	0,18
Початкова січна жорсткість K_I , кН/мм	8,39	8,00

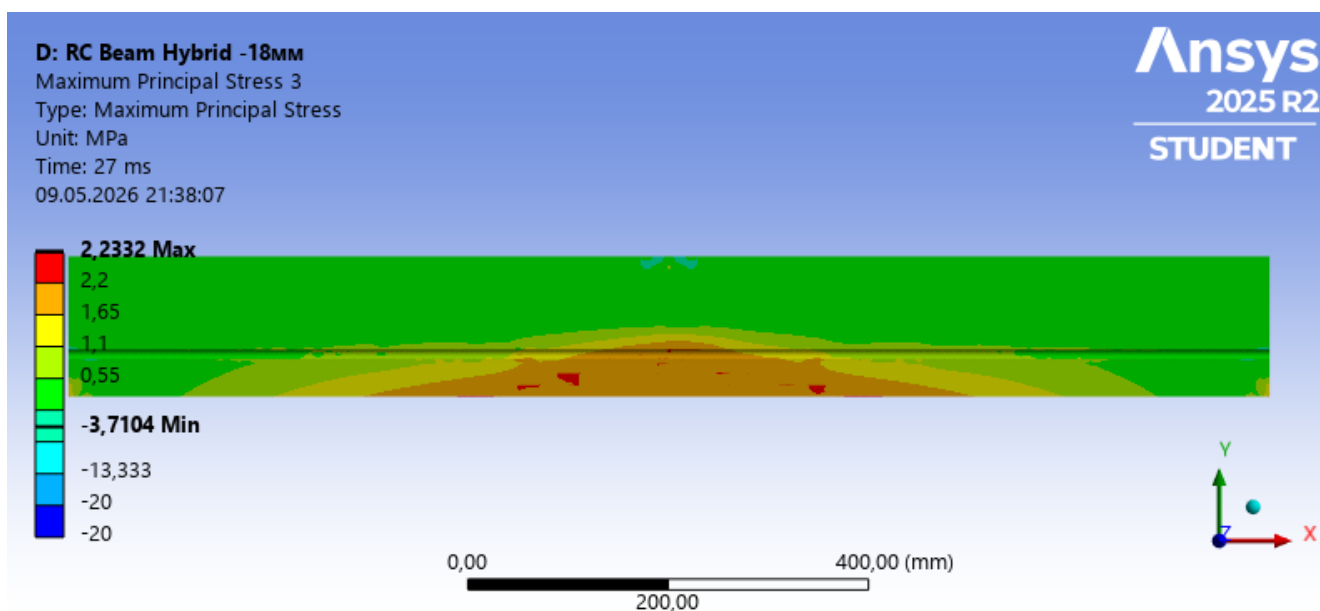
Цей факт є важливим науково-інженерним підтвердженням високої ефективності запропонованого гібридного рішення. Незначне зниження зусилля тріщиноутворення (на 4,6 %) у гібридної балки має чітке фізичне обґрунтування. Локальна заміна сталевих арматур на нітинол із суттєво нижчим модулем пружності (72,4 ГПа проти 200 ГПа) дещо зменшує момент інерції приведенного перерізу. Проте, оскільки на Стадії I переріз працює як суцільний і площа масивного бетонного перерізу (80×140 мм) домінує над площею арматури (157 мм^2), це зниження є некритичним і практично не впливає на загальну згинальну жорсткість балки в умовах нормальної експлуатації.

Із подальшим зростанням навантаження напруження у крайній розтягнутій грані бетону перевищують межу міцності на розтяг ($f_{ctm} = 2,2$ МПа). Відбувається миттєве скидання розтягувальних зусиль з бетонної матриці на арматурний каркас, що маркує перехід балок у пружно-пластичну стадію з тріщинами (Стадія II). Жорсткість обох систем закономірно знижується.

Візуалізація цього процесу за допомогою інструменту Maximum Principal Stress (який фіксує головні розтягувальні напруження) дозволяє відслідкувати картину тріщиноутворення (рис.3.2-3.5)



a)



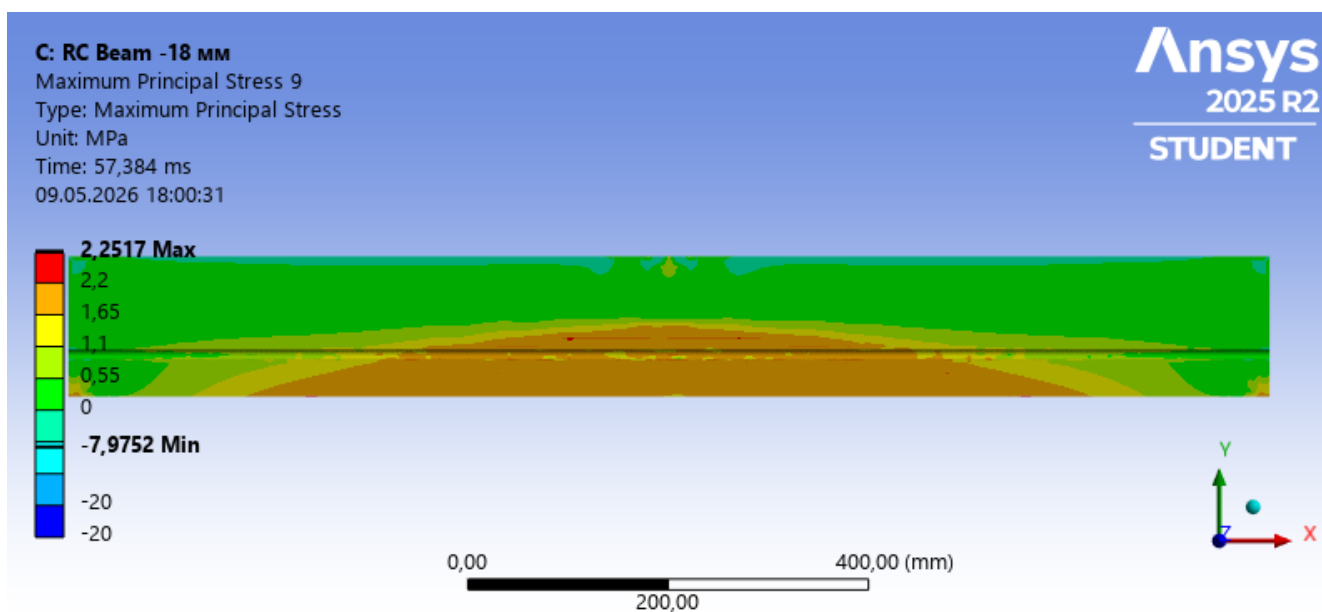
б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

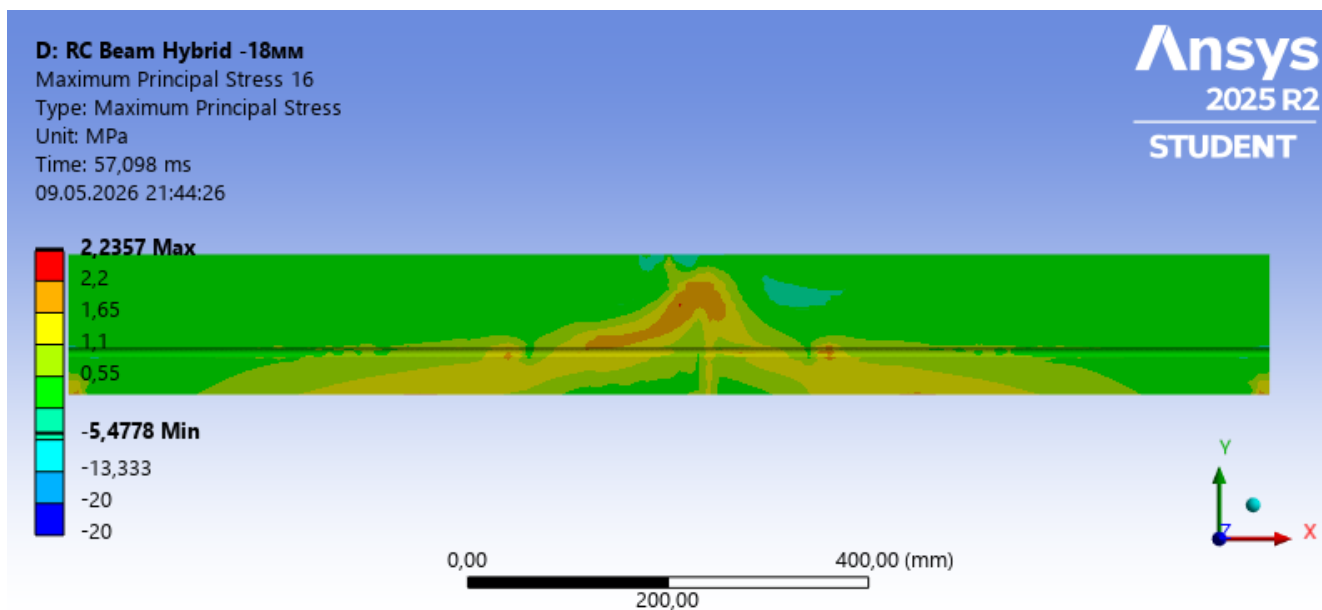
Рисунок 3.2 – Зародження мікротріщин у розтягнутій зоні

Як видно з хронограм розвитку пошкоджень (рис. 3.2), характер зародження та поширення магістральних тріщин для обох балок є ідентичним. Зони екстремальних головних напружень (відображені червоним кольором) формують класичну картину вертикальних нормальних тріщин у зоні чистого згину. Зі

зростанням навантаження ці тріщини розкриваються та просуваються вгору, прямуючи до нейтральної осі елемента (рис. 3.3-3.4)



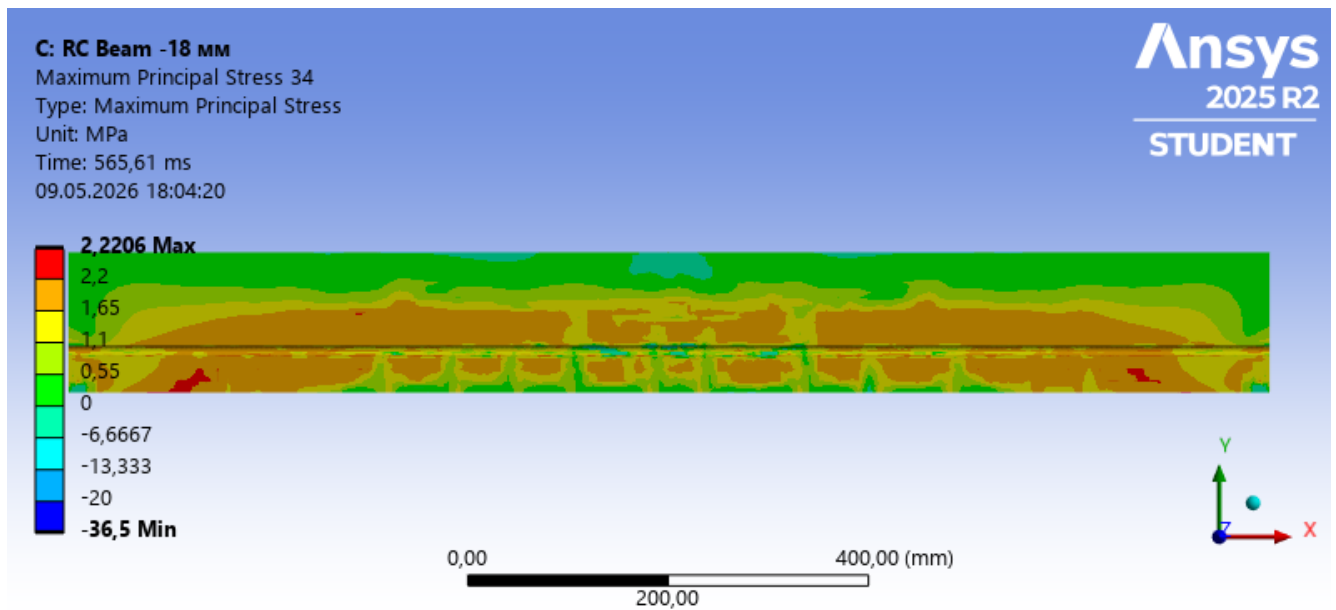
a)



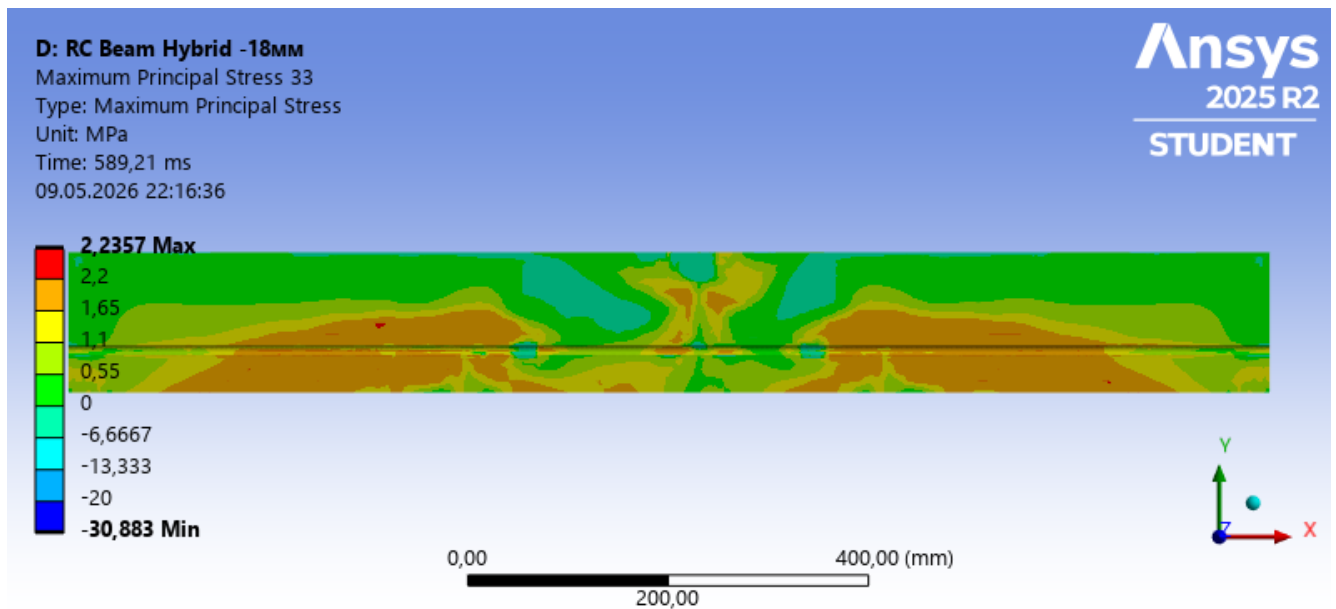
б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.3 – Поширення максимальних головних напружень



a)



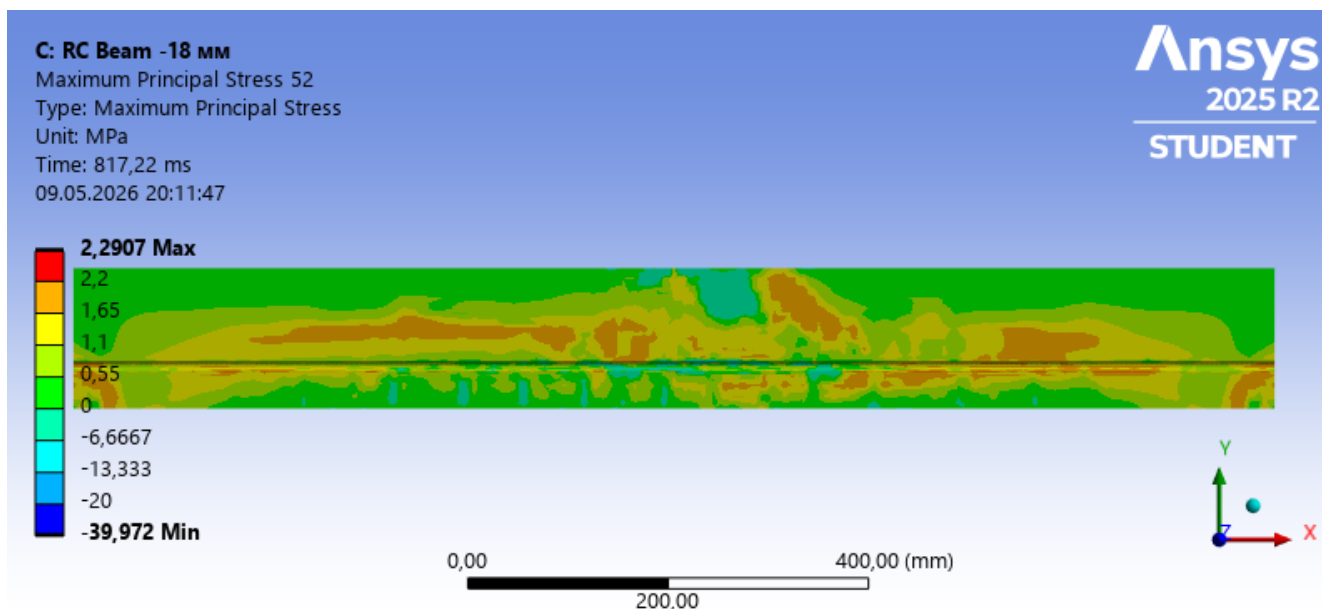
б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

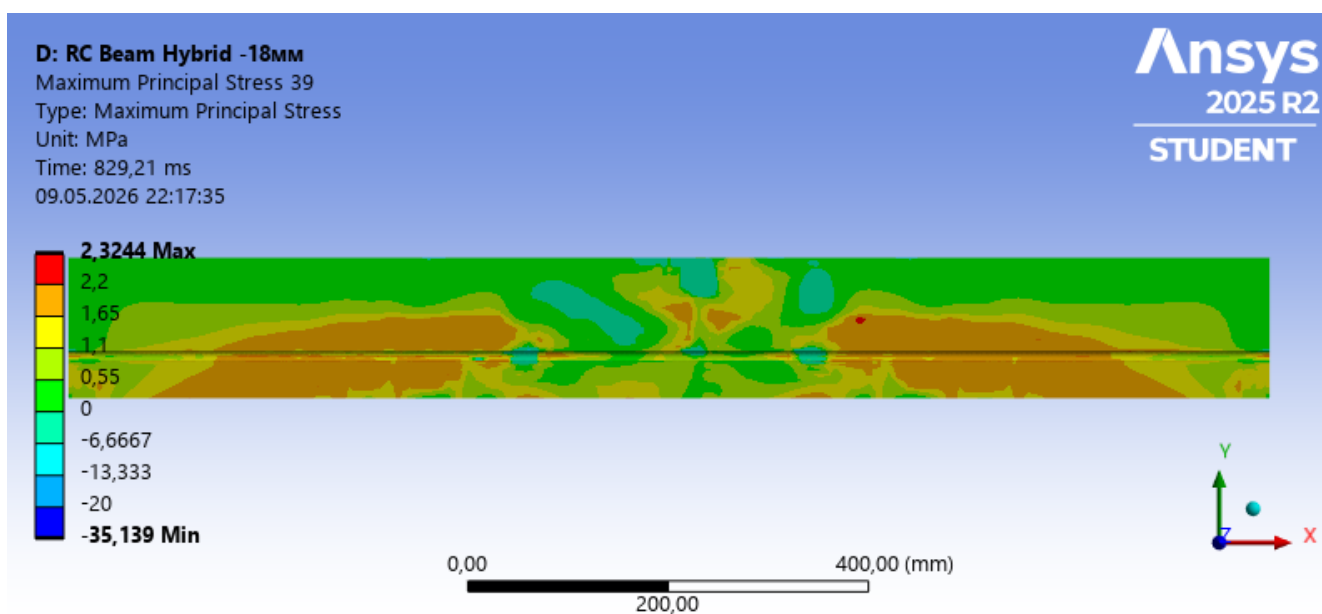
Рисунок 3.4 – Поширення вертикальних тріщин

Порівняльний аналіз роботи досліджуваних зразків на цьому етапі виконано відносно спільного кінематичного параметра – величини прогину. Аж до досягнення прогину близько 5,4 мм гібридна балка деформується подібно до контрольної. Нітиолова вставка на цьому етапі надійно сприймає розтягувальні зусилля: оскільки напруження у тілі NiTi ще не досягли критичного порогу ініціації

фазового перетворення (332 МПа), матеріал працює суто в межах пружної стадії (аустеніту), а жорсткість контактних вузлів (кінематичний зв'язок Bonded) забезпечує сумісність деформацій.



a)



б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.5 – Розподіл головних напружень при прогині 7,35 мм

Після подолання межі прогину в 5,4 мм у нітиноових стержнях починаються фазові перетворення (SMT). Варто наголосити, що сталева арматура у балці

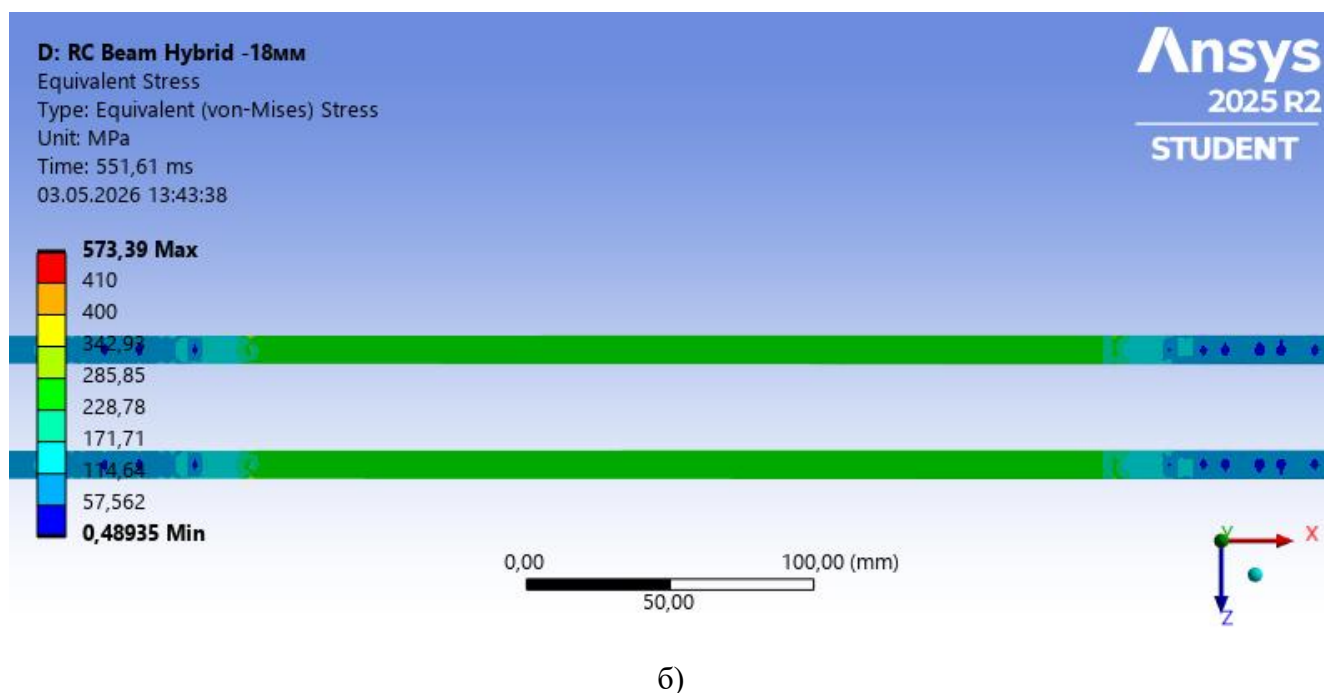
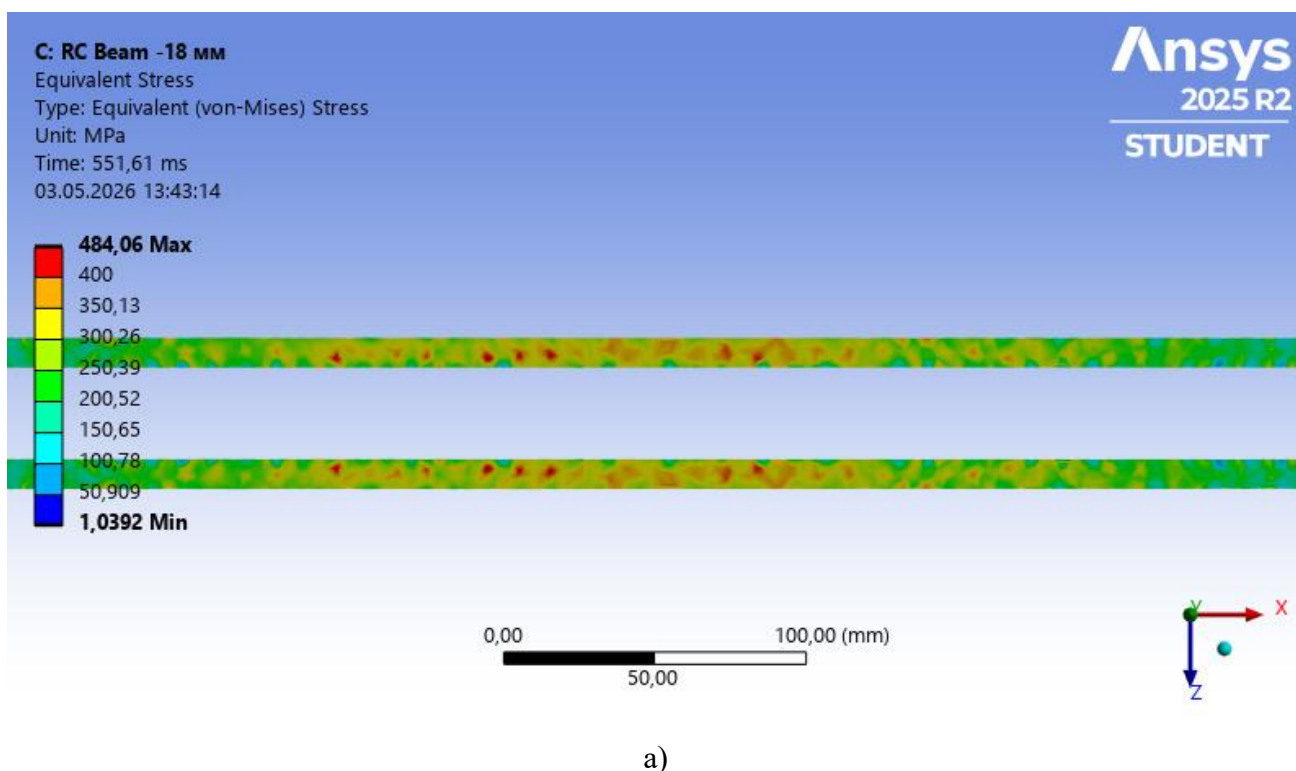
класичного армування ще до досягнення цього значення прогину почала перетинати характеристичну межу текучості 400 МПа та зазнавати незворотних пластичних деформацій.

3.2. Дослідження формування «надпружного шарніра» та ефекту високої деформативності

Принципова дивергенція в характері роботи конструкцій розпочинається на етапі вичерпання несучої здатності та переходу матеріалів у пластичну стадію. Для детального аналізу цього явища було зафіксовано просторовий напружений стан арматурних каркасів (із приховуванням тіла бетону) на контрольній часовій мітці $t = 551,61$ мс, що відповідає однаковому прогину $\delta \approx 5,41$ мм для обох моделей.

Класична залізобетонна балка, згідно з результатами розрахунку, на цьому етапі досягає свого силового піку ($F_{max} \approx 21,24$ кН). Як видно з епюри еквівалентних напружень за Мізесом (рис. 3.3, а), сталева арматура перетинає межу текучості: зона інтенсивних пластичних деформацій (напруження ≥ 400 МПа, що відображено червоним кольором на Легенді, з максимумами до ≈ 484 МПа) поширюється на значну довжину центральної третини прольоту. Це призводить до незворотної деградації жорсткості каркаса.

Натомість детальний аналіз гібридної балки (рис. 3.3, б) виявив специфічний механізм роботи. Скінченно-елементний аналіз зафіксував пікові напруження (понад 500 МПа) виключно у крайніх вузлах 300-мм циліндра NiTi, що дотикаються до сталеві арматури. З позицій механіки суцільного середовища, це явище є класичною концентрацією напружень (stress singularity), викликаною різким перепадом жорсткостей контактуючих матеріалів (200 ГПа у сталі, 72,4 ГПа у нітинолі) та математичною природою кінематичного зв'язку MPC (Bonded), який імітує абсолютно жорстку обжимну муфту.



а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.6 – Розподіл еквівалентних напружень в армуванні при $t = 551,61$ мс

Проте, в основному масиві тіла нітинолу еквівалентні напруження досягають максимального значення 364 МПа. Оскільки цей показник об'єктивно перевищує поріг ініціації прямого фазового перетворення ($\sigma_s^{AS} = 332$ МПа), це науково доводить ключовий факт: матеріал вийшов на надпружне плато. Відбувається

активна трансформація кристалічної ґратки (напруженням-індуковане мартенситне перетворення – SIMT), що супроводжується різким падінням дотичного модуля жорсткості.

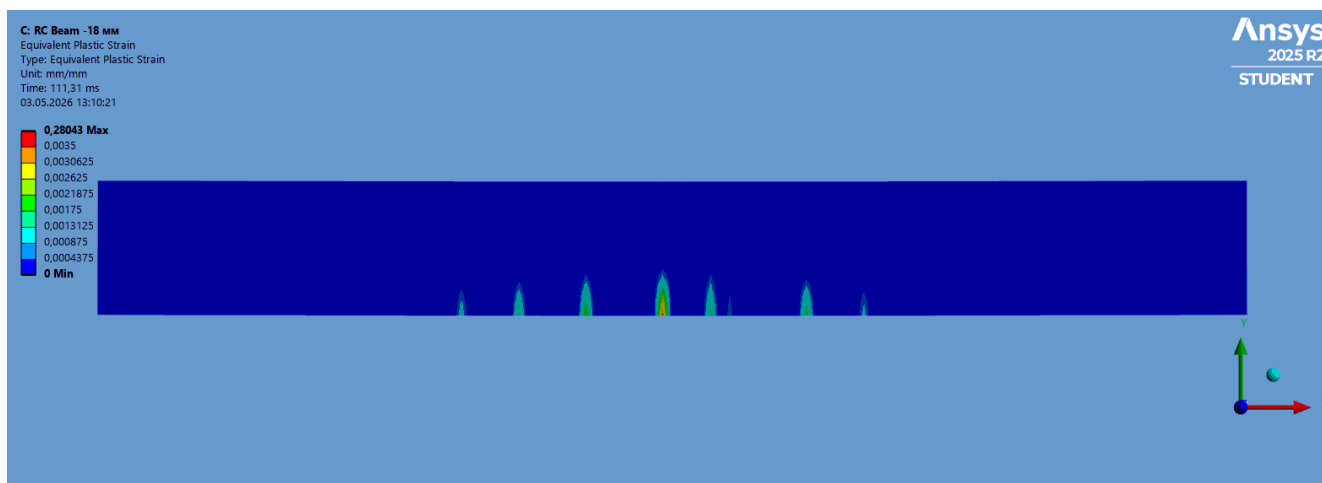
Саме цей фазовий перехід дозволяє нітиноловій вставці акумулювати значні відносні деформації на рівні $\varepsilon = 0,0046$. Завдяки цьому в центральній зоні прольоту формується повноцінний «надпружний шарнір», який акумулює макродеформації подовження і оберігає решту конструкції від перенапруження.

Як наслідок, при подальших макродеформаціях балки основна сталева арматура класу А400С залишається повністю у пружній стадії роботи. На епюрі (рис. 3.6, б) сталеві анкерні ділянки забарвлені у сині та зелені кольори, що свідчить про напруження, які значно нижчі за межу текучості. Таким чином, гібридна вставка надійно захищає робочу арматуру від руйнування.

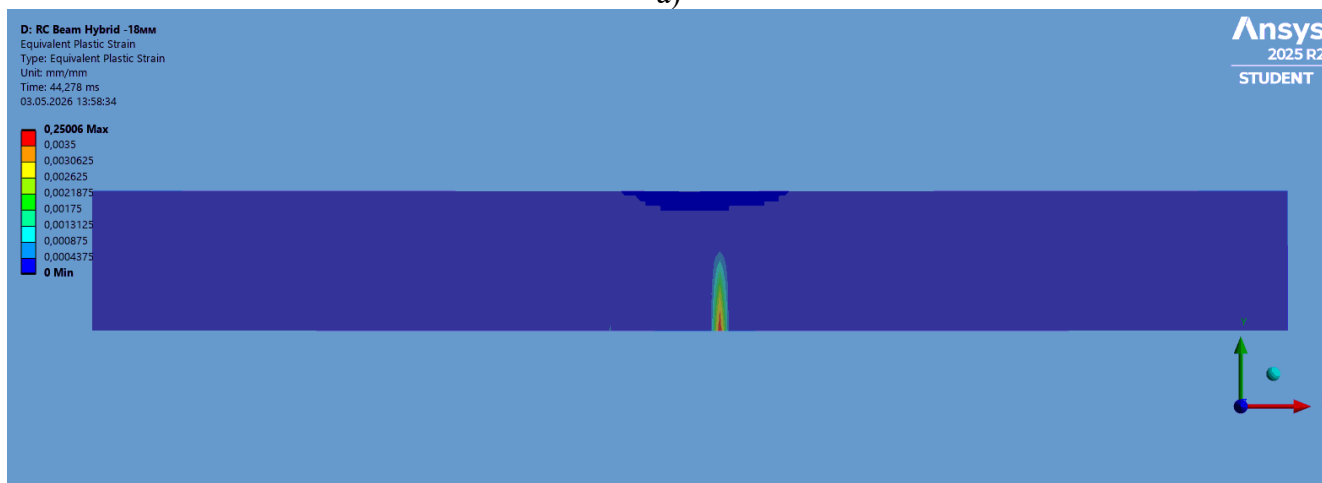
Ефект «надпружного шарніра» також кардинально змінює картину тріщиноутворення, що наочно підтверджується хронограмами еквівалентних пластичних деформацій у розтягнутій зоні бетону (рис. 3.7-3.9).

У моделі з гібридним арматурним стержнем розвиток пластичних деформацій має переважно локалізований характер. Найбільші значення зосереджуються в центральній частині елемента, поблизу зони максимального згинального впливу, тоді як в інших ділянках балки рівень пластичного деформування залишається порівняно невисоким. Це свідчить про те, що наявність нітинолового включення впливає на перерозподіл напружено-деформованого стану та сприяє обмеженню поширення пластичних деформацій у розтягнутій зоні бетону.

Для балки з класичним армуванням картина деформування є суттєво іншою. У цьому випадку пластичні деформації в розтягнутій зоні бетону поширюються більш рівномірно вздовж значної частини прольоту та супроводжуються формуванням множинних локальних осередків, що відповідають розвитку нормальних тріщин. Такий характер розподілу є типовим для традиційно армованих згинальних елементів і відображає поступове розкриття та накопичення тріщин у зоні розтягу.



а)



б)

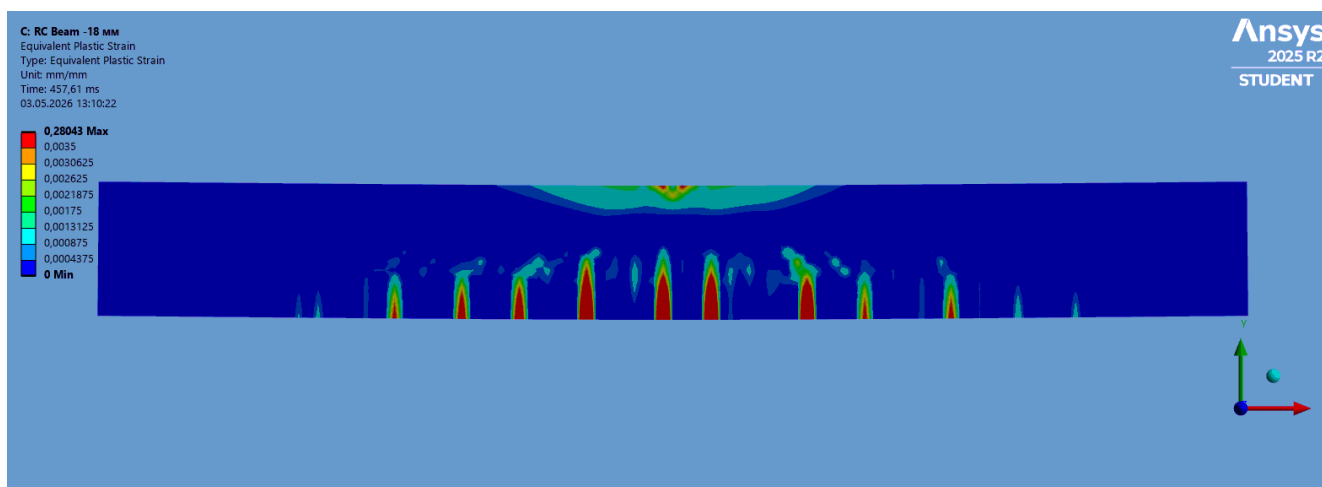
а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.7 – Поява перших пластичних деформацій

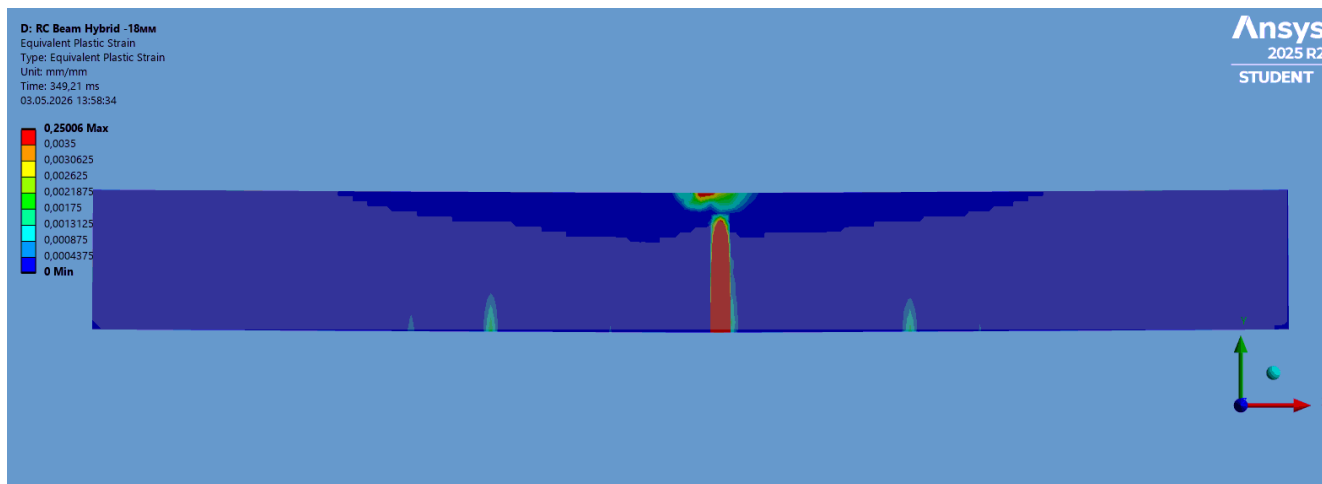
Порівняння отриманих результатів дає підстави стверджувати, що застосування гібридного стержня з нітиноловою вставкою змінює механізм деформування балки, зменшуючи інтенсивність і протяжність тріщиноутворення, а також забезпечуючи більш локалізоване протікання пластичних процесів порівняно з традиційним сталевим армуванням.

На стадії граничного стану, що відповідає повному руйнуванню поперечного перерізу бетону (рис. 3.9), на обох моделях спостерігається змикання зон пластичних деформацій у стиснутій та розтягнутій областях, тобто формується суцільна траєкторія пошкодження через усю висоту перерізу. Для балки з традиційним армуванням цей процес супроводжується інтенсивним розвитком похилої та вертикально орієнтованої зони локалізації деформацій у середині

прольоту, яка поєднує верхню стиснуту й нижню розтягнуту частини перерізу. Такий характер деформування вказує на втрату суцільності бетонного перерізу внаслідок розвитку та об'єднання нормальних і похилих тріщин, що є ознакою вичерпання несучої здатності елемента. При цьому значна кількість локальних осередків пластичних деформацій у розтягнутій зоні свідчить про попередній багатоосередковий розвиток тріщиноутворення, типовий для класично армованих залізобетонних балок.



а)



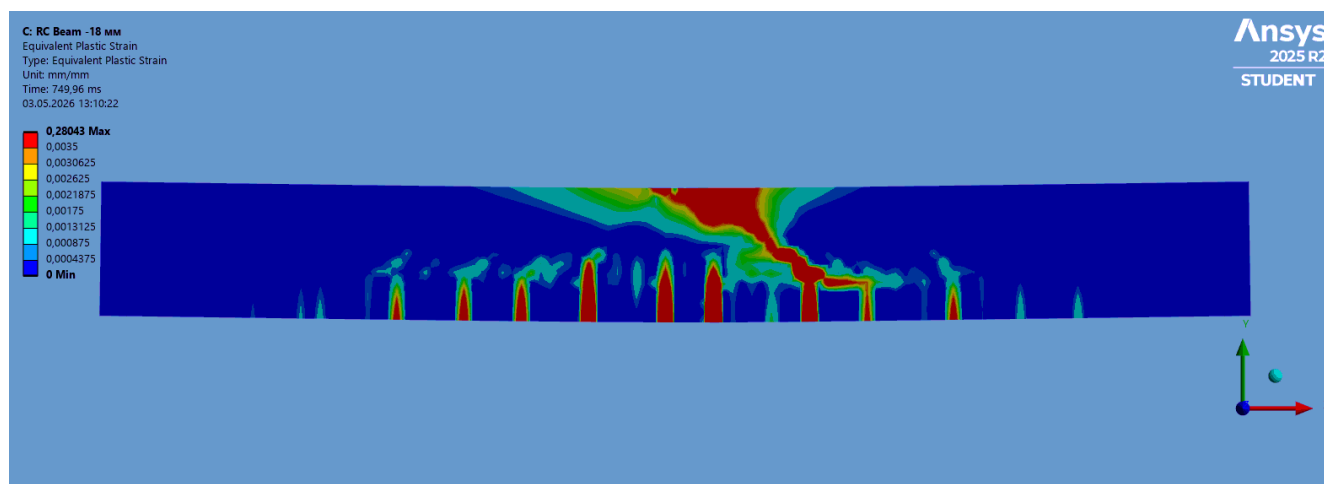
б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

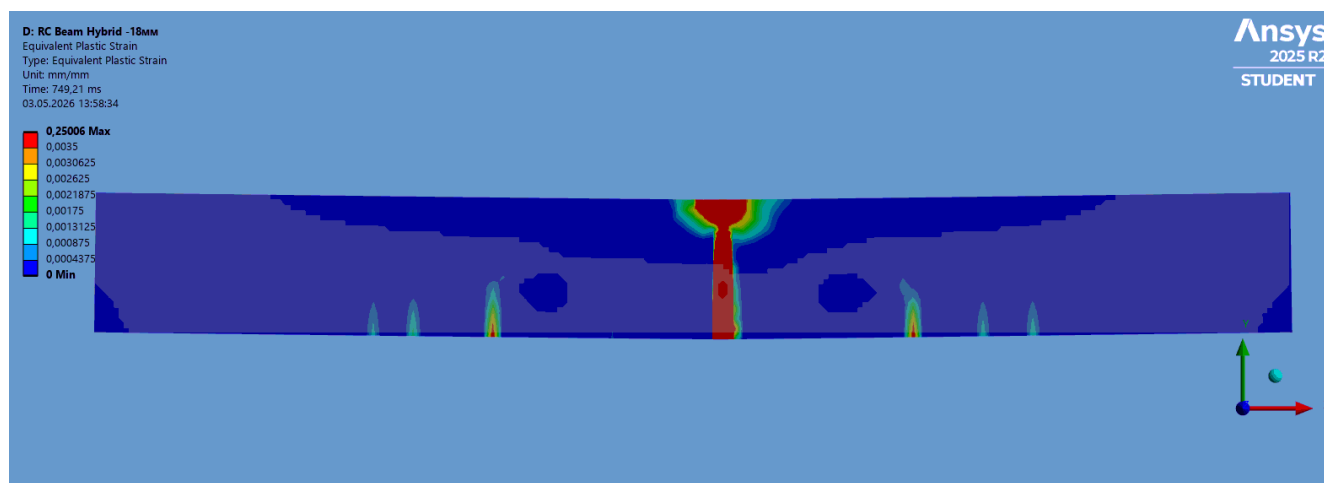
Рисунок 3.8 – Поява пластичних деформацій під навантажувальною пластиною

У випадку балки з гібридним армуванням повне руйнування перерізу (рис. 3.9,б) також супроводжується формуванням безперервної зони граничних пластичних деформацій, однак розвиток пошкоджень має більш локалізований

характер і зосереджується переважно в центральній частині елемента. На відміну від балки з традиційним армуванням, для якої характерне поширене багатоосередкове тріщиноутворення в розтягнутій зоні та поступове об'єднання нормальних і похилих тріщин, у гібридній балці пластичні деформації менше поширюються вздовж прольоту і концентруються в межах критичного перерізу. Це свідчить про зміну механізму деформування та руйнування бетонного елемента за наявності нітинолової вставки, яка сприяє стримуванню розвитку тріщин і забезпечує здатність конструкції сприймати більші деформації без передчасної втрати цілісності.



а)



б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.9 – Повне руйнування поперечного перерізу

Отже, виявлені особливості напружено-деформованого стану дають підстави перейти до кількісної оцінки високодеформативного ефекту гібридного армування за показниками граничного прогину та індексу деформівності.

Для кількісної оцінки високодеформативного ефекту використано індекс деформівності (Ductility Index, $\mu = f_{ult}/f_y$). За умови прогину початку текучості (для класичного армування) $f_y = 5,41$ мм, класична балка руйнується при $f_{ult} = 7,35$ мм, демонструючи індекс $\mu_{class} = 1,35$. Натомість гібридна балка досягає граничного прогину $f_{ult} = 15,5$ мм, і її показник сягає $\mu_{SMA} = 2,86$. Таким чином, гібридне армування об'єктивно збільшує пластичність конструкції у 2,1 раза.

Ключовим результатом є демпфуючий вплив SMA-вставки на сталеві ділянки каркаса. Завдяки високій податливості нітинолу у фазі трансформації, напруження в основній сталевій арматурі залишаються в межах пружної зони, що виключає ризик залишкових деформацій каркаса після зняття навантаження. Компаративна оцінка інтегральних показників пластичності наведена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Показники деформівності та живучості досліджуваних систем

Параметр	Контроль (Сталь)	Гібрид (Steel + NiTi)	Ефект
Граничний прогин f_{ult} , мм	7,35	15,50	+111 %
Індекс деформівності μ	1,35	2,86	x 2,12
Стан сталеві арматури	Пластичність	Пружність	Захист

Збільшення індексу деформативності у 2,1 раза обумовлює високий потенціал дисипації енергії ($W = \int P d$), що візуалізується значно більшою площею під кривою деформування гібридної балки (рис. 3.1). Така поведінка є критично важливою для забезпечення живучості споруд при сейсмічних впливах, оскільки дозволяє конструкції адаптивно реагувати на надмірні зміщення без раптового колапсу.

3.3. Аналіз напружень у стиснутій зоні бетону та проблема крихкого руйнування

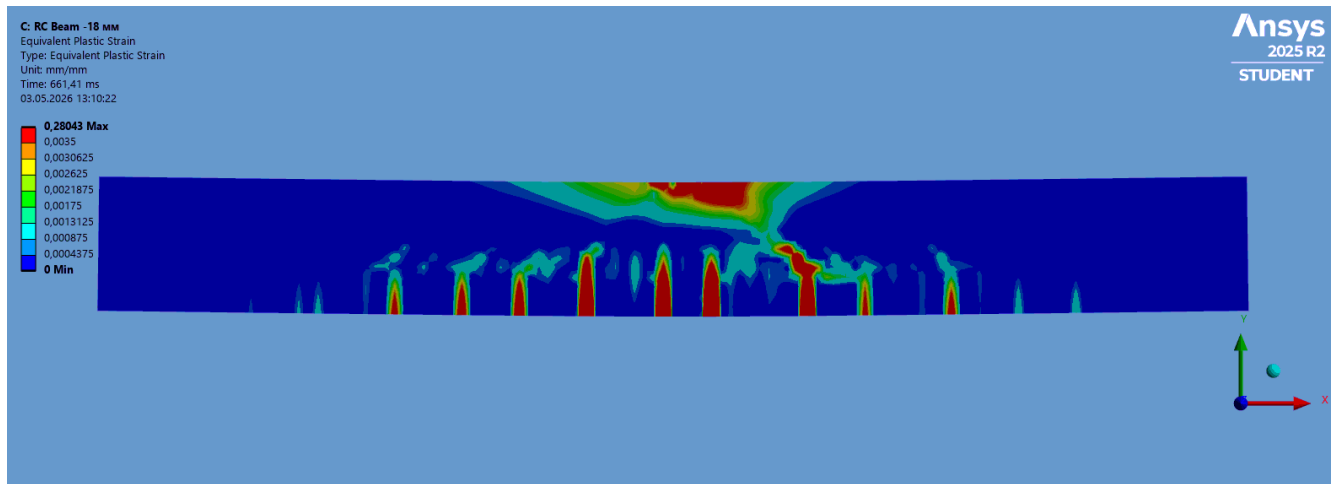
Попри визначні переваги у забезпеченні загальної пластичності та захисту сталеві арматури, результати аналізу напруженого стану виявили критичне інженерне "вузьке місце", пов'язане з гібридним армуванням. Балка руйнується задовго до вичерпання міцності як сталі, так і нітинолу.

Механізм цього явища чітко пояснюється фундаментальними рівняннями рівноваги перерізу згинального елемента. Внутрішнє зусилля стиску в бетоні (C) завжди має зрівноважувати зусилля розтягу в арматурі (T). Оскільки SMA-арматура має надзвичайно високу піддатливість (60 ГПа), вона зазнає інтенсивного пружного подовження, яке додатково полегшується відсутністю зчеплення з бетоном на ділянці 300 мм (контакт Frictionless).

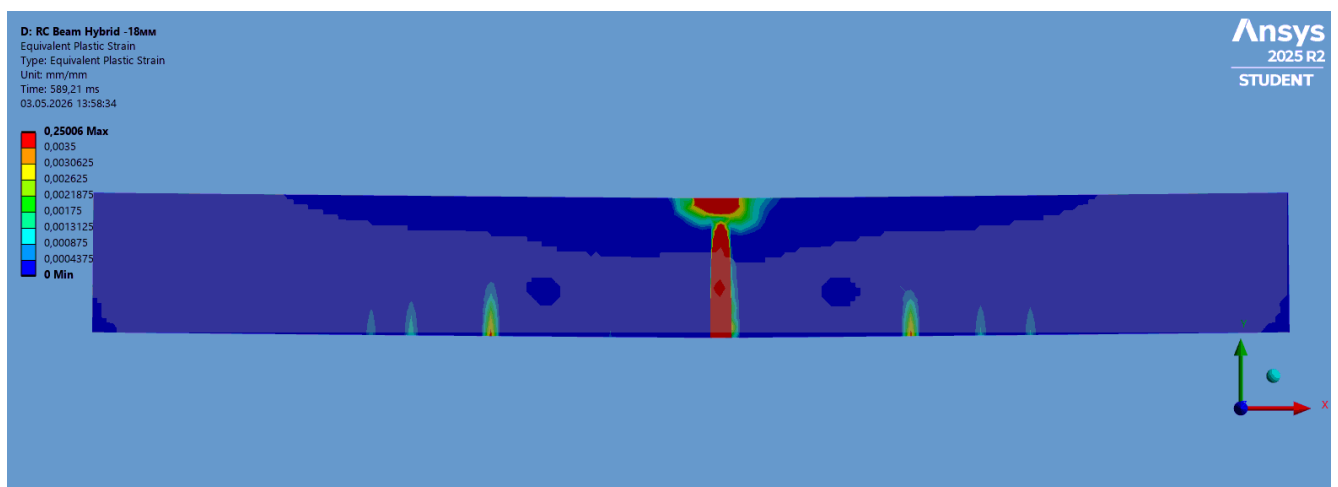
Для збереження умови рівноваги ($C = T$) та дотримання гіпотези плоских перерізів, бетонна матриця змушена компенсувати ці надмірні деформації розтягнутої фібри. Це призводить до стрімкого підняття нейтральної осі балки вгору. Як наслідок, ефективна висота стиснутої зони бетону (x) критично зменшується, перетворюючись на вузьку смугу, де концентруються екстремальні стискаючі напруження.

Кількісний аналіз напруженого стану підтверджує цю фізичну картину. Аналіз епюр еквівалентних пластичних деформацій (Equivalent Plastic Strain) показує масивну локалізацію пошкоджень під вантажною пластиною (рис. 3.9).

Як видно з рис. 3.10, де шкалу напружень (Legend) було вручну відкалібровано за нормативним фізичним лімітом Єврокоду 2, відносні деформації стиску у верхній фібри гібридної балки при прогині 15,5 мм масово і глибоко перевищують допустиме значення $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$ (або 3,5‰). Фізично це означає повне незворотне роздроблення бетонної матриці (настання граничного стану ULS). Математичний вирішувач продовжує фіксувати деформації у цих елементах лише завдяки алгоритму енергетичної стабілізації (Concrete Damage Plasticity).



а)



б)

а – балка із класичним армуванням; б – балка із гібридним армуванням.

Рисунок 3.10 – Розподіл еквівалентних пластичних деформацій у стиснутій зоні бетону перед моментом руйнування

Отже, доведено, що вичерпання несучої здатності гібридної балки лімітується виключно крихкістю бетону стиснутої зони в умовах одноосного стиску. Для повної реалізації деформативного потенціалу нітинолу конструкція критично потребує заходів із непрямого армування бетону.

3.4. Висновки до розділу 3

Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану підтвердив, що застосування 300-мм гібридної вставки з NiTi не призводить до зниження загальної

жорсткості балки на початковій (пружній) стадії експлуатації. Адекватна робота конструкції зберігається аж до навантажень, що відповідають початку текучості звичайної сталі, про що свідчить ідеальний збіг графіків обох балок до прогину $\approx 5,4$ мм.

Скінченно-елементне моделювання виявило унікальний феномен роботи гібридного армування: висока піддатливість NiTi в аустенітній фазі ($E_A = 60$ ГПа) формує ефект "пружного шарніра". Встановлено, що вставка бере на себе макродеформації, не переходячи у мартенситну фазу, що дозволяє збільшити індекс деформативності балки у 2,1 раза (збільшення прогину з 7,35 мм до 15,5 мм) та захищає основну сталеву арматуру балки від незворотних пластичних деформацій.

Ідентифіковано критичне "вузьке місце" гібридно-армованих згинальних елементів. Чисельно доведено, що інтенсивне пружне подовження NiTi зумовлює стрімке підняття нейтральної осі. Аналіз еквівалентних пластичних деформацій бетону зафіксував масове перевищення нормативної межі $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$, що фізично відповідає передчасному крихкому роздробленню бетонної матриці задовго до вичерпання несучої здатності самої арматури. Це вимагає обов'язкової розробки конструктивних заходів (непрямого армування) для підсилення стиснутої зони.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1. Пропозиції щодо конструктивного підсилення стиснутої зони

За результатами чисельного аналізу, наведеного у попередньому розділі, встановлено, що головною перешкодою для повної реалізації надпружного потенціалу вставок з нітинолу є передчасне роздроблення стиснутої зони бетону. Для вирішення цієї інженерної проблеми необхідно штучно підвищити граничну деформативність бетону на стиск.

Найбільш ефективним конструктивним заходом є застосування посиленого непрямого поперечного армування. З точки зору механіки деформівного твердого тіла, при наближенні напружень стиску до призмової міцності (f_{ck}) коефіцієнт поперечного розширення бетону (ефект Пуассона) стрімко зростає. Бетонна матриця починає інтенсивно розширюватися у поперечних напрямках. Встановлення густої сітки замкнених поперечних хомутів перешкоджає цим деформаціям. Розтягуючись, хомути створюють зворотний боковий тиск на бетонне ядро, перетворюючи одновісний стиск на об'ємний (тривісний) напружений стан. У результаті такого «ефекту об'їми» (confinement) суттєво підвищується як пікова міцність бетону, так і його гранична деформативність на низхідній гілці діаграми $\sigma - \epsilon$.

Підходи до розрахунку бетону в умовах об'ємного напруженого стану відрізняються у європейській та вітчизняній нормативних базах. Чинні українські норми ДБН В.2.6-98:2009 мають обмежений формульний апарат для розрахунку непрямого армування саме згинальних елементів, акцентуючи увагу переважно на центрально-стиснутих колонах. Тому для прогнозування поведінки пластичного шарніра в гібридній балці доцільно використовувати аналітичну модель Єврокоду 2 (EN 1992-1-1, п. 3.1.9 «Confined concrete»), яка надає чіткі залежності для обчислення приведених характеристик.

Спираючись на фізичну суть ефекту об'ємного напруженого стану, розроблено практичну рекомендацію: у середній третині прольоту балки (на ділянці довжиною 350 ... 400 мм, що перекриває зону розміщення SMA-вставки) необхідно встановити замкнені поперечні хомути зі зменшеним кроком.

Для теоретичного підтвердження ефективності цього рішення виконано аналітичний розрахунок. Приймаємо конструктивне армування хомутами з арматури класу B500C (розрахунковий опір $f_{ywd} \approx 435$ МПа) діаметром $d_w = 6$ мм та кроком $s = 50$ мм. Габарити бетонного ядра всередині хомутів (за вирахуванням захисного шару) становлять орієнтовно $b_c \times h_c = 50 \times 110$ мм.

Об'ємний коефіцієнт поперечного армування (ρ_w) розраховується як відношення об'єму хомутів до об'єму бетонного ядра на кроці s :

$$\rho_w = \frac{2 \cdot A_{sw} \cdot (b_c + h_c)}{b_c \cdot h_c \cdot s} \quad (4.1)$$

де $A_{sw} = 28,3$ мм² — площа перерізу одного стрижня хомута діаметром 6 мм.

Ефективний боковий тиск (σ_2), що створюється таким армуванням, з урахуванням коефіцієнта ефективності об'єми для прямокутних перерізів ($K_e \approx 0,75$), визначається: $\sigma_2 = 0,5 \cdot \rho_w \cdot f_{ywd} \cdot K_e$ і становить 5,38 МПа.

Згідно з EN 1992-1-1, наявність такого бокового тиску дозволяє обчислити нове, підвищене значення міцності бетону стиснутої зони ($f_{ck,c}$) та розширену границю деформативності ($\varepsilon_{cu2,c}$). Приймаючи базовий клас бетону C20/25 ($f_{ck} = 20$ МПа) та обчислений тиск $\sigma_2 > 0,05f_{ck}$, характеристики модифікованого бетону складатимуть:

$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot \left(1,125 + 2,50 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) = 20 \cdot \left(1,125 + 2,50 \cdot \frac{5,38}{20} \right) \approx 35,9 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} = 0,0035 + 0,2 \cdot \frac{5,38}{20} \approx 0,0573$$

Розрахунок доводить, що зменшення кроку хомутів до 50 мм не лише збільшує локальну міцність бетону на 79 %, але й радикально підвищує його деформативність (від нормативних 0,0035 до 0,0573). Це зніме лімітуюче

обмеження стиснутої зони та дозволить гібридній балці реалізувати весь потенціал надпружності нітинолової вставки.

Альтернативним або доповнюючим інженерним рішенням є локальне використання високоміцних бетонів (HSC – High Strength Concrete) класів C40/50 або C50/60 у зоні пластичного шарніра. Механіка цього підходу ґрунтується на умові рівноваги зусиль у перерізі ($C = T$). Збільшення призмової міцності бетону (f_{ck}) удвічі пропорційно зменшує висоту стиснутої зони (x), необхідну для зрівноваження розтягувальних зусиль від арматури. Це уповільнює підняття нейтральної осі та відтерміновує руйнування. Однак варто враховувати, що високоміцні бетони відзначаються підвищеною внутрішньою крихкістю (їх власна гранична деформація ϵ_{cu2} іноді знижується до 0,0026). Тому технічно найдосконалішим рішенням для максимізації живучості є комбінація обох методів: використання високоміцного бетону, конфайнментованого густою сіткою непрямого армування (Confined HSC).

4.2. Розрахунок економічної ефективності та живучості конструкції

Впровадження сплавів з пам'яттю форми у практику цивільного будівництва стримується їх високою вартістю. Еквіатомний нітинол (NiTi) у вигляді стрижнів є у десятки разів дорожчим за традиційну будівельну сталь класу A400C, що робить його використання у масовому житловому будівництві економічно нерентабельним на етапі капітальних інвестицій.

Проте, економічна ефективність застосування інтелектуальних матеріалів має розраховуватись не за прямими витратами на будівництво, а за методологією LCC (Life-Cycle Cost – вартість життєвого циклу) будівлі чи споруди.

Концепція гібридного армування, де дорогий нітинол застосовується виключно у вигляді коротких вставок (у нашому випадку 300 мм) у зонах максимальних моментів, є компромісним рішенням, що дозволяє різко скоротити обсяги використання SMA без втрати ефекту надпружності.

Економічна вигода від застосування такого рішення проявляється на етапі експлуатації в умовах екстремальних навантажень (сильні землетруси, техногенні вибухи, динамічні удари). Класична залізобетонна конструкція після дії пікового сейсмічного навантаження отримує незворотні залишкові деформації та масивні розкриті тріщини. Відновлення такої будівлі часто є неможливим, що призводить до необхідності її повного демонтажу та колосальних економічних збитків.

Натомість застосування NiTi забезпечує ефект надпружності (суперпластичності) та самоцентрування, що має глибоке термомеханічне обґрунтування. Під час пікового навантаження енергія дисипується за рахунок прямого перетворення (утворення напруженням-індукованого мартенситу). При знятті навантаження ініціюється зворотне фазове перетворення (з мартенситу в аустеніт), яке починається при падінні напружень до 174 МПа і повністю завершується при 103 МПа.

Цей гістерезисний цикл дозволяє гібридній балці після надзвичайної події відновити свою початкову геометрію, фізично закриваючи макротріщини. Капітальні витрати на етапі будівництва повністю компенсуються відсутністю збитків від руйнування та нульовими або мінімальними витратами на ремонт.

З огляду на це, застосування запропонованого гібридного армування є технічно та економічно доцільним виключно для об'єктів критичної інфраструктури, вихід з ладу яких є недопустимим:

- Атомні та гідроелектростанції;
- Мости та шляхопроводи стратегічного значення;
- Урядові будівлі та командні пункти;
- Висотні споруди в регіонах з підвищеною сейсмічною активністю.

4.3. Висновки до розділу 4

Для усунення проблеми передчасного роздроблення бетону та повної реалізації надпружного потенціалу NiTi сформульовано рекомендацію щодо

посиленого непрямого поперечного армування. Встановлено, що в зоні пластичного шарніра (на довжині 350 ...400 мм у центрі прольоту балки) необхідно розташовувати замкнені хомути з кроком не більше 50 мм, що створить об'ємний напружений стан бетону. Зазначено, що для розрахунку параметрів такого бетону доцільно використовувати аналітичний апарат Єврокоду 2 [37].

За результатами техніко-економічного аналізу доведено, що висока вартість сплавів з пам'яттю форми виправдовує їх застосування у вигляді локальних вставок лише при оцінці вартості життєвого циклу (LCC) споруди. Впровадження гібридного армування є економічно доцільним для об'єктів критичної інфраструктури, де початкові витрати повністю компенсуються здатністю конструкції до самовідновлення та уникненням катастрофічних руйнувань під час землетрусів чи інших екстремальних впливів.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Правила безпеки при роботі на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100

При виконанні моделюванні поведінки залізобетонної балки зі вставкою з надпружного Ni-Ti сплаву використано характеристики

Характеристики надпружного Ni-Ti сплаву отримані під час випробування зразка на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100.

Перед визначенням характеристик зразка надпружного Ni-Ti сплаву, ознайомлено та проведено інструктаж з охорони праці та техніки безпеки при роботі на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100.

Надана для вивчення інструкція технічної експлуатації випробувальної машини СТМ-100 (далі – Інструкція) розроблена відповідно до законів України, нормативно-правових актів Кабінету Міністрів України, міжгалузевих і галузевих нормативних документів з організаційних і технічних питань функціонування силового випробувального обладнання для механічних випробувань. Також, Інструкція встановлює основні організаційні і технічні вимоги до надійної та економічної експлуатації випробуваного силового обладнання та його окремих частин.

Загальні вимоги безпеки Інструкції наголошують, що у разі модернізації випробувальної машини СТМ-100, проєктні нормативні документи мають відповідати державним стандартам, технічним умовам на устаткування та вимогам цієї Інструкції. Працювати тільки на обладнанні, до якого допущені, і виконувати роботу, що доручені керівником. Потрібно зосередити увагу на виконання роботи, не відволікатись на сторонні справи і розмови, не відволікати інших. Рекомендується не допускати на своє робоче місце осіб, котрі не мають відношення до дорученої роботи. Без дозволу керівника не довіряти працююче обладнання іншому. Помітивши порушення Інструкції іншими працівниками, попередити їх

про необхідність дотримання вимог техніки безпеки. При настанні нещасного випадку терміново повідомити керівника та звернутися до медичного закладу. Систему водяного охолодження забороняється підключати в роботу до заповнення її водою. Також, в Інструкції йдеться про те, що при виявленні пошкоджень, відчутна напруга на металевих частинах випробувальної машини СТМ-100, відсутня фаза чи обірваний провід заземлення потрібно терміново повідомити про це керівника та вивісити плакат «Не включати – ремонт».

У Інструкції прописані загальні вимоги перед початком роботи. Першим пунктом наголошується про те, що перед кожним включенням випробувальної машини СТМ-100 потрібно перевірити справність системи охолодження. Далі слід перевірити наявність і справність електроапаратури та пристроїв заземлення. При підготовці зразка до досліду потрібно обов'язково переконатися у надійності закріплення зразка у захоплювачі.

У Інструкції у розділі вимог безпеки під час роботи [40] вказано про те, що організація експлуатації випробувальної машини СТМ-100, їх ремонтів, налагодження і випробування повинні забезпечувати надійність і економічність роботи устаткування, безпеку праці, пожежну та екологічну безпеку відповідно до чинних НД та вимог цієї інструкції. Експлуатація сервогідравлічної випробувальної машини СТМ-100, а також установок, експлуатація яких не передбачена Інструкцією, має здійснюватися за спеціально розробленими для них інструкціями з експлуатації з урахуванням характеру виробництва, особливостей устаткування, технологій, а також вимог Інструкції. Інструкція затверджується власником устаткування (керівником підприємства) і узгоджується з проектною організацією, яка розробила їх проект.

Знання і дотримання Інструкції в обсязі, що відповідає займаній посаді, є обов'язковим для працівників суб'єктів відносин у сфері механічних випробувань; Обсяг вимог Інструкції для окремих працівників повинен визначатися посадовою інструкцією.

Інструкція наголошує, що встановлювати і знімати досліджувані зразки тільки після завершення випробувань. Під час роботи випробувальної машини

СТМ-100 не брати і не подавати через нього будь-які предмети, не підтягувати болти, гайки, не знімати захоплювачі.

Після закінчення роботи, згідно Інструкції, потрібно вимкнути сервогідравлічну випробувальну машину СТМ-100. Дочекатися її повної зупинки, прибрати робоче місце. Також, перекрити подачу води та електричного струму до випробувальної машини СТМ-100. Про всі виявлені недоліки повідомити зав. Лабораторією.

При аварійній ситуації Інструкцією передбачені такі дії: вимкнути випробувальну машину СТМ-100; вивісити табличку про несправність і повідомити зав. лабораторією. Забороняється приступати до виконання роботи до повного усунення несправності. При припиненні водопостачання в систему охолодження слід зупинити роботу та вимкнути випробувальну машину СТМ-100. В разі припинення подачі електроенергії вимкнути електрообладнання. При отриманні травми потрібно негайно повідомити зав. лабораторією.

5.2. Оцінка стійкості об'єкта будівництва до впливу ударної хвилі ядерного вибуху і заходи щодо підвищення стійкості

У регіонах із сейсмічною активністю чи на частині території України, де введено режим функціонування Єдиної державної системи цивільного захисту в умовах воєнного стану, актуальним є питання збереження здатності промислових будівель витримувати попереднє навантаження від перебування у споруді персоналу, відвідувачів та технічних чи промислових установок та іншого обладнання і мереж після впливу ударної хвилі від ядерного чи техногенного вибуху. Здатність окремих промислових об'єктів працювати в умовах надзвичайних ситуацій (НС) безпосередньо впливає на економічний стан держави. Тому цивільні та промислові будівлі потребують обов'язкової оцінки стійкості роботи до впливу ударних хвиль ядерного чи техногенного вибуху. Також, при виявленні недостатньої стійкості у спорудах, потрібно розробити заходи щодо

підвищення стійкості. Дані заходи дозволять розмежовано та цілеспрямовано запобігти або зменшити вплив катастроф, стихійних лих чи аварій.

У таких випадках, на стадії проєктування, у заздалегідь визначених місцях каркасу споруди розміщують пластичні шарніри. Даний захід дозволяє контролювати деформації та запобігає крихкому руйнуванню у залізобетонних конструкціях. Проте, конструкція може бути непридатною для подальшої експлуатації або конструкція буде непридатна до реставрації через залишкові деформації будівлі.

Враховуючи недоліки використання пластичних шарнірів, використання СПФ матеріалів для підсилення залізобетонних конструкцій може посприяти виключенню цих недоліків та забезпечити будівлі придатність для подальшої експлуатації.

Вимоги Норм проєктування інженерно-технічних заходів цивільної оборони (ІТЗ ЦО) до будівництва об'єктів та комунально-енергетичних систем описані в ДБН В.1.2-4:2019 (далі Норми). Вимоги цих Норм урахуються при проєктуванні запобіжних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та військового характеру на території України.

Під стійкістю роботи об'єкта будівництва розуміють його здатність в умовах надзвичайних ситуацій виконувати покладену на нього функцію, а при отриманні слабких і середніх руйнувань, при пожежах, повенях, забрудненні місцевості, а також, при порушенні зв'язків по кооперації і постачанню відновлювати функціонування в мінімальні терміни.

Для споруд чи будівель, що не призначені для виготовлення матеріальних цінностей, стійкість роботи визначається як здатність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єкта будівництва впливають такі фактори:

- Захищеність робітників та службовців від факторів ураження при НС;
- Здатність інженерно-технічного комплексу об'єкта протидіяти руйнуючим факторам аварій, катастроф, стихійних лих чи сучасного озброєння;

- Надійність постачання до об'єкта електроенергії, води, палива чи сировини;
- Підготовленість об'єкта до проведення аварійно-рятувальних та відновлюваних робіт;
- Оперативність управління виробництвом та здійсненням заходів цивільного захисту в надзвичайних ситуаціях.

У цьому розділі було досліджено вплив ударної хвилі від ядерного вибуху потужністю боєзапасу в 200 кт на окремий елемент конструкції: залізобетонну балку зі вставками надпружного Ni-Ti сплаву. Відстань розміщення об'єкту від центру вибуху 4 км.

Вихідні дані: Потужність боєзапасу 200 кт. Тип вибуху – наземний. Відстань від центру вибуху: 4 км.

Максимально ймовірний надмірний тиск ($\Delta P_{\phi \max}$), що очікується від вибуху у районі розташування об'єкту залежить від віддалі об'єкта, що перевіряється на стійкість, до центра вибуху, його виду та потужності боєзапасу.

Згідно таблиці А.1 [41] максимально ймовірний надмірний тиск, потужністю боєзапасу в 200 кт на відстані 4 км від центру вибуху, рівний:

$$\Delta P_{\phi, \max} = 20 + \frac{30 - 20}{2.90 - 4.40} \cdot (4 - 4.40) = 22.7 \text{ кПа}$$

Основним елементом об'єкту є будівля із збірного залізобетону. Відповідно до ступеня руйнувань елементів ОГД при різних значеннях надлишкового тиску ударної хвилі (таблиця А.2 [41]), результат оцінки стійкості об'єкта до впливу ударної хвилі представлений у таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Результати оцінки стійкості цеху до впливу ударної хвилі

Об'єкт	Ступінь руйнування при $\Delta P_{\phi \max}$, кПа								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Споруда зі збірного залізобетону									

$\Delta P_{\phi \max}$ →

– слабкі руйнування; – середні руйнування; – повні руйнування.

Отже, межа стійкості будівлі $\Delta P_{\phi \text{ lim}} = 20$ кПа. Дана споруда є вразливою до ударної хвилі ($\Delta P_{\phi \text{ max}} = 22,7$ кПа). Відповідно до таблиці 5.1, будівля зазнає середніх руйнувань, що призводять до пошкодження у споруді в основному не несучих, другорядних конструкцій, таких як перегородки, дахи, вікна та двері. Також можливим є утворення тріщин у зовнішніх стінах і вивали в окремих місцях. Перекриття та підвали не зруйновані, частина приміщень придатна до експлуатації. Згідно таблиці 5.2 очікуваний збиток від ударної хвилі ($\Delta P_{\phi \text{ max}} = 22,7$ кПа) складає 37%.

Таблиця 5.2 – Очікуваний збиток в залежності від ступеня руйнування

Ступінь руйнування	Слабкі	Середні	Сильні	Повні
Очікуваний збиток, %	20-30	30-50	50-90	90-100

Відповідно до отриманих результатів, рекомендується підвищити межу стійкості споруди до $\Delta P_{\phi \text{ lim}} = 25$ кПа.

Для даної споруди рекомендується підвищити стійкість несучих конструкцій і перекриття будівлі шляхом проектування додаткових колон, ферм, контрфорсів чи підкосів.

5.3. Висновки до розділу 5

У розділі 5 розглянуто техніку безпеки з охорони праці при роботі на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100.

Розглянуто питання надійності роботи споруди зі збірного залізобетону на території України, де введено режим функціонування Єдиної державної системи цивільного захисту в умовах воєнного стану. Оцінено стійкість споруди до впливу ударної хвилі від ядерного вибуху потужністю боєзапасу в 200 кт. Зроблені висновки щодо вразливості споруди та методів підсилення її стійкості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо оцінки напружено-деформованого стану (НДС) та підвищення живучості залізобетонних згинальних елементів шляхом застосування гібридного армування з використанням сплавів з пам'яттю форми (нітинолу). На основі проведених теоретичних, чисельних та аналітичних досліджень зроблено такі висновки:

1. Розроблено та верифіковано просторову нелінійну скінченно-елементну модель залізобетонної балки в програмному комплексі ANSYS. Використання об'ємних гексаедричних елементів SOLID186 та моделі матеріалу Concrete Damage Plasticity дозволило подолати обмеження класичних одновимірних розрахунків. Висока адекватність моделі підтверджена порівнянням із нормативним розрахунком за ДБН В.2.6-98:2009 (похибка визначення граничної несучої здатності склала лише 5,1 %).

2. Доведено, що інтеграція 300-мм гібридної вставки з нітинолу в центральній зоні прольоту не призводить до критичного зниження загальної жорсткості балки на стадії нормальної експлуатації. Аж до навантажень $\approx 10,6$ кН (початок текучості класичної арматури) класична та гібридна балки демонструють ідентичний характер тріщиноутворення та деформування.

3. Вперше чисельно зафіксовано та обґрунтовано феномен формування «надпружного шарніра» в гібридній балці. Встановлено, що вставка з NiTi інтегрується в роботу за рахунок ініціації мартенситного фазового перетворення: максимальні напруження досягають 364 МПа (перевищуючи межу початку фазового переходу 332 МПа), що дозволяє матеріалу знаходитись у фазі активної трансформації та акумулювати відносні деформації на рівні $\varepsilon = 0,0046$. Це надійно захищає основну сталеву арматуру від незворотних пластичних деформацій та збільшує індекс деформативності балки у 2,1 раза (граничний прогин зріс із 7,35 мм до 15,5 мм).

4. Ідентифіковано критичний механізм руйнування гібридно-армованих елементів. Доведено, що висока піддатливість SMA-вставки спричиняє стрімке підняття нейтральної осі. Як наслідок, вичерпання несучої здатності балки лімітується виключно передчасним крихким роздробленням бетону стиснутої зони (перевищення нормативної границі $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$), задовго до вичерпання міцнісного потенціалу самої арматури.

5. Для вирішення проблеми крихкого руйнування розроблено практичні рекомендації щодо посиленого непрямого поперечного армування. Обґрунтовано необхідність влаштування замкнених хомутив із кроком ≤ 50 мм на ділянці пластичного шарніра (350 ... 400 мм). Доведено, що висока вартість гібридного армування з NiTi економічно виправдана виключно в межах концепції вартості життєвого циклу (LCC) для об'єктів критичної інфраструктури, що потребують високого рівня живучості та самовідновлення.

6. Розглянуто вимоги з техніки безпеки та охорони праці під час проведення експериментальних досліджень на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100. У контексті цивільного захисту в умовах воєнного стану проаналізовано надійність роботи збірних залізобетонних споруд в Україні. Оцінено стійкість конструкцій до впливу ударної хвилі від ядерного вибуху потужністю 200 кт, визначено їхню вразливість та запропоновано методи підвищення стійкості, що доповнює розроблену концепцію проектування високодеформативних гібридних елементів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Fang C. SMAs for infrastructures in seismic zones: A critical review of latest trends and future needs. Elsevier Ltd, 2022.
2. Wang B., Zhu S. Cyclic tension–compression behavior of superelastic shape memory alloy bars with buckling-restrained devices. *Construction and Building Materials*. 2018. Вип. 186. С. 103–113.
3. Fang C., Zheng Y., Chen J., Yam M. C. H., Wang W. Superelastic NiTi SMA cables: Thermal-mechanical behavior, hysteretic modelling and seismic application. *Engineering Structures*. 2019. Вип. 183. С. 533–549.
4. Ozbulut O. E., Hurlebaus S. Re-centering variable friction device for vibration control of structures subjected to near-field earthquakes. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011.
5. Chang W. S., Araki Y. Use of shape-memory alloys in construction: A critical review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*. 2016. Вип. 169, № 2. С. 87–95.
6. Falahian A., Asadi P., Tajmir Riahi H., Kadkhodaei M. An experimental study on a self-centering damper based on shape-memory alloy wires. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2021. С. 1–24.
7. Wang F. E., Pickart S. J., Alperin H. A. Mechanism of the TiNi martensitic transformation and the crystal structures of TiNi-II and TiNi-III phases. *Journal of Applied Physics*. 1972. Вип. 43, № 1. С. 97–112.
8. Otsuka K. Shape memory materials (General applications of shape memory alloys and smart materials). *Shape Memory Materials*. 1999. С. 220–239.
9. Shen C., Wu Z., Gao Z., Ma X., Qiu S., Liu Y., Sun T. Impact protection behavior of NiTi shape memory alloy wires. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Вип. 700. С. 132–139.
10. Auricchio F., Conti M., Morganti S., Reali A. Shape Memory Alloys: Material Modeling and Device Finite Element Simulations. *IUTAM Symposium on Multiscale Modelling of Fatigue, Damage and Fracture in Smart Materials*. 2011. С. 33–42.

11. Биків Н. З., Ясній В. П. ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ. 2022. Вип. 7, № 17.
12. Qian H., Luo H., Shi Y., Lü Q., Umar M. A review and comparative study on the performance of self-centering damping devices based on SMA. *Structures*. 2025. Вип. 71. С. 108027.
13. Kang L., Qian H., Guo Y., Ye C., Li Z. Investigation of mechanical properties of large shape memory alloy bars under different heat treatments. *Materials*. 2020. Вип. 13, № 17.
14. Seo J., Kim Y. C., Hu J. W. Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2015. Вип. 5, № 3. С. 187–208.
15. Qian H., Zhang Q., Zhang X., Deng E., Gao J. Experimental investigation on bending behavior of existing rc beam retrofitted with sma-ecf composites materials. *Materials*. 2022. Вип. 15, № 1.
16. Muntasir Billah A. H. M., Alam M. S. Bond behavior of smooth and sand-coated shape memory alloy (SMA) rebar in concrete. *Structures*. 2016. Вип. 5. С. 186–195.
17. Iasnii V., Bykiv N., Yasniy O., Budz V. Methodology and some results of studying the influence of frequency on functional properties of pseudoelastic SMA. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2022. Вип. 107, № 3. С. 45–50.
18. Dolce M., Cardone D., Marnetto R. SMA recentering devices for seismic isolation of civil structures. *Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. 2001. Вип. 4330, № May. С. 238–249.
19. Song G., Ma N., Li H. N. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*. 2006. Вип. 28, № 9. С. 1266–1274.
20. Alam M. S., Youssef M. A., Nehdi M. Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2007. Вип. 34, № 9. С. 1075–1086.
21. Bykiv N., Iasnii V., Yasniy P., Junga R. Thermomechanical analysis of

nitinol memory alloy behavior. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2021. Вип. 102, № 2. С. 161–167.

22. Bykiv N., Yankovyi S., Iasnii V. Stress ratio effect on the functional behavior of the pseudoelastic SMA. *Procedia Structural Integrity*. 2025. Вип. 68. С. 405–408.

23. Mirzaey E., Shaikh M. R., Rasheed M., Ughade A., Khan H. A., Shaw S. K. Shape memory alloy reinforcement for strengthening of RCC structures—A critical review. *Materials Today: Proceedings*. 2023.

24. Song A., Xu H., Luo Q., Wan S. Finite Element Analysis on Inelastic Mechanical Behavior of Composite Beams Strengthened With Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates Under Negative Moment. *Frontiers in Materials*. 2022. Вип. 9.

25. Torra V., Isalgue A., Martorell F., Terriault P., Lovey F. C. Built in dampers for family homes via SMA: An ANSYS computation scheme based on mesoscopic and microscopic experimental analyses. *Engineering Structures*. 2007. Вип. 29, № 8. С. 1889–1902.

26. Bykiv N., Iasnii V., Kosichka E. Joining the rebars with strengthened elements in a concrete beam. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Вип. 59. С. 793–798.

27. Jung D., Wilcoski J., Andrawes B. Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals. *Engineering Structures*. 2018. Вип. 160. С. 171–185.

28. Fernandes D. J., Peres R. V., Mendes A. M., Elias C. N. Understanding the Shape-Memory Alloys Used in Orthodontics. *ISRN Dentistry*. 2011. Вип. 2011. С. 1–6.

29. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. Pergamon, 2005.

30. Abraik E., El-Fitiany S. F., Youssef M. A. Seismic performance of concrete core walls reinforced with shape memory alloy bars. *Structures*. 2020. Вип. 27. С. 1479–1489.

31. Hong K., Lee S., Han S., Yeon Y. Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures. *Applied Sciences 2018, Vol. 8, Page 730*. 2018. Вип. 8, № 5. С. 730.

32. Bykiv N., Yasniy P., Lapusta Y., Iasnii V. Finite element analysis of reinforced-concrete beam with shape memory alloy under the bending. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Вип. 36. С. 386–393.
33. Damsara P., Kulathunga T., Damsara K. D. P., Kulathunga D. D. T. K. Analysis on Effectiveness of Rebar Couplers in Splicing of Reinforcement Bars. *General Sir John Kotelawala Defence University*. 2018. № June.
34. Azadi M., Dadashi A., Dezhianian S., Kianifar M., Torkaman S., Chiyani M. High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing. *Forces in Mechanics*. 2021. Вип. 3. С. 100016.
35. Katsikadelis J. T. *Dynamic Analysis of Structures*. 2020. 1–786 с. ISBN 9780128186435.
36. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2011-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 97с.
37. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN1992-1-1:2004, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 165с.
38. Iasnii V. P., Krechkovska H. V., Bykiv N. Z., Student O. Z., Lubianytskyi R. S. The influence of stress ratio on properties and mechanism of nitinol fracture. *Materials Science*. 2026.
39. Pidgurskyi M., Pidgurskyi I., Bykiv D., Bykiv N., Okipnyi I., Mushak A. Investigation of the Stress-Strain State of Double-Pitched and Arched Perforated Beams. *Procedia Structural Integrity*. 2026. Вип. 81. С. 539–546.
40. Каспрук В. Б. Методичні вказівки для написання розділу дипломного проекту з дисципліни «Охорона праці в галузі». Тернопіль:ТНТУ, 2017. 14 с.
41. Стручок В. С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання. Тернопіль:ФОП Паляниця В.А., 2022. 156 с.