

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

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

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**Магістра**

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження сплавів пам'яті форми з ефектом надпружності  
в якості елементів підсилення будівельних конструкцій

Виконав: студент VI курсу, групи МБнм-61  
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Биків Н.З.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Ясній Н.З.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Данильченко С.М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ковальчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Качка О. І.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1 ВЛАСТИВОСТІ ТА БУДОВА СПЛАВІВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ. ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ У БУДІВНИЦТВІ ТА ЦИВІЛЬНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ</b> .....	10
<b>1.1. Фазові перетворення у СПФ</b> .....	10
<b>1.2. Ефект пам'яті форми</b> .....	11
<b>1.3. Ефект надпружності</b> .....	13
<b>1.4. Кристалічна будова сплавів з ефектом пам'яті форми</b> .....	15
<b>1.5. Передумови використання СПФ</b> .....	18
<b>1.6. Основні концепції використання СПФ у будівництві</b> .....	20
<b>1.7. Застосування СПФ у конструкціях будівель та споруд</b> .....	24
<b>1.8. Висновок до розділу 1</b> .....	28
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ІЗ ВСТАВКАМИ ЗІ СПЛАВУ NI-TI</b> .....	29
<b>2.1. Вибір модуля аналітичної системи</b> .....	29
<b>2.2. Створення елементів для залізобетонної балки</b> .....	31
<b>2.3. Створення просторової моделі залізобетонної балки</b> .....	40
<b>2.4. Створення розрахункової моделі залізобетонної балки із вставкою зі сплаву Ni-Ti</b> .....	42
<b>2.5. Висновок до розділу 2</b> .....	47
<b>РОЗДІЛ 3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ПІДСИЛЕНОЇ ВСТАВКАМИ ІЗ СПФ</b> .....	48
<b>3.1. Аналіз переміщень і деформацій</b> .....	48
<b>3.2. Аналіз напруженого стану</b> .....	53
<b>3.3. Висновок до розділу 3</b> .....	597
<b>РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	619
<b>4.1. Правила безпеки при роботі на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100</b> .....	619
<b>4.2. Оцінка стійкості об'єкта будівництва до впливу ударної хвилі ядерного вибуху і заходи щодо підвищення стійкості</b> .....	631

<b>4.3. Висновок до розділу 4 .....</b>	<b>675</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>686</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ .....</b>	<b>687</b>
<b>Додаток А .....</b>	<b>72</b>
<b>Додаток Б.....</b>	<b>742</b>

## ВСТУП

У регіонах із високосейсмічною активністю залізобетонні конструкції розраховані на виникнення серйозних пошкоджень і постійних деформацій під час землетрусів ще на стадії конструювання, одночасно запобігаючи руйнуванню і життєвих втрат. Це, як правило, досягається шляхом призначення пластичних шарнірів на заздалегідь визначених місцях. Пластичні шарніри призначені контролювати деформації згину, одночасно запобігаючи крихкому руйнуванню. Навіть, якщо основна ціль пластичного шарніру буде досягнута, конструкція може бути непридатною до експлуатації і взагалі не підлягатиме реставрації через пошкодження і постійні деформації сейсмічної активності. Внаслідок цих недоліків сплави пам'яті форми (СПФ) все частіше застосовують для вдосконалення конструкцій та споруд у сфері будівництва [1].

Сплави з пам'яттю форми (СПФ, Shape Memory Alloys, SMA) відкрили в кінці 60-х років минулого сторіччя. Одно- і двосторонній ефект пам'яті форми (ЕПФ, Shape Memory Effect, SME), надпружність (НП, Superelastic behavior, SE). Крім цього, СПФ можуть розсіювати внутрішню енергію завдяки великій петлі гістерезису (рис.1) і забезпечувати міцність та деформативність.

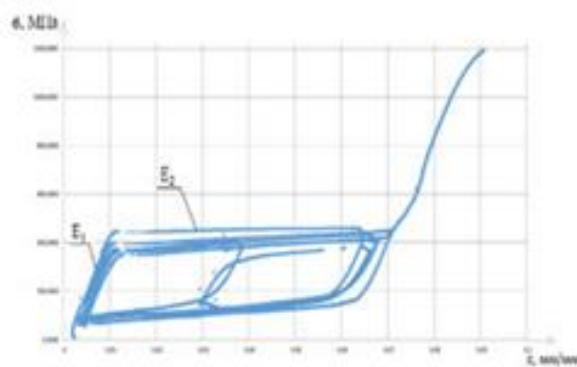


Рисунок 1 – Діаграма деформування за повторно статичного навантаження розтягом та розвантаження дроту діаметром 1,5 мм з NiTi сплаву [2]

Тому, завдяки своїм властивостям СПФ доцільно використовувати при значних втомних навантаженнях та у корозійних середовищах [3]. СПФ мають ряд застосувань на структурному рівні конструкцій, починаючи від армування в новому будівництві або як матеріал для модернізації існуючих конструктивних елементів, до використання їх, як пасм, для попереднього напруження і після натягу. Також, СПФ використовуються у SMA-приладах для пасивного, напівактивного або активного управління структурами.

У будівництві СПФ розглядається, як альтернативне підсилення конструкцій чи їх окремих елементів які експлуатуються у сейсмічних зонах. Завдяки ефекту надпружності ці сплави здатні відновлюватися після прикладання значних деформацій (у деяких випадках, до 10%) при розвантаженні, які призводять до постійних деформацій у сталевому армуванні [4].

Найкращим СПФ за фізико-механічними властивостями вважається Ni-Ti сплав (нітинол). У сплавах на його основі відбуваються складні фазові мартенситні перетворення. Ці перетворення яскравіше проявляються у пористих структурах. Для сплавів такого типу характерним є «широкий гістерезис та широкий температурний діапазон», завдяки чому у проявляються ефект пам'яті форми та ефект надпружності. Також, мартенситні перетворення відбуваються і в інших сплавах, таких як Pt-Ti, Pt-Ga, Pt-Al. Широкий спектр застосувань сплавів пам'яті форми базується на температурах фазових перетворень і механічних властивостей [4].

**Метою дипломної роботи** є дослідити напружено-деформований стан залізобетонної балки із вставками зі сплаву Ni-Ti піддану розподіленому навантаженню на площині 120×80 мм. Порівняти отримані дані із напружено-деформованим станом залізобетонної балки класичного армування.

**Об'єктом дослідження** є залізобетонна балка із вставками зі сплаву пам'яті форми Ni-Ti із ефектом надпружності, розрахункова схема якої відповідає вільноопертому стану.

**Предметом дослідження** є напружено-деформований стан залізобетонної балки зі сплаву пам'яті форми Ni-Ti із ефектом надпружності.

**Метод дослідження** полягає у моделюванні напружено-деформованого стану залізобетонної балки методом скінчених елементів у програмному комплексі ANSYS 2019 R2

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у використанні слабших за характеристиками міцності бетону та арматури, у порівнянні з іншими дослідженнями у напрямку підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані дані відкривають перспективу для подальших досліджень, змінюючи довжину, форму, діаметр вставок, їх кількість та розташування у балці.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Виконана на III Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 23-24 квітня 2020 року).

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

Робота виконана згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки ТНТУ та державними програмами надійності і економічності будівельних виборів, матеріалів і конструкцій.

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

# РОЗДІЛ 1

## ВЛАСТИВОСТІ ТА БУДОВА СПЛАВІВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ.

### ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ У БУДІВНИЦТВІ ТА ЦИВІЛЬНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

#### 1.1. Фазові перетворення у СПФ

Фазова діаграма металічних сплавів являє собою схематичне представлення умов рівноваги між різними фазами. Фазова діаграма складається із ліній рівноваги, які розділяють різні фази один від одного. У сплавах, що складаються з двох і більше елементів, впливовими змінними є концентрація і температура. Концентрацію позначають у напрямку абсцис, а температуру – у напрямку ординат. Для сплавів, у яких концентрація елементів залишається незмінною, формування та переміна фаз відбувається зі зміною температури. Аналогічно, при типовій робочій межі температур, СПФ змінюються між двома фазами. Кожна фаза має власну кристалічну будову і, отже, різні механічні властивості. Одна з них є фазою високих температур, що називається аустенітом (Austenite, A), інша – фаза низьких температур, що називається мартенситом (Martensite, M). Аустеніт, в основному, має кубічну кристалічну ґратку. Мартенсит може мати тетрагональну, орторомбічної або моноклінну ґратку. Перехід між структурами відбувається не дифузією атомів, а зсувом решітки. Таке перетворення називається мартенситною трансформацією. Утворені таким чином кристали мартенситу можуть мати різні напрямки орієнтації, що зветься варіацією. Мартенситні варіації можуть бути у двох формах: двійниковий мартенсит (Twinned Martensite,  $M_t$ ), який утворюється за допомогою комбінації «самостійних» мартенситних варіацій, і бездвійниковий мартенсит (Detwinned Martensite,  $M_d$ ), в якому домінує одна із варіацій. Зворотне перетворення фази з аустеніту (батьківської фази) до мартенситної (фази продукту) і навпаки формує основу для унікальної поведінки СПФ [5].

За відсутності навантаження, кристалічна решітка переходить із аустеніту в мартенсит під час охолодження. Такий фазовий перехід ( $A \gg M$ ) називається прямим перетворенням. Перетворення призводить до утворення кількох варіацій мартенситу – до 24 у сплавів Ni-Ti. При нагріванні матеріалу у мартенситній формі, його кристалічна структура переходить в аустеніт. Такий фазовий перехід ( $M \gg A$ ) називається зворотнім [5].

Схема кристалічних структур подвійного мартенситу і аустеніту для СПФ і перетворення між ними показана на рисунку 1.1.

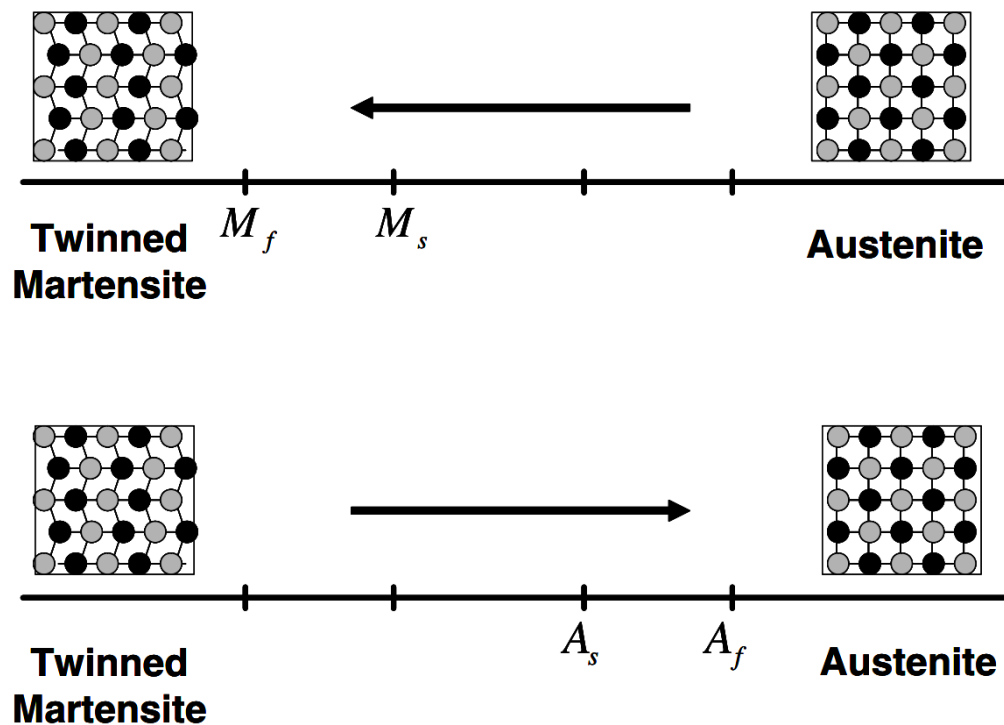


Рисунок 1.1 – Температурно-індуковане фазове перетворення СПФ без механічного навантаження [5].

## 1.2. Ефект пам'яті форми

СПФ проявляє ефект пам'яті форми (ЕПФ) коли його деформують у фазі двійникового мартенситу після чого розвантажують при температурі нижче  $A_s$ .



Нагрівши сплав вище  $A_f$  початкова форма відновиться, відбудеться перехід у вихідну аустенітну фазу. Дотримуючись шляху термомеханічного навантаження в комбінованій напружено-деформованій системі координат, як зображено на рис.1.7, можна краще зрозуміти характер СПФ. На рис.1.7. представлено експериментальні дані для типових NiTi сплавів, які піддавались одновісному навантаженню. Величина  $\sigma$  – напруження у зразку від прикладання одновісного навантаження. Відносна деформація  $\epsilon$  – зміна довжини зразка вздовж напрямку прикладеного навантаження відносно початкової довжини [5].

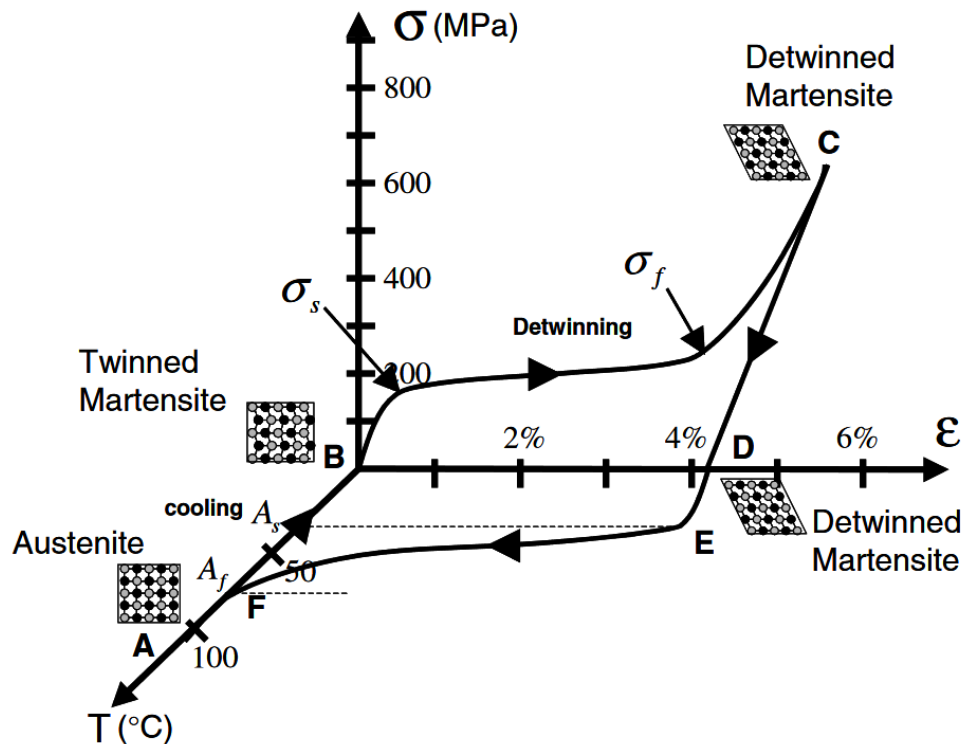


Рисунок 1.7 – Графік залежності кристалічних фаз, що проявляється при ефекті пам'яті форми для типового NiTi СПФ [5].

Охолодження розвантаженого СПФ у фазі батьківського аустеніту (починаючи з точки А на рис.1.7) нижче температур прямого перетворення ( $M_s$  і  $M_f$ ) призводить до утворення двійникового мартенситу (точка В). Піддавши двійниковий мартенсит навантаженню, що перевищує значення початкової напруги ( $\sigma_s$ ), зніщюється процес

переорієнтації, що призводить до зростання певних сприятливо орієнтованих варіантів мартенситу, які ростуть за рахунок інших менш сприятливих варіантів. Рівень напружень для переорієнтації варіантів є меншим, ніж межа пластичності мартенситу. Процес переорієнтації завершується на рівні напружень,  $\sigma_f$ , який характеризується кінцем плато на діаграмі  $\sigma$ - $\varepsilon$  (Рис. 1.7). Після цього, матеріал розвантажують від С до D і зберігають стан бездвійникового мартенситу. При нагріванні без навантаження зворотне перетворення зніщується по мірі того, коли температура досягне  $A_s$ , (E) і завершується при температурі  $A_f$  (F), вище якої існує лише батьківська аустенітна фаза. За відсутності пластичної деформації, сформованої під час переорієнтації, початкова форма СПФ відновлюється (до точки A). Деформація відновлена внаслідок фазової трансформації від бездвійникового мартенситу до аустеніту, називається деформацією трансформації ( $\varepsilon^t$ ). Подальше охолодження до мартенситу знову призведе до утворення самостійно розміщених двійникових варіацій мартенситу, не пов'язаних зі зміною форми, цикл ЕПФ можна відтворити знову. Вищеописане явище називається ефектом односторонньої пам'яті форми, або просто ЕПФ, тому що відновлення форми досягається тільки під час нагрівання після того, як матеріал був зафіксований прикладеним механічним навантаженням [5].

### 1.3. Ефект надпружності

Надпружна поведінка СПФ пов'язана з напружено-індукованою трансформацією, яка призводить до утворення деформацій під час навантаження і подальшого відновлення деформацій при розвантаженні у температурному діапазоні вище  $A_f$ . Надпружний термомеханічний шлях навантаження зазвичай починається при досить високій температурі, де існує стабільний аустеніт, потім розвивається під дією прикладеного навантаження до стану, при якому бездвійниковий мартенсит стабільний і, нарешті, повертається до аустенітної фази при поверненні в нульовий

напружений стан (рис.1.8). Зазвичай, тест на надпружність виконується при номінально постійній температурі вище  $A_f$  [5].

Щоб детальніше описати надпружну поведінку, варто розглянути термомеханічний шлях навантаження ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$ ) (рис.1.8), що показаний на діаграмі (рис.1.9).

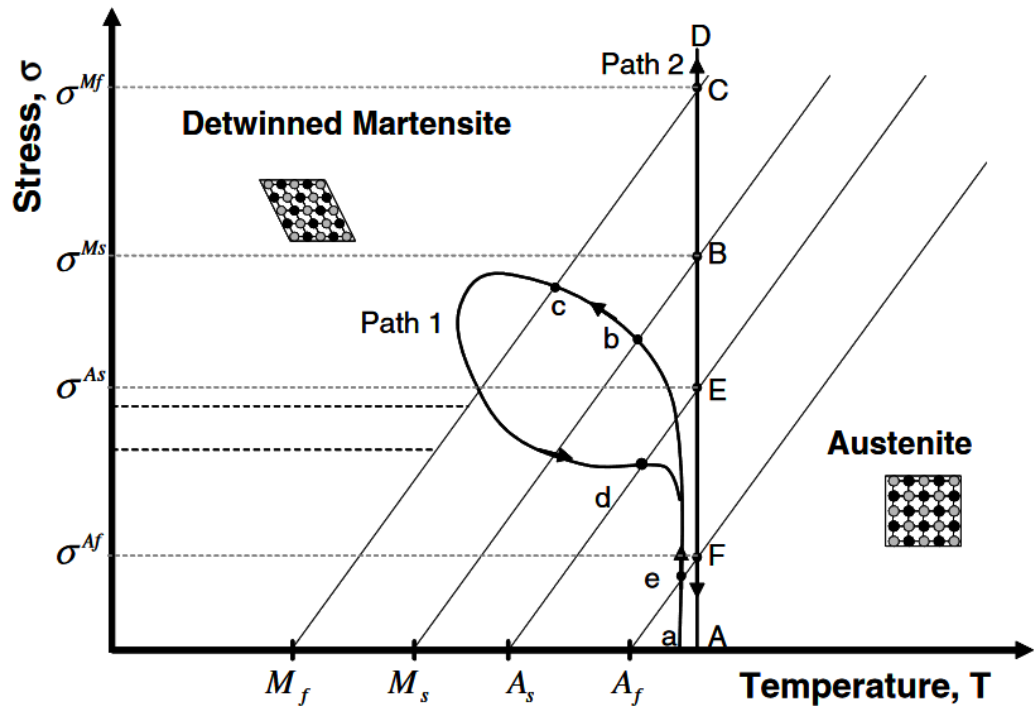


Рисунок 1.8 – Фазова діаграма і два можливих способи надпружних навантажень [5].

Під дією механічного навантаження батьківська фаза (аустеніт) пружно деформується ( $A \rightarrow B$ ). Значення напруження для ініціювання мартенситного перетворення на фазовій діаграмі помічено  $\sigma^{Ms}$ . Під час перетворення генеруються великі надпластичні деформації і відбувається трансформація ( $B \rightarrow C$ ) до значення  $\sigma^{Mf}$  – завершення перетворення [5].

Зміна нахилу на кривій  $\sigma$ - $\epsilon$  пов'язана з пружним навантаженням мартенситної фази. Подальше збільшення напруження не призводить до подальших перетворень. Відбувається пружна деформація мартенситу ( $C \rightarrow D$ ). Розвантаження мартенситу шляхом ( $D \rightarrow E$ ) – пружне.

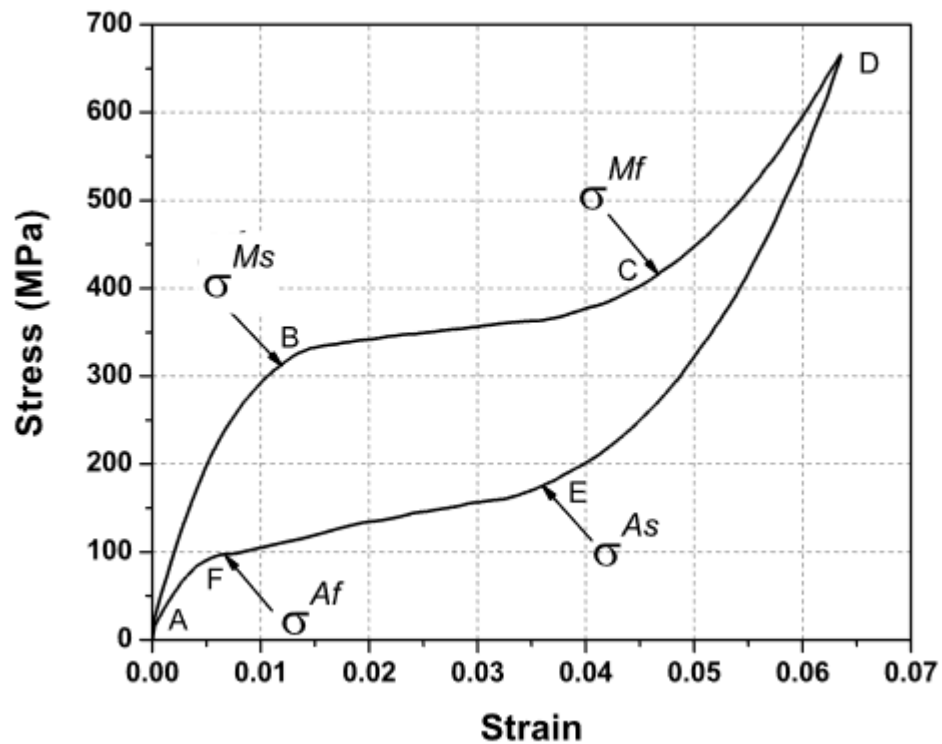


Рисунок 1.9 – Типовий цикл надпружного навантаження СПФ [5].

У точці E кривої розвантаження розпочинається перетворення мартенситу в аустеніт (при  $\sigma = \sigma^{As}$ ). Процес супроводжується відновленням деформації. Кінець зворотного перетворення в аустеніт позначається точкою F, що відповідає напруженню  $\sigma^{Af}$ . Після чого матеріал пружно розвантажується до A. Перетворення фази вперед і назад в ході повного надпружного циклу призводить до гістерезису, який у просторі  $\sigma$ - $\varepsilon$  представляє енергію, розсіяну в циклі перетворення. Рівні напружень трансформації і розміри гістерезису змінюються в залежності від матеріалу СПФ і умов тестування [5].

#### 1.4. Кристалічна будова сплавів з ефектом пам'яті форми

В загальному ЕПФ – термopужне мартенситне перетворення, яке відбувається з бездифузійним ефектом [6]. Під час цього відбувається трансформування за

принципом зсуву об'ємноцентрованої кубічної ґратки (вихідна фаза яку умовно називають аустенітною) (рис. 1.10.а) у гранецентровану орторомбічну (рис.1.10.б), опісля в моноклінну, властиву мартенситу (рис. 1.10.в). Подібні структурні перетворення можуть відбуватися шляхом формування проміжної тетрагональної фази (R-фази) [6,7].

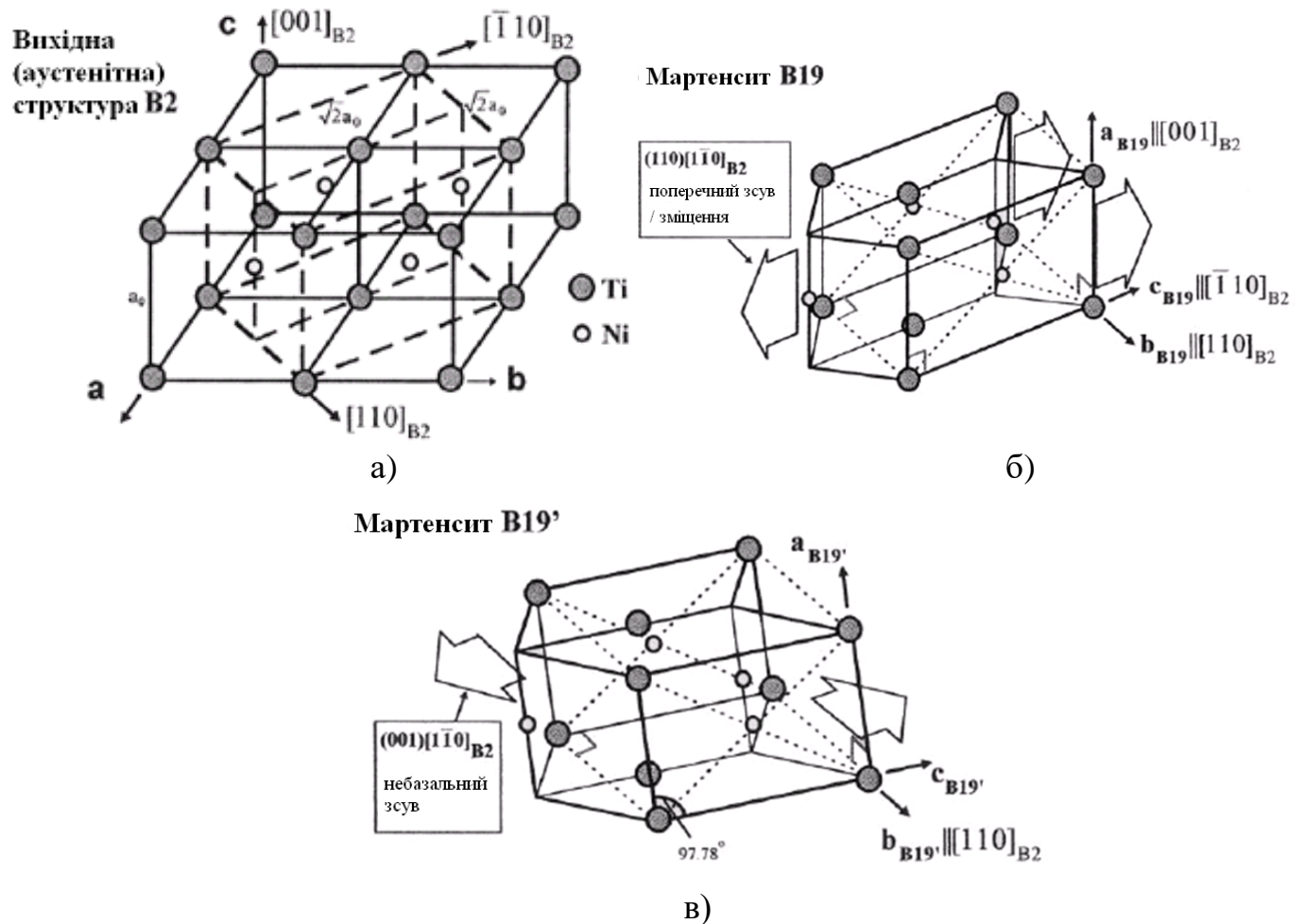


Рисунок 1.10 – Розташування атомів у кристалічній ґратці ЕПФ Ni-Ti в:

- а) – об'ємноцентрованої ґратці типу B2 (аустенітна);
- б) – гранецентрованої орторомбічній типу B19 (двійковий мартенсит, сформований при поперечному зсуву ґратці B2 в площині  $[110]$ );
- в) – моноклінній B19' (бездвійниковий мартенсит) [7].

Сплави Ti-Ni після гартування (без включень  $Ti_3Ni_4$ ) і після старіння (коли з'являються включення) мають три можливих варіанти розвитку мартенситу (R, B19, B19') для монокристалів, це спричинене полегшенням пружної деформації (рис.1.11) [7].

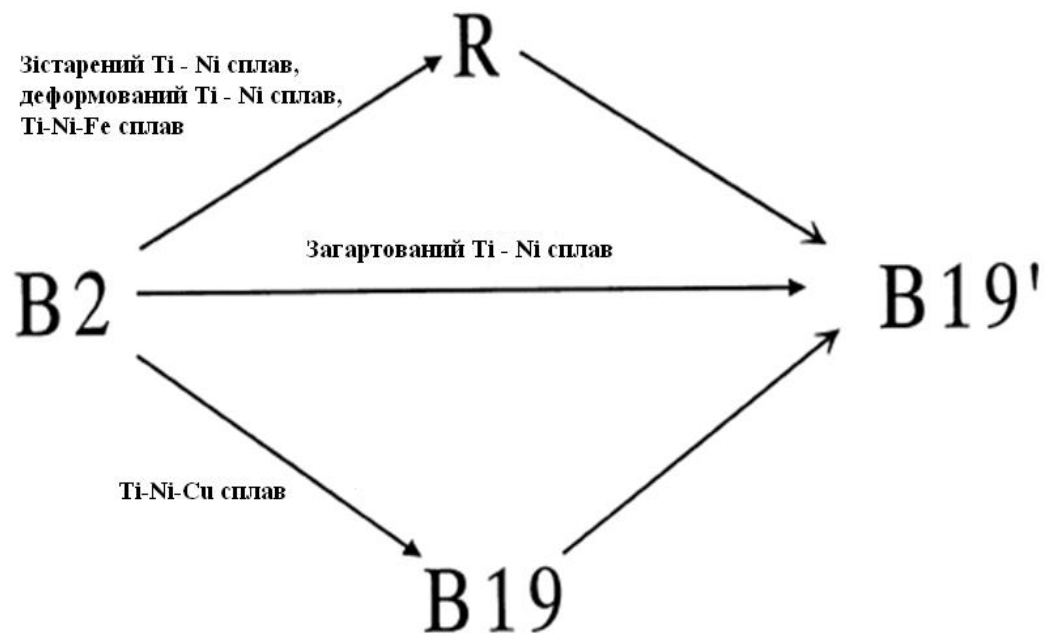


Рисунок 1.11 – Варіації структурних перетворень у сплавах Ni-Ti з пам'яттю форми [7].

В усіх сплавах з ЕПФ під час фазових перетворень відбувається виділення або поглинання теплової енергії, що зумовлено зміною форми ґратки і розташування у ній атомів. Отже, критична деформація сплавів залежить від зміни параметрів ґратки під час перетворення аустеніту в мартенсит, а здатність до відновлення форми – характеристиками новоутвореної кристалічної структури [8].

При вищих температурах, від температури експлуатації, сплав Ni-Ti характеризується стабільним параметром об'ємноцентрованої ґратки. Проте, під час охолодження у критичному для перетворення температурному діапазоні змінюється сила міжатомних зв'язків, що у свою чергу впливає на модуль пружності, границю плинності і електроопір. Так, у діапазоні мартенситного перетворення, під час

пониження температури, відбуваються зміни у кристалічній будові яка напряму залежить від температур на початку ( $M_s$ ) та під кінець ( $M_f$ ) перетворення (рис.1.12). Зміни, які виникають під час такого перетворення, є передумовою для використання ефекту пам'яті форми [9,10].

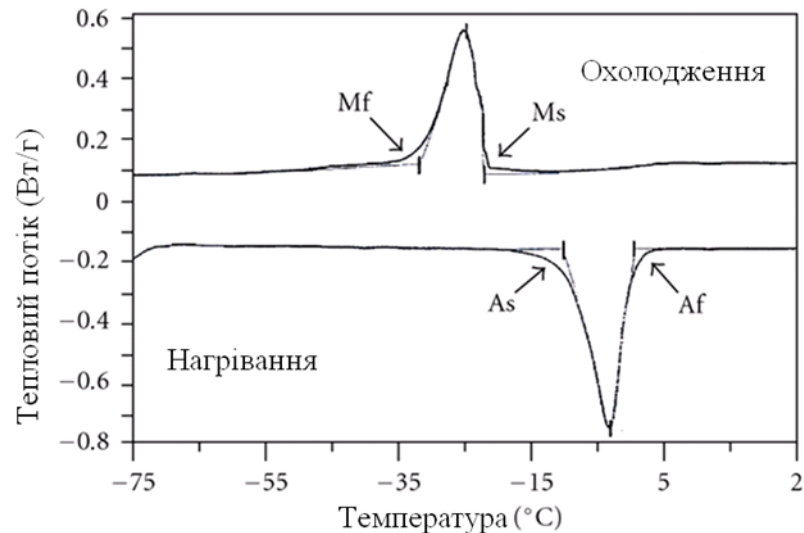


Рисунок 1.12 – Типові криві для СПФ, отримані при скануванні калориметрії.

«Вершини» кривих демонструють температури фазових перетворень.

$M_s$ ,  $M_f$  та  $A_s$ ,  $A_f$  початок і кінець фаз мартенситу і аустеніту відповідно, при нагріванні чи охолодженні зразка [11].

### 1.5. Передумови використання СПФ

На сьогоднішній момент, у світі, є попит на будівлі, що задовольняють такі потреби: функціональність, несуча здатність, витонченість, просторість, пристосування до перепризначення, зменшення маси конструкції з економічних причин. Всі ці фактори ускладнюють роботу інженерів-будівельників. Іншим завданням для інженерів-будівельників є утримання існуючих конструкцій, що ускладнюється при непридатності початкової розробки споруди або збільшенні навантаження на споруду. Це спонукає до пошуку нових матеріалів та технологій, що

виходять за межі звичного способу мислення. Одними з таких матеріалів є СПФ, які часто відносяться до класу так званих «розумних матеріалів» [13].

СПФ не використовувалися в будівництві до недавнього часу. Досі продовжуються дослідження їх надзвичайних властивостей та пов'язаних з ними металографічних аспектів. Проте, отриманих на даний момент знань, більше, ніж достатньо для огляду можливих застосувань СПФ у конструкціях цивільного призначення. На сьогоднішній день близько 30 сплавів показують ефект пам'яті форми. Отже, вони належать до групи СПФ. Приклади наведені в таблиці 1.1 [13].

Таблиця 1.1. Деякі сплави, що проявляють ефект пам'яті форми [13].

<b>Alloy</b>	<b>Composition (atomic % )</b>	<b>Transformation</b>
Cu-Al-Ni	28-29Al, 3.0-4.5 Ni	Thermoelastic
Cu-Sn	15 Sn	Thermoelastic
Cu-Zn (brass)	38.5-41.5 Zn	Thermoelastic
Cu-Zn-X	(X=Si, Al, Ga, Sn) few %X	Thermoelastic
Fe-Cr-Ni-Mn-Si	9 Cr,5 Ni,14 Mn, 6 Si	Non- thermoelastic
Fe-Mn-Si	28-33 Mn, 4-6Si	Non- thermoelastic
Fe-Ni-C	31 Ni, 0.4C	Non- thermoelastic
Fe-Ni-Co-Ti	33 Ni, 10 Co, 4 Ti	Thermoelastic
	31 Ni, 10 Co, 3 Ti	Non- thermoelastic
Fe-Ni-Nb	31 Ni, 7 Nb	Non- thermoelastic
Mn-Cu	5-35 Cu	
Ni-Al	36-38 al	Thermoelastic
Ni-Ti	49-51 Ni	Thermoelastic
Ni-Ti-Cu	8-20 Cu	Thermoelastic



## 1.6. Основні концепції використання СПФ у будівництві

Використання СПФ у будівництві базується на здатності цих сплавів гасити коливання, збуджені динамічним навантаженням.

Гасіння коливань від зовнішнього динамічного навантаження може здійснюватися за допомогою активного управління, напівактивного контролю та пасивного управління. В активному режимі управління, зовнішнє джерело живлення управляє виконавчими механізмами, щоб застосувати сили для об'єктних структур. Для пасивної системи управління не потрібно ніякого зовнішнього джерела живлення, а сили удару розвиваються у відповідь на рух конструкцій. Напівактивні пристрої управління використовують значно менше енергії для регулювання структурних властивостей, ніж активні пристрої управління [4].

До пасивного контролю відносять використання властивості демпфування СПФ для зменшення реакції і, як наслідок, пластичної деформації конструкцій, що піддаються сильним навантаженням. СПФ можуть бути ефективно використані для цієї мети за допомогою двох механізмів: системи ізоляції землі та системи розсіювання енергії [12]. У системі ґрунтової ізоляції СПФ-ізолятори, які встановлюються між надбудовою і ґрунтом для поєднання роз'єднаної системи, фільтрують сейсмічну енергію, що передається від руху ґрунту до надбудови, завдяки чому зменшуються шкода надбудові.

СПФ-пристрої для пасивного контролю вібрації, які базуються на мартенситних СПФ мають більшу демпфуючу здатність; однак, це вимагає зовнішнього тепла для фазового перетворення, щоб відновити його первісну форму. З іншого боку, надпластичні СПФ мають меншу демпфуючу здатність, але вони мають значну рецентруючу силу, щоб відновити початкове положення конструкції, і тим самим мінімізувати її залишкову деформацію [4].

Вище згадані ізоляційні системи на основі СПФ включають СПФ-стержні для автомагістральних мостів, пристрої центрування із СПФ дротами, ізоляційні системи

із СПФ-пружинами, СПФ-жилки у ізоляційній системі для каркасів з великим ступенем вільності (multi-degree-of-freedom, MDOF) [4].

Відомі дослідження, наприклад циклічних властивостей і потенціалу надпластичних дротів і стержнів СПФ зокрема із великим поперечним перерізом [14], у сейсмічно стійких конструкціях та модифікаціях. Вивчали вплив історії навантаження, частоти навантаження і розміру стрижня на механічні властивості, зокрема напруження аустенітно-мартенситного перетворення, гасіння коливань для вироблення відповідних рекомендацій щодо використання надпластичних СПФ для підвищення сейсмічної стійкості інженерних споруд. Тести показали, що дріт та стержень з матеріалу (таблиця 1.2) продемонстрували дуже хорошу надпластичну поведінку. Залишкова деформація поступово збільшується з середнього значення 0,15% після амплітуди деформації 3% до середнього значення деформації 0,65% після чотирьох циклів навантаження з амплітудою деформації 6%. Залишкова деформація не пов'язана із діаметром стрижня, при 12,7 мм (0,5 дюйма), що показують найменшу залишкову деформацію чотирьох зразків. Навантаження з деформацією понад 6% зазвичай призводить до неприйнятно великого збільшення залишкових деформацій.

Таблиця 1.2. Властивості NiTi сплавів пам'яті форми [14]

Property	NiTi SMA	
	Austenite	Martensite
Physical properties		
Density	6.45 g/cm <sup>3</sup>	
Mechanical properties		
Recoverable elongation	up to 8%	
Young's modulus	30–83 GPa	21–41 GPa
Yield strength	195–690 MPa	70–140 MPa
Ultimate tensile strength	895–1,900 MPa	
Elongation at failure	5–50% (typically 25%)	
Poisson's ratio	0.33	
Chemical properties		
Corrosion performance	Excellent (similar to stainless steel)	

Також сплави пам'яті форми почали використовувати у демпфуючих пристроях [15,16], які використовують як розсіювачі енергії при коливаннях будівель чи споруд.

Подібний пристрій був розроблений [17] для транспортування довгомірних конструкцій. Даний пристрій (рис.1.13) підвищує надійність демпфуючого пристрою шляхом виконання його у вигляді двох бокових систем кріплення при тривалій експлуатації. Як результат, концепція даного пристрою може використовуватися у будівництві для гасіння коливань.

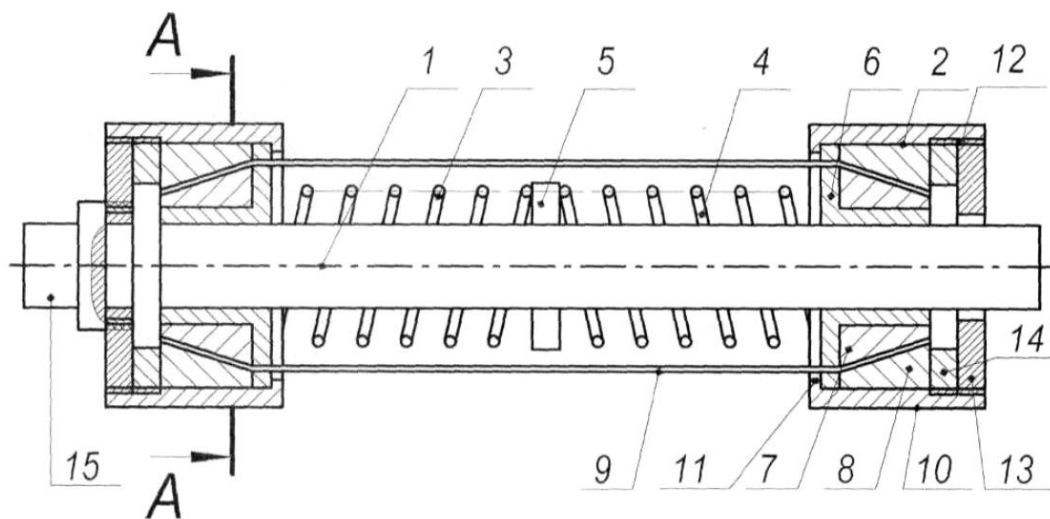


Рисунок 1.13 – Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій [17]

Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій (рис.1.13) містить вісь 1, на якій розміщені дві бокові системи кріплення 2, між якими поміщено пружини 3 і 4, які розділені центральним фіксатором 5, що жорстко кріпиться на осі 1, бокові системи кріплення, оснащені кріпильними втулками 6 з отворами, на які поміщені конус 7 з конусною втулкою 8, між якими затиснені дроти 9 з СПФ. Кожна бокова система кріплення оснащена циліндричною обоймою 10 з внутрішнім кільцевим упором 11 з одного боку та внутрішньою різьбою 12 з протилежного, в яку вкручується кільце 13, що підтискає конічну втулку через

проміжну шайбу 14. Різьбове кільце 13 лівої бокової системи кріплення з'єднане з тягою 15.

Землетруси у США та Японії вказували на те, що відносне зміщення багатопролітних вільно опертих мостів на шарнірах і опорах може призвести до обвалення мосту [18,19], якщо він перевищить допустиме переміщення. Для зменшення сейсмічної вразливості було запропоновано використати замість сталевих стержнів-обмежувачів (restrainer bar) обмежувачі зі СПФ (табл.1.3, рис.1.14).

Таблиця 1.3. Порівняння властивостей сплаву пам'яті форми Ni-Ti з типовою для конструкції сталлю.[19].

Property	Ni-Ti shape memory alloy	Steel
Recoverable elongation	8%	0.2%
Young's modulus	8.7E4 MPa (Austenite), 1.4–2.8E4 MPa (Martensite)	2.07×10 <sup>5</sup> MPa
Yield strength	200–700 MPa (Austenite), 70–140 MPa (Martensite)	248–517 MPa
Ultimate tensile strength	900 MPa (fully annealed), 2000 MPa (work hardened)	448–827 MPa
Elongation at failure	25–50% (fully annealed), 5–10% (work hardened)	20%
Corrosion performance	Excellent (similar to stainless steel)	Fair

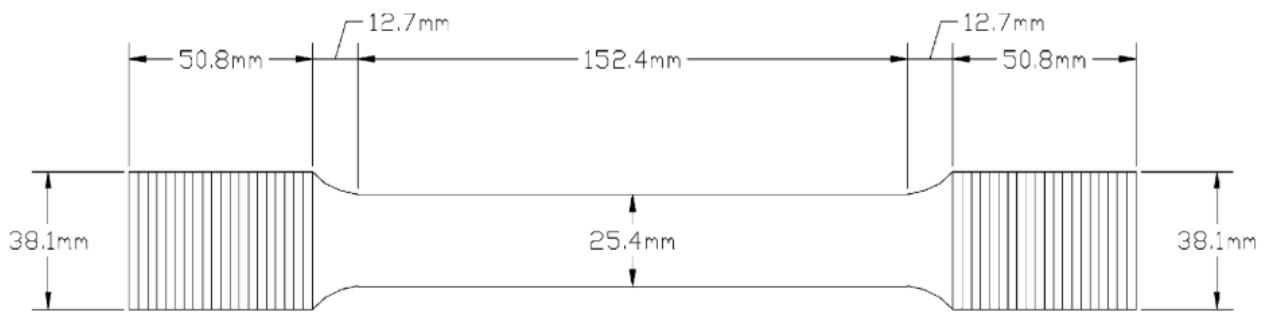


Рисунок 1.14 – Нітиноловий СПФ-обмежувач використаний у дослідженні [19].

Використання СПФ-обмежувачів може забезпечити більш ефективну альтернативу для обмеження відносного зміщення шарніра, ніж звичайні кабелі-утримувачі або стержні-утримувачі. Утримувачі СПФ можуть бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечити достатню жорсткість і демпфування для обмеження відносного зміщення шарніра нижче заздалегідь визначеного значення.

## 1.7. Застосування СПФ у конструкціях будівель та споруд

Кількість виконаних проектів із використання СПФ у будівельних конструкціях є невеликою. Тому проекти, які вдалося втілити у реальних спорудах, дуже важливі для подальшого використання СПФ у будівництві.

Коливання, спричинені землетрусом, можуть завдати серйозної шкоди, зокрема, історичним будівлям, наприклад, Базиліці Сан-Франческо в Ассізі (Basilica of San Francesco at Assisi, рис.1.15, рис.1.16). Базиліка була відновлена від значних пошкоджень, завданих землетрусом 1997 року [20].



Рисунок 1.15 – Базиліка Святого Франческа в Ассізі реставрована [21].

Наприклад структурна взаємодія трансепту південного фронту базилики з основною частиною будівлі, що потребує модифікації. Заходи з модернізації, спрямовані на обмеження прискорення та сили, що передаються з даху основної конструкції на фронтон кам'яної кладки із тимпаном. Крім того, потрібно надати

даній конструкції можливість гасити енергію від коливань. Для вирішення вищезазначеного завдання фронтон був повністю від'єднаний від покрівлі і знову з'єднаний з дахом за допомогою пристроїв із сплаву пам'яті форми (SMAD, рис.1.17 та рис.1.18).



Рисунок 1.16 – Базиліка Святого Франческа в Ассізі після землетрусу 1997 року [22]

Кожен пристрій зі сплавом пам'яті форми розроблений так, щоб сприймати напруження на розтяг та стиск, при цьому складається з проводів СПФ, які працюють на розтяг. Провід виготовлений із сплаву NiTi з ефект надпружності. Таким чином, прилад зі сплавом пам'яті форми працює як ізолятор. Принцип поведінки пристрою продемонстрований на рисунку 1.19.

Під час горизонтальних навантажень, таких як вітер та незначні землетруси, пристрій проявляє майже лінійну еластичну поведінку і виникають лише невеликі зміщення (рис.1.19, історія навантаження I). Однак у випадку великого землетрусу максимальне значення напруження в СПФ зростає, а дроти втрачають жорсткість (рис.1.19, історія навантаження II, плато надпружності).

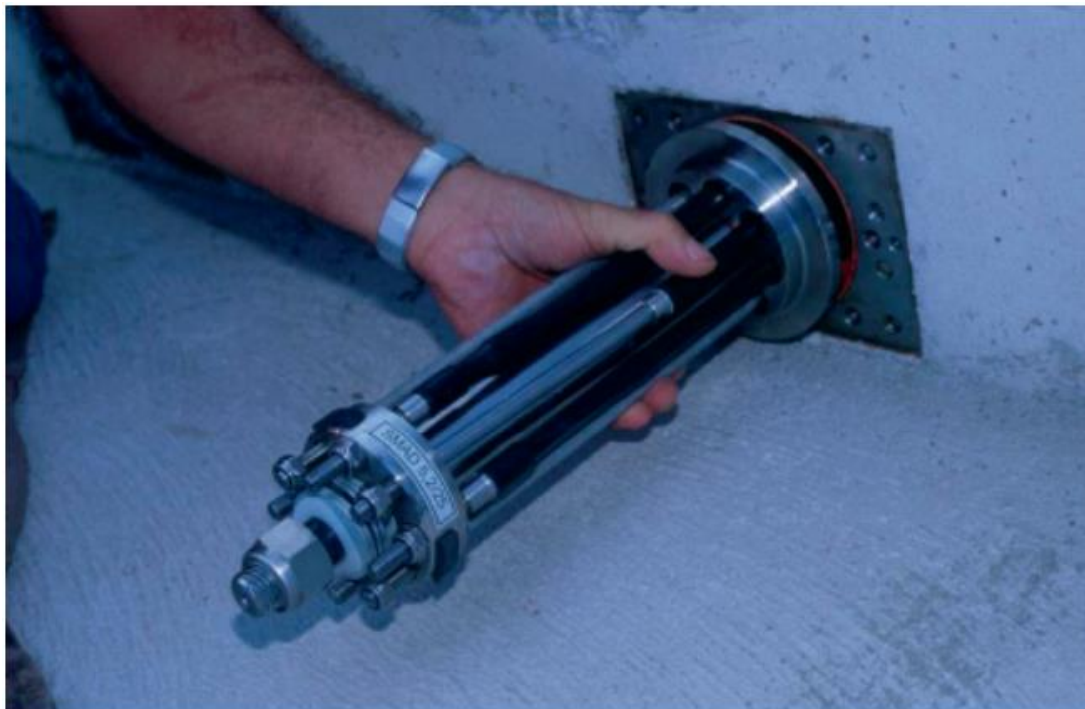


Рисунок 1.17 – Пристрій із сплаву пам'яті форми [23].



Рисунок 1.18 – Натурний вигляд кріплення фронтона із дахом за допомогою пристроїв із сплавом пам'яті форми [23]

Пристрій допускає утворення більших переміщень і, як результат, надає можливість до демпфування з'єднаної конструкції кладки, виконуючи функцію обмежувача навантажень. Гістерезис створюється циклічним розвантаженням і навантаженням.

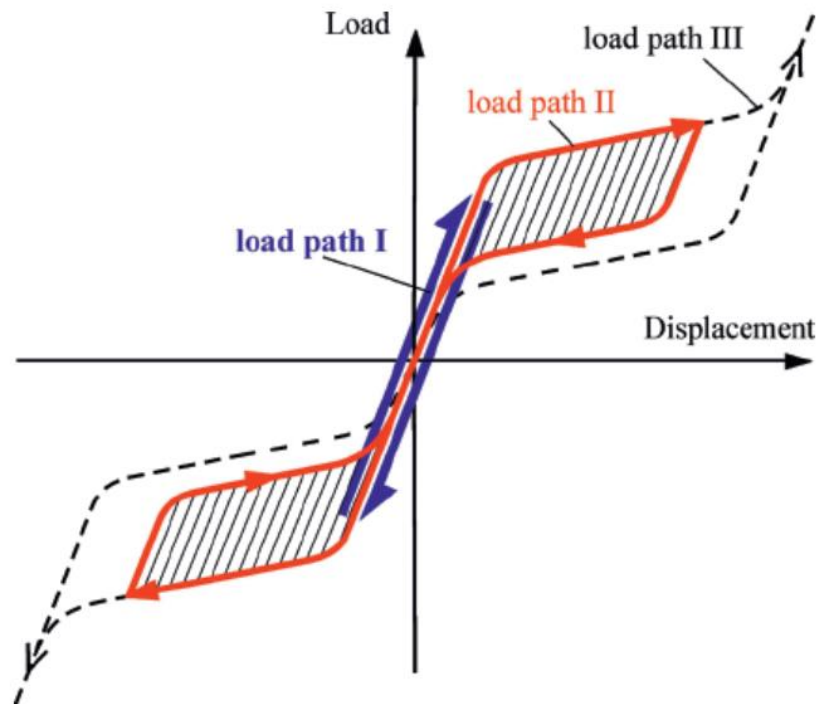


Рисунок 1.19 – Графік залежності деформації від навантаження, що демонструє принцип поведінки пристрою зі сплавом пам'яті форми [24].

Посилення жорсткості СПФ при навантаженні більшим за плато надпружності запобігає розриву фронту основної споруди у разі несподіваного сильного землетрусу (рис.1.19, історія навантаження III). Варто зауважити, що дана модель поведінки пристрою зі сплавом пам'яті форми є спрощенням. Деталі точного дизайну пристрою можна знайти в літературі [25].



## **1.8. Висновок до розділу 1**

Використання СПФ в структурних і сейсмічних застосуваннях все ще знаходиться на ранній стадії досліджень. Проте останні кілька років показали значну перспективу завдяки зниженню цін і поліпшенню якості матеріалу. В той час, як ціна сплавів пам'яті форми все ще вважається високою порівняно з іншими будівельними матеріалами, вартість значно скоротилася. Очікується, що витрати продовжуватимуть зменшуватися в міру вдосконалення виробничих процесів та збільшення кількості методів широкого застосування.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ІЗ ВСТАВКАМИ ЗІ СЛАВУ NI-TI

#### 2.1. Вибір модуля аналітичної системи

Для моделювання поведінки залізобетонної балки та дослідження її напружено-деформованого стану було обрано програмний комплекс ANSYS 2019 R2 (рис.2.1). Даний пакет дозволяє вирішувати широке коло задач в галузі міцності, теплопровідності, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу, що об'єднує всі чотири області. Дозволяє проводити оптимізацію конструкції на основі всіх перерахованих типів аналізу.



Рисунок 2.1 – Запуск програмного комплексу ANSYS 2019 R2

Після запуску відкривається робочий простір Workbench, де одразу була присутня вкладка проєкту Project. На цій вкладці присутні три вікна: вікно інструментів Toolbox (рис.2.2); вікно схем проєкту Project Schematic (рис.2.3); вікно властивостей схем проєкту Properties of Project Schematic (рис.2.4). Для створення розрахункової системи, зі списку аналітичних систем, представлених у вікні Toolbox, обрано модуль аналітичної системи Static Structural (рис.2.5).

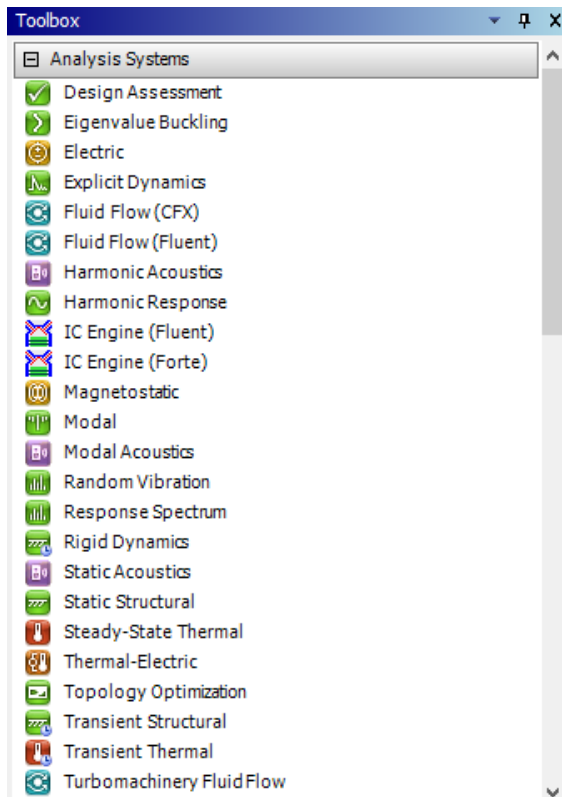


Рисунок 2.2 – Вікно інструментів  
Toolbox

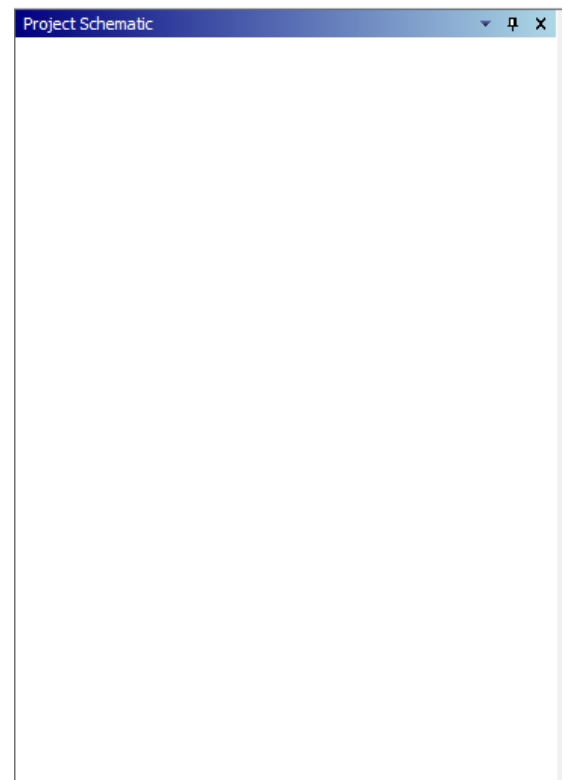


Рисунок 2.3 – Вікно схем проєкту Project  
Schematic

	A	B
1	Property	Value
2	Notes	
3	Notes	
4	Solution Process	
5	Update Option	Run in Foreground

Рисунок 2.4 – Вікно властивостей схем проєкту Properties of Project Schematic

## 2.2. Створення елементів для залізобетонної балки

У розділі Engineering Data додано теку матеріалів та їх властивості для моделювання залізобетонної балки, а саме: бетон C20/25 із нелінійною поведінкою; робоча арматура 400С із нелінійною поведінкою; монтажна арматура 240С із нелінійною поведінкою; сплав Ni-Ti із ефектом надпружності (рис.2.6 – 2.10).

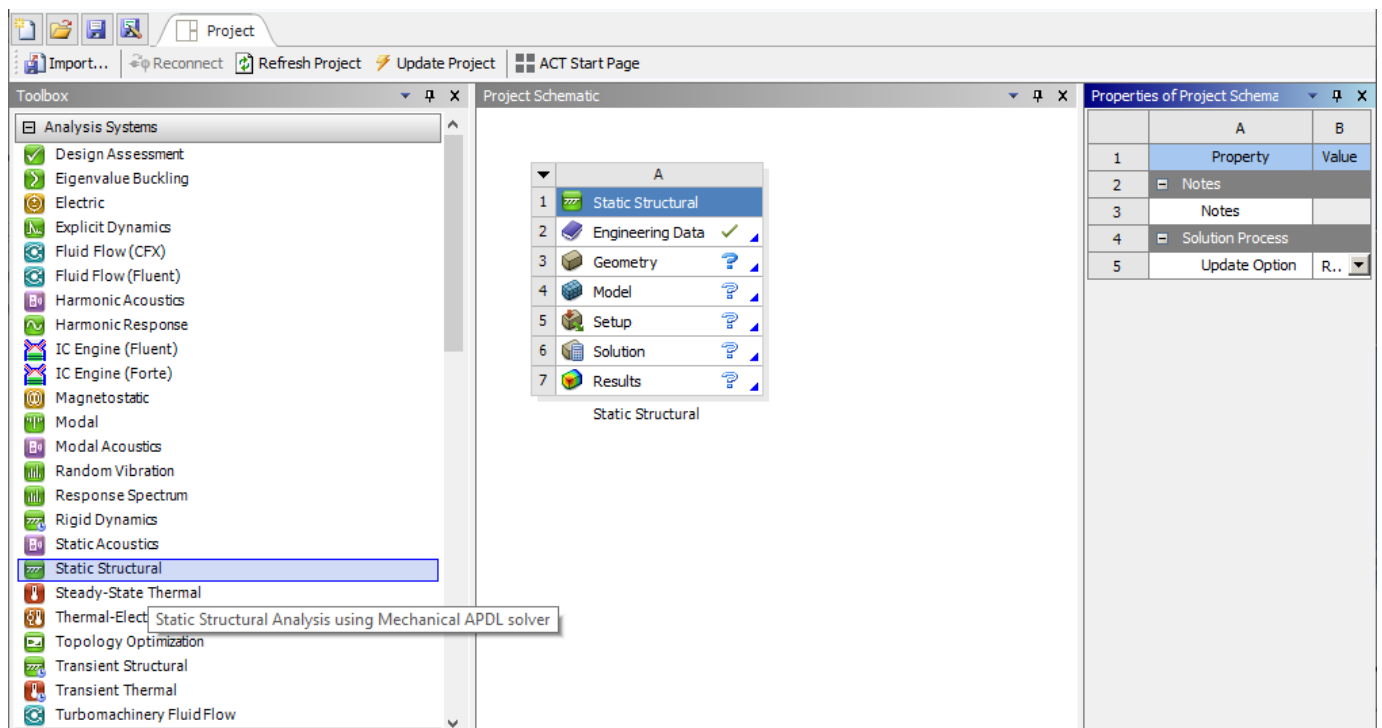


Рисунок 2.5 – Створення статичної задачі у просторі Workbench

Outline of Schematic A2, B2, C2, D2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Ni55,8% Ti44,2%			E:\Дослди\ЗІБ_files\dp0\SYS\ENGD\EngineeringData.xml	
4	Арматура 240С			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	Арматура 400С			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Бетон C20/25			General_Materials.xml	
*	Click here to add a new material				

Рисунок 2.6 – Створення теки матеріалів для моделювання залізобетонної балки

Properties of Outline Row 6: Бетон C20/25				
	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"/> Density	2300	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
5	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient of Thermal Expansion	1.4E-05	C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
6	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	23000	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.2		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.2778E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	9.5833E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/> Uniaxial Compression Test Data	Tabular		<input type="checkbox"/>
13	Has Lateral Strain	No		
14	Scale	1		<input type="checkbox"/>
15	Offset	0	Pa	<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.7 – Властивості бетону C2/25

Properties of Outline Row 5: Арматура 400C				
	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"/> Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
5	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
6	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	2.1E+05	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.3		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
13	Yield Strength	365	MPa	<input type="checkbox"/>
14	Tangent Modulus	4000	MPa	<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.8 – Властивості робочої арматури 400C

Properties of Outline Row 4: Арматура 240С					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young's Modu...			
8	Young's Modulus	2.1E+05	MPa		<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.3			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>	
13	Yield Strength	225	MPa		<input type="checkbox"/>
14	Tangent Modulus	2500	MPa		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.9 – Властивості монтажної арматури 240С

Properties of Outline Row 3: Ni55,8% Ti44,2%					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	6.45	g cm <sup>-3</sup>		<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young's Modu...			
8	Young's Modulus	52700	MPa		<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.36			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	6.2738E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	1.9375E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	Superelasticity			<input type="checkbox"/>	
13	Sigma SAS	450	MPa		<input type="checkbox"/>
14	Sigma FAS	460	MPa		<input type="checkbox"/>
15	Sigma SSA	190	MPa		<input type="checkbox"/>
16	Sigma FSA	100	MPa		<input type="checkbox"/>
17	Epsilon	0.06	m m <sup>-1</sup>		<input type="checkbox"/>
18	Alpha	0			<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.10 – Властивості сплаву Ni-Ti

Для задання властивості нелінійної поведінки бетону у робочому вікні матеріалів залізобетонної балки (рис.2.6) обирає Бетон C20/25. У розділі Hyperplastic Experimental Data, робочого вікна інструментів Toolbox (рис.2.11), обрано опцію Uniaxial Compression Test Data.

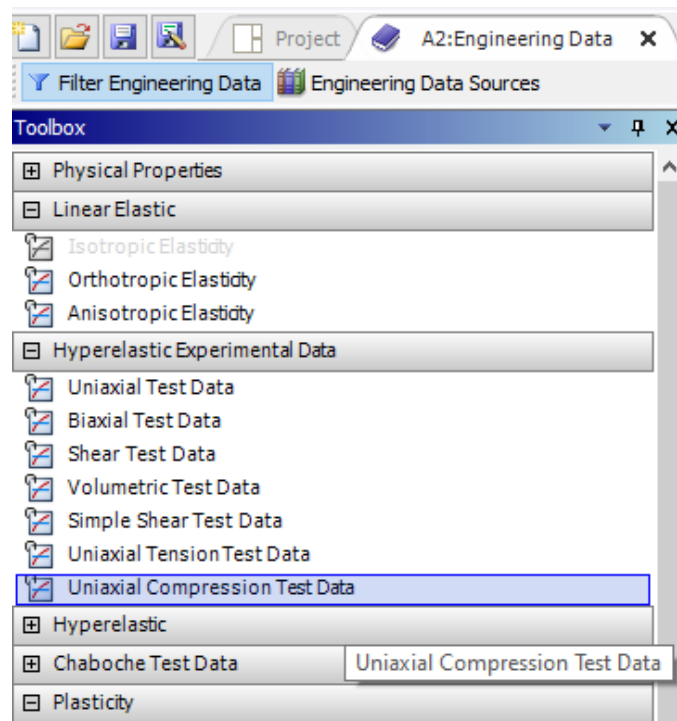


Рисунок 2.11 – Вибір опції Uniaxial Compression Test Data у вікні інструментів Toolbox вкладки Engineering Data

Нелінійну поведінку бетону розраховано як ізотропну полілінійну модель поведінки бетону, яка запропонована Уїльямом і Варнке (William & Warnke)[5].

Згідно моделі Уїльяма і Варнке нелінійну діаграму деформування бетону при стисканні (рис.2.12) можна побудувати за відомими значеннями механічних властивостей бетону, зокрема:

- значення міцності бетону на стиск (напруження руйнування бетону)  
 $f_{cd} = 14,5\text{МПа}$ ;
- початковий модуль пружності бетону  $E_{cd} = 23\text{ ГПа}$ .

Для побудови нелінійної діаграми деформування бетону на стиск використано формули (2.1 – 2.3):

$$f = \frac{E_{cd} \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_D}\right)^2} \quad (2.1);$$

$$\varepsilon_D = \frac{2f_{cd}}{E_{cd}} \quad (2.2);$$

$$E_{cd} = \frac{f}{\varepsilon} \quad (2.3);$$

де  $f$  – напруження за довільної деформації  $\varepsilon$ ;

$\varepsilon_D$  – деформація при напруженні руйнування бетону на стиск  $f$ .

Відмітка 1 – початок діаграми деформування,

Відмітка 6 – відповідає значенню критичної деформації бетону,

Відмітка 2 – відповідає початковій (30%) ділянці пружності бетону,

Відмітки 3, 4, 5 - проміжні точки діаграми, визначаються за формулою (1) при деформаціях 45%, 60%, 80% від критичної  $\varepsilon_D$ .

Отримані значення подано у таблиці 2.1 та у графічному вигляді (рис.2.12).

Таблиця 2.1. Значення нелінійної діаграми деформування бетону на стиск

№ відмітки	Деформація $\varepsilon$ , мм/мм	Напруження $f$ , МПа
1	0	0
2	0,00018913	4,35
3	0,000567391	10,85239085
4	0,000756522	12,79411765
5	0,001008696	14,14634146
6	0,00126087	14,5

Дану поведінку бетону додано у ANSYS у табличній та графічній формах (рис.2.13, 2.14) у властивість Uniaxial Compression Test Data (рис.2.8).



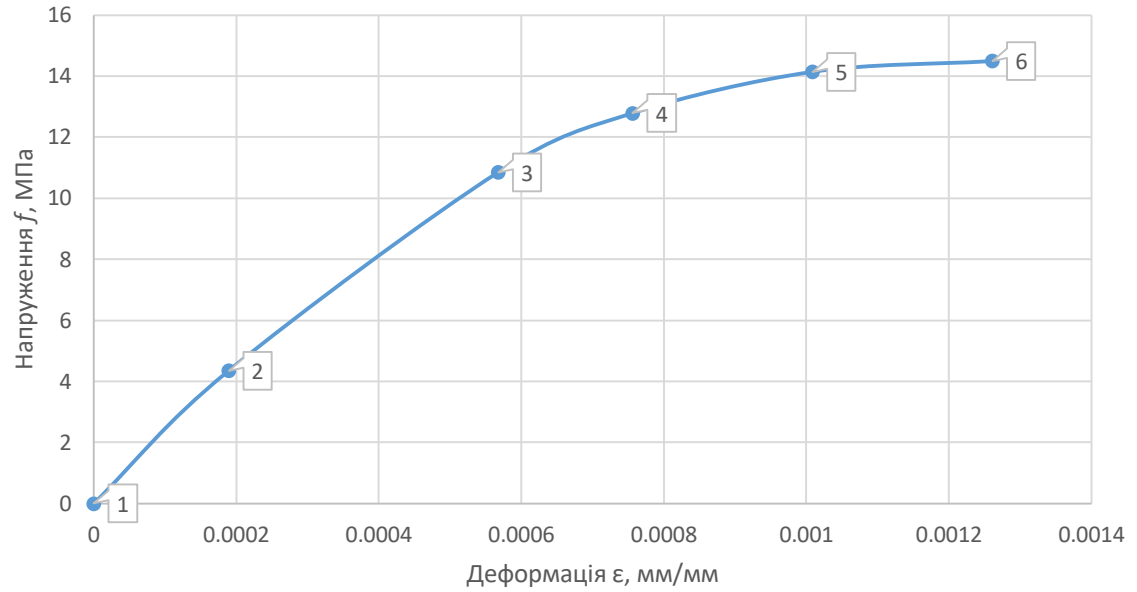


Рисунок 2.12 – Діаграма деформування бетону на стиск

Table of Properties Row 12: Uniaxial Compression Test Data			
	A	B	C
1	Temperature (C)	Strain (mm <sup>-1</sup> )	Stress (MPa)
2	22	0	0
*			
		0.00018913	4.35
		0.00056739	10.852
		0.00075652	12.794
		0.0010087	14.146
		0.0012609	14.5

Рисунок 2.13 – Задання у ANSYS нелінійної поведінки бетону

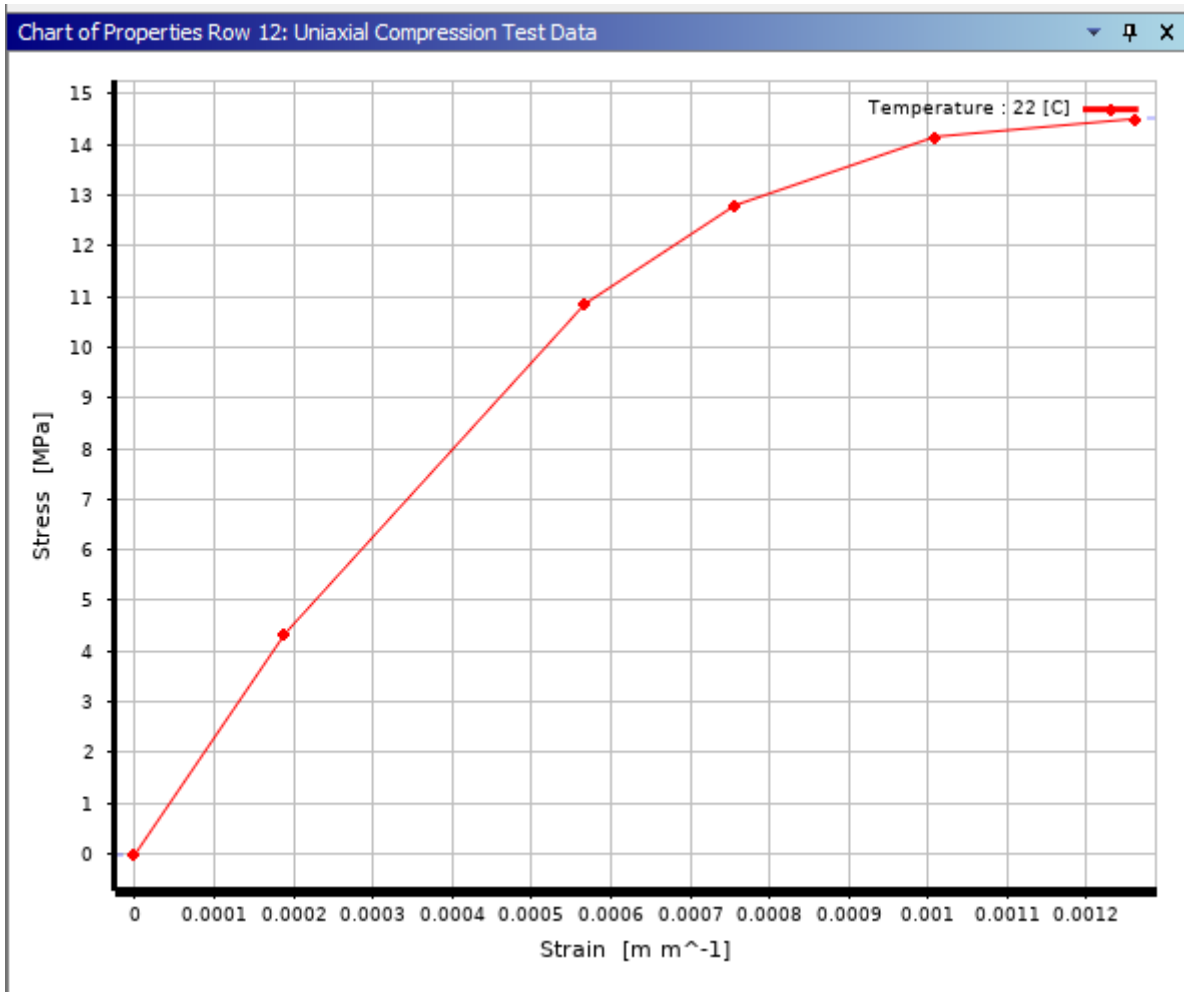


Рисунок 2.14 – Діаграма деформування бетону задана у ANSYS

Нелінійна поведінка робочої (A 400C) та монтажної (A 240C) арматур у ANSYS задана білінійною пружно-пластичною діаграмою деформування Bilinear Isotropic Hardening (рис.2.15-2.18 відповідно).

	A	B	C
1	Temperature (C) ▾	Yield Strength (MPa) ▾	Tangent Modulus (MPa) ▾
2		365	4000
*			

Рисунок 2.15 – Задання нелінійної поведінки робочої арматури A 400C

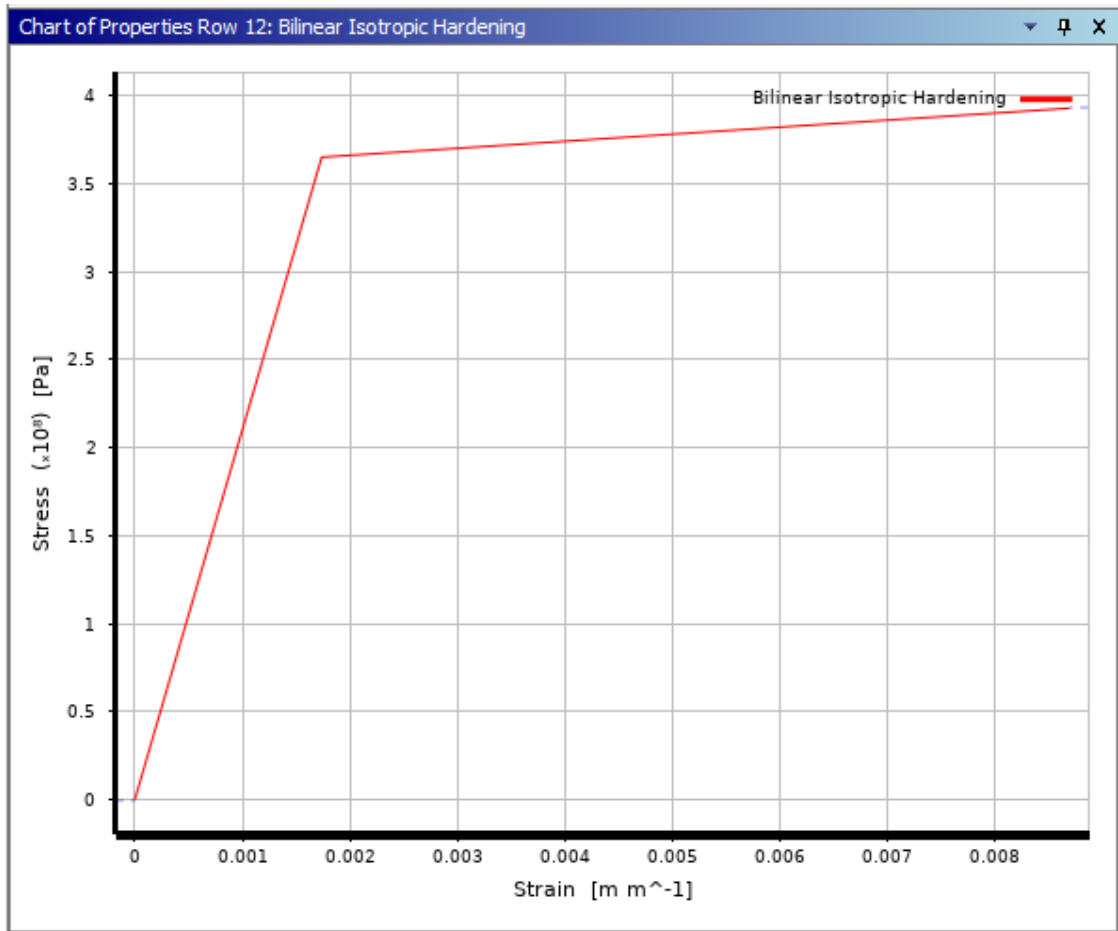


Рисунок 2.16 – Білінійна діаграма пружно-пластичного деформування робочої арматури А 400С

Table of Properties Row 12: Bilinear Isotropic Hardening			
	A	B	C
1	Temperature (C)	Yield Strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)
2		225	2500
*			

Рисунок 2.17 – Задання нелінійної поведінки монтажної арматури А 240С

Фізико-механічні властивості бетону та арматури відповідають: ДБН [6] та ДСТУ [7].

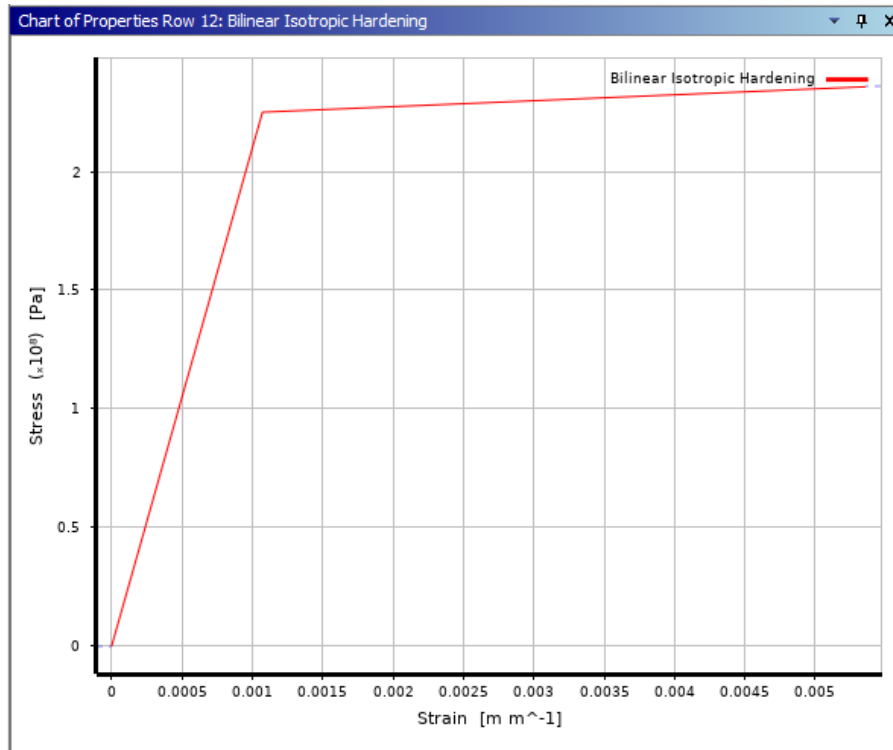


Рисунок 2.16 – Білінійна діаграма пружно-пластичного деформування монтажної арматури А 240С

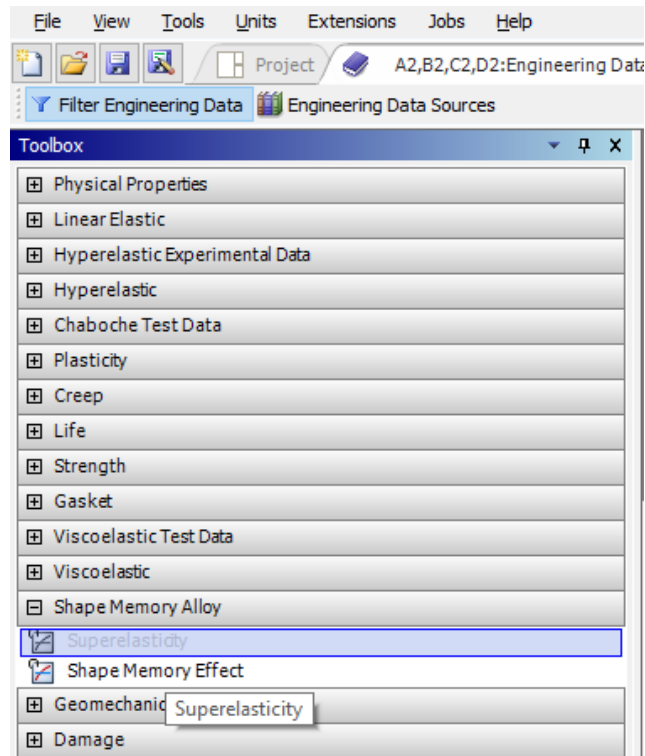


Рисунок 2.17 – Вибір властивості Superelasticity у вікні інструментів Toolbox вкладки Engineering Data

Для задання ефекту надпружності у ANSYS для сплаву Ni-Ti у робочому вікні матеріалів залізобетонної балки (рис.2.6) обираємо елемент Ni55,8% Ti44,2%. У розділі Share Memory Alloy, робочого вікна інструментів Toolbox (рис.2.17), обираємо властивість Superelasticity.

У вікні властивостей ефекту надпружності Superelasticity (рис.2.10), задано значення характеристик Ni-Ti сплаву, що визначалися експериментально за деформування розтягом при температурі 18°C [8].

### 2.3. Створення просторової моделі залізобетонної балки

Створення просторової моделі виконане у робочому просторі програми SpaceClaim – програма комп’ютерного дизайну для створення твердих тіл, розроблена під Microsoft Windows компанією SpaceClaim Corporation.

Перейшовши у розділ геометрії Geometry (рис.2.18), вікна схем проекту Project Schematic (рис.2.3), було запущено SpaceClaim (рис.2.19).

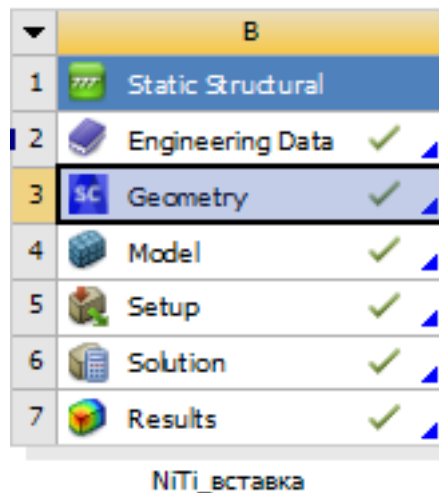


Рисунок 2.18 – Розділ Geometry у схемі проекту

У робочому просторі програми SpaceClaim створено залізобетонну балку із вставками зі сплаву Ni-Ti (рис.2.20). Характеристики конструкції: залізобетонна балка  $b = 80$  мм,  $h = 140$  мм,  $L = 1200$  мм; арматура A400C 2Ø12мм; монтажна арматура A240C 2Ø6мм.

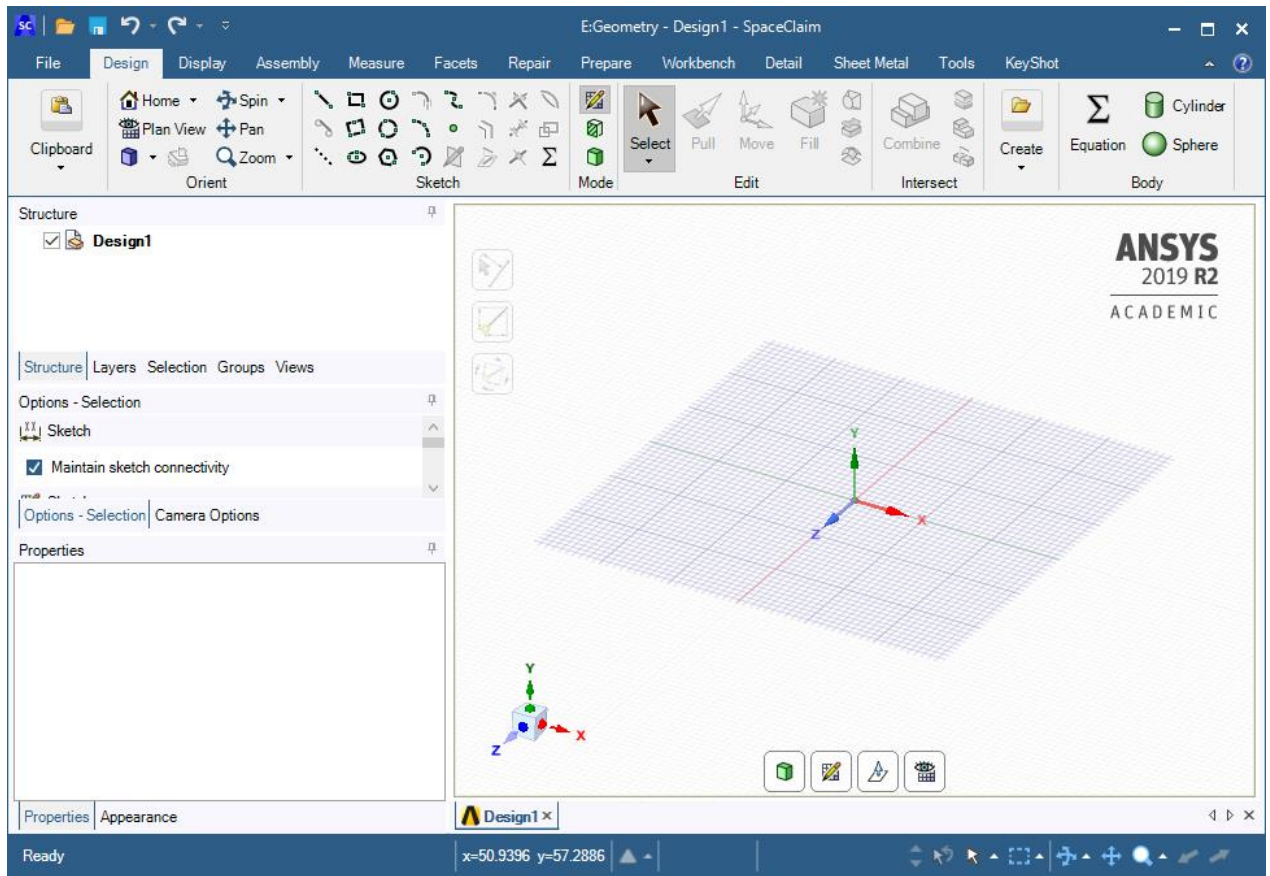


Рисунок 2.19 – Робочий простір програми SpaceClaim

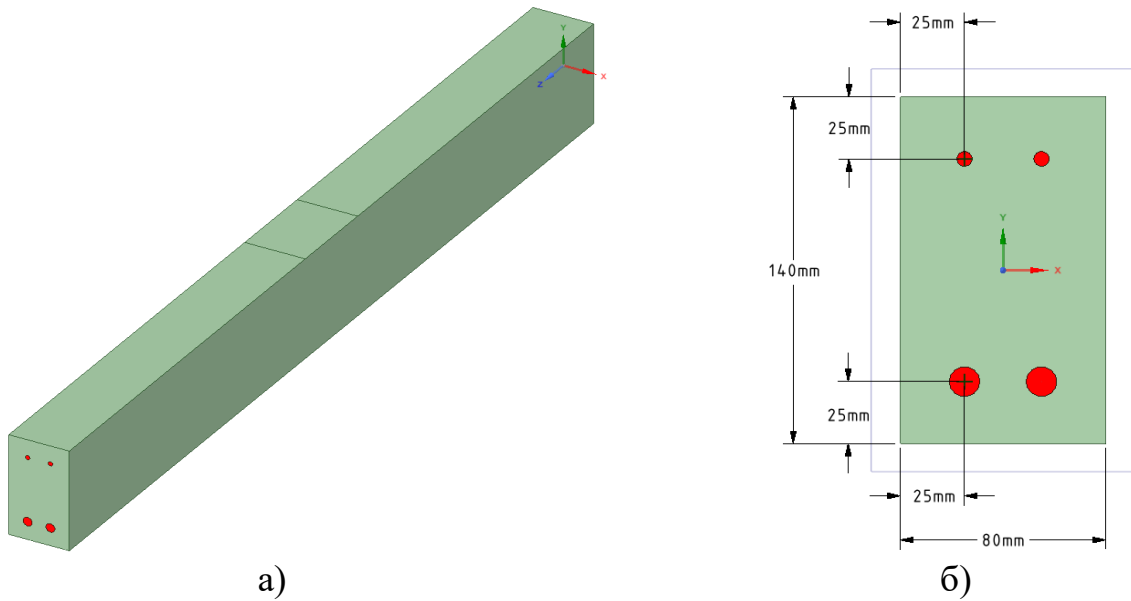


Рисунок 2.20 – Просторова модель залізобетонної балки: а) основний вигляд;  
б) розміщення арматури

Під час створення просторової моделі балки, початок координатних осей розташовано у центрі фронтальної грані,  $OZ$  спрямовано вздовж балки,  $OY$  – по висоті перерізу балки, як показано на рисунку 2.20 (а, б).

Вставку із сплаву Ni-Ti довжиною 120 мм розміщено у центрі кожної робочої арматури (рис.2.21).

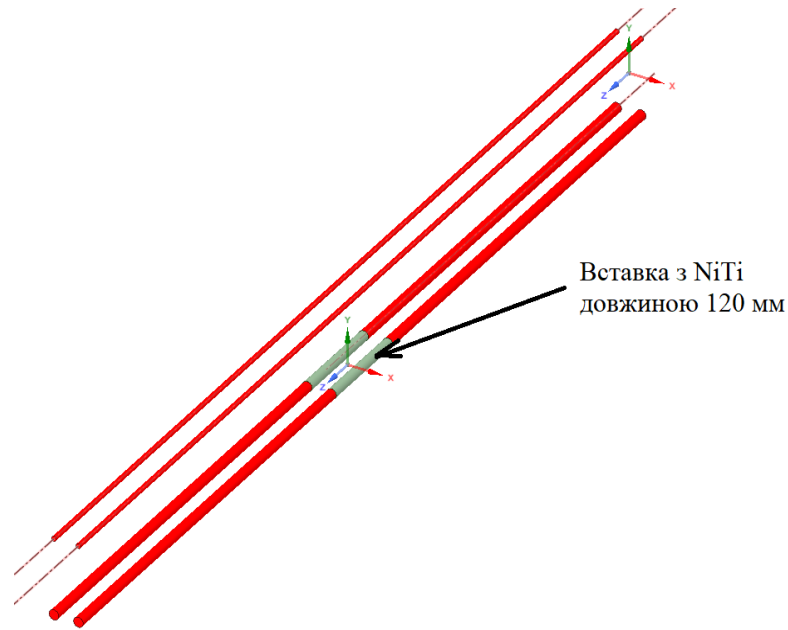


Рисунок 2.21 – Розміщення вставки із сплаву Ni-Ti

#### 2.4. Створення розрахункової моделі залізобетонної балки із вставкою зі сплаву Ni-Ti

Створення розрахункової моделі відбувалося у робочому просторі програми ANSYS Mechanical Enterprise (рис.2.22) – це новітнє програмне середовище для розв'язування задач механіки, яке використовує аналіз методом скінченних елементів (АСЕ). Дана програма дозволяє змодельовати сучасні матеріали, складні екзогенні впливи та конкретно-галузеві вимоги у таких сферах, як гідродинаміка відкритих вод та багатошарові композитні матеріали.

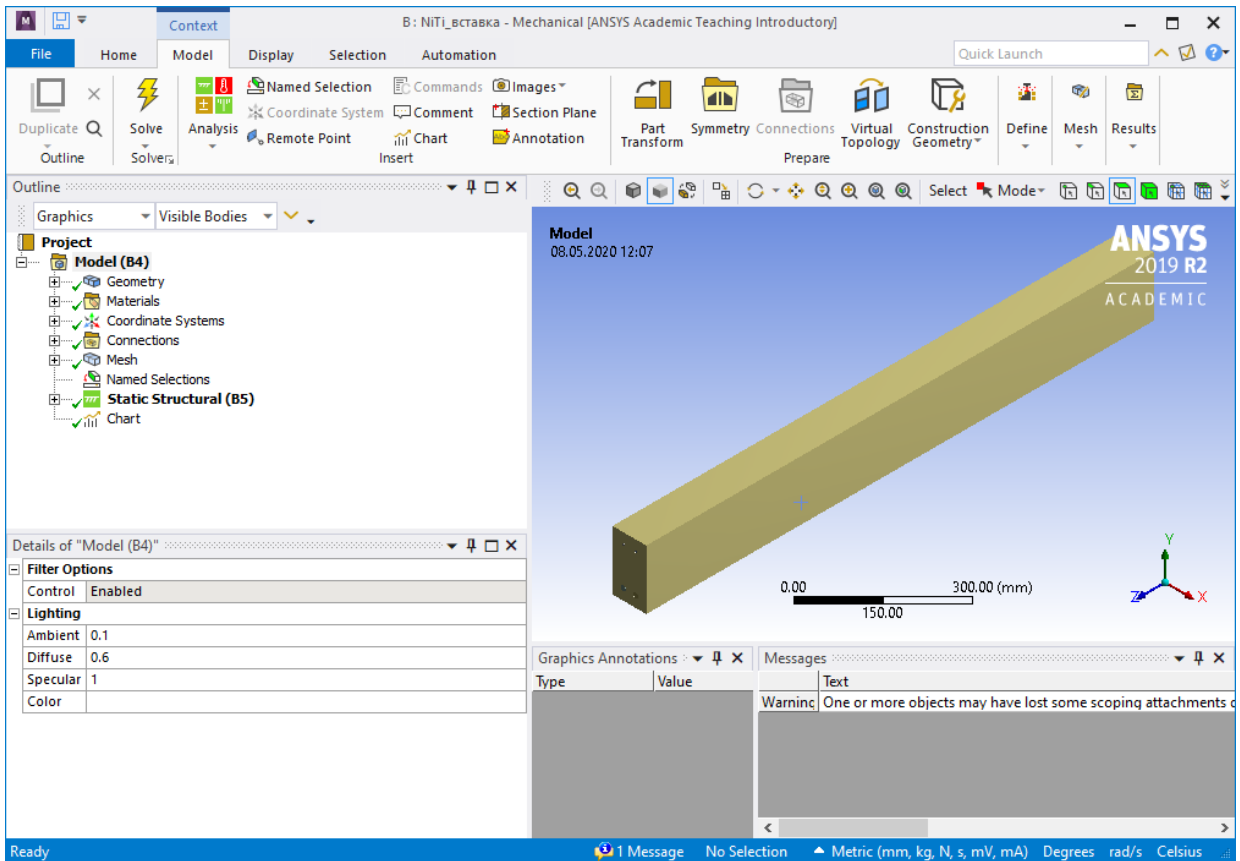


Рисунок 2.22 – Робочий простір програми ANSYS Mechanical Enterprise

Щоб надати кожному об'ємному елементу відповідні характеристики, у вікні розгалужень Outline (рис.2.23) у гілці Geometry обираю потрібне геометричне тіло та у вікні Details of «*назва елемента*» задано відповідний матеріал у рядку Assignment (рис.2.24).

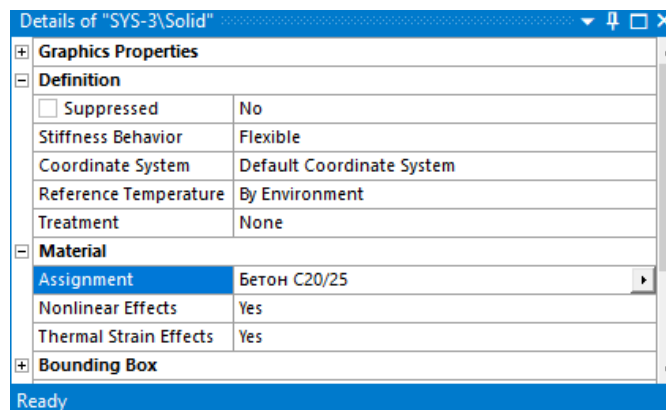


Рисунок 2.24 – Надання об'ємному тілу властивостей відповідного елемента



Гілку Connection створено автоматично на програмному рівні, що моделює взаємозв'язок передачі реакцій між елементами, поверхні яких дотичні (рис.2.25). У даному випадку програмою підбрано тип взаємодії Bonded між елементами залізобетонної балки: Бетон C20/25, Арматурою 400С, Арматурою 240С та Ni55.8% Ti44.2%.

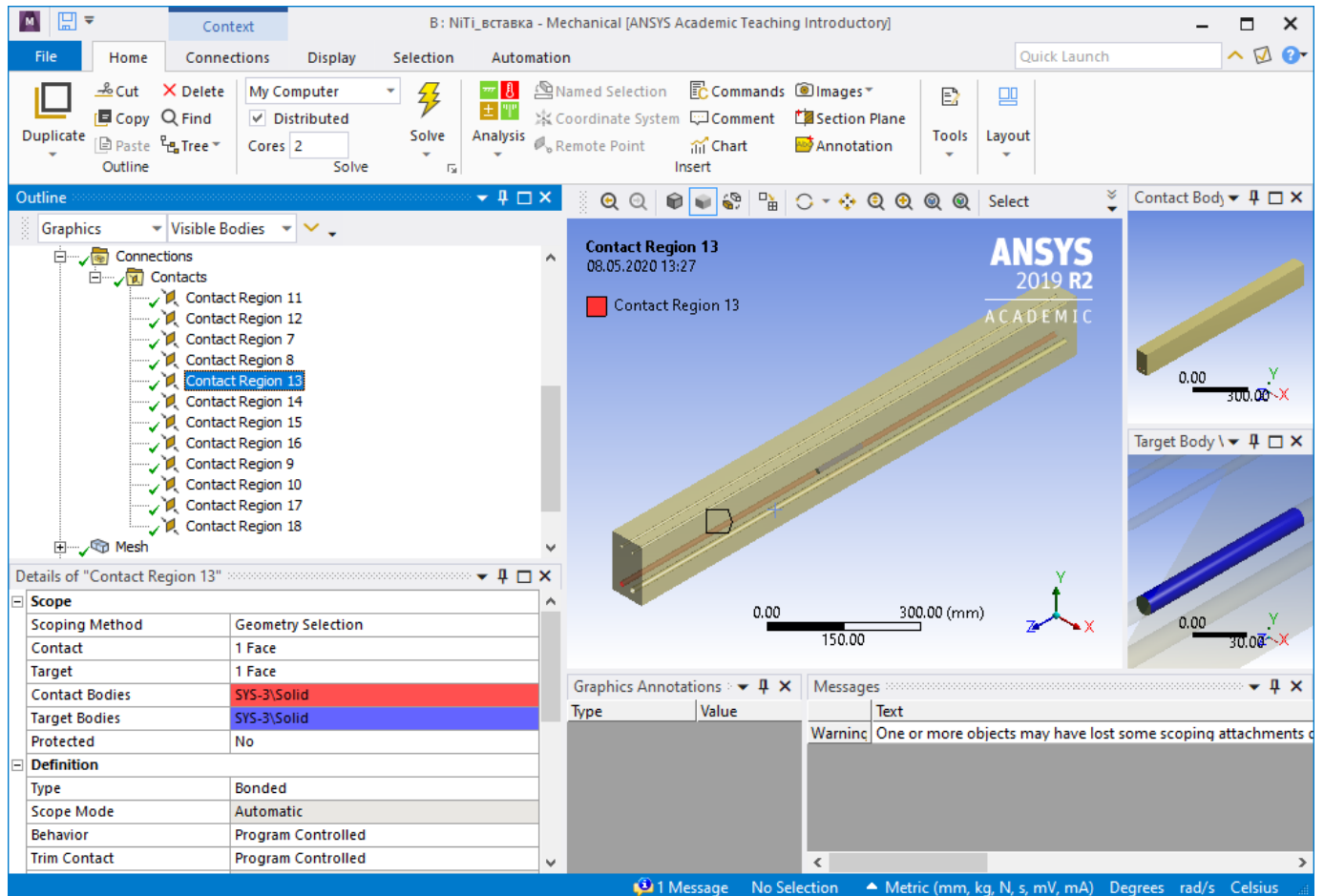


Рисунок 2.25 – Створені місця з'єднань елементів

У вітці Mesh задано поділ об'ємних тіл на скінченні елементи. У цьому дослідженні поділ задано таким чином: бетонний елемент поділений програмою (рис.2.26); арматурні стержні поділені вздовж із кроком 25 мм (рис.2.27); стержні зі сплаву Ni-Ti – 20 мм (рис.2.28). Такий поділ зумовлено обмеженнями студентської версії ANSYS.

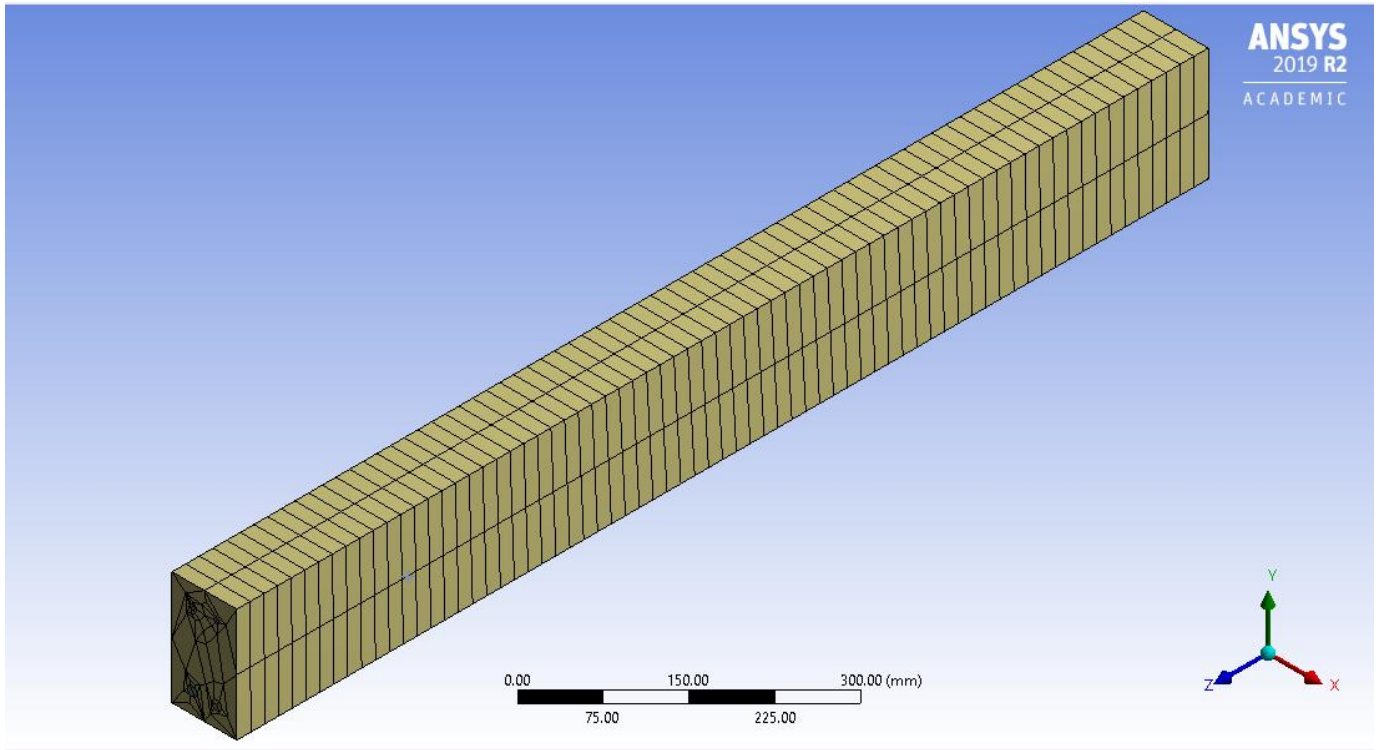


Рисунок 2.26 – Поділ тіла Бетон C20/25 на скінченні елементи

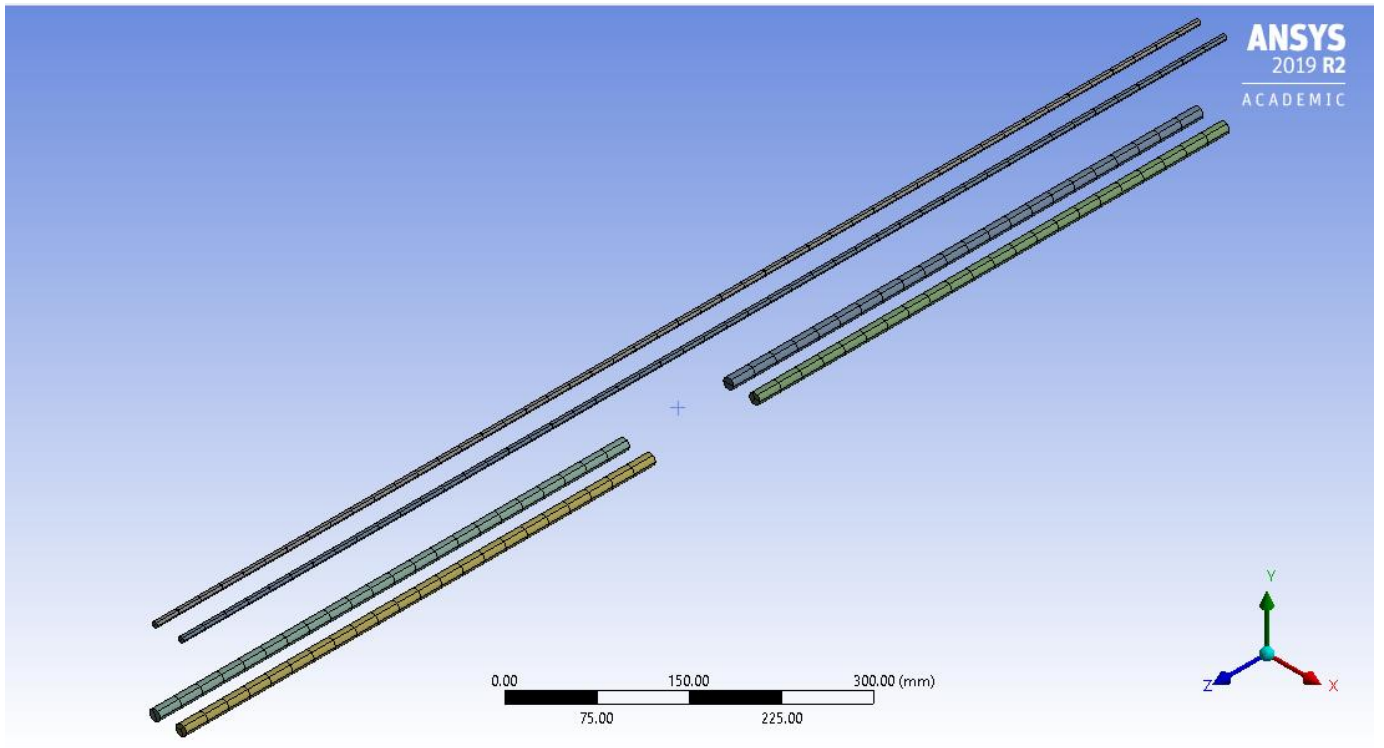


Рисунок 2.27 – Поділ тіл Арматура 400С та Арматура 240 С на скінченні елементи

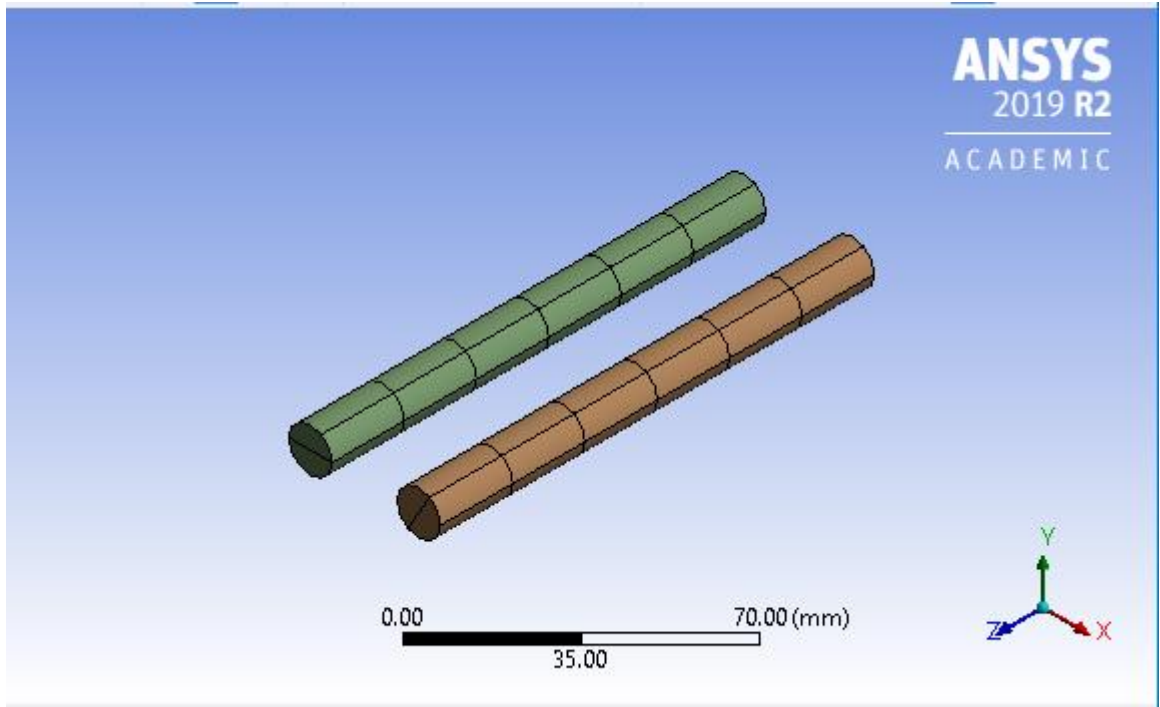


Рисунок 2.28 – Поділ тіла Ni55.8% Ti44.2% на скінченні елементи

Створено розрахункову модель (рис.2.29), що відповідає розрахунковій схемі вільноопертої балки.

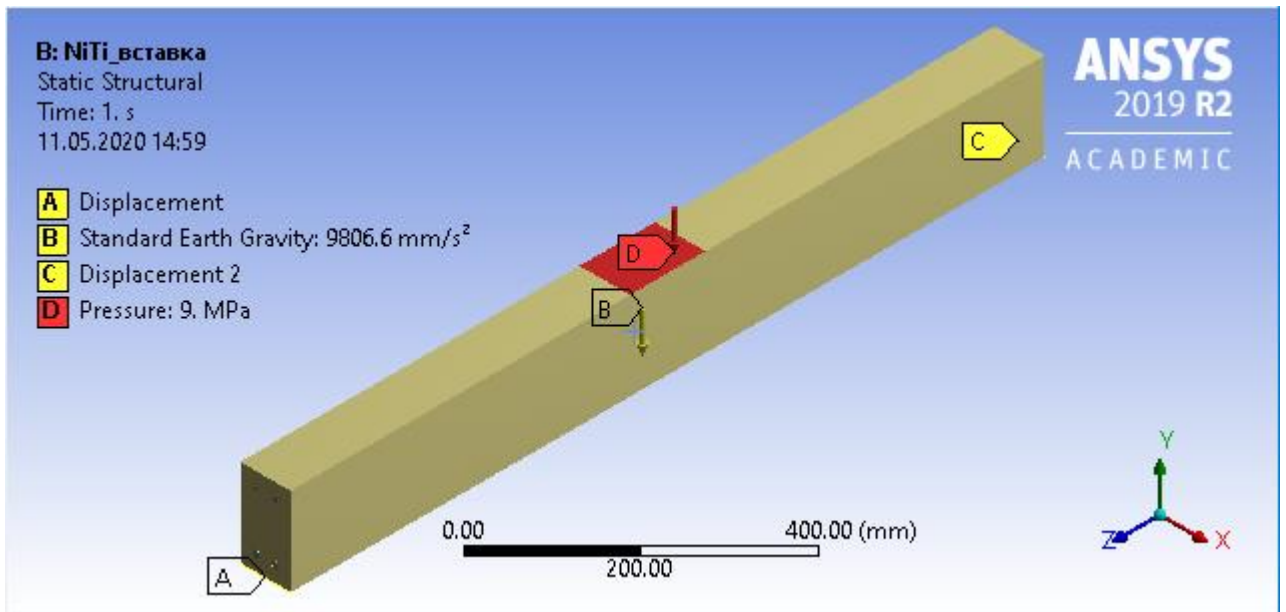


Рисунок 2.29 – Розрахункова схема вільноопертої залізобетонної балки

В'язі задані як заборона переміщень у напрямках осей  $OZ$ ,  $OX$ ,  $OY$  (мітка А, рис.2.29) та дозволене вільне переміщення у напрямку осі  $OZ$  (мітка С, рис.2.29). На балку задане (мітка D, рис.2.29) розподілене навантаження на площині  $120 \times 80$  мм, симетричній відносно геометричного центру верхньої грані та спрямована в напрямку  $-Y$ . Також присутня сила тяжіння (мітка В, рис.2.29) спрямована в напрямку  $-Y$ . Розглянуто випадок навантаження і розвантаження до значення  $0$  МПа.

У гілці Solution додано запит на розв'язок еквівалентних напружень і еквівалентних пластичних деформацій балки та, окремо, арматури, спрямованого переміщення балки вздовж осі  $OY$ .

## **2.5. Висновок до розділу 2**

У розділі 2 розглянуто метод створення залізобетонної балки зі вставками надпружного Ni-Ti сплаву у прикладній програмі ANSYS 2019 R2. Розглянуто метод задання нелінійної поведінки бетону на стиск, як ізотропну полілінійну модель поведінки бетону, яка запропонована Уїльямом і Варнке. Задано нелінійну поведінку бетону та арматур. Задано надпружну властивість для Ni-Ti сплаву. Створено математичну модель із скінчених елементів.

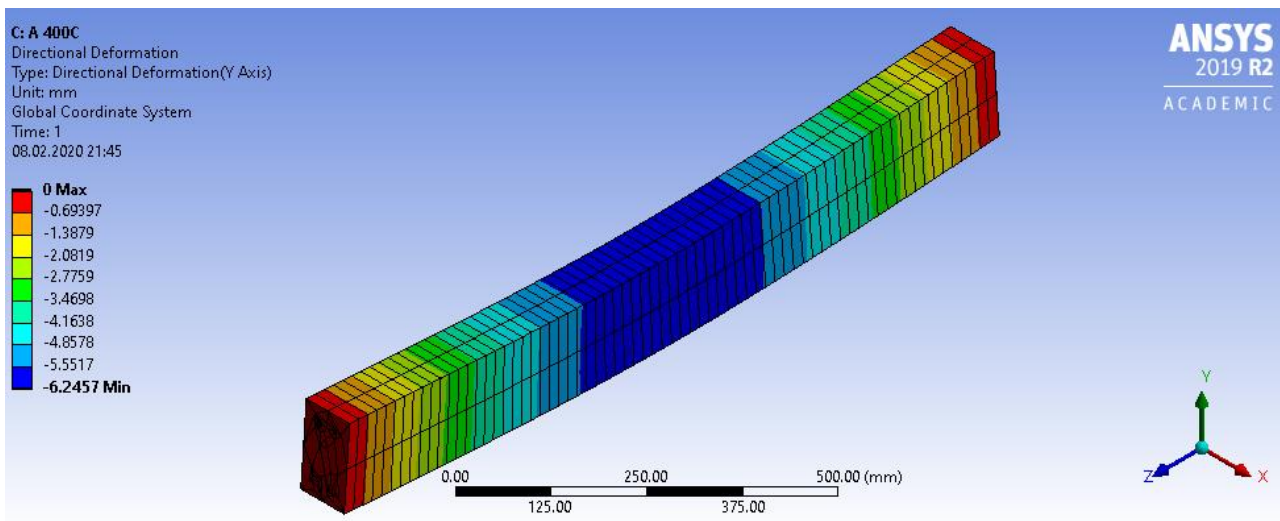
## РОЗДІЛ 3

### НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ПІДСИЛЕНОЇ ВСТАВКАМИ ІЗ СПФ

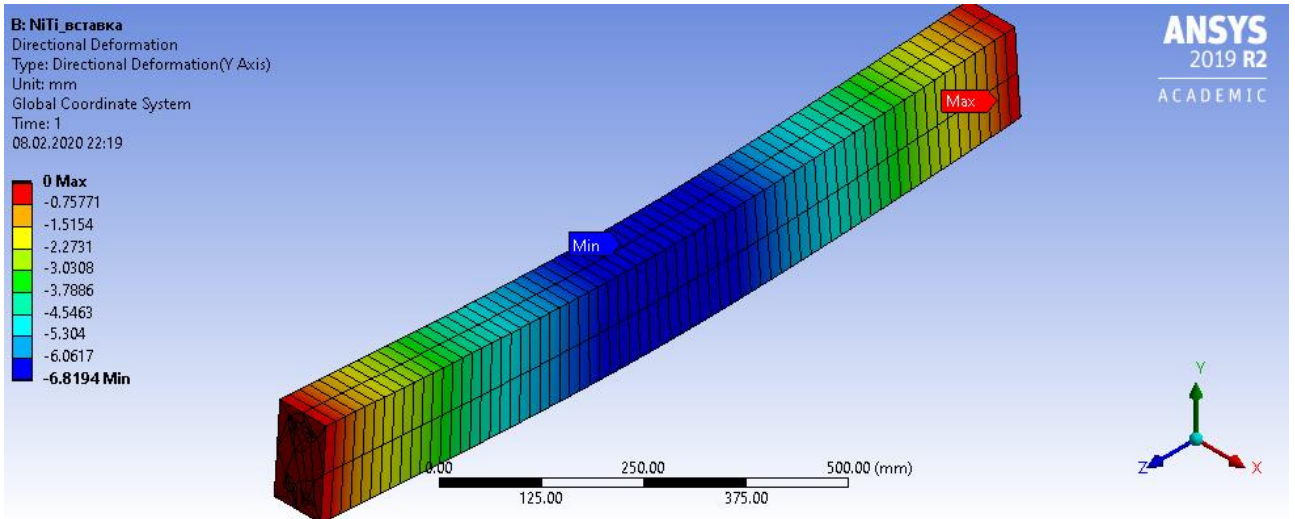
Досліджено напружено деформований стан залізобетонної балки із вставками із СПФ піддану розподіленому навантаженню на площині 120×80 мм.

#### 3.1. Аналіз переміщень і деформацій

На рисунку 3.1 представлено розподіл полів переміщень (прогинів) в балці з робочою арматурою 400С (а) і зі вставкою СПФ (б) при максимальному навантаженні на балку 9 МПа (це напруження) з урахуванням ваги балки. Із аналізу результатів слідує, що балка із вставкою із СПФ прогнулася на 9,2% більше ніж балка із робочою арматурою 400С. Це спричинено меншою жорсткістю СПФ у порівнянні із класичною арматурою. Модуль пружності Ni-Ti сплаву (рис.2.10) майже у 4 рази менший за модуль пружності сталеві робочої арматури (рис.2.8).



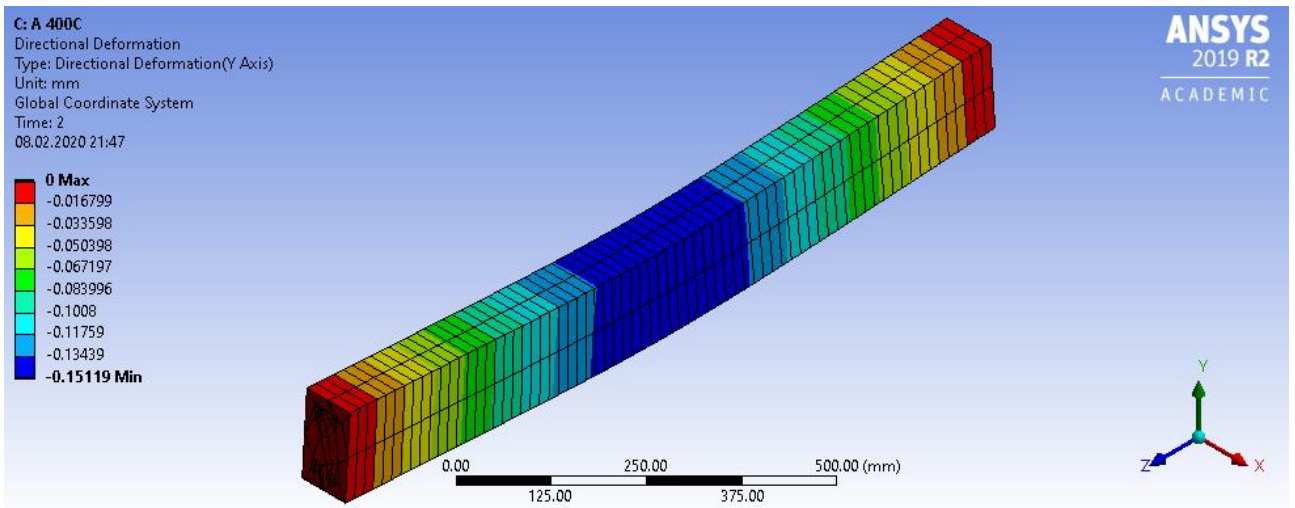
a)



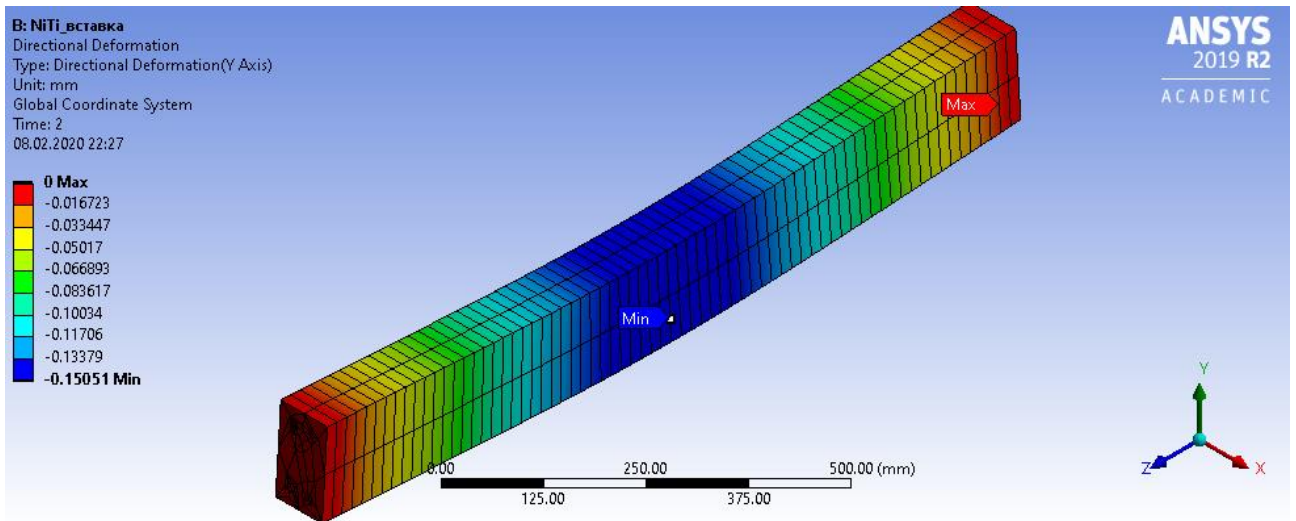
б)

Рисунок 3.1 – Максимальний прогин балки: а) – з робочою арматурою 400С;  
 б) – зі вставкою СПФ.

Проте, після розвантаження, залишкові прогини балок з робочою арматурою 400С (а) і із вставкою СПФ (б) практично незмінні (рис.3.2).



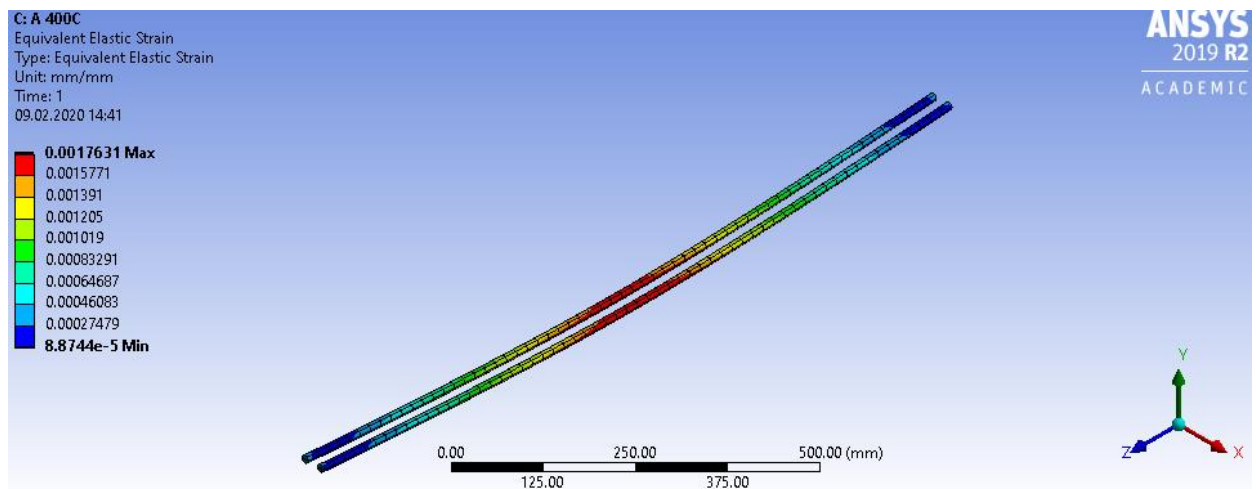
а)



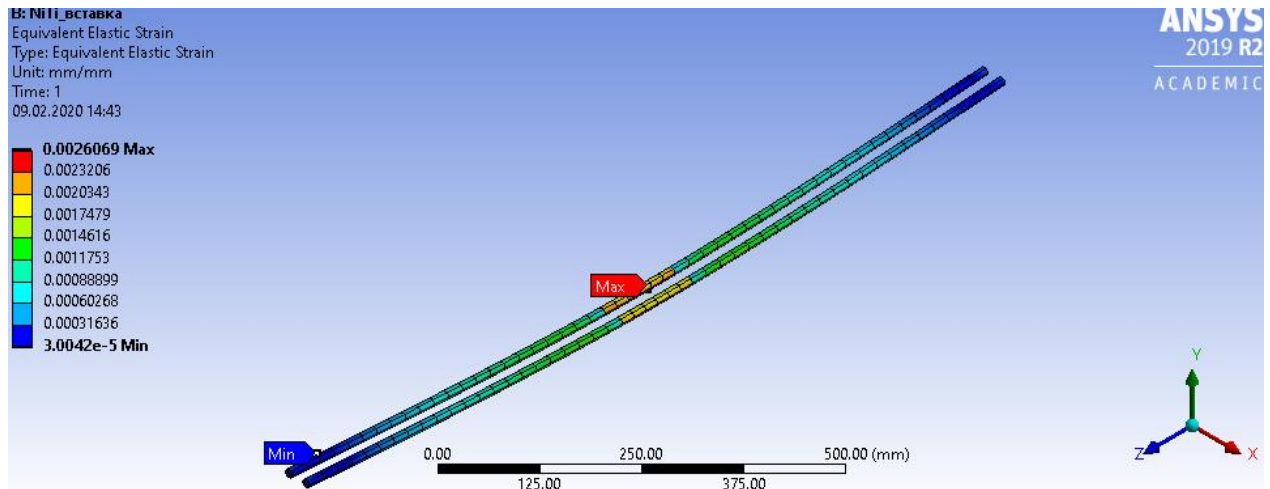
б)

Рисунок 3.2 – Залишковий прогин балки: а) – з робочою арматурою 400С;  
 б) – зі вставкою СПФ.

Заміна ділянки робочої арматури на вставку із Ni-Ti сплаву значно збільшує локальне максимальне видовження арматури (рис.3.3), що цілком передбачувано, враховуючи діаграму деформування надпружного СПФ. Максимальне еквівалентне видовження арматури із вставкою СПФ більше, ніж у балці без вставки на 47,8%.



а)



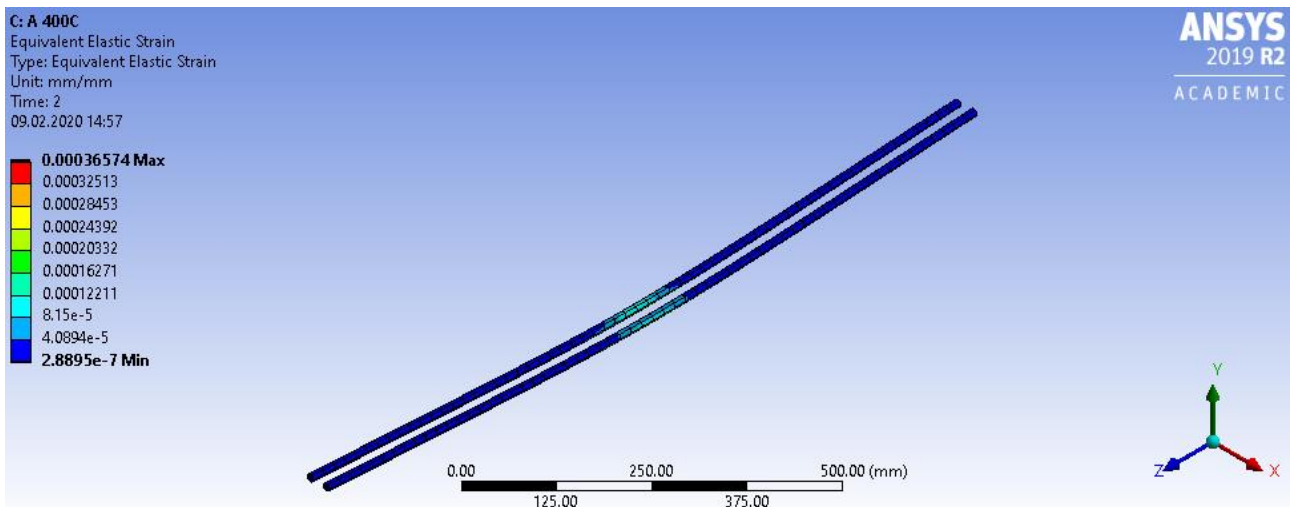
б)

Рисунок 3.3 – Еквівалентне відносне видовження за максимального навантаження:

а) – робочої арматури 400С;

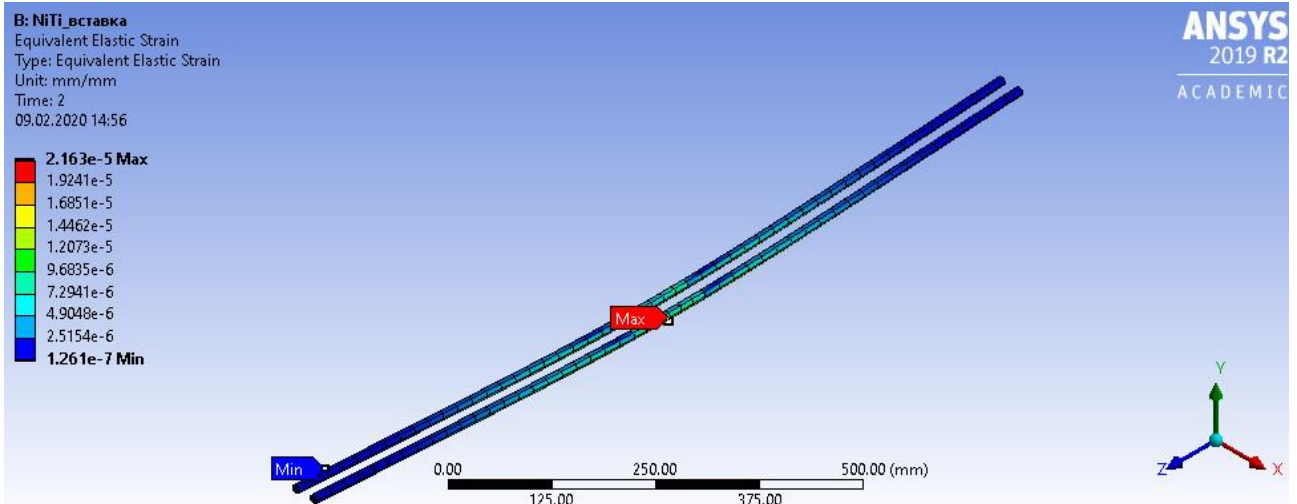
б) – робочої арматури зі вставкою СПФ.

Також, аналізуючи рисунок 3.4, можна зробити висновок, що вставки із надпруженого СПФ майже у 17 разів зменшують максимальне залишкове еквівалентне відносне видовження робочої арматури порівняно із робочою арматурою 400С.



а)





б)

Рисунок 3.4 – Залишкове еквівалентне відносне видовження: а) – робочої арматури 400С; б) – робочої арматури зі вставкою СПФ.

На діаграмі (рис.3.5) показано як робоча арматура деформується вздовж своєї осі під час навантаження та повного розвантаження при класичному армуванні та при армуванні із використанням вставки СПФ.

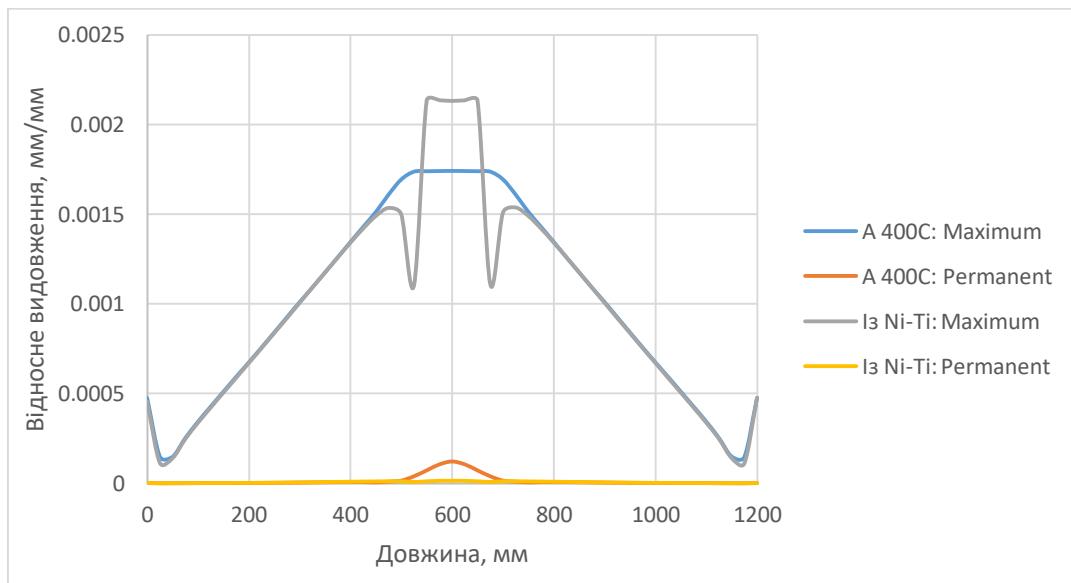
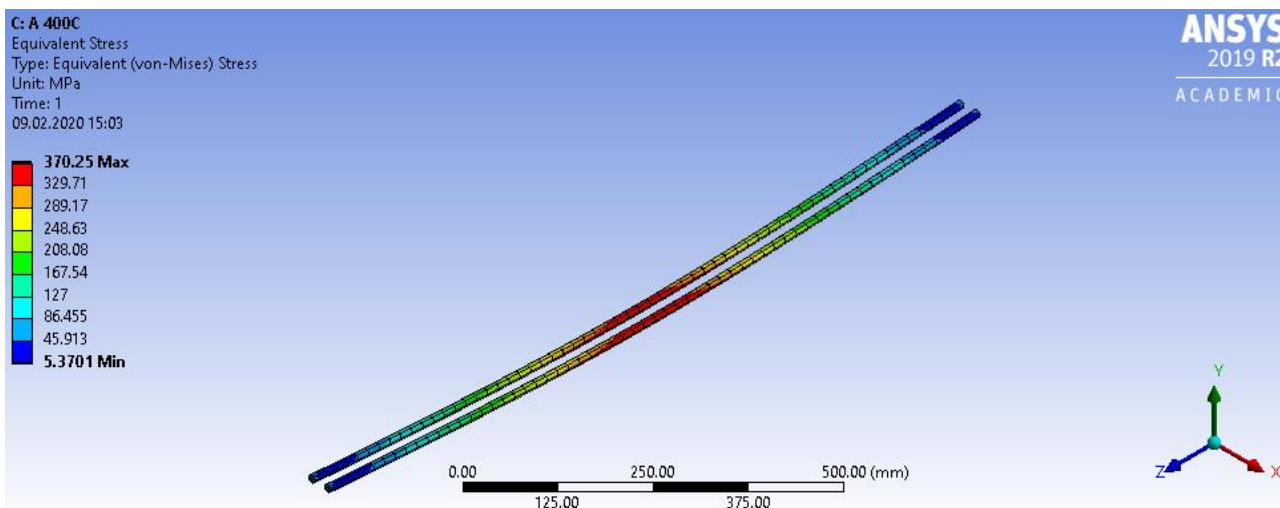


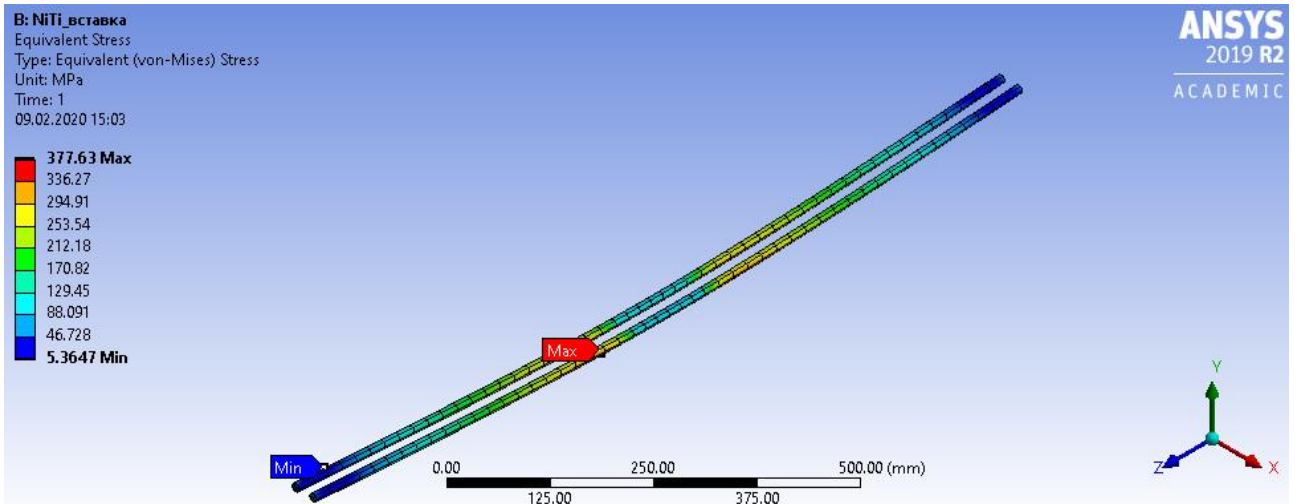
Рисунок 3.5 – Розподіл відносного видовження вздовж центральної осі робочої арматури

### 3.2. Аналіз напруженого стану

На рисунку 3.6 подано розподіл полів еквівалентних напружень в робочій арматурі 400С (а) та в робочій арматурі 400С зі вставкою СПФ за прикладеного навантаження. Із аналізу цих даних (рис.3.6), можна зробити висновок, що максимальні напруження ( $\sigma = 370$  МПа) на серединній ділянці балки перевищують границю текучості арматури 400С ( $\sigma_{0,2} = 365$  МПа), що спричиняє появу пластичних деформацій на цій ділянці. Заміна серединної ділянки робочої арматури 400С вставкою із надпружного Ni-Ti сплаву усуває вказану проблему. Тому, для зменшення напруження у робочій арматурі, потрібно замінити ділянку арматури 400С, де напруження перевищують границю текучості  $\sigma_{t0,2}$ , на вставку із СПФ.



a)



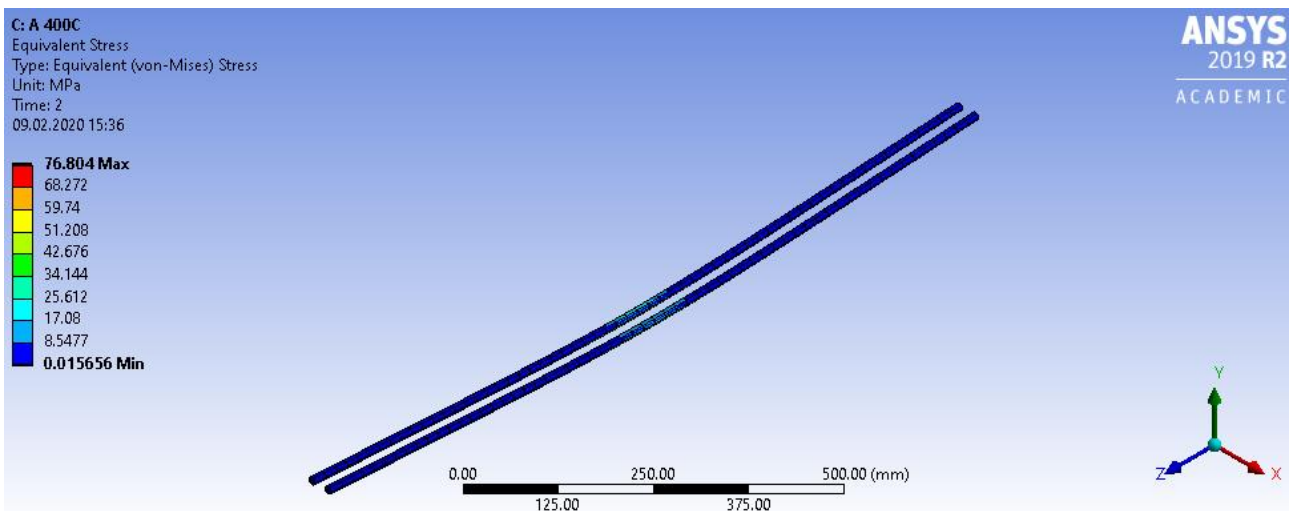
б)

Рисунок 3.6 – Еквівалентне напруження за максимального навантаження:

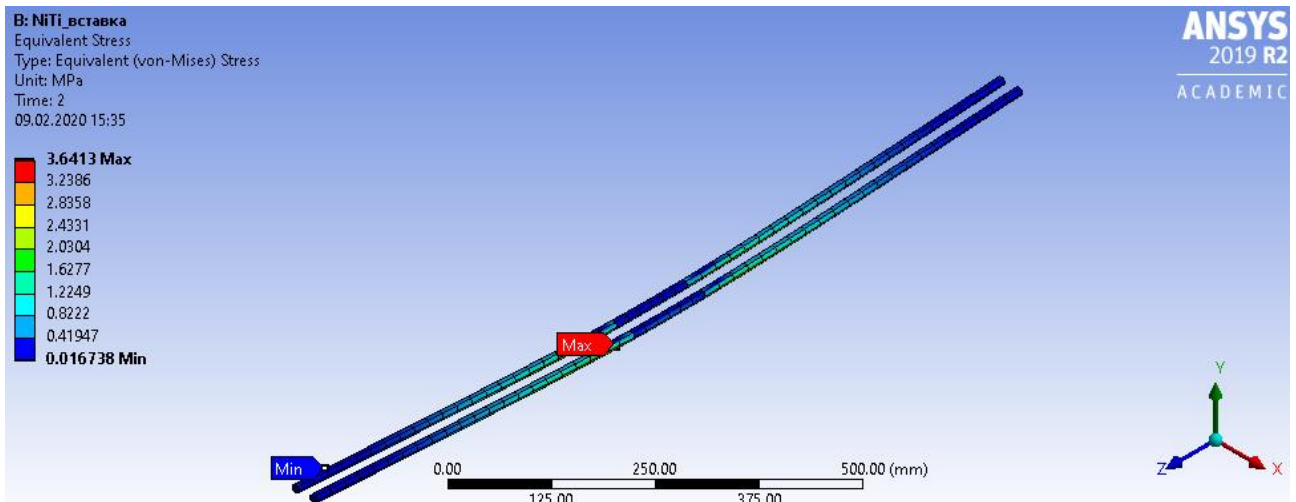
а) – в робочій арматурі 400С;

б) – в робочій арматурі зі вставкою СПФ

На рисунку 3.7 подано розподіл залишкових полів еквівалентних напружень в робочій арматурі 400С (а) в робочій арматурі 400С зі вставкою СПФ. З рисунку 3.7 можна зробити висновок, що вставка СПФ у робочу арматуру зменшила максимальні залишкові розтягуючі напруження у 21 раз, з 76,8 МПа до 3,64 МПа.



а)



б)

Рисунок 3.7 – Залишкове еквівалентне напруження: а) – в робочій арматурі 400С;  
 б) – в робочій арматурі зі вставкою СПФ

На діаграмі (рис.3.8) показано як змінюється напруження в робочій арматурі вздовж осі за максимального навантаження і після повного розвантаження при класичному армуванні та при армуванні із використанням вставки СПФ. Зменшення напруження в робочій арматурі при максимальному навантаженні спостерігається на ділянці від 450 до 750 мм, а залишкового напруження на ділянці від 525 мм до 675 мм.

Різниця у значеннях напружень робочих арматур 400С у залізобетонних балках підсиленими вставками із надпружного Ni-Ti сплаву (рис.3.6, 3.7 та 3.8) пов'язана із градієнтом напружень по січенню арматури. При навантаженні максимальні напруження виникають в нижніх розтягнутих волокнах робочої арматури (рис. 3.6), а результати представлені на рисунку 3.8 відносяться до осі робочої арматури.

На рисунках 3.9-3.12 показано розподіл полів напружень в поперечному перерізі робочої арматури 400С на відстані 600 мм (рис. 3.9-3.10) і робочої арматури 400С із вставкою СПФ на відстані 500 мм (рис. 3.11-3.12) за максимального навантаження (рис. 3.9 і рис.3.11) і після розвантаження (рис. 3.10 і рис.3.12). Із аналізу представлених результатів слідує, що по висоті поперечного перерізу робочої арматури існує значний градієнт розтягувальних напружень.

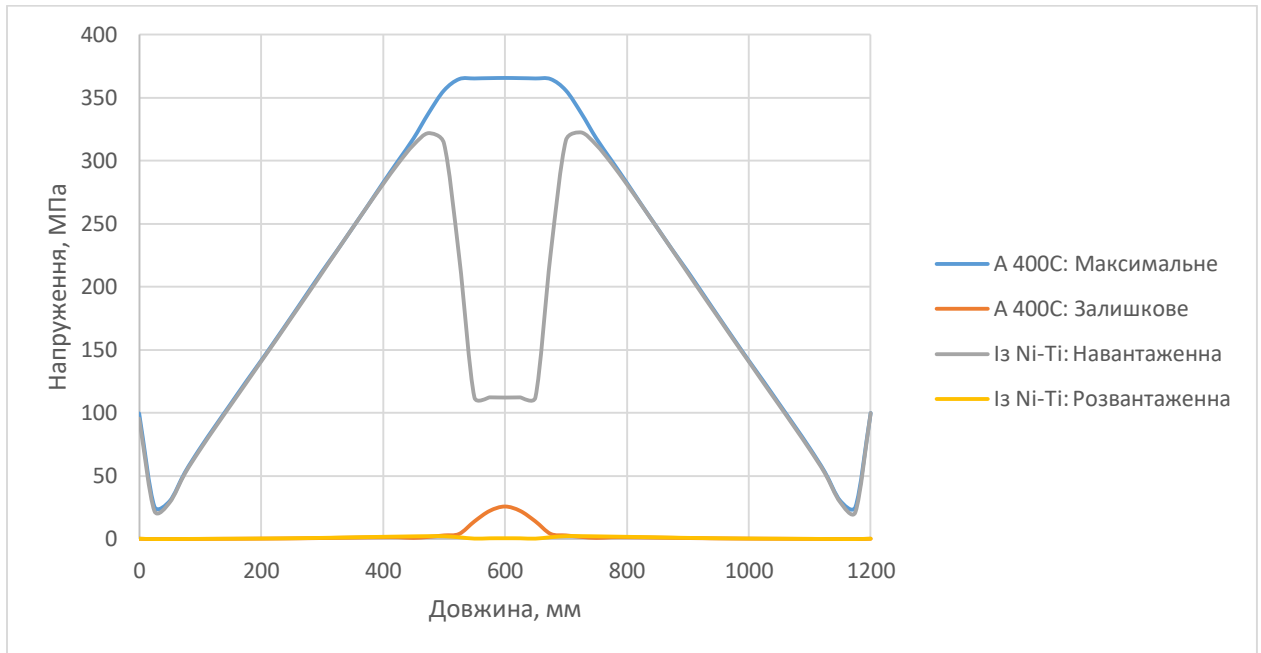


Рисунок 3.8 – Розподіл напружень вздовж центральної осі робочої арматури

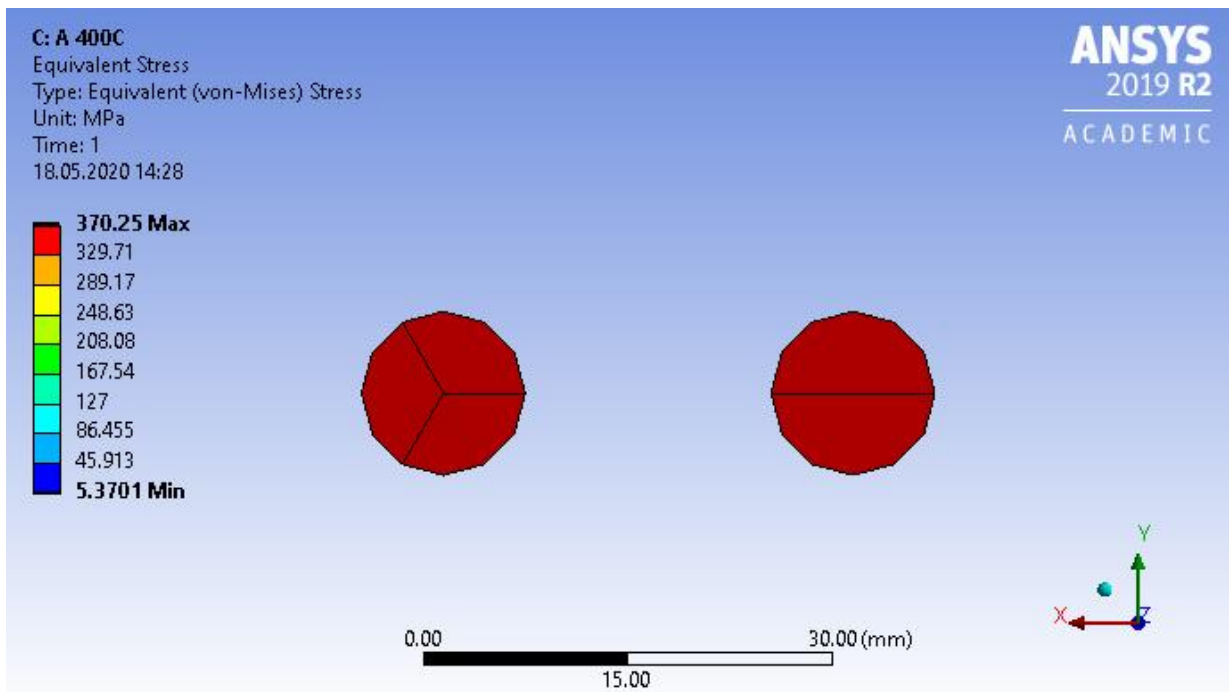


Рисунок 3.9 – Напруження у січєні робочої арматури 400С на відстані 600 мм довжини при максимальних навантаженнях

Аналізуючи дані розподілу напружень (рис.3.9-3.12), можна зробити висновок, що завдяки заміні ділянки робочої арматури 400С, де напруження в арматурі перейшло значення межі текучості ( $\sigma_{0,2} = 365 \text{ МПа}$ ), зменшено напруження у арматурі 400С. Це вказує на те, що після зняття навантаження із балки, арматура матиме ще запас міцності, оскільки арматура досягла напруження межі текучості ( $\sigma_{0,2} = 365 \text{ МПа}$ ) лише у нижніх волокнах свого січення (рис.3.11).

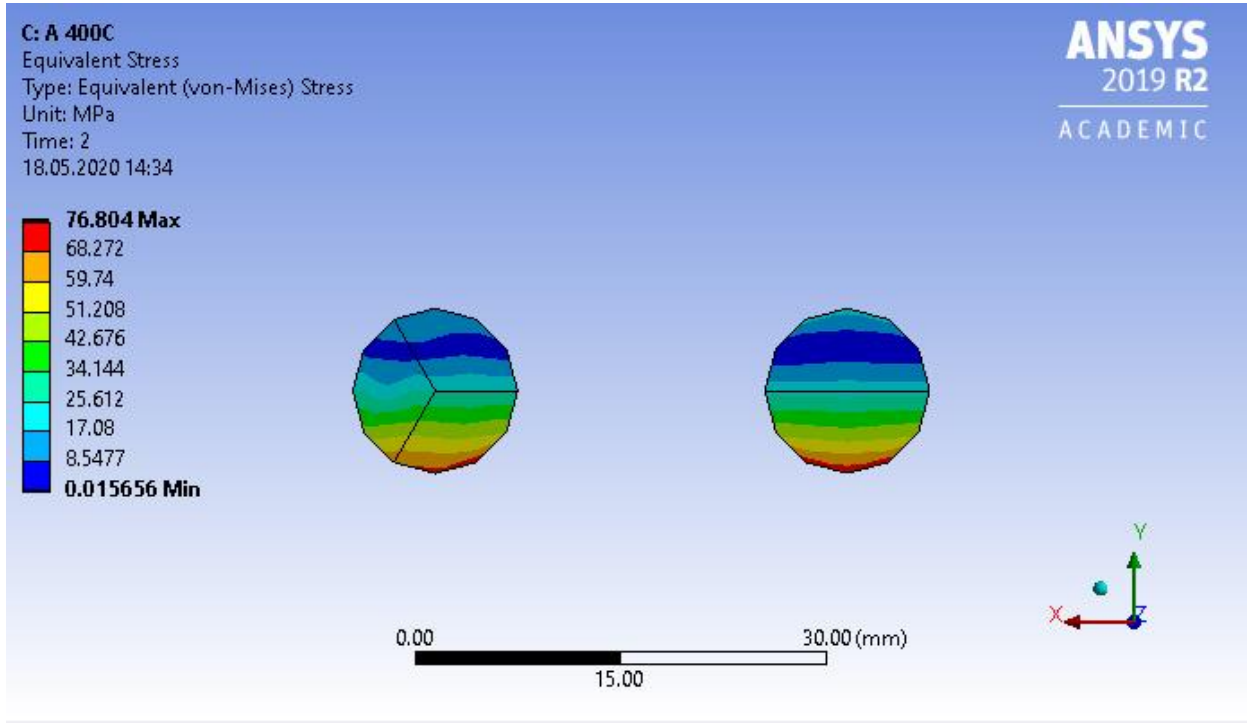


Рисунок 3.10 – Напруження у січені робочої арматури 400С на відстані 600 мм довжини після розвантаження

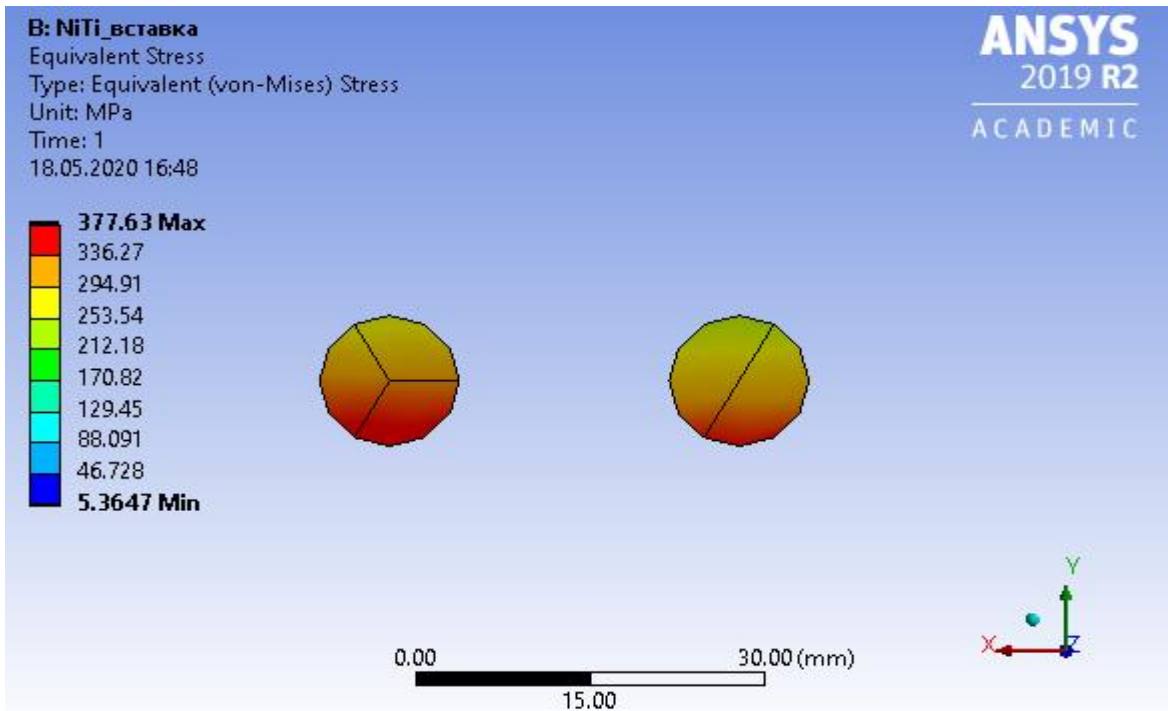


Рисунок 3.11 – Напруження у січєні робочої арматури 400С із вставкою СПФ на відстані 500 мм довжини при максимальних навантаженнях

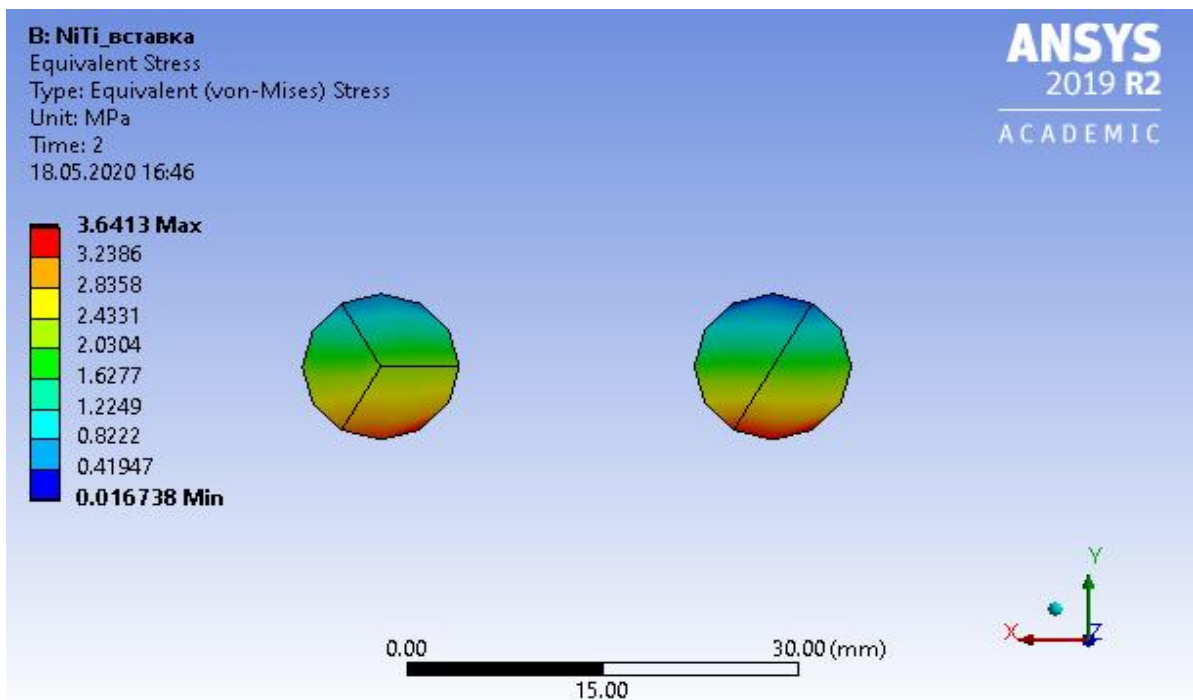


Рисунок 3.12 – Напруження у січєні робочої арматури 400С із вставкою СПФ на відстані 500 мм довжини після розвантаження

### 3.3. Висновок до розділу 3

Коротко отримані результати подано у таблиці 3.1 та на діаграмах деформування зі значень із зони розтягу арматур (рис.3.13) та залізобетонних балок (рис.3.14).

Таблиця 3.1. Стислий запис даних отриманих під час моделювання

Робоча арматура	Прогин балки, мм	$\epsilon_{\max}$ , мм/мм	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\epsilon_{\text{залиш}}$ , мм/мм	$\sigma_{\text{залиш}}$ , МПа
А 400С	6,25	$1,76 \times 10^{-3}$	370,25	$3,66 \times 10^{-4}$	76,80
Вставка з СПФ	6,82	$2,61 \times 10^{-3}$	377,63	$2,16 \times 10^{-5}$	3,64

Де  $\epsilon_{\max}$  – еквівалентне відносне видовження;

$\sigma_{\max}$  – еквівалентне напруження;

$\epsilon_{\text{залиш}}$  – залишкове еквівалентне відносне видовження;

$\sigma_{\text{залиш}}$  – залишкове еквівалентне напруження.

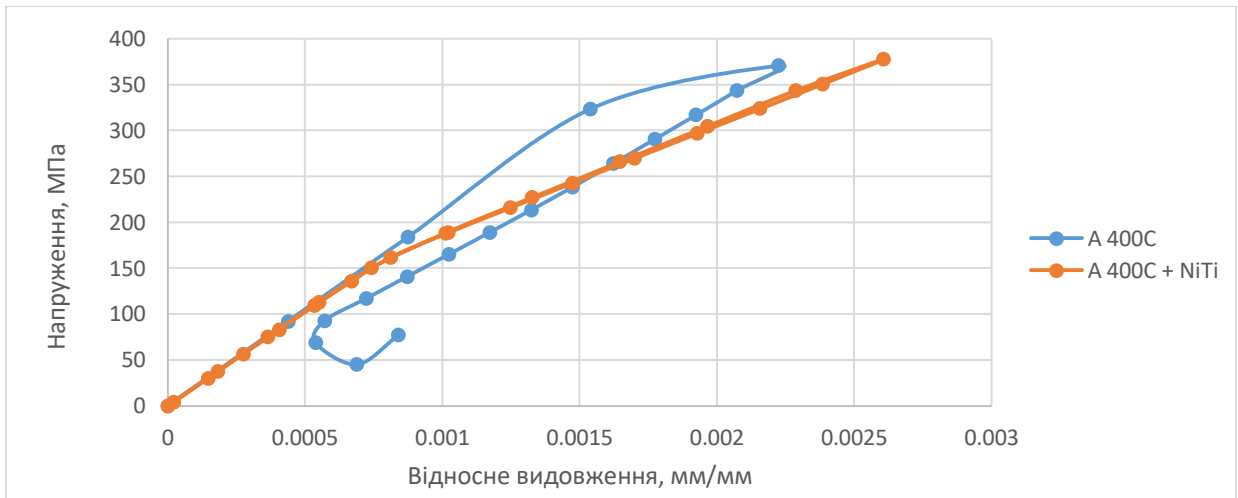


Рисунок 3.13 – Діаграма деформування арматур



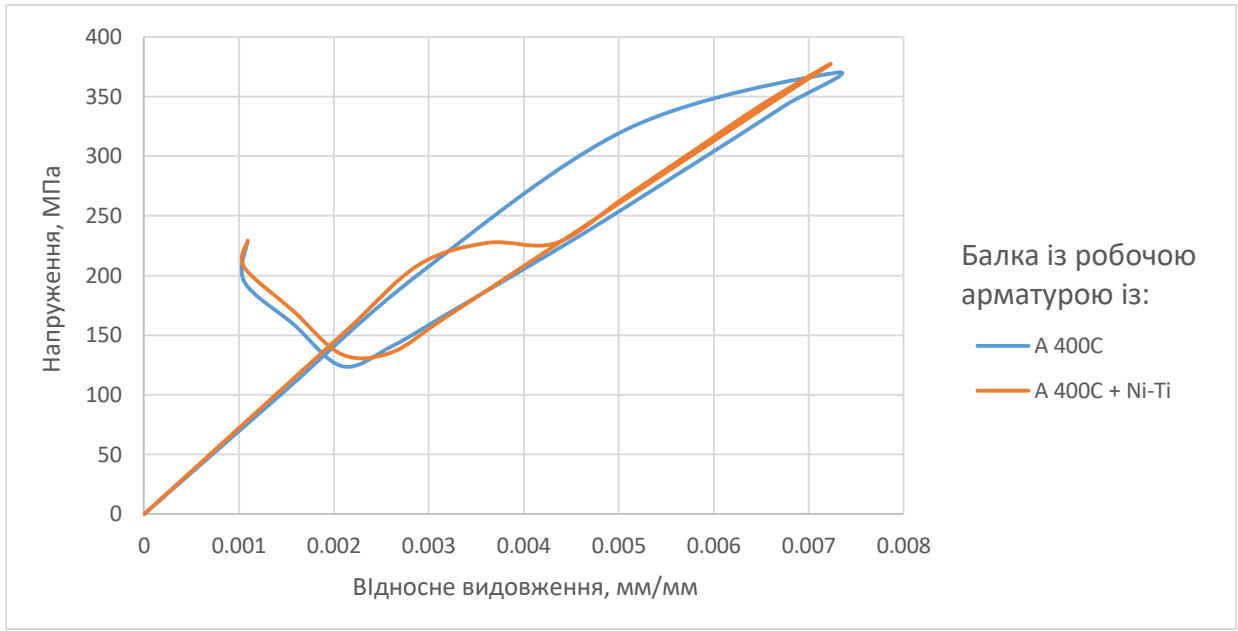


Рисунок 3.14 – Діаграма деформування балок

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що заміна ділянки робочої арматури, яка перейшла межу текучості ( $\sigma_{0,2} = 365 \text{ МПа}$ ), вставкою із надпружного Ni-Ti є корисною. Даний метод підсилення дозволяє продовжити роботу балки та, у подальшому, споруди в цілому. Теоретично, це може допомогти при евакуації людей із споруди при аварійних ситуаціях.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1. 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, проектні 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 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 обов'язку, 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.

#### **4.2. 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 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 проектування, 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 проектування 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 ураховуються при проектуванні 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 ( $\Delta P_{\text{ф max}}$ ), 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 максимально ймовірний надмірний тиск, потужністю боєзапасу в 200 кт на відстані 4 км від центру вибуху, рівний:

$$\Delta P_{\text{ф max}} = 20 + \frac{30-20}{2,90-4,40} \times (4 - 4,40) = 22,7 \text{ кПа.}$$

Основним елементом об'єкту є будівля із збірною залізобетону та залізобетонними балками із вставками надпружного Ni-Ti сплаву у наперед визначених місцях, що замінюють необхідність пластичних шарнірів. Відповідно до ступеня руйнувань елементів ОГД при різних значеннях надлишкового тиску ударної хвилі (таблиця А.2), результат оцінки стійкості об'єкта до впливу ударної хвилі представлений у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – 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  $\Delta P_{\phi \lim} = 20$  кПа. Дана споруда є вразливою до ударної хвилі ( $\Delta P_{\phi \max} = 22,7$  кПа). Відповідно до таблиці 4.1, 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 4.2 очікуваний збиток від ударної хвилі ( $\Delta P_{\phi \max} = 22,7$  кПа) складає 37%.

Таблиця 4.1 – 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  $\Delta P_{\phi \lim} = 25$  кПа.

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

### **4.3. Висновок до розділу 4**

У розділі 4 розглянуто техніку безпеки з охорони праці при роботі на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100.

Розглянуто питання надійності роботи споруди зі збірного залізобетону та залізобетонними балками із вставками надпружного Ni-Ti сплаву у наперед визначених місцях, що замінюють необхідність пластичних шарнірів, 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

1. Проаналізовано літературні дані про кристалічну будову і фізико-механічні властивості сплавів з пам'яттю форми.
2. Основні напрямки використання сплавів з пам'яттю форми визначаються їх унікальними властивостями, власне ефектом пам'яті форми і в більшій мірі, ефектом надпружності і пов'язаною з ним гасильною (демпфувальною) здатністю. Ця здатність може бути використана для зменшення коливань елементів інженерних і будівельних конструкцій під час землетрусів.
3. Запропоновано конструкцію залізобетонної балки армованої сталеву арматурою із вставками стрижнів із сплаву з пам'яттю форми.
4. Методом скінчених елементів з використанням комплексу ANSYS змодельований напружено-деформований стан залізобетонної балки традиційної і залізобетонної балки на двох опорах із вставками стрижнів із надпружного сплаву з пам'яттю форми довжиною 120 мм за вигину рівномірно розподіленим навантаженням на центральній ділянці.
5. Обґрунтовано ефективність методу зменшення напруження у робочій арматурі, заміною ділянки, де напруження перевищують границю текучості матеріалу на вставку із надпружного сплаву з пам'яттю форми. Вставки діаметром 12 мм із надпружного сплаву з пам'яттю форми у 16,9 разів зменшують максимальне залишкове еквівалентне відносне видовження робочої арматури порівняно із робочою арматурою 400С.
6. За результатами моделювання напружено-деформованого стану виявлено збільшення на 9,2% прогину балки із вставкою із надпружного сплаву з пам'яттю форми порівняно з балкою із робочою арматурою 400С та збільшення на 47,8% максимального еквівалентного видовження арматури із надпружного сплаву з пам'яттю форми при максимальному навантаженні.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Alam M.S., Youssef M.A., Nehdi M. Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review // *Can. J. Civ. Eng.* 2007. Vol. 34, № 9. P. 1075–1086.
2. Колісник М.Б., Собашек Л., Ясній В.П. Обґрунтування використання СПФ сплавів у демпфуючих пристроях // *Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*. 2018. Vol. 1. P. 35.
3. Humbeeck J. Van. Non-medical applications of shape memory alloys // *Mater. Sci. Eng. A*. 1999. Vol. 273–275. P. 134–148.
4. Song G., Ma N., Li H.N. Applications of shape memory alloys in civil structures // *Eng. Struct.* 2006. Vol. 28, № 9. P. 1266–1274.
5. Kim Y.K. Alloys, Shape Memory // *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*. 2006.
6. Wayman C.M., Otsuka K. SMA - Space Antenna TiNi shape memory book - Space antenna 2002. 2002.
7. Ren X. et al. A comparative study of elastic constants of Ti-Ni based alloys prior to martensitic transformation // *Mater. Sci. Eng. A*. 2001. Vol. 312, № 1–2. P. 196–206.
8. Uehara T., Tamai T. An atomistic study on shape-memory effect by shear deformation and phase transformation // *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2006. Vol. 13, № 2. P. 197–204.
9. 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 // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43, № 1. P. 97–112.
10. Thompson S.A. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry // *Int. Endod. J.* 2000. Vol. 33, № 4. P. 297–310.
11. Fernandes D.J. et al. Understanding the Shape-Memory Alloys Used in Orthodontics // *ISRN Dent.* 2011. Vol. 2011. P. 1–6.

12. Saadat S. et al. An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy // *Smart Mater. Struct.* 2002. Vol. 11, № 2. P. 218–229.
13. Janke L. et al. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas // *Mater. Struct. Constr.* 2005. Vol. 38, № 279. P. 578–592.
14. DesRoches R., McCormick J., Delemont M. Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars // *J. Struct. Eng.* 2003. Vol. 130, № 1. P. 38–46.
15. Neelakanta P. *Smart Materials.* 2013. Vol. 4, № 3. P. 4172.
16. Morais J. et al. Shape Memory Alloy Based Dampers for Earthquake Response Mitigation // *Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 5. P. 705–712.
17. Володимир Я., Петро Я. UA 116582 U. Україна, Ukraine, 2017. № 19.
18. Buckle I.G. et al. *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges.* 2006. № January. P. 1–658.
19. DesRoches R., Delemont M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys // *Eng. Struct.* 2002. Vol. 24, № 3. P. 325–332.
20. Vinson I., Nada A. Innovative Technologies for Earthquake Protection of Architectural Heritage // *Int. ICOMOS Congr.* 2000.
21. <http://www.sanfrancescoassisi.org/images/BASILICA-ESTERNI/001esterni.jpg>.
22. <https://www.terra.com.br/noticias/mundo/europa/freiras-violam-clausura-para-fugir-da-morte-em-terremoto,c3a0153ee2965d11d1eac47beef91fec91nuvz7.html>.
23. <https://www.archiexpo.it/prod/fip-industriale/product-125805-1331063.html>.  
Dissipatore - SMAD SERIES - FIP industriale.
24. Motavalli M. et al. SHAPE MEMORY ALLOYS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES – ON THE WAY FROM VISION TO REALITY. 2009. P. 81–94.
25. Indirli M., Castellano M.G. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation , Analysis , and Restoration Shape Memory Alloy Devices for the Structural Improvement of Masonry Heritage Structures.* № November 2014. P. 37–41.

26. Пиндус Ю.І., Конончук О.П., Підгурський М.І. Методичні вказівки з дисципліни “Метод скінченних елементів в механіці споруд.” 2016.
27. ДБН, В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. 2011.
28. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. 2011.
29. Yasniy P. et al. Modelling of Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys Using Finite Elements Method // J. Ternopil Natl. Tech. Univ. 2018. Vol. 91, № 3. P. 7–15.
30. Hamid N.A. et al. Behaviour of smart reinforced concrete beam with super elastic shape memory alloy subjected to monotonic loading // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Inc., 2018. Vol. 1958.

## Додаток А

**Надлишковий тиск ударної хвилі при різних потужностях ядерного боєзапасу і  
відстані до центру вибуху**

Таблиця А.1

Надлишковий тиск $\Delta P$ , кПа	Потужність боєзапасу, кт							
	1	2	3	5	10	20	30	50
	Відстань від центру (епіцентру) вибуху, км,							
2000	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,15	0,17	0,20
	0,07	0,10	0,11	0,13	0,17	0,21	0,24	0,28
1000	0,07	0,09	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	0,25
	0,10	0,13	0,14	0,17	0,22	0,27	0,31	0,37
500	0,09	0,11	0,13	0,15	0,18	0,24	0,27	0,32
	0,13	0,17	0,19	0,23	0,29	0,37	0,42	0,50
250	0,13	0,16	0,18	0,22	0,27	0,35	0,40	0,47
	0,18	0,23	0,26	0,31	0,39	0,49	0,56	0,65
200	0,15	0,18	0,21	0,28	0,32	0,40	0,46	0,54
	0,20	0,25	0,29	0,34	0,43	0,54	0,62	0,75
150	0,17	0,21	0,24	0,28	0,36	0,45	0,52	0,61
	0,23	0,29	0,33	0,29	0,49	0,62	0,70	0,84
100	0,21	0,27	0,31	0,37	0,46	0,60	0,70	0,80
	0,27	0,35	0,40	0,47	0,59	0,70	0,80	1,00
90	0,23	0,28	0,32	0,41	0,50	0,70	0,80	0,90
	0,28	0,36	0,42	0,50	0,64	0,80	0,90	1,10
80	0,26	0,31	0,36	0,45	0,55	0,80	0,90	1,00
	0,30	0,40	0,44	0,54	0,69	0,90	1,00	1,20
70	0,29	0,34	0,41	0,50	0,61	0,85	0,93	1,10
	0,33	0,44	0,48	0,58	0,74	0,97	1,05	1,25
60	0,32	0,38	0,47	0,55	0,67	0,90	1,00	1,20
	0,36	0,49	0,52	0,63	0,80	1,00	1,10	1,30
50	0,36	0,45	0,52	0,61	0,77	1,00	1,10	1,30
	0,40	0,50	0,57	0,68	0,85	1,10	1,20	1,40
40	0,46	0,57	0,65	0,77	0,96	1,10	1,20	1,40
	0,47	0,59	0,68	0,80	1,00	1,20	1,30	1,50
30	0,54	0,68	0,78	0,92	1,15	1,50	1,35	2,00
	0,54	0,68	0,78	0,92	1,15	1,50	1,35	2,00
20	0,75	0,95	1,10	1,30	1,60	2,00	2,23	2,70
	0,69	0,87	1,00	1,20	1,50	1,90	2,13	2,60
15	0,95	1,20	1,35	1,60	2,00	2,60	3,00	3,50
	0,84	1,05	1,20	1,45	1,80	2,30	2,60	3,10
10	1,40	1,74	2,00	2,40	3,00	3,20	3,65	4,50
	1,10	1,40	1,60	1,90	2,40	3,00	3,30	4,20

Таблиця А.1 (закінчення)

Надлишковий тиск $\Delta P$ , кПа	Потужність боєзапасу, кг							
	50	100	200	300	500	1000	2000	5000
	Відстань від центру (епіцентру) вибуху, км							
2000	0,20	0,23	0,32	0,36	0,43	0,50	0,65	0,85
	0,28	0,36	0,45	0,52	0,61	0,77	1,00	1,30
1000	0,25	0,32	0,40	0,46	0,54	0,70	0,90	1,30
	0,37	0,46	0,58	0,67	0,79	1,00	1,30	1,80
500	0,32	0,40	0,51	0,58	0,69	0,90	1,20	2,00
	0,50	0,62	0,79	0,90	1,05	1,35	1,70	2,90
250	0,47	0,59	0,74	0,85	1,00	1,30	1,50	2,50
	0,65	0,83	1,05	1,20	1,45	1,80	2,10	3,40
200	0,54	0,68	0,86	0,98	1,15	1,50	1,80	3,10
	0,75	0,92	1,15	1,35	1,60	2,00	2,50	4,00
150	0,61	0,77	0,97	1,10	1,30	1,70	2,20	3,70
	0,84	1,05	1,35	1,50	1,80	2,30	2,90	4,70
100	0,80	1,00	1,20	1,37	1,70	2,40	2,70	4,20
	1,00	1,20	1,50	1,70	2,10	3,00	3,40	5,00
90	0,90	1,20	1,40	1,57	1,90	2,70	3,00	4,40
	1,00	1,30	1,60	1,83	2,30	3,40	3,70	5,40
80	1,00	1,30	1,50	1,67	2,00	3,00	3,30	5,00
	1,20	1,40	1,70	1,93	2,40	3,50	3,90	5,70
70	1,10	1,40	1,60	1,85	2,30	3,30	3,60	5,60
	1,25	1,50	1,80	2,10	2,60	3,60	4,20	6,20
60	1,20	1,62	1,80	2,07	2,60	3,60	4,20	6,60
	1,30	1,70	2,00	2,30	2,80	4,00	4,60	6,80
50	1,30	1,76	1,90	2,27	3,00	4,30	4,60	7,60
	1,40	1,90	2,20	2,55	3,20	4,50	5,10	7,80
40	1,40	2,25	2,50	2,80	3,40	5,00	6,80	9,20
	1,50	2,47	2,60	2,93	3,60	5,50	7,00	9,30
30	2,00	2,44	2,90	3,35	4,20	7,50	9,50	13,0
	2,30	2,54	3,00	3,60	4,40	7,00	8,80	12,0
20	2,70	3,75	4,40	4,95	6,00	9,50	13,0	14,6
	2,60	3,69	3,80	4,40	5,50	8,40	10,7	14,3
15	3,50	3,95	5,50	6,35	7,55	14,3	18,0	24,0
	3,10	3,84	4,90	5,65	6,70	11,2	14,2	19,5
10	4,50	5,40	7,90	9,10	11,5	13,2	23,2	26,0
	4,20	5,10	6,40	7,30	9,00	10,4	13,0	13,3

Примітка: чисельник – для повітряного вибуху; знаменник – для наземного вибуху;

**Додаток Б**  
**Ступені руйнування елементів об'єкту в залежності від надлишкового**  
**Тиску ударної хвилі  $\Delta P_{\phi}$ , кПа**

Таблиця Б.1

№ П/П	Елементи об'єкту	Ступінь руйнувань			
		Слабкі	Середні	Сильні	Повні
<b>1. Виробничі, адміністративні будівлі та споруди</b>					
1.	Масивні промислові споруди з металевим каркасом і крановим обладнанням вантажопідйомністю 25...50 т	20...30	30...40	40...50	50...70
2.	Теж саме, з крановим обладнанням вантажопідйомністю 60...100 т	20...40	40...50	50...60	60...80
3.	Бетонні та залізобетонні будинки та споруди антисейсмічної конструкції	25...35	80...120	150...200	200
4.	Споруди з легким металевим каркасом і без каркасні конструкції	10...20	20...30	30...50	50...70
5.	Промислові будівлі з металевим каркасом і бетонним заповненням з площею застеклення біля 30%	10...20	20...30	30...40	40...50
6.	Промислові будівлі з металевим каркасом і суцільним крихким заповненням стін та даху	10...20	20...30	30...40	40...50
7.	Багатоповерхові і залізобетонні споруди з великою площею застеклення	8...20	20...40	40...90	90...100
8.	Споруди зі збірної залізобетону	10...20	20...30	-	30...60
9.	Одноповерхові споруди з металевим каркасом і стіновим заповненням з хвилевої сталі	5...7	7...10	10...15	15
10.	Теж саме, з дахом і стіновим заповненням з хвилевої сталі	7...10	10...15	15...25	25...30
11.	Цегляні безкаркасні виробничо-допоміжні споруди з перекриттям (покриттям) з залізобетонних збірних елементів одно- і багатоповерхові	10...20	20...35	35...45	45...60
12.	Теж саме, з перекриттям (покриттям) з дерев'яних елементів одно- і багатоповерхові	8...15	15...25	25...35	35
13.	Споруди фідерної або трансформаторної підстанції з цегли або блоків	10...20	20...40	40...60	60...80
14.	Складські цегляні будівлі	10...20	20...30	30...40	40...50
15.	Легкі склади-намети з металевим каркасом і шиферною покрівлею	10...25	25...35	35...50	50