

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БИКІВ НАЗАРІЙ ЗІНОВІЙОВИЧ

УДК 620.1:539.3:539.4:620.22

**ПІДВИЩЕННЯ ДЕФОРМІВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ ЗА ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ШЛЯХОМ
ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ**

13 «Механічна інженерія»
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н.З. Биків

Науковий керівник:
Ясній Володимир Петрович,
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2024

АНОТАЦІЯ

Биків Н.З. Підвищення деформівних властивостей елементів конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 “Механічна інженерія” за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2024.

Дана робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми, а саме підвищення деформівності конструкційних елементів за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми.

Розроблено комплекс методик дослідження впливу асиметрії циклу навантаження на функціональні властивості й механічну втому сплавів з пам'яттю форми з використанням силових, деформаційних і енергетичних параметрів. Досліджено вплив асиметрії циклу навантаження на функціональні та конструкційні властивості СПФ. Беручи до уваги визначені температури фазових перетворень, встановлені механічні і досліджені функціональні та конструкційні властивості СПФ виготовлена залізобетонна балка із використання вставки із псевдопружного СПФ. Експериментальні дослідження балок показали, що балка із вставкою з псевдопружного СПФ має підвищену деформівність у порівнянні із звичайною залізобетонною балкою за малоциклових навантаженнях. В процесі виготовлення балки із СПФ вставкою вирішено проблематику з'єднання елемента СПФ у вигляді прутка діаметром 8 мм із робочою арматурою 12 мм в діаметрі. В програмному комплексі ANSYS із використання методу скінченних елементів змодельовано поведінку балок, в тому числі зі вставкою з псевдопружного СПФ за дії циклічного навантаження. Отримано точні дані про розподіл напружень та деформацій у балках що, підтверджують підвищення деформівності та

довговічності конструкцій шляхом застосування СПФ за дії циклічних навантажень.

Зміст роботи складається з п'яти розділів, у яких викладено та обґрунтовано основні результати дисертаційної роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, наведено зв'язок роботи з науково-дослідною темою, поставлено мету та визначено завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наведено перелік методів дослідження, що застосовувались для досягнення мети дисертаційної роботи. Сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий творчий внесок здобувача. Подано відомості щодо апробації та опублікування результатів дослідження.

У першому розділі представлено кристалічну будову сплавів з пам'яттю форми, яка відповідає за унікальні властивості, а саме ефекти псевдопружності та пам'яті форми. Проведено огляд літературних джерел, щодо застосування СПФ у конструкціях задля підвищення деформівності за динамічних навантажень.

На основі проведеного огляду сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі описані методики дослідження механічних і функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми, що є необхідними для подальшого аналізу, створення експериментальних зразків та модельних зразків. Механічні властивості псевдопружного СПФ визначали згідно стандарту ASTM F2516-14 на сервогидравлічній машині СТМ-100. Температури фазових трансформацій визначено методом диференціальної сканувальної калориметрії з використанням калориметра NETZSCH DSC 214 Polyma.

Представлена експериментальним методика визначення механічної втоми та функціональних властивостей псевдопружних СПФ на універсальній випробувальній машині СТМ-100 при кімнатній температурі, з використанням екстензометра та індуктивного датчика для вимірювання деформацій та переміщення. Особлива увага приділялася дослідженню опору втомному руйнуванню нітинолу під впливом циклічних навантажень з різними коефіцієнтами асиметрії.

Представлена методика моделювання механічної поведінки і демпфувальних властивостей як і ЗББ так і ЗББ-СПФ у програмному комплексі ANSYS 2024 R1.

У **третьому розділі** подано результати експериментальних досліджень впливу циклічного навантаження на механічну поведінку і функціональні властивості надпружного NiTi сплаву з пам'яттю форми з урахуванням асиметрії циклу навантажень, а також виявлені фрактографічні особливості їх деформування та руйнування.

Результати показали, що підвищення асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 погіршує функціональні властивості матеріалу, а саме зменшує енергію дисипації. Зокрема, за однакового значення максимального напруження NiTi сплаву енергія дисипації, на ділянці стабілізації, при $R_\sigma = 0,1$ приблизно втричі більша за $\sigma_{\max} = 450$ МПа ніж при $R_\sigma = 0,5$. При чому, із збільшенням максимального напруження, ця різниця зростає, і при $\sigma_{\max} = 550$ МПа за коефіцієнта асиметрії 0,1 енергія дисипації у 4,2 рази більша ніж при $R_\sigma = 0,5$. Встановлено, що на початковому етапі навантаження, упродовж перших 10-ти циклів відбувається різке зменшення коефіцієнта втрат псевдопружного NiTi сплаву. В подальшому тенденція до зменшення залишається, проте це відбувається більш поступово аж до зруйнування зразка.

Фрактографічним аналізом показано, що асиметрія циклу навантаження впливає на кількість зародків втомних тріщин та рельєф зламів. За більшої асиметрії спостерігалось більше зародків тріщин та збільшення розкриття їх берегів, що узгоджується з механічними випробуваннями, які показали вищий рівень дисипованої енергії за меншого коефіцієнта асиметрії.

Встановлено, що із збільшенням R_σ від 0,1 до 0,5 втомна довговічність NiTi сплаву значно збільшується в межах 1900-12500 циклів навантаження. За найменшого значення максимального напруження 450 МПа зміна коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 практично не впливає на втомну довговічність. А при $\sigma_{\max} = 550$ МПа та 500 МПа втомна довговічність, за $R_\sigma = 0,5$, більша у 5,4 та 4,2 рази відповідно, порівняно із $R_\sigma = 0,1$. Аналогічно із максимальними напруженнями, із збільшенням розмаху напружень, втомна

довговічність псевдопружного NiTi сплаву зменшується за обох коефіцієнтів асиметрії навантаження.

У четвертому розділі на основі визначених параметрів у розділі 3, а саме температур фазових перетворень, механічних, функціональних та конструкційних властивостей сплаву, виготовлена залізобетонна балка із використання вставки із псевдопружного СПФ та без неї. В процесі виготовлення балки із СПФ вставкою вирішено проблематику з'єднання елемента СПФ, у вигляді прутка діаметром 8 мм із робочою арматурою 12 мм в діаметрі, шляхом використання металевої муфти та двокомпонентного епоксидного клею.

Експериментальні дослідження показали, що руйнування ЗББ відбувається при значенні прогину 7,3 мм, а в ЗББ-СПФ при – 20,3 мм, що підвищує деформівність конструкції у 2,8 разів, у порівнянні із залізобетонною балкою з арматурою 600С.

Встановлено, що використання СПФ у конструкціях впливає на характер їх руйнування, а саме змінює різке крихке руйнування ЗББ на повільне пластичне руйнування ЗББ-СПФ.

У п'ятому розділі розроблено модельний зразок нітинолу та проведено верифікацію його поведінки із результатами експериментальних досліджень, описаних у розділі 3. Загальна форма петель гістерезису та ключові точки деформації добре узгоджуються з моделлю, що свідчить про адекватність моделі нітинолу для прогнозування поведінки елементів конструкцій за малоциклових навантажень.

Розроблено тривимірні моделі залізобетонних балок зі СПФ-вставкою та без неї. Проведено верифікацію отриманих результатів моделювання із результатами натурних випробувань. Похибка для залізобетонної балки без СПФ-прутка становить 5,64%, а похибка для залізобетонної балки із СПФ-вставкою – 3,25%.

Визначено, що СПФ-вставка із прутка діаметром меншим у 1,5 рази від діаметру робочої арматури, спричиняє збільшення значень максимальних напружень у конструкції в 4, 9 та 5 разів на 4-му, 7-му та 10-му циклах навантаження.

Моделювання підтверджує підвищення деформівних властивостей елементів конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів із пам'яттю форми.

Розроблено рекомендацій щодо впровадження СПФ-прутків у елементи конструкцій для підвищення деформівних властивостей за циклічних навантажень.

Ключові слова: псевдопружний нікель-титановий сплав, функціональний матеріал, механічні властивості, напруження, пружно-пластична деформація, циклічні навантаження, асиметрія циклу навантаження, втомне руйнування, тріщини, деформівність та стійкість, залізобетонна балка, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Bykiv N.Z. Increasing the deformability of structural elements under cyclic loads by using shape memory alloys - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the Philosophy Doctor degree in the field of knowledge 13 "Mechanical Engineering", speciality 131 "Applied Mechanics." - Ternopil National Technical University, Ternopil, 2024.

This work is devoted to solving an urgent scientific and technical problem, namely, increasing the deformability of structural elements under cyclic loads by using shape memory alloys (SMA).

A set of methods has been developed to study the effect of stress ratio on the functional properties and mechanical fatigue of SMA using force, deformation, and energy parameters. The influence of stress ratio on the functional and structural properties of SMA is investigated. Considering the determined phase transformation temperatures, mechanical properties, and functional and structural properties of the SMA, a reinforced concrete beam was manufactured using an insertion of pseudoelastic SMA. Experimental studies of the beams have shown that the beam with a pseudoelastic SMA insertion has increased deformability compared to a conventional reinforced concrete beam under low-cycle loads. In the process of manufacturing the beam with the SMA insertion, the problem of connecting the SMA element in the form of an 8 mm diameter bar with a 12 mm diameter working reinforcement was solved. Using the finite element method, the behaviour of beams, including those with a pseudoelastic SMA insertion, under cyclic loading was modelled in ANSYS software using the finite element method. Accurate data on the distribution of stresses and strains in the beams were obtained, confirming the increase in deformability and durability of structures using SMA under cyclic loads.

The work consists of five chapters in which the main results of the dissertation are presented and substantiated.

The introduction substantiates the study's relevance, provides the connection of the work with the research topic, sets the goal, defines the study's objectives and the object and subject of the study, and provides a list of research methods used to achieve the goal of the dissertation. The scientific novelty, practical significance of the results and personal creative contribution of the applicant are formulated. Information on the testing and publication of research results is provided.

The first section presents the crystal structure of SMA, which is responsible for the unique properties, namely the effects of pseudoplasticity and shape memory. A literature review on using SMA in structures to increase stability under dynamic loads is carried out.

Based on the review, the purpose and objectives of the study are formulated.

The second section describes the methods of studying SMA mechanical and functional properties, which are necessary for further analysis and creation of experimental and model specimens. The mechanical properties of the pseudoelastic SMA were determined according to ASTM F2516-14 using a servo-hydraulic machine STM-100. The phase transformation temperatures were determined by differential scanning calorimetry using a NETZSCH DSC 214 Polyma calorimeter.

The paper presents an experimental method for determining the mechanical fatigue and functional properties of pseudoelastic SMA on a universal testing machine STM-100 at room temperature, using an extensometer and an inductive sensor to measure deformation and displacement. Particular attention was paid to studying nitinol fatigue fracture resistance under cyclic loads with different stress ratios.

The paper presents a methodology for modelling the mechanical behaviour and damping properties of both the reinforced concrete beam and reinforced concrete beam with shape memory alloy in the ANSYS 2024 R1 software package.

The third section presents the results of experimental studies of the effect of cyclic loading on the mechanical behaviour and functional properties of pseudoelastic NiTi SMA, considering the stress ratio and the fractographic features of their deformation and fracture.

The results showed that an increase in the stress ratio from 0.1 to 0.5 worsens the material's functional properties, namely, reduces the dissipation energy. At the same value of the maximum stress of the NiTi alloy, the dissipation energy in the stabilisation zone at $R_\sigma = 0.1$ is approximately three times higher at $\sigma_{\max} = 450$ MPa than at $R_\sigma = 0.5$. Moreover, with an increase in the maximum stress, this difference increases, and at $\sigma_{\max} = 550$ MPa with a stress ratio of 0.1, the dissipation energy is 4.2 times higher than at $R_\sigma = 0.5$. It has been established that at the initial stage of loading, during the first 10 cycles, there is a sharp decrease in the loss factor of the pseudoelastic NiTi alloy. Subsequently, the tendency to decrease remains but occurs more gradually until the sample is destroyed.

The fractographic analysis showed that the stress ratio affects the number of fatigue crack nuclei and fracture relief. At higher stress ratios, more crack initiation and increased crack tip opening were observed, which is consistent with mechanical tests that showed a higher level of dissipated energy at lower stress ratios.

It has been established that with an increase in R_σ from 0.1 to 0.5, the fatigue life of the NiTi alloy increases significantly within 1900-12500 load cycles. At the lowest value of the maximum stress of 450 MPa, a change in the stress ratio from 0.1 to 0.5 has virtually no effect on fatigue life. And at $\sigma_{\max} = 550$ MPa and 500 MPa, the fatigue life, with $R_\sigma = 0.5$, is 5.4 and 4.2 times higher, respectively, compared to $R_\sigma = 0.1$. Similarly to the maximum stresses, with an increase in the stress range, the fatigue life of the pseudoelastic NiTi alloy decreases at both load asymmetry ratios.

In Chapter 4, based on the parameters determined in Chapter 3, namely phase transformation temperatures and mechanical, functional, and structural properties of the alloy, a reinforced concrete beam was manufactured with and without a pseudoelastic SMA insertion. In the process of manufacturing the beam with the SMA insertion, the problem of connecting the SMA element, in the form of an 8 mm diameter bar with a 12 mm diameter working reinforcement, was solved by using a metal coupling and a two-component epoxy adhesive.

Experimental studies have shown that the destruction of reinforced concrete beams occurs at a deflection value of 7.3 mm, and in reinforced concrete beam with shape

memory alloy at 20.3 mm, which increases the deformability of the structure by 2.8 times, compared to a reinforced concrete beam with 600C reinforcement.

It has been established that the use of SMA in structures affects the nature of their destruction, namely, changes the sharp brittle fracture of reinforced concrete to the slow plastic fracture of reinforced concrete beam with shape memory alloy.

In Chapter 5, we developed a model specimen of nitinol and verified its behaviour with the results of the experimental studies described in Section 3. The general shape of the hysteresis loops and key deformation points agree with the model, which indicates that the nitinol model is adequate for predicting the behaviour of structural elements under low-cycle loads.

Three-dimensional models of reinforced concrete beams with and without SMA insertion were developed. The obtained modelling results were verified with the results of field tests. The error for a reinforced concrete beam without an SMA rod is 5.64%, and that for a reinforced concrete beam with an SMA insertion is 3.25%.

It has been determined that an SMA insertion made of a bar with a diameter less than 1.5 times the diameter of the working reinforcement causes an increase in the maximum stresses in the structure by 4, 9, and 5 times at the 4th, 7th, and 10th loading cycles.

The modelling confirms that the deformation properties of structural elements under cyclic loads can be improved using shape memory alloys.

Recommendations for introducing SMA rods into structural elements to improve deformation properties under cyclic loads have been developed.

Keywords: pseudoelastic nickel-titanium alloy, functional material, mechanical properties, stresses, elastic-plastic deformation, cyclic loads, asymmetry of the load cycle, fatigue fracture, cracks, stability, reinforced concrete beam, finite element method, stress-strain state.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях України та закордоном

1. Bykiv N. Z., Yasnii P. V., Iasnii V. P. *Modeling of mechenical behavior of reinforced concrete beam reinforced by the shape memory alloy insertion using finite elements method. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2020. Вип. 3, № 13. С. 24–34*
2. 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.*
3. 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.*
4. Биків Н. З., Ясній В. П. *Застосування сплавів із пам'яттю форми у будівельних конструкціях. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2022. № 17. С. 3–14.*
5. 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.*

Матеріали і тези конференцій

1. Биків Н.З. *Застосування сплавів з пам'яттю форми для підвищення стійкості конструкцій при динамічних навантаженнях. ІХ міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2020 року, Тернопіль, 2020. С.26.*
2. Биків Н., Ясній В., Лапуста Ю., Будз В. *Вплив частоти навантаження на функціональні властивості псевдопружного СПФ. Міжнародна науково-технічна конференція присвячена 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій», 10-11 листопада 2022 року, Тернопіль, 2022. С. 190-191.*

ЗМІСТ

ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	20
1.1. Кристалічна будова СПФ	20
1.2. Ефект пам'яті форми та надпружність (псевдопружність).	23
1.3. Фізико-механічні та функціональні властивості СПФ.....	28
1.4. Застосування сплавів з пам'яттю форми для підвищення стійкості конструкцій за динамічних навантажень.....	32
1.5. Аналіз механічної поведінки елементів конструкцій за динамічного навантаження	46
1.5.1. Типи динамічних навантажень.....	46
1.5.2. Застосування МСЕ для аналізу напружено-деформованих станів елементів конструкцій	50
1.6. Висновок до розділу 1	54
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПФ	56
2.1. Визначення фізико-механічних властивостей	56
2.2. Визначення конструкційних та функціональних властивостей.....	60
2.3. Методологія моделювання механічної поведінки і демпфувальних властивостей СПФ.....	62
2.4. Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРУЖНОГО Ni-Ti СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ	67
3.1. Хімічний склад і фізико-механічні властивості сплаву	67
3.2. Вплив асиметрії циклу навантаження на функціональні властивості псевдопружного NiTi сплаву	71
3.3. Вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність псевдопружного NiTi сплаву	78
3.4. Фрактографічні особливості втомного руйнування сплаву типу нітинол з пам'яттю форми.....	82
3.4.1. Утомне навантаження як чинник впливу на фазові перетворення в нітинолі.....	82
3.4.2. Ознаки зародження втомного руйнування у нітинолі, виявлені на бокових поверхнях зразків	84

3.4.3. Вплив параметрів циклу навантаження на макрофрактографічні особливості рельєфу втомного руйнування нітинолу.....	92
3.4.4. Вплив параметрів циклу навантаження на мікрофрактографічні ознаки втомного рельєфу руйнування нітинолу	95
3.5. Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ У КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ.....	99
4.1. Забезпечення міцності з'єднання СПФ елемента з арматурою.....	99
4.2. Розроблення модельного зразка будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами	106
4.3. Експериментальні дослідження експлуатаційних і функціональних характеристик модельного зразка	110
4.4. Висновки до розділу 4	116
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....	118
5.1. Створення скінченно-елементної моделі будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами	118
5.2. Результати моделювання поведінки будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами.....	126
5.3. Розроблення рекомендацій щодо застосування СПФ для зменшення циклічних навантажень на будівельну (інженерну) конструкцію	144
5.4. Висновки до розділу 5	146
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	150
ДОДАТОК А. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	161

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних умовах стрімкої урбанізації та розвитку інфраструктури питання підвищення стійкості будівельних конструкцій до динамічних навантажень є надзвичайно важливим. Динамічні навантаження, зокрема сейсмічні коливання, вітрові удари та транспортні вібрації, суттєво впливають на безпеку та експлуатаційну придатність будівель і споруд. Недостатня деформівність до цих навантажень може призвести до серйозних руйнувань, значних економічних втрат та загрози для життя людей [1].

Використання сплавів з пам'яттю форми (SMA) у будівельних конструкціях є передовою технологією, яка здатна значно підвищити деформівність конструкцій за дії циклічних навантажень. Сплави з пам'яттю форми мають унікальні властивості, такі як псевдопружність та здатність до самовідновлення. Ці властивості дозволяють сплавам з пам'яттю форми ефективно поглинати та розсіювати енергію динамічних навантажень, суттєво знижуючи рівень пошкоджень конструкцій та підвищуючи їх довговічність [2].

Наукові дослідження підтверджують, що використання СПФ у будівельних конструкціях значно підвищує їх сейсмічну стійкість та зменшує ризик катастрофічних руйнувань. Наприклад, дослідження [3] демонструє, що СПФ здатні ефективно знижувати амплітуду коливань та збільшувати демпфування конструкцій під час сейсмічних подій. Інші дослідження, зокрема [4], також підтверджують ефективність застосування СПФ у будівельній практиці.

Використання сплавів з пам'яттю форми також має значний економічний ефект. Вони сприяють зниженню витрат на ремонт та відновлення конструкцій, що зазнали пошкоджень від динамічних навантажень. Крім того, підвищення рівня безпеки будівель за рахунок використання СПФ забезпечує додаткові переваги для інвесторів та забудовників. Дослідження [5] підтверджують економічну вигоду від впровадження СПФ у будівництві, що робить цю технологію привабливою для широкого застосування.

На сьогоднішній день сплави з пам'яттю форми вже знайшли застосування у різних галузях, зокрема у авіабудуванні [6–8], космічній та машинобудівній промисловості [9–11], робототехніці [12–14], та біоінженерії [15]. Їх впровадження у будівельну галузь відкриває нові перспективи для підвищення деформівності та безпеки будівельних конструкцій. Наукові дослідження та практичні експерименти підтверджують високу ефективність СПФ у будівництві, що робить їх незамінними для вирішення проблеми підвищення деформівності конструкцій за циклічних навантажень [2].

Таким чином, актуальність дослідження з підвищення стійкості конструкцій за динамічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми обумовлена необхідністю забезпечення надійності та безпеки сучасних будівельних об'єктів. Використання СПФ не тільки підвищує деформівність конструкцій, але й сприяє зниженню витрат на їх експлуатацію та ремонт, що є важливим аспектом для розвитку будівельної галузі в умовах сучасних викликів та вимог.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя у рамках бюджетних тем згідно з тематичними планами наукових досліджень, де автор був виконавцем: «Розроблення методів прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми в системах захисту конструкцій від динамічного навантаження» (№ держреєстрації 0121U109857, 2021-2023 р.); «Моделювання функціональних і конструкційних властивостей сплавів з пам'яттю форми методами машинного навчання» (№ держреєстрації 0122U001858, 2022-2024 р.)

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення методик задля підвищення деформівності елементів конструкцій за дії циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- Встановити температури фазових перетворень і визначити механічні властивості сплавів з пам'яттю форми, зокрема модулі пружності та

напруження фазових перетворень, які залежать від температури та швидкості деформації.

- Дослідити та виявити закономірності впливу асиметрії циклічного навантаження на функціональні властивості та механічну втому псевдопружного NiTi сплаву.
- Із використанням фрактографічного аналізу виявити закономірності деформування та руйнування СПФ із врахуванням асиметрії циклу навантаження.
- Провести експериментальні дослідження та виконати моделювання поведінки залізобетонних балок з використанням СПФ-елементів під дією циклічних навантажень. Забезпечити з'єднання гладких стержнів із псевдопружного NiTi сплаву з арматурою.
- Дослідити та порівняти поведінку ЗББ та ЗББ-СПФ за дії циклічного навантаження з метою визначення їх деформівності.
- Створити скінчено-елементну модель для більш детального аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної балки з використанням СПФ.

Об'єктом дослідження є залізобетонні балки, укріплені елементами зі сплаву з пам'яттю форми, за дії циклічних навантажень.

Предметом дослідження є механічна поведінка та функціональні властивості циліндричних зразків та залізобетонних конструкцій із СПФ, зокрема їх здатність до дисипації енергії та підвищення деформівності і безпеки конструкцій під дією динамічних навантажень.

Метою дослідження є визначення впливу застосування СПФ-елементів на покращення механічних і функціональних характеристик залізобетонних конструкцій при циклічних навантаженнях.

Достовірність здобутих результатів. Підтверджується використанням сучасних високоточних сертифікованих приладів та методів:

- Сервогідравлічна випробувальна машина СТМ-100, оснащена контролером В1-07-005 та керована персональним комп'ютером із програмним забезпеченням MTL32 Base Module і TestBuilder;
- Високоточний калориметр NETZSCH DSC 214 Polyma;
- Стандарт ASTM F2516-14, що включає вимірювання переміщення та поздовжніх деформацій на зразках із сплаву з пам'яттю форми;
- Програмний комплекс ANSYS Workbench 2024 R1 і задовільним узгодженням результатів обчислень із експериментальними та чисельними даними інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в науковому обґрунтуванні та вирішенні важливого наукового завдання підвищенні деформівності конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми у залізобетонній балці.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено оригінальну методику підвищення деформівності конструкцій за рахунок використання у залізобетонній балці псевдопружних сплавів з пам'яттю форми;
- виявлено основні закономірності впливу асиметрії циклу навантаження на функціональні і конструкційні властивості псевдоружного СПФ та встановлено фрактографічні особливості їх руйнування;
- обґрунтовано та забезпечено міцність з'єднання арматури із СПФ через муфту із використанням багатокомпонентного епоксидного клею;
- розроблено оригінальні модельні зразки залізобетонних балок зі вставками нітинолу і проведено їх випробування під циклічним навантаженням, що дозволило детально вивчити механізми взаємодії між бетоном і СПФ-елементами;
- на основі проведених експериментальних дослідження показано переваги використання псевдоружного СПФ у залізобетонній балці за дії статичного та циклічного навантаження;

— з використанням МСЕ отримано точні дані про розподіл напружень та деформацій в обидвох балках, що підтвердило ефективність використання СПФ-елементів для підвищення деформівності та довговічності конструкцій, а також допомогло розробити рекомендації щодо їх застосування в будівництві.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена оригінальний спосіб підвищення деформівності елементів конструкцій за дії циклічних навантажень шляхом використання сплавів з пам'яттю форми, може бути використана в багатьох галузях, зокрема будівельній, де під час експлуатації виникають значні деформації. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання оцінки ефективності регулювання залишкових напружень у залізобетонних конструкціях, з метою підвищення їх деформівності.

Особистий внесок здобувача. Основу дисертаційної роботи складають результати, які отримані автором самостійно. В друкованих працях, написаних у співавторстві, автору належить:

- методика дослідження впливу циклічних навантажень на елементи конструкції зі сплавом із пам'яттю форми;
- методика забезпечення міцності з'єднання робочої арматури зі сплавом із пам'яттю форми;

Науковий керівник роботи брав участь у формулюванні задач, обговоренні, аналізі, трактуванні одержаних результатів та можливостей їх практичного застосування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на: ІХ міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 25-26 листопада 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції присвяченій 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій» (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.)

Публікації. Результати проведених досліджень за тематикою дисертаційної роботи опубліковані в 10 друкованих працях. З них – 4 у фахових виданнях з переліку МОН України категорії Б, 2 входять у перелік категорії А, яка індексується у наукометричній базі Scopus, 3 в тезах і матеріалах доповідей науково-технічних конференцій. Розроблено 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 161 сторінок, в тому числі 105 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел складає 110 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Кристалічна будова СПФ

Сплави із пам'яттю форми (Shape Memory Alloys, SMA) – це функціональні сплави зі складною кристалічною структурою, що відзначаються унікальними фізико-механічними та функціональними властивостями. Сплавам із пам'яттю форми за сталої концентрації елементів, як і звичайним сплавам, притаманні фазові перетворення зі зміною температури. Кожна фаза має власну кристалічну будову та відмінні властивості. Перетворення кристалічних ґраток у сплавів із пам'яттю форми відбувається між двома фазами: аустенітною (Austenite, A) та мартенситною (Martensite, M) .

Мартенсит – це фаза низьких температур із тетрагональною, орторомбічною або моноклінною ґратками (Рисунок 1.1а). Аустеніт – це фаза високих температур із кубічною кристалічною ґраткою. У випадку з нітинолом, молекули титану розміщуються у центрі куба і формують зв'язки із молекулами нікелю (Рисунок 1.1б).

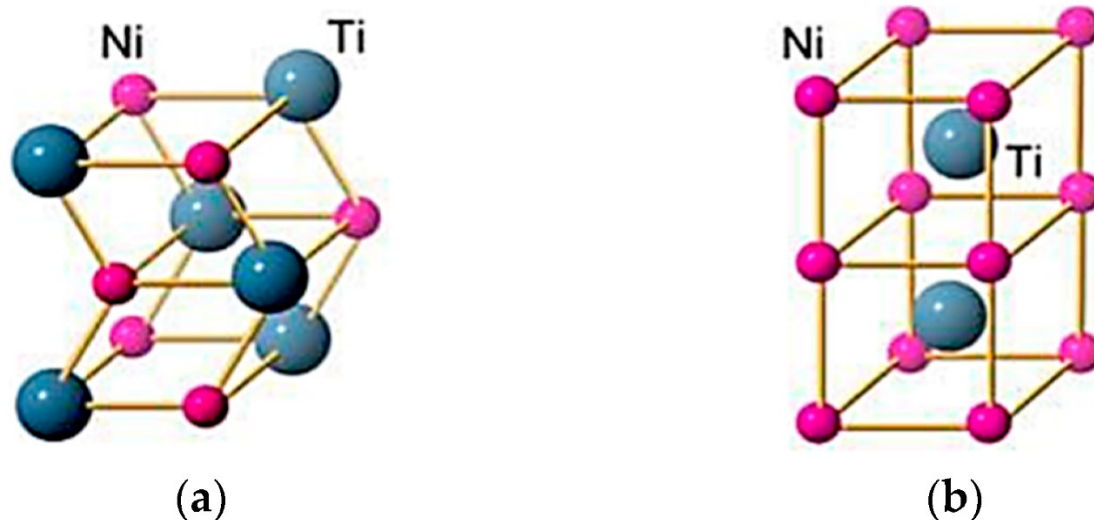


Рисунок 1.1. Кристалічна ґратка нікель-титанового сплаву у фазах (а) мартенситу B19' і (б) аустеніту B2 [16]

Фаза аустеніту характеризується вищою твердістю та жорсткістю у порівнянні із мартенситною фазою, яка є м'якою, пластичною і має нижчу умовну

межу текучості. У деяких типах нітинолу науковці знаходять проміжну R-фазу, яка має ромбоендричну будову ґратки з низькою межею деформаційних трансформацій та низькотемпературний гістерезис (1-10°C) [17, 18]

Перехід між ґратками аустеніту до мартенситу відбувається переорієнтацією молекул або ж зсувом решітки. Дане перетворення називають мартенситною трансформацією [19]. Кристали мартенситу, що утворюються внаслідок фазових перетворень, можуть мати різноманітні орієнтації, явище, відоме як варіація. Існують дві основні форми мартенситних варіацій: двійникований мартенсит (Twinned Martensite, M_t), який виникає через комбінацію різних мартенситних варіацій, та бездвійникований мартенсит (Detwinned Martensite, M_d), де переважає одна орієнтація. Ці фазові перетворення між аустенітом (батьківська фаза) та мартенситом (фаза продукту) є ключовими для забезпечення унікальних властивостей СПФ [20].

У відсутності зовнішнього навантаження, фазовий перехід від аустеніту до мартенситу відбувається при охолодженні, цей процес відомий як пряме перетворення ($A \gg M$). Під час даного перетворення відбуваються процеси, що призводять до формування численних варіацій мартенситу, до 24 варіантів у сплавах на основі Ni-Ti [21]. При нагріванні, мартенситна структура трансформується назад у аустеніт, що є зворотним фазовим переходом ($M \gg A$).

Термоеластичне мартенситне перетворення включає зміну об'ємноцентрованої кубічної ґратки аустеніту (Рисунок 1.2а) у гранецентровану орторомбічну структуру (Рисунок 1.2б), а потім у моноклінну структуру мартенситу (Рисунок 1.2в). Ці структурні зміни також можуть включати формування проміжної тетрагональної фази, відомої як R-фаза. [22, 23]

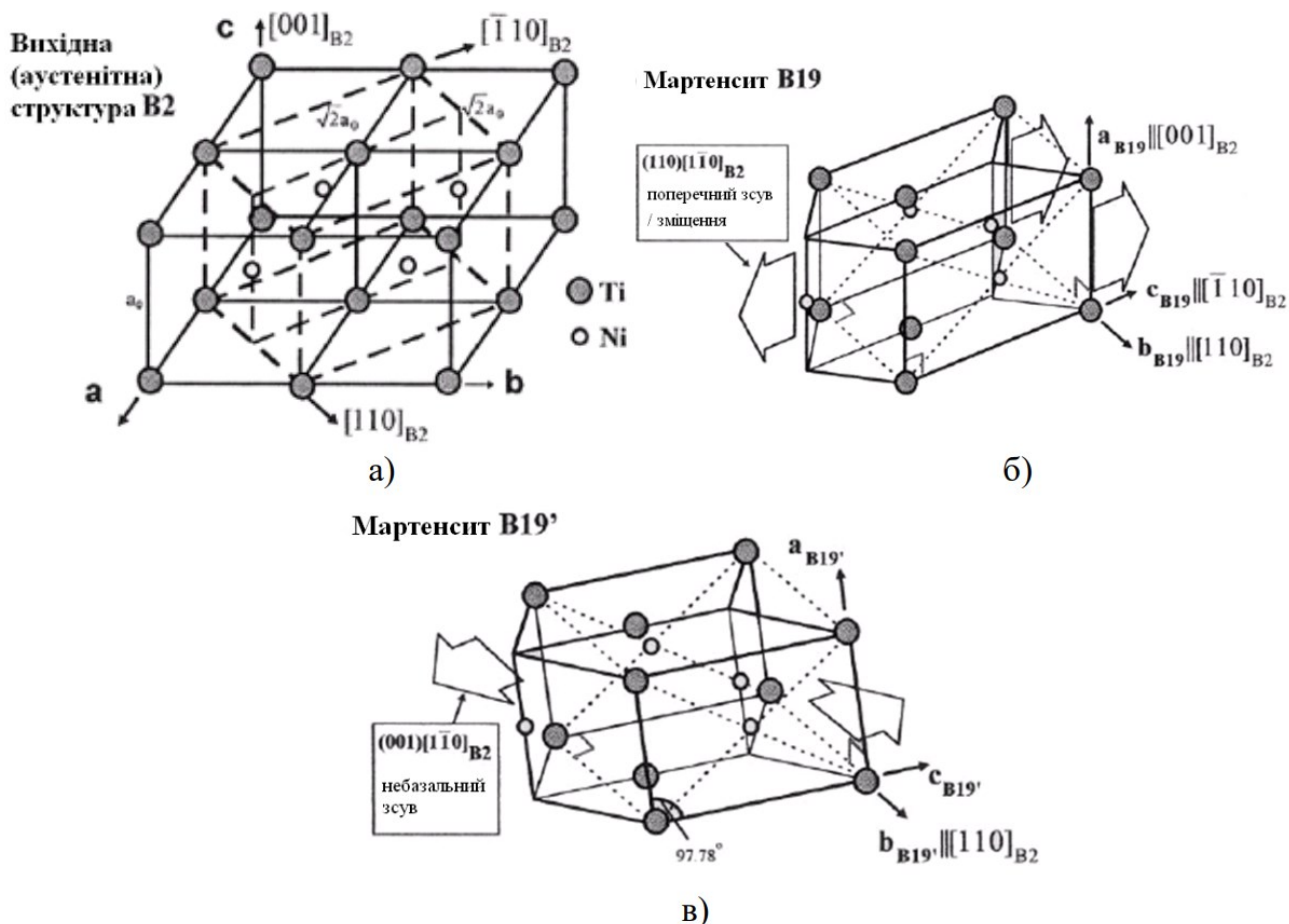


Рисунок 1.2. Розташування атомів у кристалічній ґратці ЕПФ Ni-Ti в:

- 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) [23].

У всіх сплавах з ефектом пам’яті форми відбуваються термічні перетворення, під час яких відбувається вивільнення або поглинання теплової енергії. Це зумовлено зміною кристалічної ґратки та розташування атомів у ній. Таким чином, критична деформація сплавів залежить від зміни параметрів ґратки під час перетворення аустеніту в мартенсит, а здатність до відновлення форми визначається характеристиками новоутвореної кристалічної структури.

При високих температурах, що перевищують температуру експлуатації, сплав Ni-Ti має стабільні параметри об’ємноцентрованої ґратки. Однак під час охолодження в критичному для перетворення температурному діапазоні змінюється сила міжатомних зв’язків, що впливає на модуль пружності, границю

міцності і електричний опір. У діапазоні мартенситного перетворення, при зниженні температури, відбуваються зміни в кристалічній структурі, які напряму залежать від температур на початку (M_s) та в кінці (M_f) перетворення (Рисунок 1.3). Ці зміни є передумовою для використання ефекту пам'яті форми.

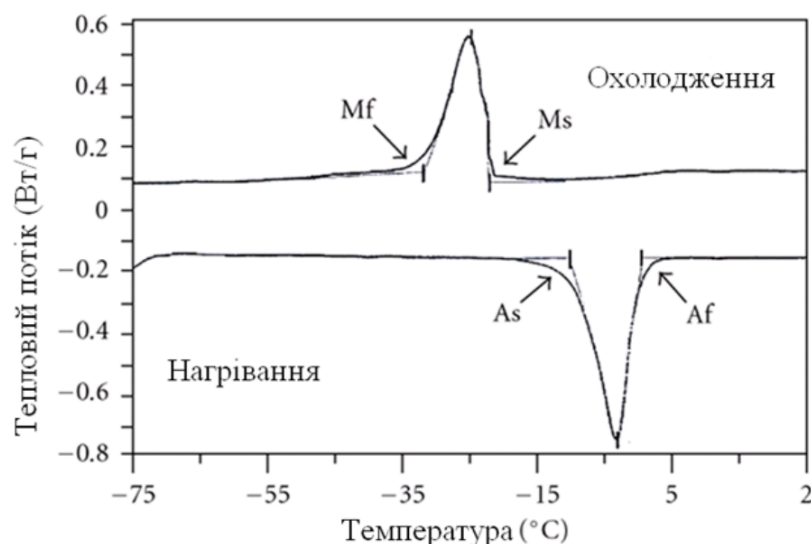


Рисунок 1.3. Типові криві для СПФ, отримані при скануванні калориметрії. [24]

Під час дослідження теплових характеристик матеріалу за допомогою калориметрії, «Вершини» кривих вказують на температури фазових перетворень, такі як M_s , A_s – початки, M_f та A_f – завершення фаз мартенситу і аустеніту відповідно. Значення для мартенситу визначаються при охолодженні зразка, а значення для аустеніту – при нагріванні.

1.2. Ефект пам'яті форми та надпружність (псевдопружність).

Існують дві ключові фізико-механічні характеристики для сплавів із пам'яттю форми: ефект пам'яті форми (ЕПФ або Shape Memory Effect, SME) та надпружність (НП або Superelasticity, SE) [25, 26] або ж альтернативна назва – псевдопружність (ПП або Pseudoelasticity, PE) [27]. ЕПФ відбувається при зміні температури, коли відбуваються трансформації у кристалічній ґратці сплаву. Цей процес включає перехід із аустенітного стану у мартенситний двійниковий стан, після чого відбувається перехід у мартенситну бездвійникову фазу та повернення у аустенітний стан. Даний цикл трансформації відбувається під час зміни температури, з охолодженням і нагріванням сплаву.

Для кращого розуміння ЕПФ, варто піддати аналізу термомеханічне навантаження в комбінованій напружено-деформованій системі координат (див. Рисунок 1.4). ЕПФ проявляється, коли сплав деформується у фазі двійникового мартенситу після чого розвантажується при температурі нижче значення A_s . Під дією нагрівання до значення, що відповідає A_f , початкова форма сплаву відновлюється, відбувається перехід у вихідну аустенітну фазу. Дана діаграма відображає експериментальні дані для типових NiTi сплавів під дією одновісного навантаження [28]. На діаграмі напруження у зразку від прикладання одновісного навантаження позначено символом (σ). Відносну деформації, яка є зміною довжини зразка вздовж напрямку прикладеного навантаження відносно початкової довжини, позначено символом (ϵ).

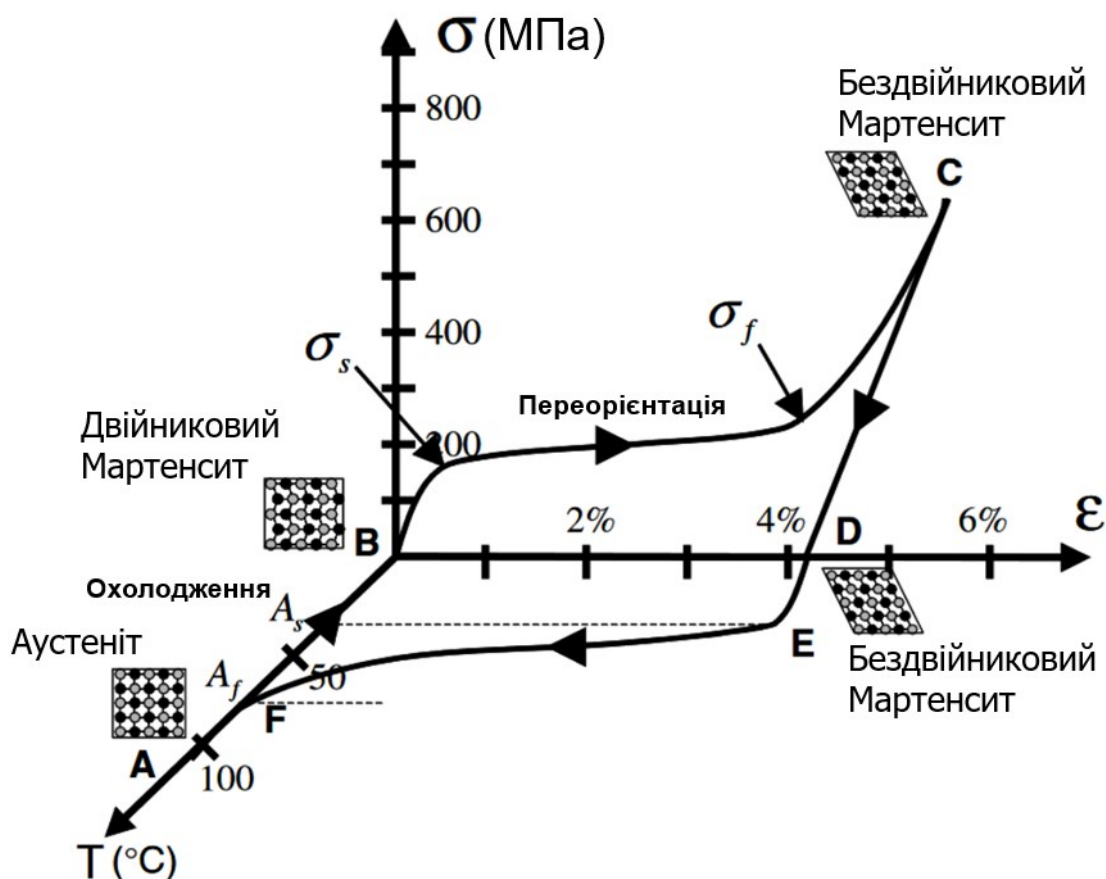


Рисунок 1.4. Графік залежності кристалічних фаз, що проявляється при ефекті пам'яті форми для типового NiTi СПФ [28]

Під час руху від позиції А до позиції В (Рисунок 1.4) СПФ піддається охолодженню. Фаза батьківського мартенситу поступово заміщується фазою двійникового мартенситу, коли температура набуває значень прямого

перетворення (M_s і M_f). Навантаживши СПФ у фазі двійникового мартенситу до значень, що перевищує значення початкової напруги (σ_s), розпочнеться процес переорієнтації варіантів мартенситу. Це призводить до зростання певних сприятливо орієнтованих варіантів мартенситу, які ростуть за рахунок інших менш сприятливих варіантів. Процес переорієнтації триває допоки рівень напружень для переорієнтації варіантів є меншим, ніж межа пластичності мартенситу σ_f . На діаграмі σ - ϵ (Рисунок 1.4) відбувається вихід із плато та різким ростом напружень до позиції С. Розвантаження сплаву із пам'яттю форми до D не ініціює зворотного процесу, а зберігає стан бездвійникового мартенситу. Лише при нагріванні без навантаження відбувається зворотне перетворення по мірі того, коли температура досягне A_s , (позиція E) і завершується при температурі A_f (позиція F). Матеріал знову перебуває у фазі батьківського аустеніту. 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 (ϵ^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 [29–32].

Надпружність проходить у ізотермічному стані, що рівний чи перевищує значення температури завершення аустенітної фази трансформації ($T \geq A_f$). У цьому випадку аустенітний стан переходить у мартенситний бездвійниковий, під дією навантаження, та повертається в аустенітний – одразу при розвантаженні.

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 (Рисунок 1.5). Зазвичай, тест на надпружність виконується при номінально постійній температурі вище A_f .

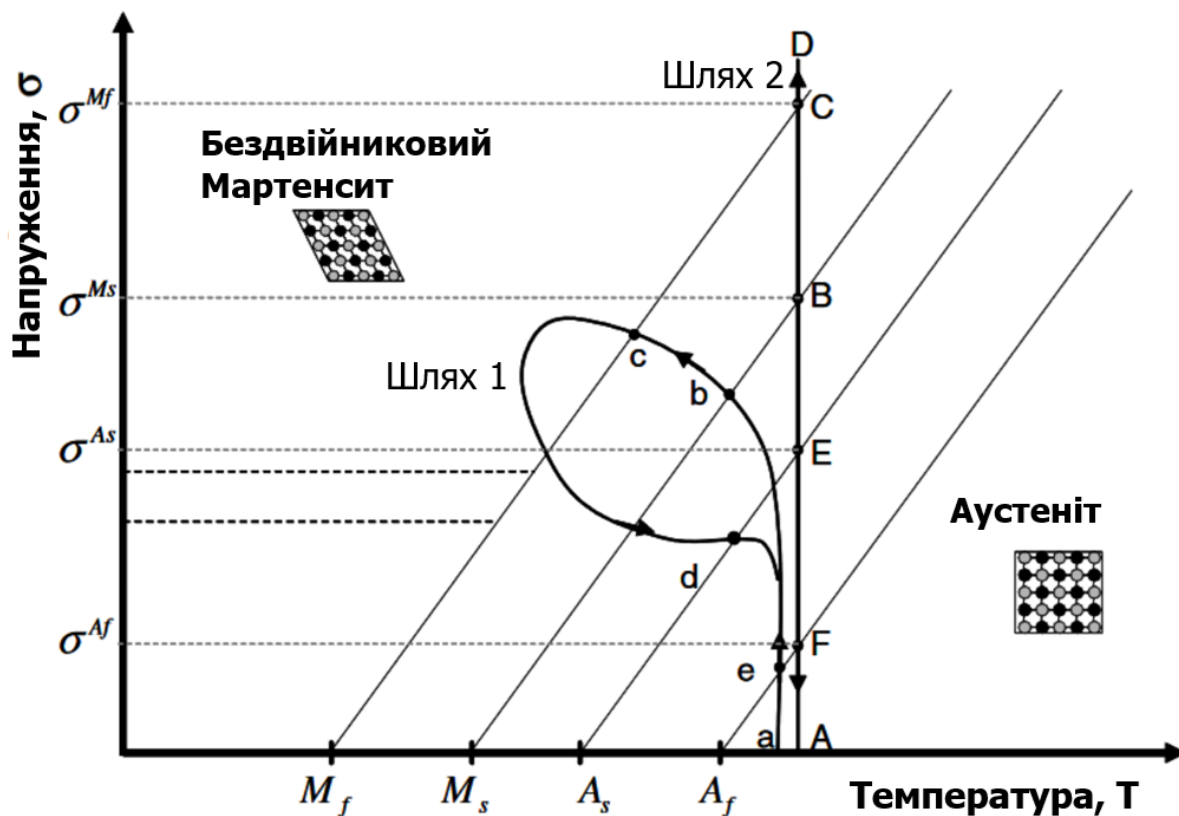


Рисунок 1.5. Фазова діаграма надпружних навантажень [28]

Щоб детальніше описати надпружну поведінку, варто розглянути термомеханічний шлях навантаження ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$) (Рисунок 1.5), що показаний на діаграмі (Рисунок 1.6).

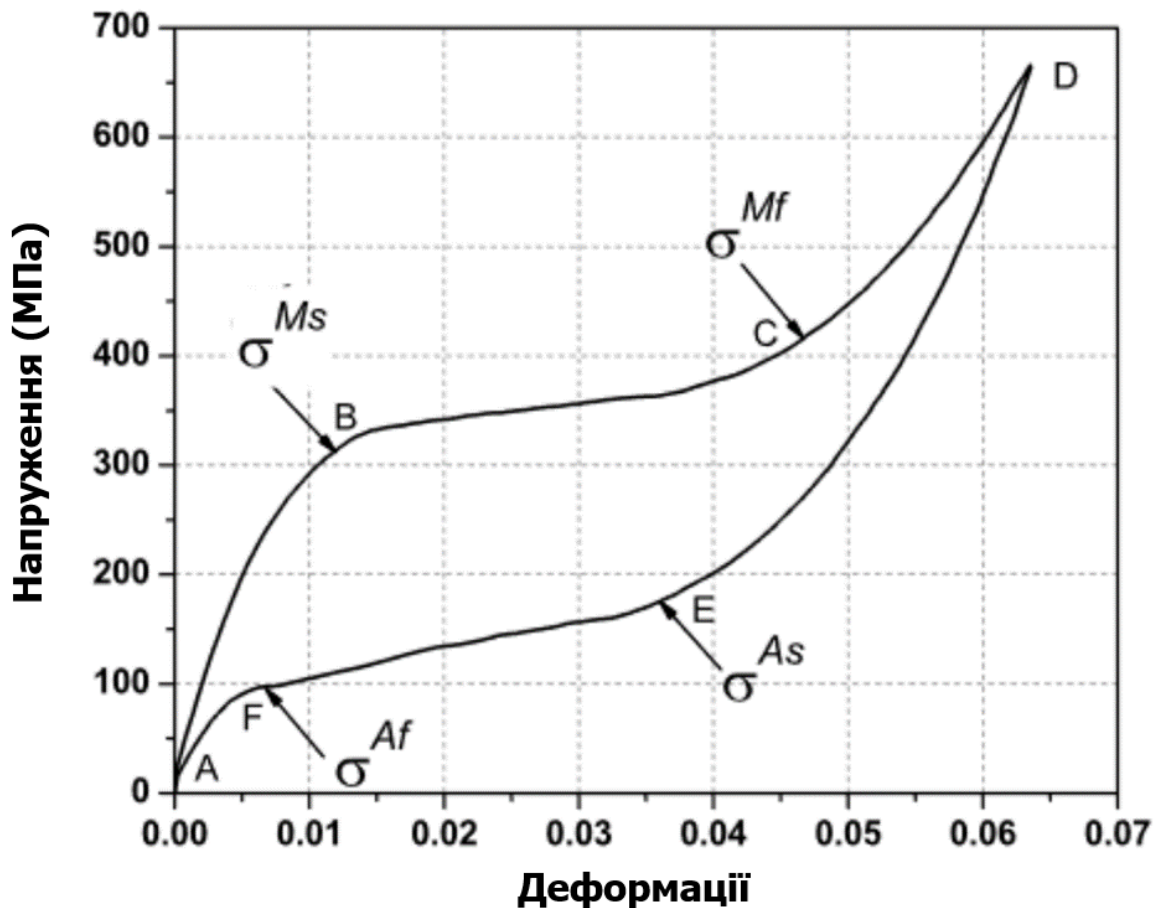


Рисунок 1.6. Типовий цикл надпружного навантаження СПФ [28]

Під дією механічного навантаження батьківська фаза (аустеніт) пружно деформується (A→B). Значення напруження для ініціювання мартенситного перетворення на фазовій діаграмі помічено σ^{Ms} . Під час перетворення генеруються великі псевдопружні деформації і відбувається трансформація (B→C) до значення σ^{Mf} – завершення перетворення. Зміна нахилу на кривій σ - ϵ пов'язана з пружним навантаженням мартенситної фази. Подальше збільшення напруження не призводить до подальших перетворень. Відбувається пружна деформація мартенситу (C → D). Розвантаження мартенситу шляхом (D → E) – пружне.

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 σ^{Af} . Після чого матеріал пружно розвантажується до A. Перетворення фази вперед і назад в ході повного надпружного циклу призводить до гістерезису, який у просторі σ - ϵ представляє енергію, розсіяну в циклі перетворення. Рівні

напружень трансформації і розміри гістерезису змінюються в залежності від матеріалу СПФ і умов тестування.

1.3. Фізико-механічні та функціональні властивості СПФ

Сплави з пам'яттю форми мають унікальну здатність до зворотних фазових перетворень (див. п. 1.1. ,1.2.), що дозволяє їм відновлювати свою початкову форму при певних змінах температури або напруження. Така поведінка зумовлена мікроструктурними змінами матеріалів та взаємодією між їхніми механічними та функціональними властивостями.

Механічні властивості сплавів з пам'яттю форми стосуються їх здатності відновлювати попередню форму попри деформації у, що найменше, 6% від власної довжини [33, 34]) і демонструвати тимчасовий опір розриву до 1000 МПа [6, 35, 36].

Також, сплави з пам'яттю форми проявляють здатність розсіювати механічну енергію, що дозволяє ефективно поглинати вібрації та гасити динамічні навантаження. Дана здатність проявляється завдяки петлі гістерезису (Рисунок 1.7), що виникає у сплавах пам'яті форми за обох ефектах: ЕПФ та НП [37–39].

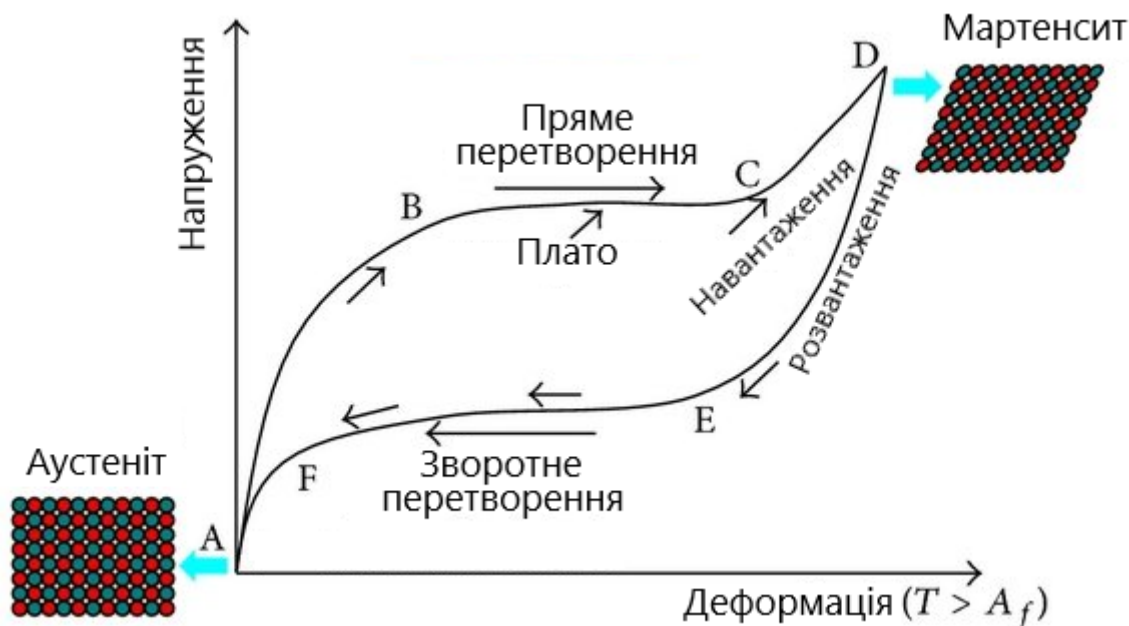


Рисунок 1.7. Типова петля гістерезису СПФ [40]

Гістерезисна поведінка в СПФ полягає в різниці кривих напруження-деформації при навантаженні і розвантаженні, що призводить до розсіювання енергії всередині матеріалу. У свою чергу, розсіювання енергії – це внутрішня здатність цих матеріалів, яка полягає у перетворенні механічної енергії в теплову під час мартенситного перетворення, викликаного напруженням, що сприяє демпфуючій здатності сплаву та його надпружній поведінці[41].

Опір втомному руйнуванню – одна з основних механічних характеристик матеріалів. Втомне руйнування відбувається у місцях дефекту матеріалу внаслідок концентрації напружень під дією циклічного навантаження. Це призводить до зародження тріщин на поверхні (чи у близькій відстані до неї) та подальшого руйнування виробу.

Останні дослідження в області втомного руйнування сплавів із пам'яттю форми вказують на такі фактори впливу: форма зерен, теплова обробка, склад сплаву, умови навантаження та інші.

У більшості досліджень у галузі втомного руйнування сплавів із пам'яттю форми вивчають нітинол. Даний сплав вирізняється своєю довговічністю за низьких і високих частот циклу із контролем напружень або переміщень.

У дослідженні впливу утворення смуг Людерса на втомну поведінку матеріалу та загальну втомну довговічність N_f , полікристалічні смуги NiTi випробувано на втому в м'якому режимі навантаження [27]. Умовно виділено три стадії втоми: перехідна стадія (струшування, *shakedown*), стаціонарна стадія (*steady stage*) та руйнування.

«Струшування» (*Shakedown*) – це процес стабілізації зразків СПФ у перших десятках циклів для досягнення незмінної поведінки при циклічному навантаженні. Так, дротину із нітинолу, діаметром 1 мм, піддали напружено контролюваному циклічному навантаженню із максимальним зусиллям в 500 Н із частотою 0,04 Гц впродовж 20-ти циклів (Рис. 1.8).

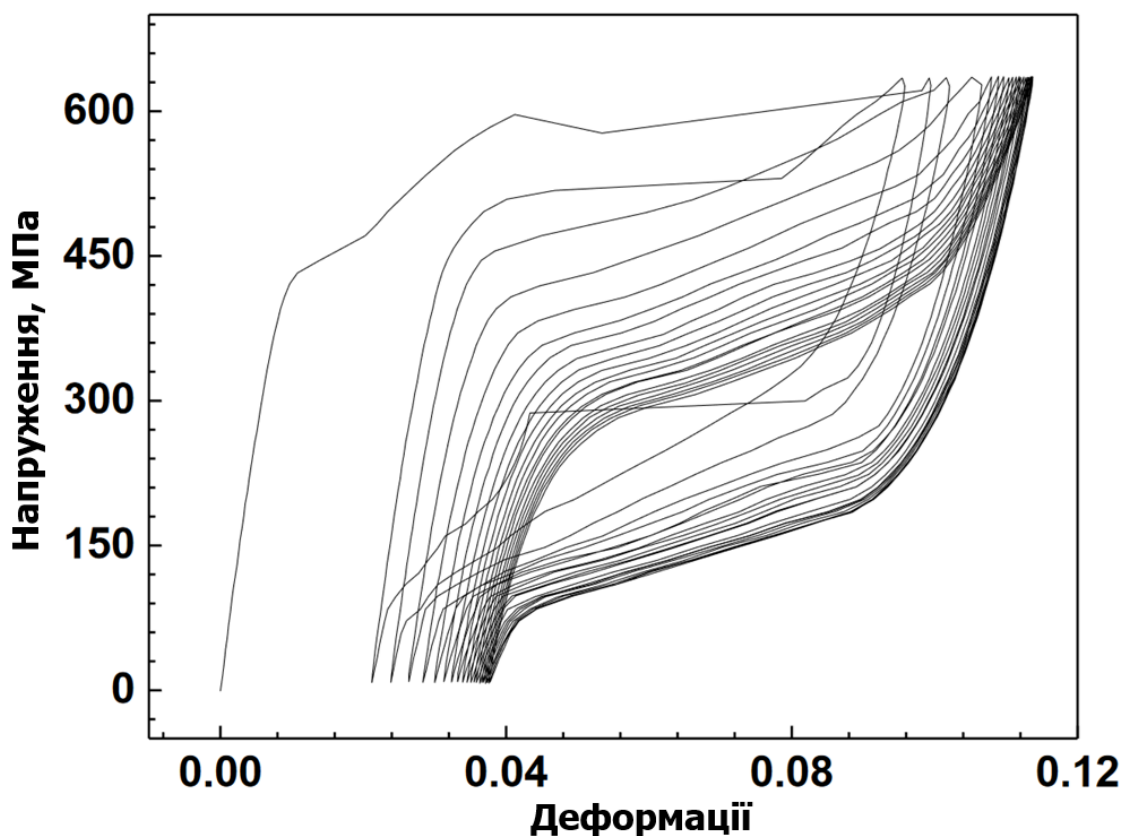


Рис. 1.8. Стабілізація матеріалу «струшенням» [42]

Втомний процес, в основному, відбувається у стаціонарній стадії в межах смуги Людерса або на її фронті. Утворення смуги є індикатором слабких зон зразків, а циклічне зародження/знищення смуги прискорює деградацію мікроструктури. При однаковій схемі навантаження втомних випробувань зразки зі смугами мають значно меншу втомну довговічність, ніж зразки без смуг.

Таким чином, для малоциклової втоми СПФ, характерним є накопичення непружних деформацій у фазі мартенситного перетворення. Саме у цій фазі є найбільша ймовірність ініціації розвитку тріщин [27, 42, 43].

Багатоциклова втома СПФ відбувається при пружній поведінці сплаву на макрорівні. Проте, на мезоскопічному рівні деякі зерна зазнають пластичних деформацій, що призводить до руйнування виробу [44–46].

Ці дві особливості поведінки СПФ формують z-подібну криву втоми від деформацій, що зумовлена невідповідною поведінкою сплаву у глобальних та локальних деформаціях [47].

Також, сплави із пам'яттю форми мають різну поведінку при циклічних навантаженнях із контролем деформацій та контролем напружень за різних частот. Так, за багатоциклової втоми СПФ демонструють приріст довговічності у діапазоні частот 1-5 Гц із контрольованим напруженням. Із контрольованим видовженням, довговічність залишається відносно незмінною до частоти 2,5 Гц. При частоті 5 Гц довговічність матеріалу погіршується. Для малоциклової втоми поведінка сплаву подібна: збільшення частоти призводить до зменшення довговічності [42]. На таку поведінку впливає температура зразка, що зростає із збільшенням частоти.

Ще одним з ключових факторів, що визначає механічні характеристики SMA, є коефіцієнт асиметрії напружень R_σ , який визначає співвідношення між максимальними σ_{max} та мінімальними σ_{min} напруженнями під час циклічних навантажень.

При значеннях коефіцієнта асиметрії, близьких до -1, матеріал зазнає інтенсивних змін напруження під час кожного циклу навантаження, що призводить до значного накопичення деформацій та зростання рівня втоми. Це пояснюється тим, що зворотне циклічне навантаження викликає постійні зміни напрямку напруження, що створює додаткові термічні ефекти та фазові перетворення в матеріалі. Такі умови призводять до підвищеного зношування та швидкого руйнування СПФ [48–50]. Наприклад, дослідження, проведені в рамках цього діапазону, показали, що сплави з ефектом пам'яті форми, які піддаються циклічним навантаженням з R_σ близьким до -1, мають меншу стійкість до втоми порівняно зі сплавами, що зазнають позитивного циклічного навантаження [51, 52].

Дослідження також показують, що вплив зворотного циклічного навантаження на СПФ не обмежується лише накопиченням деформацій. Відомо, що такі умови викликають структурні зміни на мікрорівні, включаючи розвиток мікротріщин та локалізованих зон пластичної деформації. Зростання мікротріщин з часом призводить до макроскопічного руйнування матеріалу. Крім того, висока частота зміни напрямку напруження підвищує температури матеріалу через внутрішнє тертя, що впливає на фазові перетворення та зменшує загальну стійкість матеріалу до циклічних навантажень [48].

При значеннях коефіцієнта асиметрії, що варіюються від 0 до 1, включаючи помірні значення (0-0,5) та високі значення (0,5-1), сплави з ефектом пам'яті форми демонструють загалом покращені втомні властивості порівняно з низькими значеннями R_σ . Ці умови сприяють рівномірнішому розподілу деформацій у матеріалі, що зменшує швидкість накопичення мікротріщин і підвищує загальну стійкість матеріалу до циклічних навантажень. Дослідження вказують, що при високих значеннях R_σ (0,5-1), матеріал демонструє значне нагрівання під час навантаження, що призводить до покращення здатності матеріалу відновлюватись після великих деформацій завдяки фазовим перетворенням. Проте це також прискорює зношування через термічний вплив [49, 50, 53].

Дослідження також показали, що при середніх значеннях R_σ сплави демонструють зниження внутрішнього нагріву матеріалу та покращення фазових перетворень, що забезпечує збереження еластичної здатності матеріалу навіть після багатьох циклів навантаження. Крім того, помірні значення коефіцієнта асиметрії сприяють зменшенню розвитку мікротріщин та інших структурних дефектів, що є критичним для тривалої експлуатації матеріалів у різних інженерних застосуваннях [48].

1.4. Застосування сплавів з пам'яттю форми для підвищення стійкості конструкцій за динамічних навантажень

Для будь-якої споруди під дією сейсмічних навантажень важливо враховувати її власну частоту коливань. При дії динамічних збудників на будівлю чи конструкцію, критичним моментом її стійкості є потрапляння у резонанс – посилення амплітуди, спричинене збігом значень частоти збудника із власною частотою коливань. У різних типах споруд, різна частота власних коливань.

Ефективним методом запобігання руйнуванню конструкцій під дією динамічних навантажень є застосування сейсмічних ізоляторів, у тому числі з використанням сплавів із пам'яттю форми. На даний час існує безліч сплавів, що демонструють ефект пам'яті форми та надпружність. Приклади таких сплавів подано у Таблиця 1.1.

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

Сплав	Компоненти (атомна частка %)	Метод перетворення
Cu-Al-Ni	28-29 Al, 3,0-4,5 Ni	Термоеластичний
Cu-Sn	15 Sn	Термоеластичний
Cu-Zn	38,5-41,5 Zn	Термоеластичний
Cu-Zn-X	(X = Si, Al, Ga, Sn) невелика кількість включень	Термоеластичний
Fe-Cr-Ni-Mn-Si	9 Cr, 5 Ni, 14 Mn, 6 Si	Не термоеластичний
Fe-Mn-Si	28-33 Mn, 4-6 Si	Не термоеластичний
Fe-Ni-C	31 Ni, 0,4 C	Не термоеластичний
Fe-Ni-Co-Ti	33 Ni, 10 Co, 4 Ti	Термоеластичний
	31 Ni, 10 Co, 3 Ti	Не термоеластичний
Fe-Ni-Nb	31 Ni, 7 Nb	Не термоеластичний
Mn-Cu	5-35 Cu	
Ni-Al	36-38 Al	Термоеластичний
Ni-Ti	49-51 Ni	Термоеластичний
Ni-Ti-Cu	8-20 Cu	Термоеластичний

Застосування сплавів із пам'яттю форми у будівельних конструкціях чи спорудах різняться відповідно до завдання, типу навантаження та способу кріплення. Найпростішим методом застосування СПФ у конструкції є безпосереднє використання їх у якості дротів, стержнів, болтів та тросів. Зазвичай, даний тип елементів піддається одновісному навантаженню, а саме – розтягу. Даний метод заснований на простоті реалізації та монтажі, передбачуваності поведінки як СПФ-елемента, так і конструкції в цілому, високій ефективності використання сплаву [40, 54, 55].

Найпоширенішим елементом для вивчення за одновісного навантаження є дротина. Це пов'язано із низькою вартістю, розвиненому виробництві та ринку збуту, високою ефективністю використання матеріалу та достатньою стійкістю до малоциклової втоми [56–58]. Однак, низький опір навантаженню часто обмежує

застосування дротів із СПФ, що ставить під сумнів можливість використання їх у масивних конструкціях. Більшість досліджень, що проводилися в цьому напрямку, мали маломасштабний характер та слугували перевіркою концепції пристроїв [59–62]. Крім того, є складність у закріпленні СПФ-дротів, оскільки є потреба у ефективному та зручному закріпленні гладких дротин, яких у одному пристрої, зазвичай, використовують сотнею або тисячею. Як зазначає автор у власному дослідженні: «Додати велику кількість тонших дротів було можливо, але полагодити кілька сотень дротів не здається легким завданням.»(Vicencç Torra, Casciati, and Vecce 2016, ст.84).

Дротини із СПФ можна використовувати із дерев'яними конструкціями, оскільки дерев'яні рами залежать від сталевих з'єднань у місцях перетину елементів різного типу. Враховуючи те, що дерево є зазвичай найслабшим елементом у такому з'єднанні під час екстремальних подій, таких як землетрус, застосування СПФ можна вважати цілком доречним. Також, зважаючи на відносну легкість деревини, витрати матеріалу із сплаву з пам'яттю форми зменшуються. Крім того, порівнюючи із класичним рішенням використання попереднього напружених сталевих ниток, де ефект попереднього натягу зменшується із часом через переважаючий вплив повзучості деревини, використання СПФ-дротин може бути перспективною альтернативою [64].

Так, у дослідженні [65] представлено результати циклічної поведінки шипових з'єднань, армованих дротами зі сплаву з пам'яттю форми (СПФ). Чотири зразки з'єднання, армовані різною кількістю СПФ-дротин, піддали малоциклічному реверсивному навантаженню. і отримані гістерезисні криві момент-обертання. Циклічну поведінку з'єднань, армованих СПФ, порівняли з поведінкою з'єднань із традиційними методами армування. Відповідно до результатів, міцність, жорсткість і здатність розсіювання енергії шипових з'єднань, із використанням СПФ, значно покращилась. Залишкова деформація виявилась на 20% меншою, ніж у з'єднань, із традиційними методами зміцнення.

Зменшення амплітуди коливань від зовнішніх динамічних впливів також здійснюють за допомогою активного, напівактивного та пасивного контролю. В

активному режимі зовнішнє джерело живлення управляє виконавчими механізмами, що дозволяє прикладати сили до структур об'єкта. Пасивна система управління не потребує зовнішнього джерела живлення, а сили, що поглинають удари, виникають у відповідь на рухи конструкцій. Напівактивні системи управління використовують набагато менше енергії для регулювання властивостей структур, ніж активні системи [5].

Пасивним контролем вважається застосування властивостей демпфування та надпружності СПФ під дією чисельно великих навантажень. Дане застосування допомагає зменшити реакції конструкцій чи їх елементів і, відповідно, зменшити пластичні деформації. Ефективне застосування відбувається з використанням спеціальних приладів у двох напрямках застосування: ґрунтова система ізоляції та систему гасіння динамічної енергії [66]. У системі ґрунтової ізоляції СПФ встановлюються між наземною частиною конструкції і безпосередньо ґрунтом або фундаментом, утворюючи роз'єднану систему, яка фільтрує сейсмічну енергію, що передається від ґрунту до надбудови, зменшуючи тим самим потенційну шкоду.

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, псевдопружні СПФ мають меншу демпфуючу здатність, але вони мають значну рецентруючу силу, щоб відновити початкове положення конструкції, і тим самим мінімізувати її залишкову деформацію [35, 40, 67, 68].

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) [12, 69].

Відомі дослідження, наприклад циклічних властивостей і потенціалу псевдопружних дротів і стержнів СПФ зокрема із великим поперечним перерізом [68], 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 псевдопружних СПФ для підвищення сейсмічної стійкості інженерних споруд. Тести показали, що дрiт та стержень з матеріалу (Таблиця 1.2) продемонстрували дуже хорошу псевдопружну 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 із пам'яттю форми [68]

Властивості	Сплав із пам'яттю форми NiTi	
	Аустеніт	Мартенсит
	Фізичні властивості	
Густина	6,45 г/см ³	
	Механічні властивості	
Відновлення деформацій	до 8% включно	
Модуль пружності	30 – 83 ГПа	21 – 41 ГПа
Межа текучості	195 – 690 МПа	70 – 140 МПа
Межа міцності розтягу	895 – 1900 МПа	
Видовження руйнування	5 – 50% (зазвичай 25%)	
Коефіцієнт Пуассона	0,33	
	Хімічні властивості	
Стійкість до корозії	Відмінна (подібна до нержавіючої сталі)	

Також сплави пам'яті форми почали використовувати у демпфуючих пристроях [54, 70], які використовують як розсіювачі енергії при коливаннях будівель чи споруд. Подібний пристрій був розроблений [71] для транспортування довгомірних конструкцій. Даний пристрій (Рисунок 1.1) 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.

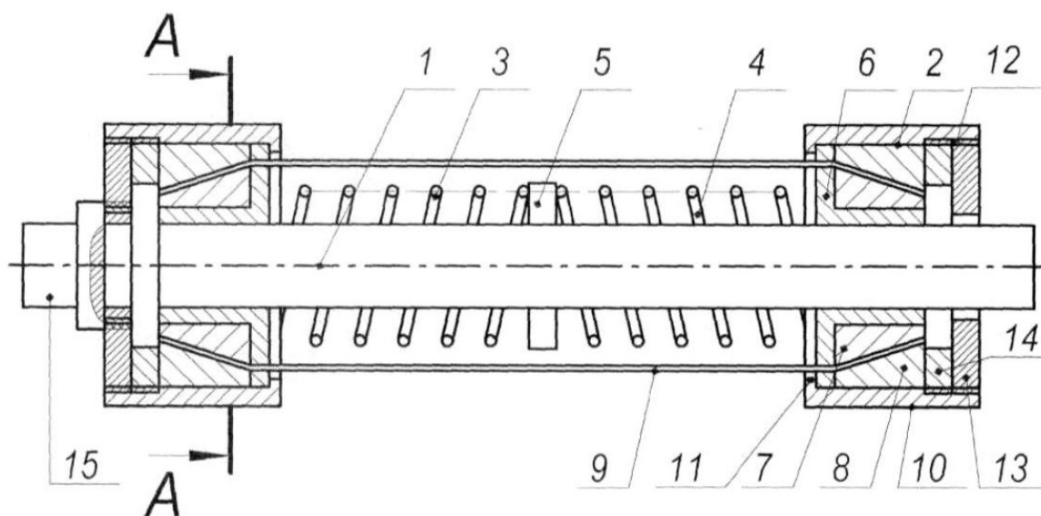


Рисунок 1.9. Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій [71]

Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій (Рисунок 1.9) 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 23 проміжну шайбу 14. Різьбове кільце 13 лівої бокової системи кріплення з'єднане з тягою 15.

Для поліпшення або усунення недоліків сплавів з пам'яттю форми (СПФ), їх комбінують з іншими матеріалами. Наприклад, для зниження сейсмічних навантажень використовують поєднання п'єзоелектричного матеріалу зі СПФ [72–75]. У дослідженні [76] розглянуто роботу "розумного" демпфера, призначеного для поліпшення керування інженерними спорудами під впливом зовнішніх збурень, таких як землетруси різної магнітуди. Передбачалося, що динамічні реакції інженерної споруди можна ефективніше погасити за допомогою пристроїв

для активного контролю систем, що мають доступ до виконавчих механізмів (актуаторів). Розроблений комбінований демпфер складається з дротів зі СПФ та фрикційного демпфера, який може регулювати зусилля залежно від амплітуди руху ґрунту, змінюючи електричну напругу на п'єзокерамічних актуаторах. Числове моделювання двоповерхової сталевий рамної конструкції під дією сейсмічних коливань дозволило оцінити ефективність цього демпфера.

Швидкість навантаження мала незначний вплив на гістерезисну криву дротів СПФ. Зі збільшенням амплітуди деформації область мартенситного перетворення зменшувалася, а накопичена залишкова деформація, гранична напруга і площа гістерезисної петлі збільшувалися, що призводило до постійного зростання здатності до розсіювання енергії. Запропонований комбінований демпфер зі СПФ і п'єзоелектриків ефективно знижував динамічну реакцію конструкції. Гібридне керування зменшувало сейсмічні коливання краще, ніж пасивне керування без подачі напруги на приводи. Крім того, зменшення сейсмічних коливань при пасивному керуванні на рівні 0,6g було кращим, ніж при 0,4g, тоді як для гібридного керування спостерігалася протилежна тенденція. Це пояснюється тим, що здатність напівактивного керування до розсіювання енергії є недостатньою у випадку сильного землетрусу, коли пасивне керування відіграє основну роль у цьому процесі.

Досліджуючи використання сплавів з пам'яттю форми (СПФ) як допоміжної арматури у залізобетонних балках [77], виникла необхідність дослідити поведінку надпружних елементів у різних типах бетону [25, 78]. У роботі [25] було проаналізовано вісім балок, з яких дві підсилені прутками зі сплаву NiTi. Двопротітні вільнооперті балки (Рисунок 1.10) піддавали циклічному навантаженню, причому довжини СПФ становили 200 мм, 250 мм та 320 мм (Таблиця 1.3).

Для виготовлення залізобетонних балок використали два класи бетону з міцностями: $f_{ctest} = 37,5$ МПа (BN1-S, BN1-Nm, BN2-S, BN2-Nm, Таблиця 1.3) та $f_{ctest} = 53,8$ МПа (BH1-S, BH1-Nm, BH2-S, BH2-Nm, Таблиця 1.3). Було виявлено, що балки з бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа продемонстрували кращі показники

надпружності. Зі збільшенням відсотка армування балки, навантаження, при якому бетон починав розтріскуватися, змінилося наступним чином: з 19,4 кН до 12,8 кН для бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа та з 38,9 кН до 37,5 кН для бетону міцністю $f_{ctest} = 53,8$ МПа без застосування СПФ; з 15,4 кН до 12,7 кН для бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа та з 12,1 до 15,4 кН для бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа із застосуванням СПФ.

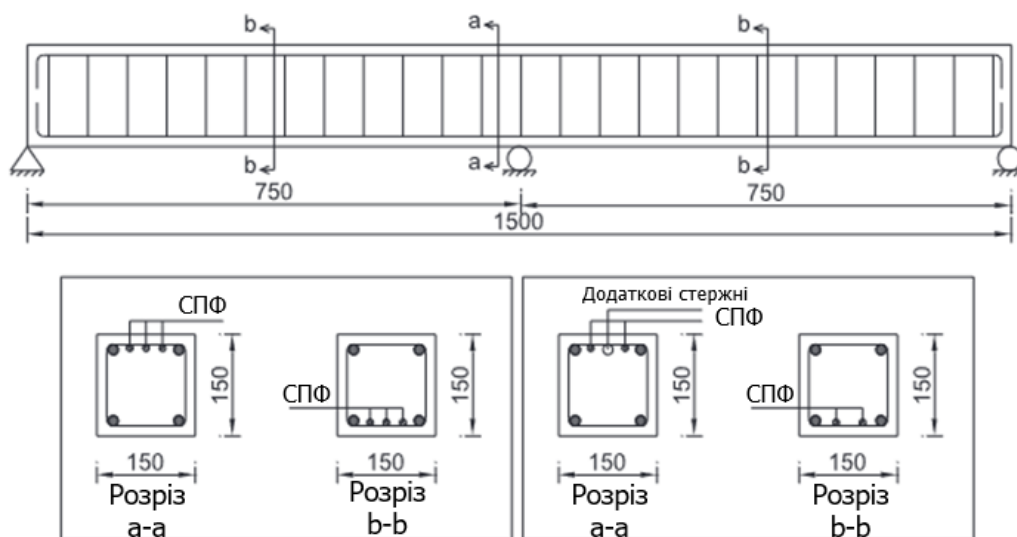


Рисунок 1.10. Конструктивна схема досліджуваних балок [25]

У балках з вищим відсотком армування та стержнями зі СПФ (ВН2- N_m та ВН2- N_m , Таблиця 1.3) ефективність закриття тріщин збільшилась до 12,5% (ВН2- N_m , Таблиця 1.3) та до 14,3% (ВН2- N_m , Таблиця 1.3). У балок з меншим відсотком армування та стержнями зі СПФ (ВН1- N_m та ВН1- N_m , Таблиця 1.3), ефективність закриття тріщин склала 5% (ВН1- N_m , Таблиця 1.3) та 12,5% (ВН1- N_m , Таблиця 1.3). Було зафіксовано, що гранична деформація балок зі СПФ перевищувала показники звичайних балок, і цей ефект був більш виражений у балках з бетону міцністю $f_{ctest} = 37,5$ МПа. Крім того, використання СПФ у балках підвищило ефективність розсіювання енергії більше ніж на 50%, сповільнило процес втрати жорсткості до руйнування та покращило гнучкість.

Таблиця 1.3. Типи досліджуваних балок [25]

№	Тип	Розріз а-а	Розріз b-b
---	-----	------------	------------

	Армування	Додаткове армування	СПФ	Армування	СПФ	
1	BN1-S	4Ø8	Немає	Немає	4Ø8	Немає
	BN1-Nm	4Ø8	Немає	3 стержні (L = 200)	4Ø8	3 стержні (L = 250)
	BH1-S	4Ø10	Немає	Немає	4Ø10	Немає
	BH1-Nm	4Ø10	Немає	3 стержні (L = 200)	4Ø10	3 стержні (L = 250)
2	BN2-S	4Ø10	1Ø8 (L = 500)	Немає	4Ø10	Немає
	BN2-Nm	4Ø10	1Ø8 (L = 500)	2 стержні (L = 250)	4Ø10	2 стержні (L = 320)
	BH2-S	4Ø12	1Ø10 (L = 630)	Немає	4Ø12	Немає
	BH2-Nm	4Ø12	1Ø10 (L = 630)	2 стержні (L = 250)	4Ø12	2 стержні (L = 320)

Основний напрямок підсилення залізобетонних конструкцій надпружними сплавами з пам'яттю форми (СПФ) включає їх використання у великогабаритних мостах [79].

Альтернативним підходом є застосування СПФ для зовнішніх надбудов з метою гасіння поперечних крутних коливань, спричинених зовнішніми вібраціями [80]. Для дослідження цієї концепції, на моделі мосту з органічного скла (Рисунок 1.11) було закріплено попередньо натягнуті до 3,5% стержні з нітинолу. Проводили експерименти з вивчення поведінки мосту при дії вільних коливань, вільних крутних коливань (Рисунок 1.12), а також вібраційних та крутних коливань, спричинених рухомим тілом зі сталою швидкістю (Рисунок 1.13).

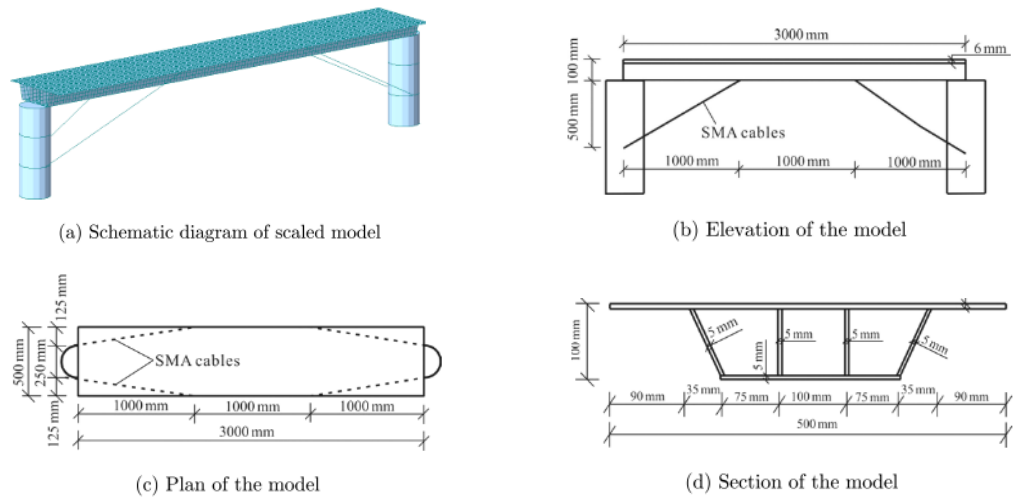


Рисунок 1.11. Схема натурної моделі мосту [80]

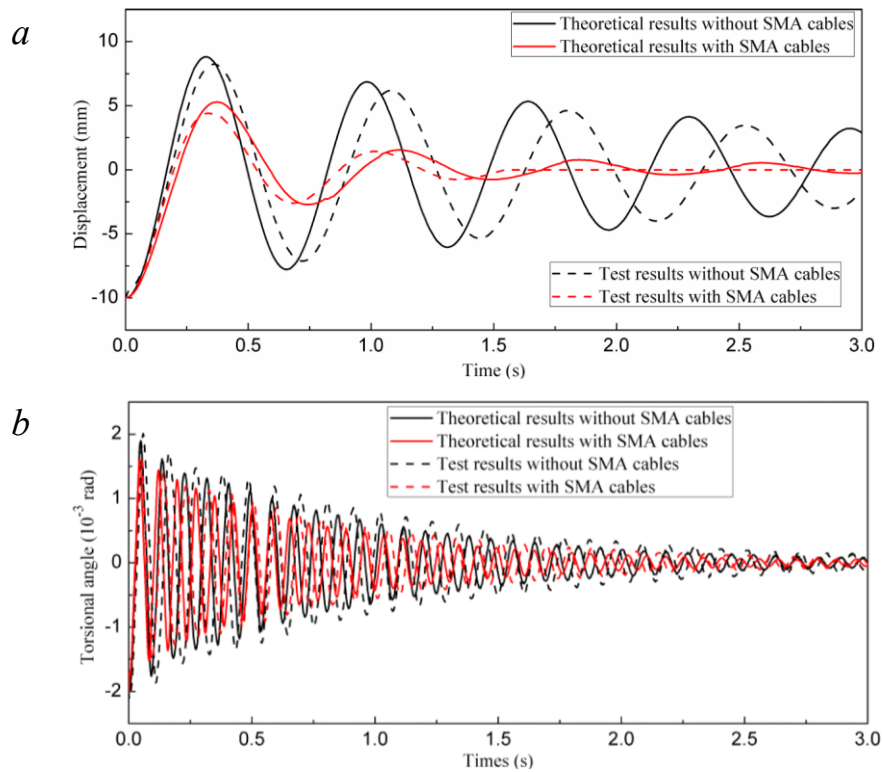


Рисунок 1.12. Діаграми прогинів (а) та кручення (b) за вільного коливання [80]

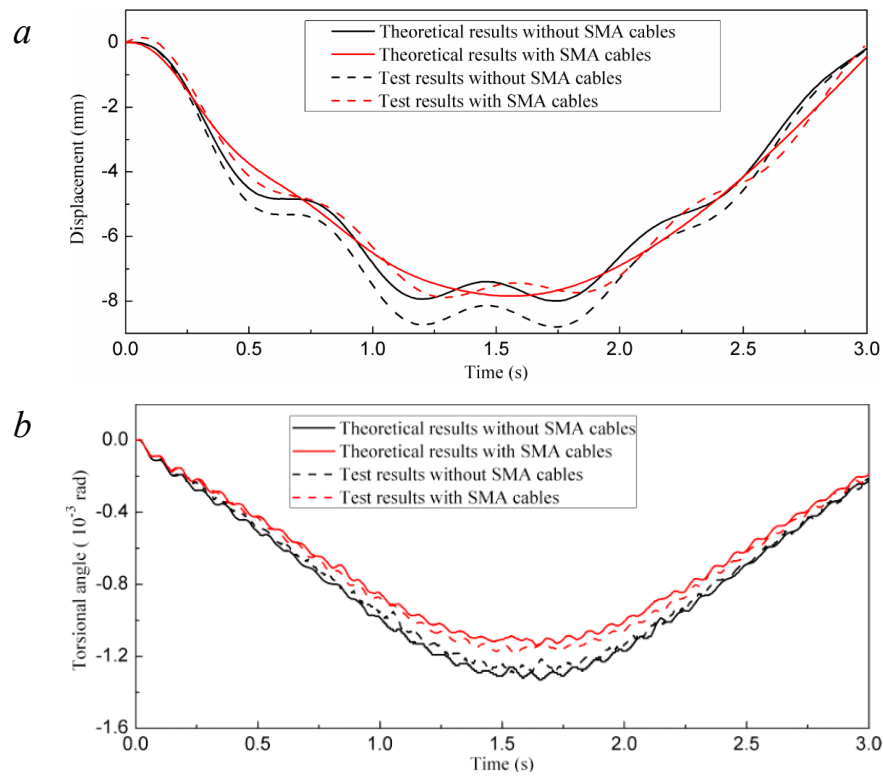


Рисунок 1.13. Діаграми прогинів (а) та кручення (b) спричинені рухомим тілом із сталою швидкістю [80]

Дослідження показали, що для прогнозування поведінки мостів зі СПФ під дією вільних коливань та коливань, спричинених рухомим тілом, можна використовувати рівняння (1) та (2):

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + \delta(x - x_0) \left[k_{SMA} y(x, t) + c_{SMA} \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right] = 0 \quad (1.1)$$

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + \delta(x - x_0) \times \left[k_{SMA} y(x, t) + c_{SMA} \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right] = \delta(x - vt) mg \quad (1.2)$$

Використання СПФ призвело до зменшення амплітуди вільних коливань на 63% та амплітуди крутих коливань на 18% (Рисунок 1.12). Амплітуди крутих та

вібраційних коливань, викликаних рухомим тілом зі сталою швидкістю, зменшилися на 17% та 58% відповідно (Рисунок 1.13) [80].

Також розглядалася доцільність використання СПФ як пластичних шарнірів, зокрема у мостових опорах (Рисунок 1.14).

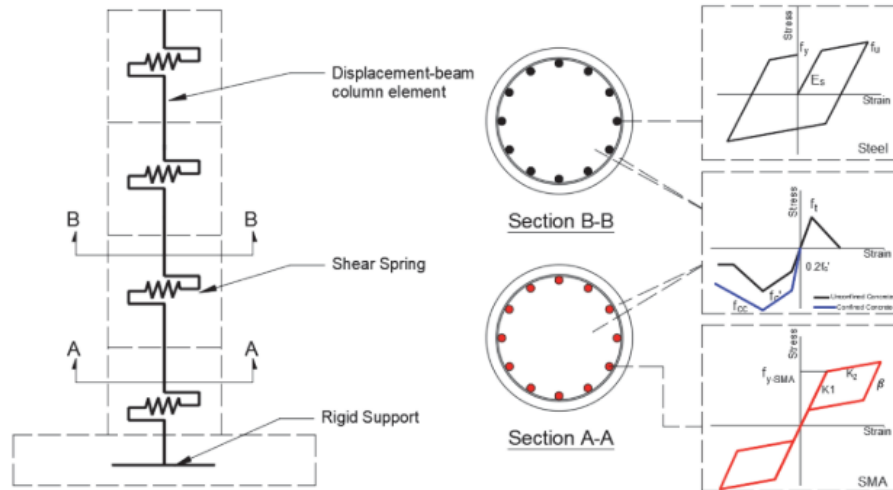


Рисунок 1.14. Розрахункова модель опори мосту з пластичним шарніром зі СПФ [81]

Для визначення величини зміщення мостової конструкції з пластичним шарніром зі СПФ, запропоновано використовувати формули (1.3) та (1.4):

$$\Delta_y = \frac{0.9\epsilon_{SMA}H^2}{3D} \text{ при } P/A_g f'_c > 0.05 \quad (1.3)$$

$$\Delta_y = \frac{0.7\epsilon_{SMA}H^2}{3D} \text{ при } P/A_g f'_c < 0.05 \quad (1.4)$$

де ϵ_{SMA} – відносне видовження за фазового перетворення; D – діаметр опори; H – висота опори; $P/A_g f'_c$ – коефіцієнт осевого навантаження; P – прикладене осьове навантаження, A_g – площа перерізу, f'_c – міцність бетону на стиск [81].

Вплив зовнішньої температури при застосуванні СПФ у конструкціях було проігноровано.

СПФ також ефективно застосовують при розробці приладів розсіювання енергії. Одним із таких пристроїв є прототип для пасивного розсіювання енергії [82] створений із використанням двох дротин із надпружного NiTi сплаву, як основного компоненту.

створений із двома дротинами з надпружного NiTi сплаву як основного компонента. Пристрій, подібний до самоцентруючого приладу, розробленого Dolce та іншими [67] відрізняється спеціальною конструкцією, де дротини СПФ завжди піддаються розтягуючим зусиллям, навіть при стисканні пристрою (Рисунок 1.15). У конструкцію також закладена можливість попереднього натягу дротин з нітинолу.

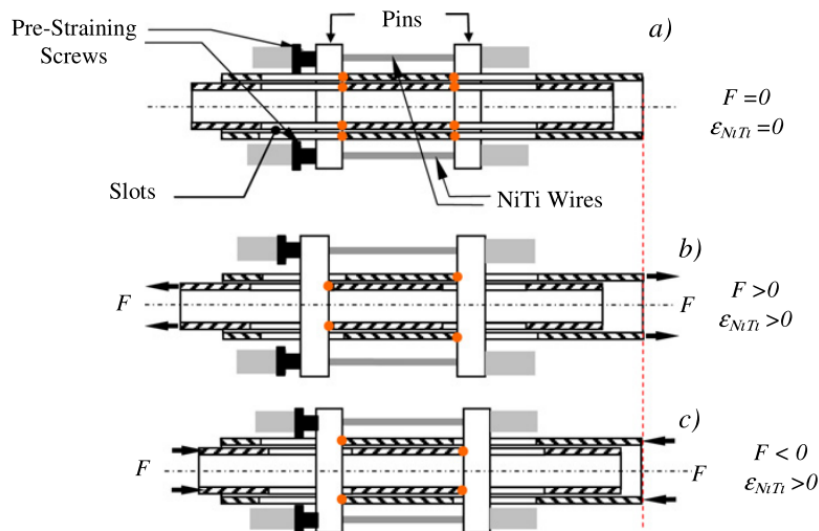


Рисунок 1.15. Схематичне зображення принципу дії СПФ-приладу [82]

З урахуванням попереднього натягу, діаграма деформування дротини та залежність зусилля від переміщення пристрою представлені на Рисунку 7.

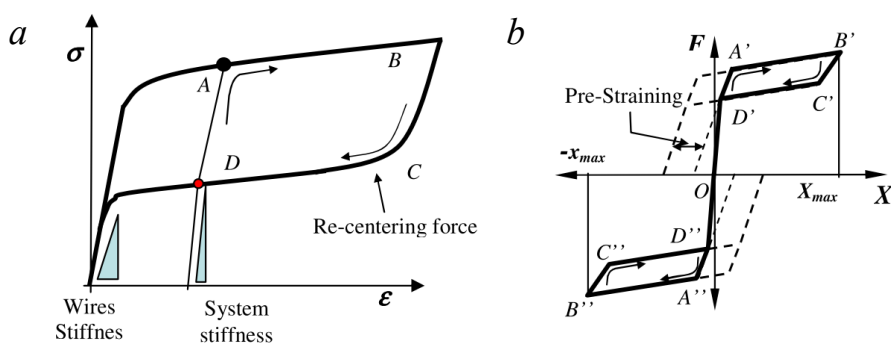


Рисунок 1.16. Графіки напружено-деформованого стану дротини із Нітинолу (a) та приладу гасіння коливань (b) [82]

При циклічному навантаженні у СПФ з'являється залишкова деформація до 2%, яку можна компенсувати за рахунок попереднього натягу дротин. Прототип, розглянутий у цій статті [82], розроблено для номінальної довжини дроту з NiTi

СПФ (вміст Ni 50,8%) довжиною 80 мм. Автор зазначає, що така довжина дозволяє нівелювати невеликі початкові різниці довжин завдяки попередньому натягу. Оскільки температура завершення аустенітної фази трансформації становить -10°C , очікувалося, що пристрій працюватиме в стандартних умовах навколишнього середовища, тому випробування проводили при кімнатній температурі 22°C на сервогідравлічній випробувальній машині.

Провели два типи випробувань: з дротинами СПФ, закріпленими звичайним способом, і з попередньо натягнутими дротинами на 2%. Ці пристрої піддали 50 циклам розтягу-стиску зі швидкістю переміщення 1 мм/хв, але завдяки конструкції пристрою, дротини піддавалися 100 циклам навантаження розтягом.

На Рисунок 1.17 представлені залежності зусилля від переміщення для дротин, закріплених звичайним способом (Рисунок 1.17а), та з натягом у 2% (Рисунок 1.17б). Амплітуди переміщень визначалися з умов повного аустенітно-мартенситного перетворення NiTi сплаву. Це можна оцінити за невеликим збільшенням навантаження, яке спостерігається в кінці плато аустенітно-мартенситного перетворення (Рисунок 1.17).

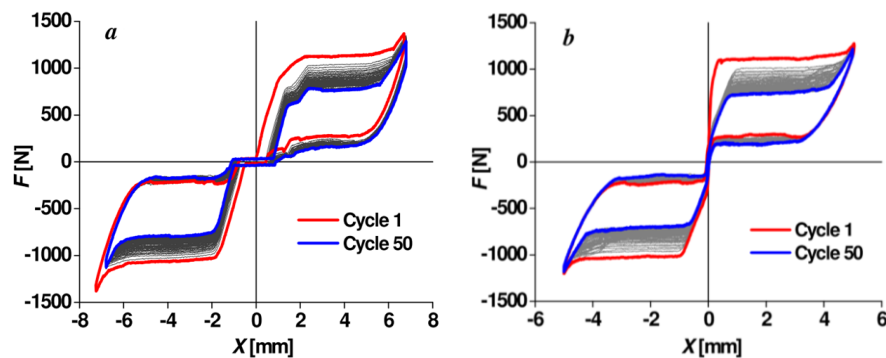


Рисунок 1.17. Діаграми 50 циклів роботи приладів (100 циклів для дротин) із звичайним закріпленням (а) та 2% натягом (б) [82]

Таким чином, амплітуди переміщень становили 6,75 мм для звичайного закріплення та 5 мм для 2% попереднього натягу. Функціональні властивості цього СПФ стабілізуються після 100 циклів навантаження, під час яких зменшуються

напруження аустенітно-мартенситного перетворення, що призводить до зменшення площі петлі гістерезису та, відповідно, кількості розсіяваної енергії.

1.5. Аналіз механічної поведінки елементів конструкцій за динамічного навантаження

1.5.1. Типи динамічних навантажень

Динамічні навантаження в цивільній інженерії є важливим аспектом, що потребує ретельного аналізу та врахування під час проєктування та будівництва інфраструктури. На відміну від статичних навантажень, які залишаються постійними, динамічні навантаження змінюються з часом і можуть суттєво впливати на стабільність та безпеку будівель і споруд. До таких навантажень належать вітер, землетруси, трафік та інші транзиторні сили, які викликають змінні напруження в конструкціях. Відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 [83], при проєктуванні враховують навантаження, що виникають під час зведення та експлуатації споруд чи будівельних конструкцій. Навантаження та впливи поділяють за походженням на основні та епізодичні, а за часовою залежністю - на постійні та змінні (тривалі, короткочасні, епізодичні).

Вітрові навантаження – це сили, що діють на конструкцію під впливом потоку вітру. Вони змінюються залежно від швидкості вітру, його напрямку та площі поверхні конструкції. Вітрові навантаження можуть бути постійними (стабільними) або змінними (поривчастими). За класифікацією державних будівельних норм [83], до змінних короткочасних навантажень, зокрема, належать вітрові навантаження з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями. Розрахунки будівельних конструкцій із врахуванням вітрового навантаження виконуються згідно карти районування значень вітрового тиску (Рисунок 1.18).

Сейсмічні навантаження виникають під час землетрусів через рух земної поверхні, викликаний поширенням сейсмічних хвиль від епіцентру землетрусу. Важливим аспектом у визначенні сейсмічних навантажень є рух ґрунту, який безпосередньо впливає на динамічну відповідь та стабільність будівель і споруд.

Взаємодія ґрунту та споруди під час землетрусу є критичним фактором, оскільки ґрунт і конструкція взаємно впливають одне на одного, що може призвести до складних динамічних ефектів [84].

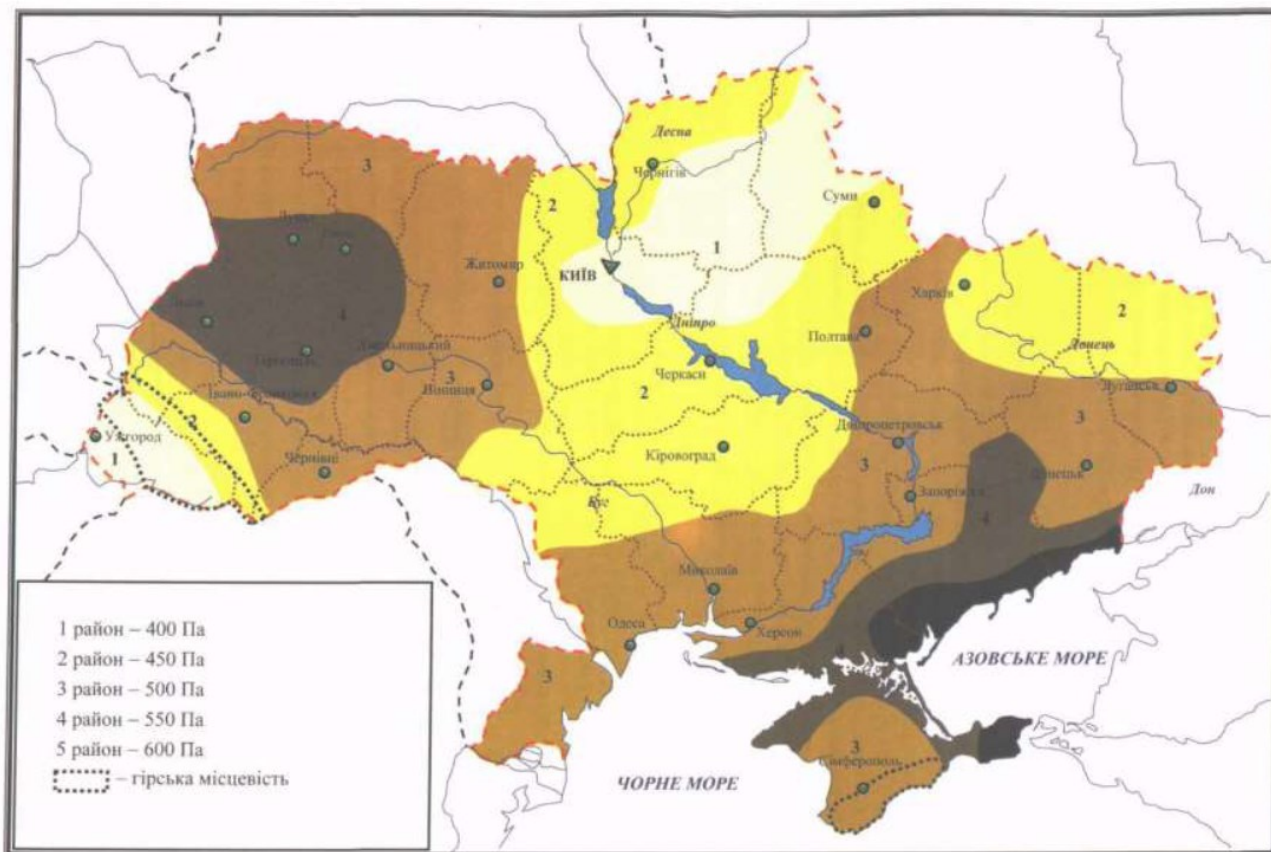


Рисунок 1.18. Карта районування території України за характеристичними значеннями вітрового тиск

Для визначення нормативної інтенсивності сейсмічних впливів рекомендується використовувати перелік населених пунктів України та набір карт загального сейсмічного районування території країни відповідно до ДБН В1.1-12:2014 [85]. Комплект карт ЗСР-2004 включає карти А, В і С для всієї території України у масштабі 1:2 500 000, а також детальні карти для територій АР Крим та Одеської області у масштабі 1:1 000 000. Ці карти визначають сейсмічну інтенсивність для ділянок із середніми за сейсмічними властивостями ґрунтами і застосовуються при проектуванні будівель різних класів наслідків (відповідальності) залежно від висоти та призначення споруд.

Ударні навантаження, такі як зіткнення транспортних засобів або удари від великих машин, мають миттєвий і високий рівень амплітуди, що може призвести до раптових пошкоджень та деформацій конструкції. Ці навантаження можуть спричинити значні пошкодження окремих елементів конструкції або навіть повний обвал, якщо навантаження перевищує міцність матеріалів (Рисунок 1.19).

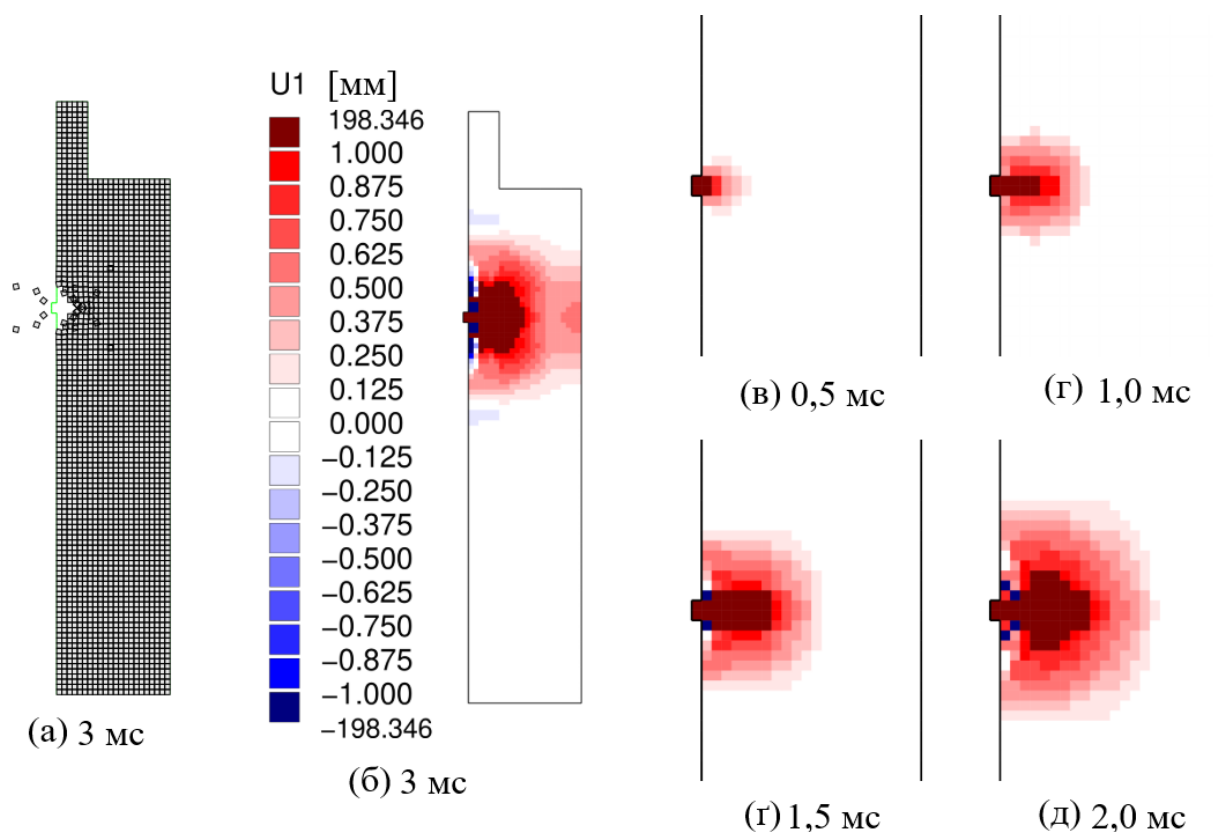


Рисунок 1.19. Деформована ділянка (а) і форми зміщень в горизонтальному напрямку (б), та збільшене місце удару в різні моменти часу (в), (г), (г), (д) [86]

Запобіжні заходи включають використання буферних зон та амортизуючих матеріалів для поглинання ударної енергії, а також підвищення міцності критичних елементів конструкції. Розрахунки конструкцій на ударні навантаження включають моделювання поведінки матеріалів під впливом високошвидкісних навантажень та аналіз міцності з використанням методів кінцевих елементів [86].

Вибухові навантаження створюють інтенсивні ударні хвилі, що поширюються від джерела вибуху та можуть призвести до значних пошкоджень конструкції у локалізованій зоні. Ці навантаження відрізняються від інших

динамічних навантажень своєю миттєвістю і високою амплітудою. Запобіжні заходи включають посилення конструкцій, використання вибухостійких матеріалів та дотримання безпечної відстані від можливих джерел вибуху. Розрахунки на вибухові навантаження передбачають використання числових методів для моделювання поведінки конструкцій під впливом високошвидкісних ударних хвиль та аналіз руйнувань з урахуванням динамічних властивостей матеріалів [87].

Вібраційні навантаження в цивільній інженерії – це динамічні сили, що діють на конструкції через коливальні або циклічні рухи. Вони можуть викликати втому матеріалів і потенційний структурний резонанс, що призводить до поступового руйнування конструкцій і зниження їхньої міцності. Запобіжні заходи включають застосування демпферів, які знижують амплітуду коливань, та проектування конструкцій з урахуванням власних частот, щоб уникнути резонансних явищ. Розрахунки на вібраційні навантаження виконуються за допомогою методів спектрального аналізу та аналізу модальних форм, що дозволяє визначити власні частоти конструкцій і оцінити їхню реакцію на динамічні навантаження [88].

Основна ідея динамічного розрахунку споруди полягає у визначенні параметрів її напружено-деформованого стану (очікуваних амплітуд переміщень, внутрішніх зусиль та напружень) при коливаннях під дією динамічного навантаження та порівняння їх з допустимими значеннями. Допустимі значення амплітуд внутрішніх зусиль обумовлені вимогами міцності та довговічності будівельних конструкцій, а значення амплітуд, швидкостей і прискорень коливань будівель і споруд, в яких знаходяться люди або встановлене чутливе до вібрацій технологічне обладнання, – вимогами виключення шкідливого впливу коливань будівлі на здоров'я людей (встановлюються санітарними нормами) і на нормальну роботу віброчутливого обладнання (згідно з його паспортними даними).

Для попередньої оцінки сейсмічних навантажень і розрахункових динамічних моделей системи «основа – фундамент – надземна частина будівлі (споруди)» допускається приймати наступні експериментальні залежності періодів власних коливань за першою формою T_1 від висоти залізобетонних каркасних і безкаркасних будівель H :

- Каркасні: $T_1 = 0,055 \cdot H^{0,77}$;
- З монолітними стінами: $T_1 = 0,013 \cdot H$;
- Великопанельні: $T_1 = 0,033 \cdot H^{0,81}$.

Додатково створюється динамічна паспортизація, що включає наступні види робіт:

- Визначення реакції будівель на спеціальні динамічні впливи в частотному діапазоні хвиль від 0,3 Гц до 30 Гц;
- Визначення частот, форм власних коливань будівель і декрементів коливань та їх порівняння із проектними даними.

Дані розрахунки виконуються відповідно до чинних будівельних норм України [85].

1.5.2. Застосування МСЕ для аналізу напружено-деформованих станів елементів конструкцій

Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із найбільш ефективних інструментів для аналізу та моделювання механічної поведінки будівельних конструкцій під дією динамічного навантаження. У цьому підрозділі розглядаються основні аспекти застосування МСЕ, а також результати досліджень, що використовують цей метод для аналізу поведінки будівельних конструкцій під дією динамічних впливів.

Використання МСЕ для аналізу механічної поведінки будівельних конструкцій під дією динамічних навантажень дозволяє враховувати різні аспекти взаємодії матеріалів та конструкційних елементів, що є критично важливим для точного прогнозування їхньої поведінки в реальних умовах експлуатації. Наприклад, у дослідженні [89] було проведено чисельний аналіз механічної поведінки сталобетонних композитних балок, укріплених вуглецевими волокнами (CFRP). Модель включала різні типи елементів для симуляції бетонної плити, сталеві балки та армування, що дозволило отримати точні результати про напружено-деформований стан елементів під дією навантаження. Цей підхід забезпечив деталізоване моделювання розподілу напружень і деформацій у

кожному з компонентів композитних балок (Рисунок 1.20) , що дозволило краще зрозуміти їхню поведінку під час експлуатації та вдосконалити методи проектування і підсилення конструкцій. Додатково, використання CFRP сприяло підвищенню міцності та жорсткості балок, що є важливим фактором для забезпечення довговічності та безпеки будівельних конструкцій у зонах з високою сейсмічною активністю.

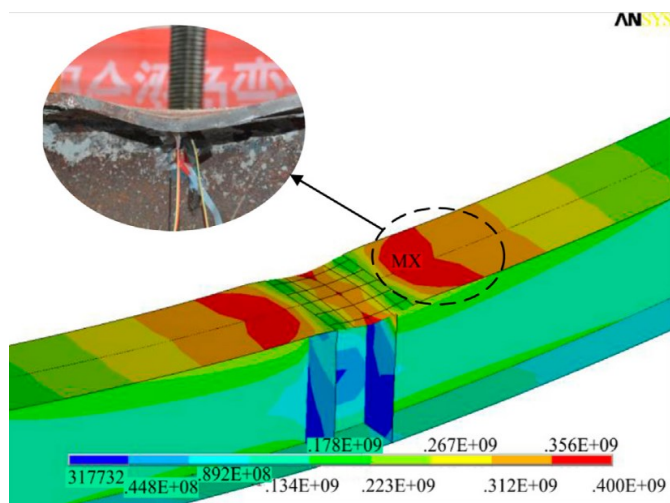
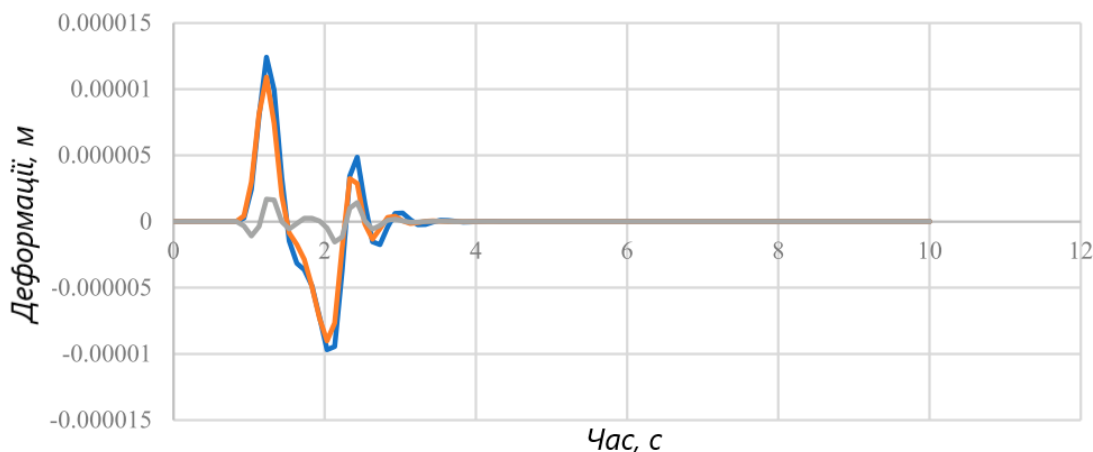


Рисунок 1.20. Еквівалентний розподіл напружень при границі текучості нижньої фланцевої пластини (одиниця виміру: Па) [89]

Іншим прикладом є дослідження [90] , у якому поєднано метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) з методом граничних елементів (Boundary Element Method, BEM) для моделювання взаємодії ґрунту і споруди під дією динамічного навантаження. Цей підхід дозволив покращити точність моделювання та ефективність обчислень, що є важливим для великих інженерних проектів. Дослідження показало, що збільшення відстані між конструкціями впливає на поведінку не навантаженої конструкції під час динамічного навантаження, незалежно від типу ґрунту, тоді як вплив на навантажену конструкцію є менш значним (Рисунок 1.21). Методологія показала свою високу ефективність, забезпечуючи точні результати при значному зменшенні обчислювального навантаження, що підтверджено скороченим часом досягнення конвергенції порівняно з МСЕ.



— Відстань між конструкціями 0,5 м — Відстань між конструкціями 1,0 м
— Відстань між конструкціями 2,0 м

Рисунок 1.21. Порівняльна оцінка деформаційних моделей у часі при різних відстанях між конструкціями другої будівлі, з акцентом на вплив м'яких ґрунтових умов

Дослідження [39] також зосереджено на використанні сплавів з ефектом пам'яті форми (SMA) для розробки вбудованих демпферів у сімейних будинках. Модель, створена в середовищі ANSYS, дозволила детально проаналізувати термомеханічну поведінку цих демпферів, з урахуванням всіх основних фізичних параметрів, що впливають на їх ефективність. Результати моделювання показують, що демпфери СПФ здатні зменшити максимальну амплітуду коливань, викликаних прискореннями "Ель Центро", вдвічі і що вони розсіюють 50% енергії, переданої конструкції. Це означає значне зниження ризику структурних пошкоджень під час сейсмічних подій. Крім того, демпфери СПФ є пасивним, неконтрольованим рішенням для демпфування, що підходить для сімейних будинків, забезпечуючи їх надійність і безпеку без необхідності в надмірному обслуговуванні чи контролі. Використання таких демпферів є економічно вигідним, оскільки вони не потребують додаткових систем управління, зменшуючи загальні витрати на експлуатацію будівель. Це дослідження демонструє потенціал СПФ технологій для широкого застосування у цивільному будівництві, особливо у регіонах з підвищеною сейсмічною активністю, де зниження амплітуди коливань і

розсіювання енергії мають вирішальне значення для збереження цілісності та стійкості конструкцій.

Ще одним важливим аспектом застосування МСЕ – для аналізу конструкцій під дією динамічного навантаження, що дозволяє детально дослідити процеси руйнування та деформації матеріалів. Наприклад, у дослідженні [91] було проведено експериментальне та аналітичне дослідження безперервних залізобетонних балок, укріплених дротинами зі сплаву з ефектом пам'яті форми, під дією циклічного навантаження. Результати показали, що дротини СПФ демонструють задовільну псевдопружність і здатність відновлювати тріщини згину та прогини середньої частини балки.

У дослідженні [92] проведено аналіз вибухових випробувань та чисельне моделювання поведінки будівельних конструкцій під дією вибухових навантажень (Рисунок 1.22) з використанням методу скінченних елементів, що базуються на використанні програмного забезпечення ANSYS/LS-DYNA.

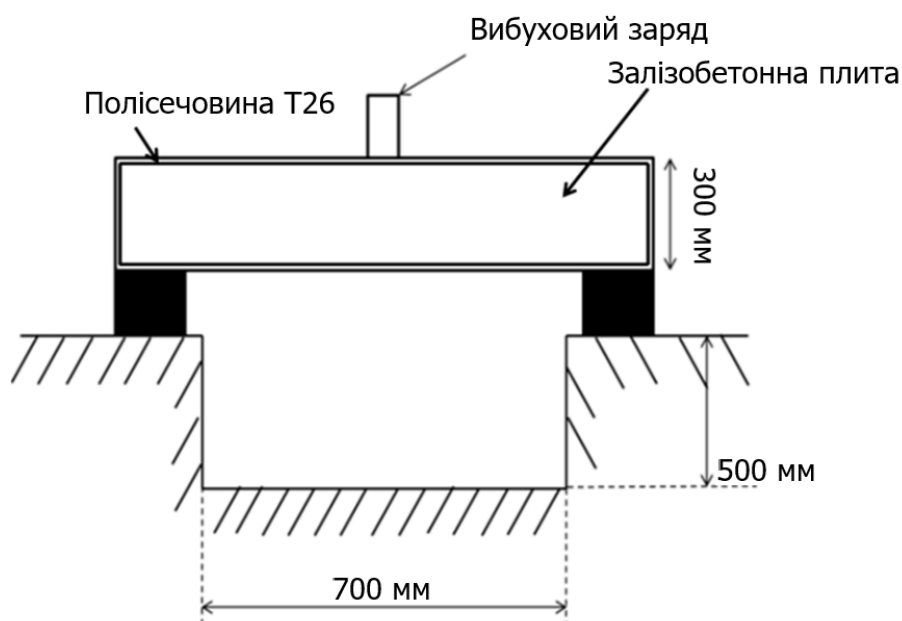


Рисунок 1.22. План-схема установки для експерименту з вибухом [92]

Результати дослідження показали, що застосування демпферів з метою зниження амплітуди коливань є ефективним підходом для підвищення стійкості та безпеки конструкцій під час вибухів. Вибухові випробування проводились із застосуванням спеціальних демпферів, призначених для гасіння ударних хвиль, і

показали, що моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) дозволяє точно передбачити їхню поведінку. Порівняння натурних експериментів із чисельним моделюванням підтвердило високу точність МСЕ, що дозволяє ефективно проектувати та вдосконалювати конструкції для забезпечення їхньої безпеки під час вибухових впливів.

Таким чином, застосування методу скінченних елементів для аналізу механічної поведінки будівельних конструкцій під дією динамічного навантаження забезпечує глибоке розуміння процесів руйнування та деформації матеріалів, ефективність різних засобів гасіння коливань і допомагає розробляти більш надійні та безпечні конструкції.

1.6. Висновок до розділу 1

У розділі детально розглянуто та проаналізовано кристалічну будову сплавів із пам'яттю форми, їхні унікальні властивості та можливості застосування у будівельних конструкціях. Основними аспектами були фазові перетворення, механічні властивості, асиметрія напружень та доцільність використання СПФ у будівництві за дії динамічних навантажень.

Властивості СПФ під впливом механічних навантажень відповідають за ефект псевдопружності, який проявляється у здатності матеріалу відновлювати форму після зняття навантаження. Процес переорієнтації мартенситу під навантаженням є ключовим для забезпечення псевдопружної поведінки матеріалу.

Дослідження показали, що коефіцієнт асиметрії впливає на функціональні та втомні характеристики СПФ. Значення близькі до -1, призводять до значного накопичення деформацій і швидкого руйнування матеріалу через постійні зміни напрямку напруження. В діапазоні значення від 0 до 1 СПФ демонструють кращі втомні властивості ніж за від'ємних значень коефіцієнта асиметрії, що пов'язано з більш рівномірним розподілом деформацій, зменшенням розвитку мікротріщин та зниженням внутрішнього нагріву матеріалу. Проте більшість досліджень проведені в жорсткому режимі за контрольованої деформації, а за контрольованого навантаження досліджені не достатньо.

Використання СПФ у будівельних конструкціях, особливо в зонах з високою сейсмічною активністю, є перспективним завдяки їх здатності ефективно поглинати і розсіювати енергію. Це може значно зменшити амплітуду коливань під час землетрусів та інших динамічних впливів. Чисельні дослідження з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) показали високу ефективність і точність моделювання поведінки будівельних конструкцій під дією динамічних навантажень.

Тому було сформовано мету даної дисертаційної роботи, що полягає у розробленні методів підвищення деформівності конструкційних елементів за циклічного навантаження шляхом використання сплавів з пам'яттю форми.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Встановити температури фазових перетворень і визначити механічні властивості сплавів з пам'яттю форми, зокрема модулі пружності та напруження фазових перетворень, які залежать від температури та швидкості деформації.

2. Дослідити та виявити закономірності впливу асиметрії циклічного навантаження на функціональні властивості та механічну втому псевдопружного NiTi сплаву.

3. Із використанням фрактографічного аналізу виявити закономірності деформування та руйнування СПФ із врахуванням асиметрії циклу навантаження.

4. Провести експериментальні дослідження та виконати моделювання поведінки залізобетонних балок з використанням СПФ-елементів під дією циклічних навантажень. Забезпечити з'єднання гладких стержнів із псевдопружного NiTi сплаву з арматурою.

5. Дослідити та порівняти поведінку ЗББ та ЗББ-СПФ за дії циклічного навантаження з метою визначення їх деформівності.

6. Створити скінчено-елементну модель для більш детального аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної балки з використанням СПФ.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПФ

2.1. Визначення фізико-механічних властивостей

Визначення механічних властивостей сплаву із пам'яттю форми проводили за допомогою сервогідравлічної машини STM-100 (Рисунок 2.1), виготовленої на державному підприємстві «АНТОНОВ». Випробувальна машина має можливість до автоматизованого управління, реалізоване використанням персонального комп'ютера. Вони поєднанні між собою за допомогою контролера моделі В1-07-005 від виробника TESTRESOURCES ASIA BiSS (Рисунок 2.1). Випробувальна система надає можливість для відтворення одновимірного навантаження розтягу/стиску, з можливістю супроводу процесу додатковим циклічним навантаженням.



Рисунок 2.1. Фото дослідницького комплексу із сервогідравлічної машини STM-100, контролер В1-07-005 та стаціонарний комп'ютер (з права на ліво)

Завдяки програмному забезпеченню MTL32 Base Module, із персонального комп'ютера можна керувати машиною STM-100 та налаштовувати такі робочі

параметри: аварійні межі каналів, коефіцієнти регулювання (апаратні та програмні) тощо. Випробування проводяться за допомогою програмного модуля TestBuilder.

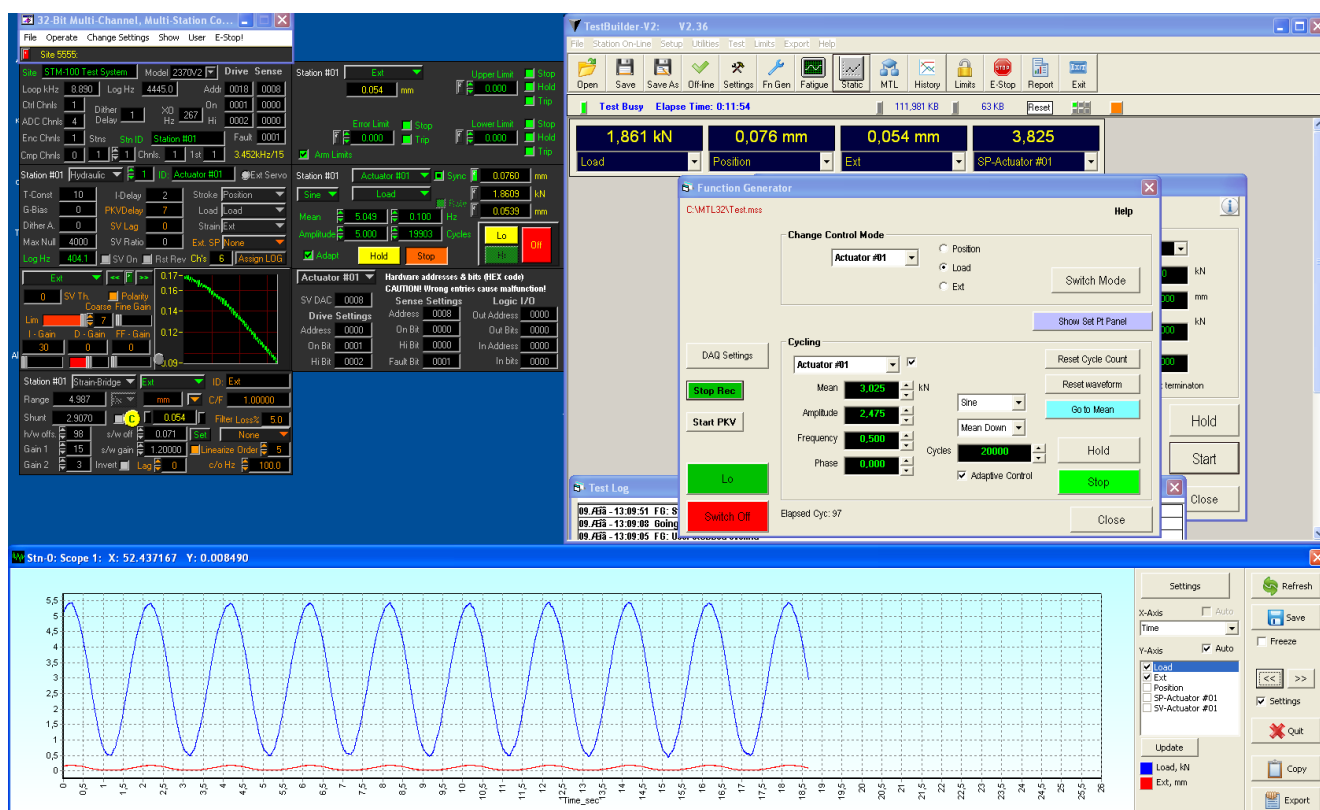


Рисунок 2.2. Знімок екрану із робочим простором програмного забезпечення MTL32 Base Module та TestBuilder (зліва на право)

Використовуючи даний пакет програм, можна контролювати такі функції:

- введення та контроль параметрів та налаштувань керуючого каналу;
- паралельне налаштування чотирьох незалежних вимірювальних каналів;
- виконання заданих параметрів для керуючого та вимірювальних каналів;
- запис даних із обраних керуючих і контрольованих параметрів випробування наживо з можливістю виведення їх на монітор комп'ютера або збереження їх у форматах електронних таблиць (наприклад .xls);
- контроль виконання випробувань та аварійних меж каналів;
- можливість редагування параметрів каналів у процесі випробувань;

— можливість зупинки процесу та відтворення його з останнього моменту або з виходом на попередньо заданий рівень навантаження;

Похибка передачі значень зусилля, переміщення штока, повздовжньої чи поперечної деформації не перевищує 1% максимального значення виставленого масштабного діапазону.

Для дослідження механічних властивостей нітинолу $Ni_{55.75} Ti_{44.15}$, із СПФ-стержня діаметром 8 мм виготовлено циліндричні зразки довжиною 46 мм (Рисунок 2.3). Довжина робочої ділянки становить 12,5 мм, діаметр – 4 мм. Робоча поверхня зразка відполірована до шорсткості з базовою довжиною 0,25 мм. По обох кінцях зразка нарізано різьбу М8, довжиною 14,5 мм.

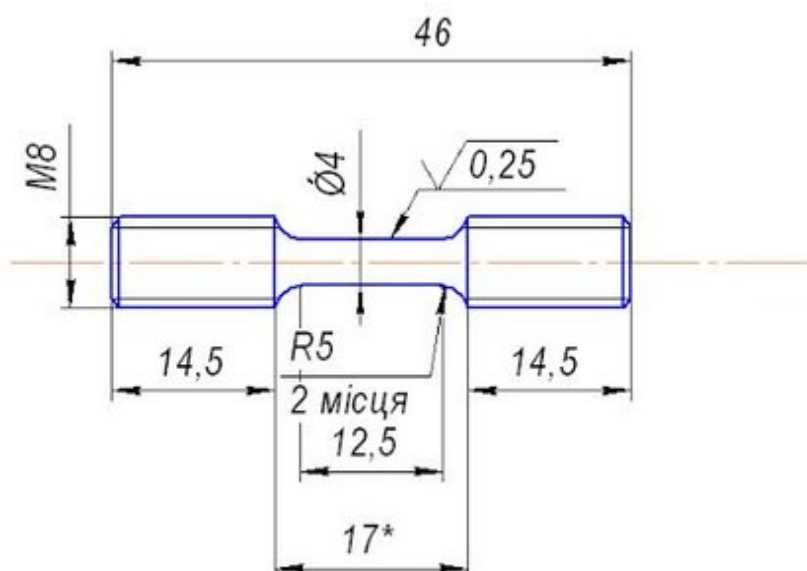


Рисунок 2.3. Схема розмірів досліджуваних циліндричних зразків

Визначення механічних властивостей нікель-титанового сплаву виконувалось за одновісного розтягу відповідно до стандарту ASTM F2516-14 [93]. Даний стандарт описує методику, описана в роботі [94] при якій матеріал розтягують до 6% деформації, потім розвантажують до менш ніж 7 МПа і розтягують аж до руйнування. Згідно стандарту, процедура виконання була наступна:

- 1) Температура під час дослідження становила 18,8-22°C, що перевищує температуру аустенітного перетворення $A_f = 14,7^\circ\text{C}$ на 4,1-7,3°C. Це

забезпечило уникнути часткових фазових перетворень матеріалу впродовж випробування;

- 2) Максимальні допустимі швидкості переміщення штока випробувальної машини, для циліндричного зразка з діаметром робочої ділянки $d = 4$ мм, становили: $v_1 = 0,00208$ мм/с – швидкість першого циклу навантаження до 6% деформації; $v_2 = 0,0208$ мм/с – швидкість другого циклу навантаження до повного руйнування зразка, відповідно до стандарту (Таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Швидкості переміщення штока [93]

Діаметр d , мм	Максимальна допустима швидкість переміщення штока випробувальної машини	
	Перший цикл (навантаження до 6% розтягу і розвантаження)	Другий цикл (навантаження до руйнування)
$d \leq 0,2$	0,08	0,8
$0,2 < d \leq 0,5$	0,04	0,4
$0,5 < d \leq 2,5$	0,02	0,2
$d > 2,5$	0,01	0,1

Визначення температурних властивостей сплаву з пам'яттю форми виконано методом диференціальної сканувальної калориметрії (DSC). Дослідження відбувалось з використанням високоточного калориметра NETZSCH DSC 214 Polyma. Вхідні параметри включають: широкий температурним діапазоном від -150°C до 600°C; максимальну чутливість теплового потоку 0.1 мкВат; точність задання температури та визначення теплоємності 0.1°C та 0.1 мкДж/К відповідно.

Під час експериментів з використанням NETZSCH DSC 214 Polyma можна отримати наступні графіки: теплового потоку чи теплоємності від часу або температури. Ці дані дозволяють визначити теплові події, такі як фазові переходи, кристалізація, плавлення тощо.

Метод нагрівання використовує електричний опір, що вбудований у нагрівальну платформу. Швидкості нагрівання можуть бути налаштовані від 0.01 К/хв до 50 К/хв, що забезпечує широкий діапазон температурних змін у протязі експерименту.

Фазові перетворювання в СПФ досліджували на циліндричних зразках. Циліндричні зразки вагою, приблизно, 85 мг та діаметром 4 мм, вирізані зі стрижнів діаметром 8 мм, поміщали на пластину тигля стандарту Al. Швидкість потоку газу становила 35 мл/хв. Зразок нагрівали і охолоджували від -70 до 70 °С в атмосфері N₂ (азоту) зі швидкістю 10, 5, 2,5, 1,5 °С/хв. Для підвищення надійності результатів кожен цикл нагрівання та охолодження повторювали чотири рази.

2.2. Визначення конструкційних та функціональних властивостей

Сплави з пам'яттю форми, зокрема псевдопружні сплави, широко застосовуються у різних галузях техніки завдяки їх здатності змінювати форму у відповідь на зміни температури або механічного навантаження. Однак для забезпечення необхідних параметрів демпфуючих пристроїв необхідно проводити комплексні експериментальні та розрахункові дослідження змін механічних і функціональних властивостей СПФ та демпфуючих пристроїв під впливом циклічних навантажень із змінною частотою

Для дослідження функціональних властивостей сплавів пам'яті форми під впливом циклічних навантажень була адаптована експериментальна методика випробувань дротів зі сплаву нітинолу (NiTi) у м'якому режимі навантаження [55].

У цьому дослідженні використано циліндричні зразки нікель-титанового сплаву (див. Рисунок 2.3), що виготовлені із стержня діаметром 8 мм. Експериментальні випробування проводились на універсальній випробувальній машині СТМ-100 при кімнатній температурі, що вища за температуру завершення мартенситно-аустенітного перетворення $A_f = 14$ °С. Під час тестування вимірювали переміщення та поздовжні деформації циліндричних зразків за допомогою екстензометра моделі Ві-06-308 та індуктивного датчика Ві-02-313, що мали похибку не більше 0,1%. Для кожного випробування проводили тарування

екстензометра та виставлення бази. Також виконували заміри діаметрів робочої ділянки зразка тричі, щонайменше. Замірялась температура повітря у лабораторії, виставлялись параметри зусиль, відповідно до запланованих максимальних напружень та середнього значення робочого діаметру.

Під час експерименту, Test Builder виконував запис значень зусилля F , позиції штока S та видовження з екстензометра Δ . Відповідно до отриманих даних було вираховано напруження σ , відносні деформації ε , дисиповану енергію W_{dis} та коефіцієнт демпфування η за формулами (2.1), (2.2), (2.3) та (2.4):

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{l_0} \quad (2.2)$$

$$W_{dis\ i} = W_{dis\ i-1} + \frac{1}{2}(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})(\sigma_i + \sigma_{i-1}) \quad (2.3)$$

$$\eta = W_{dis}/(\pi(2W_{elast} - W_{dis})) \quad (2.4)$$

де F – зусилля, Н; d – діаметр зразка у робочій зоні, мм; l_0 – база екстензометра, мм; $W_{dis\ i}$, $W_{dis\ i-1}$ – розсіяна енергія i -го та попереднього циклів, МДж/м³; ε_i , ε_{i-1} – відносна деформація i -го та попереднього циклів, мм/мм; σ_i , σ_{i-1} – напруження i -го та попереднього циклів, МПа; W_{elast} – пластична енергія циклу, МДж/м³.

Для дослідження опору втомного руйнування нітинолу Ni_{55.75} Ti_{44.15}, циліндричні зразки піддавалися циклічному навантаженню одновісного розтягу із частотою 0,5 Гц у м'якому режимі, з контрольованим зусиллям. Було проведено дві серії випробувань; у першому випадку коефіцієнт асиметрії циклу навантаження $R = 0,1$, у другому $R=0.5$ (Таблиця 2.2). Зразки поділені на групи з коефіцієнтами навантажень $R_\sigma = [0,1; 0,5]$, а також за максимальним напруженням $\sigma_{max} = [450-550]$ МПа. Перед початком експерименту, для кожного зразка визначали середнє значення діаметру робочої зони \bar{d} , виконавши заміри штангенциркулем у робочій зоні мінімум тричі. Таким чином визначено вихідне максимальне зусилля для

кожного із зразків. Досліди проводились при температурах, що перевищують температуру фазової трансформації в аустеніт $A_f = 14^\circ\text{C}$.

Таблиця 2.2. Вихідні експериментальні дані

№ зразка	Частота, Гц	R_σ	σ_{\max} , МПа	\bar{d} , мм	F_{\max} , кН
3	0,5	0,1	550	3,89	6,55
6			450	3,95	5,51
9			550	3,84	6,37
4		0,5	500	3,96	6,16
7			550	3,95	6,74
8			450	3,95	5,51

2.3. Методологія моделювання механічної поведінки і демпфувальних властивостей СПФ

Для моделювання механічних та демпфувальних властивостей методом скінчених елементів було використано програмне забезпечення ANSYS 2024 R1. Цей комплекс надає можливість виконувати широкий спектр аналізів, включаючи міцнісні, теплові, гідродинамічні та електромагнітні розрахунки. ANSYS 2024 R1 також підтримує міждисциплінарні дослідження, поєднуючи різні галузі аналізу для комплексної оптимізації конструкцій, що дозволяє ефективно удосконалювати інженерні системи.

Першим етапом роботи було відкриття робочої програми ANSYS Workbench 2024 R1 і створення нового проєкту. У новий проєкт додано модуль Engineering Data. У даному модулі створено матеріал – нітинол (Рисунок 2.4). Для задання основних фізико-механічних властивостей, із вікна Toolbox вкладки фізичних властивостей (Physical Properties) додано густину (Density) для врахування власної ваги. Із вкладки лінійної пружності (Linear Elasticity) додано ізотропну поведінку матеріалу (Isotropic Elasticity), для введення лінійних механічних властивостей: модуль пружності (Young's Modulus) аустенітної фази, коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio). Значення Bulk Modulus та Shear Modulus програмне середовище

ANSYS вираховує автоматично. Ці параметри прораховують та моделюють пружну поведінку матеріалу. Із вкладки Shape Memory Alloy додано псевдопружну властивість (Superelasticity) для введення значень напружень початку прямого перетворення (Sigma SAS), завершення прямого перетворення (Sigma FAS), початку (Sigma SSA) та завершення (Sigma FAS) зворотного перетворення, коефіцієнтів симетрії поведінки розтягу до стиску (Alpha) і відносне видовження, яке сплав здатен відновити (Epsilon). Завдяки цим параметрам вдасться відтворити демпфуючі властивості нітинолу. На відміну від попередньої давніших версій ANSYS [95], тепер можна додатково задавати модуль пружності для мартенситної фази сплаву (Es).

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table			
3	Density		kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young's M...			
6	Young's Modulus		Pa	<input type="checkbox"/>	
7	Poisson's Ratio				<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus		Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus		Pa		<input type="checkbox"/>
10	Superelasticity			<input type="checkbox"/>	
11	Sigma SAS		Pa	<input type="checkbox"/>	
12	Sigma FAS		Pa	<input type="checkbox"/>	
13	Sigma SSA		Pa	<input type="checkbox"/>	
14	Sigma FSA		Pa	<input type="checkbox"/>	
15	Epsilon		m m ⁻¹	<input type="checkbox"/>	
16	Alpha			<input type="checkbox"/>	
17	Es		Pa	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 2.4. Властивості СПФ у середовищі ANSYS

У наступному кроці було створено тривимірний об'єкт в модулі Geometry у формі циліндра з діаметром 4 мм та довжиною 10 мм. Дані розміри – це робоча ділянки циліндричних СПФ-зразків. Даний об'єкт було поділено на скінченні елементи в модулі Mesh (Рисунок 2.5). Для оптимальної побудови сітки скінченних елементів, підбір розмірів елементів, їх якість та форми виконані програмою автоматично із обраним параметром Program Contron.

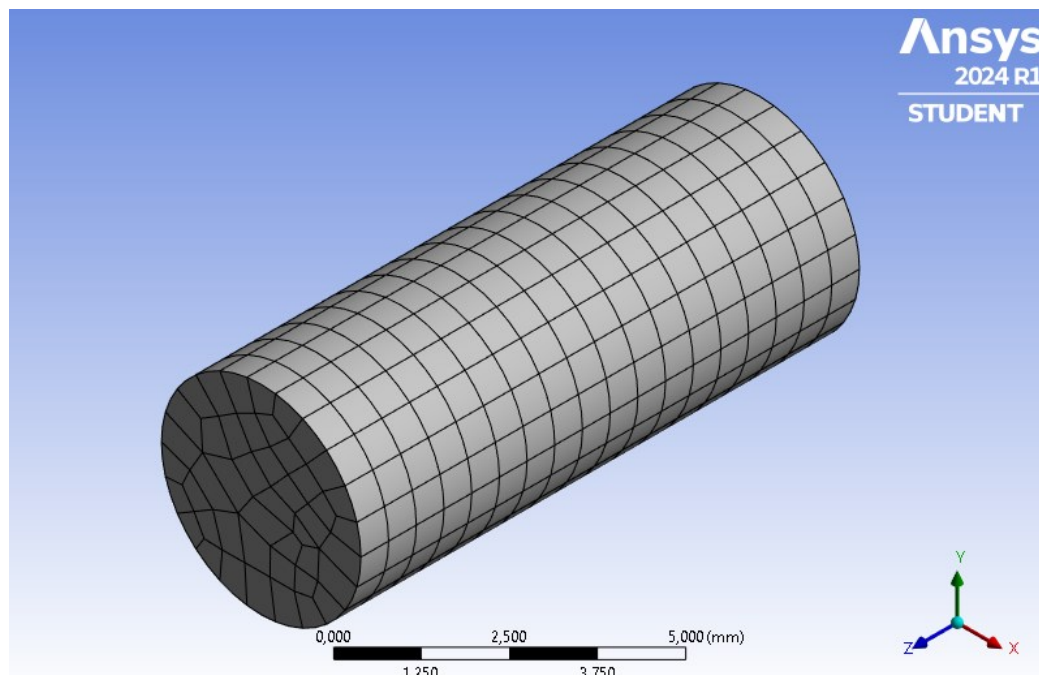


Рисунок 2.5. Модель циліндра поділеного на скінченні елементи

У модулі Static Structural створено розрахункову схему навантаження зразка (Рисунок 2.6). Задано граничні умови, закріпивши одну з граней зразка типом Fixed Support (Рисунок 2.6). Це означає, що ця грань не має жодного ступеня свободи і повністю зафіксована, що дозволяє запобігти будь-якому переміщенню чи обертанню. Таке закріплення забезпечує стабільність об'єкту під час моделювання і дозволяє точно визначити реакції матеріалу на прикладені навантаження.

До протилежної грані зразка було прикладено переміщення Displacement у напрямку осі Z (Рисунок 2.6). Це переміщення задає контрольовану зміну положення грані, дозволяючи змодельовати деформаційні процеси в матеріалі.

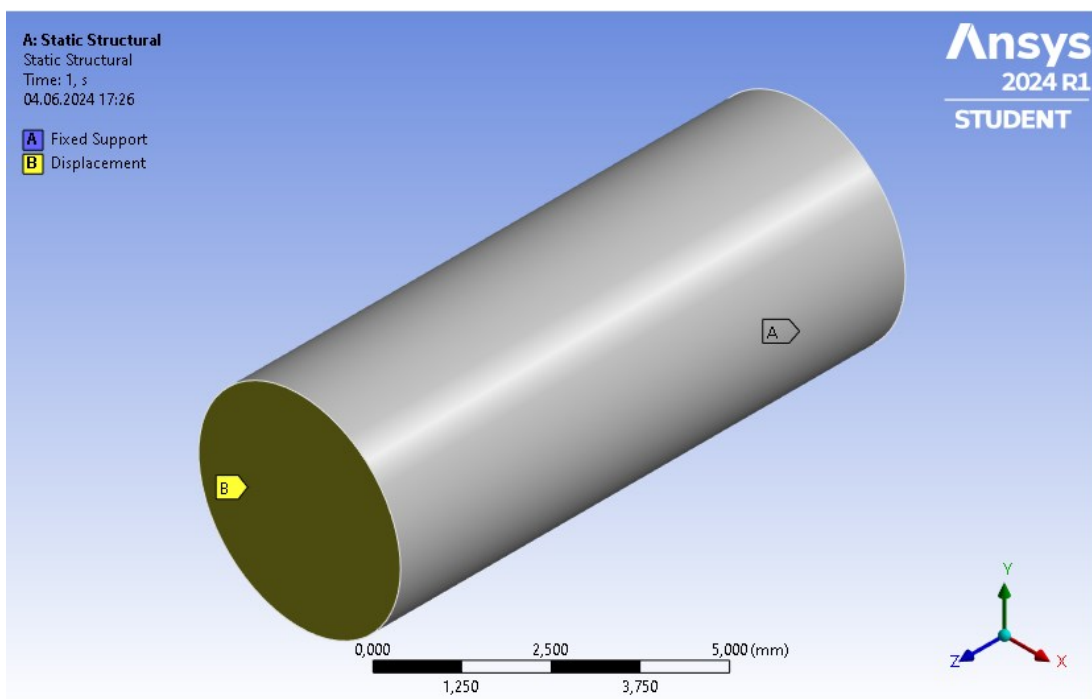


Рисунок 2.6. Розрахункова схема для СПФ-циліндра

Переміщення грані зразка було задано вздовж осі Z циклом навантаження-розвантаження з амплітудою, яка залежить від довжини зразка та відносного видовження, яке СПФ здатен відновити. Цикл навантаження-розвантаження дозволяє оцінити псевдопружні властивості СПФ і його здатність відновлюватися після деформації. Даної амплітуди навантаження достатньо для ініціювання і завершення фазових перетворень в матеріалі.

Для точного запису даних стан спокою зразка було закладено до першої секунди моделювання. Це дозволяє зразку досягти стабільного початкового стану перед початком циклу навантаження. Протягом наступної секунди зразок було навантажено до максимального значення по переміщенню грані. Це ініціює фазове перетворення в матеріалі, що дозволяє вивчити його механічні властивості під впливом навантаження. Розвантаження зразка також тривало одну секунду, що дозволяє оцінити здатність матеріалу до відновлення і його псевдопружної поведінки. Загальна тривалість циклу складає 3 секунди, що забезпечує достатній час для повного циклу навантаження-розвантаження і збору необхідних даних для аналізу.

2.4. Висновки до розділу 2

У розділі описані методики дослідження механічних і функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми, що є необхідними для подальших досліджень, аналізу та розробки інженерних застосувань з використанням сплавів з пам'яттю форми. Основними аспектами дослідження були визначення фізико-механічних властивостей, визначення температурних властивостей та конструкційних і функціональних властивостей СПФ.

описані методики дослідження механічних і функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми, що є необхідними для подальшого аналізу, створення експериментальних зразків та модельних зразків. Механічні властивості псевдопружного СПФ визначали згідно стандарту ASTM F2516-14 на сервогідравлічній машині СТМ-100. Температури фазових трансформацій визначено методом диференціальної сканувальної калориметрії з використанням калориметра NETZSCH DSC 214 Polyma.

Представлена експериментальним методика визначення механічної втоми та функціональних властивостей псевдопружних СПФ на універсальній випробувальній машині СТМ-100 при кімнатній температурі, з використанням екстензометра та індуктивного датчика для вимірювання деформацій та переміщення. Особлива увага приділялася дослідженню опору втомному руйнуванню нітинолу під впливом циклічних навантажень з різними коефіцієнтами асиметрії.

Представлена методика моделювання механічної поведінки і демпфувальних властивостей як і ЗББ так і ЗББ-СПФ у програмному комплексі ANSYS 2024 R1. Описані методики забезпечують високу точність і надійність експериментальних даних, що є основою для науково обґрунтованих висновків і рекомендацій.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРУЖНОГО NI-TI СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

3.1. Хімічний склад і фізико-механічні властивості сплаву

Для досліджень використано сплав пам'яті форми $Ni_{55.75}Ti_{44.15}$ (нітинол, 55.75% – масова частка нікелю, 44.15% – титану) у вигляді прутка діаметром 8 мм. Виготовлений сплав компанією Baoji Seabird Metal Material Co., LTD (Китай). Згідно наданого сертифікату компанії, хімічний склад нітинолу такий: Ni 55,75%; Co 0,005%; Cu 0,005%; Cr 0,005%; Fe 0,012%; Nb 0,005%; C 0,036%; H <0,001%; O 0,031%; Ti 44,15%. У сертифікаті зазначені наступні механічні характеристики: міцність за одновісного розтягу – 895 МПа, межа текучості – 320 МПа, відносне видовження 20%, температура завершення перетворення аустеніту $A_f = 15$ °C.

Результати аналізу диференціальної сканівної калориметрії за нагріву та охолодження подані на Рисунок 3.1а та Рисунок 3.1б, відповідно.

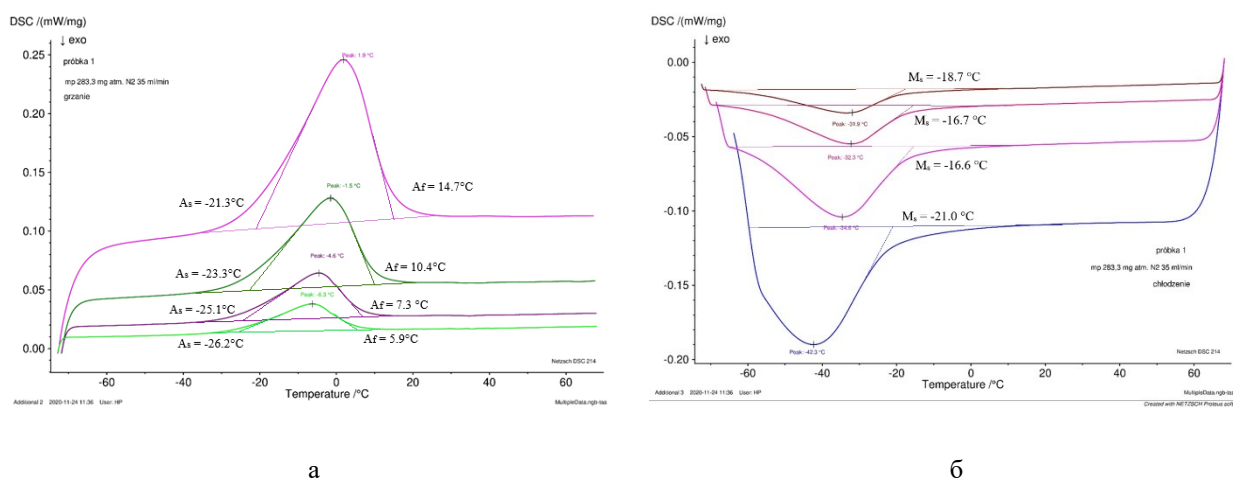


Рисунок 3.1. ДСК аналіз сплаву з пам'яттю форми за швидкості 10°C/min (1), 5°C/min (2), 2,5°C/min (3) 1,5°C/min (4) при нагріванні (а) та охолодженні (б)

Узагальнені результати температур фазових перетворень досліджуваного СПФ подано в Таблиця 3.1 (тут M_s , M_f , A_s , A_f – температури початку і завершення мартенситної та аустенітної фази, відповідно). Зазначимо, що температури фазових

перетворень в матеріалі прутка відрізняються між окремими циклами нагрівання (охолодження). Проте прослідковується певні закономірності їх зміни. Із збільшенням швидкості від нагріву зразка від 1,5°C/хв до 10°C/хв зростають температури початку і завершення аустенітної трансформації (A_s та A_f) та зменшується температура початку мартенситної фази M_s . Отримані закономірності узгоджуються із результатами інших авторів, зокрема для NiTiCu сплаву з пам'яттю форми [96, 97].

Таблиця 3.1. Температури фазових перетворень сплаву нітинол

Нагрівання/охолодження	M_s	M_f	A_s	A_f
	°C			
10°C/хв	-21,0	< -60	-21,3	14,7
5°C/хв	-16,6	< -60	-23,3	10,4
2,5°C/хв	-16,7	< -60	-25,1	7,3
1,5°C/хв	-18,7	< -60	-26,2	5,9
Усереднене значення	-18,3	< -60	-24	9,6

Із отриманих діаграм деформування СПФ (Рисунок 3.2, Рисунок 3.4) визначено такі основні механічні параметри (Таблиця 3.2): модулі пружності у фазі аустеніту (E_A) та мартенситу (E_M), напруження фазових перетворень (σ_s^{AM} , σ_f^{AM} , σ_s^{MA} , σ_f^{MA}) та відносне видовження фазового перетворення (ε_L).

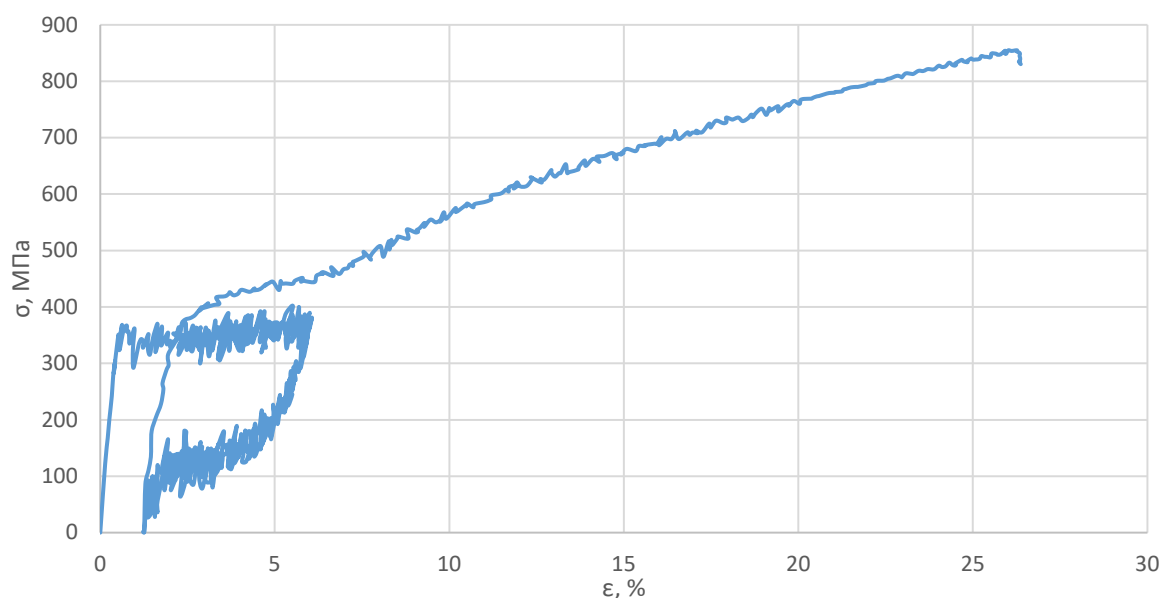


Рисунок 3.2. Діаграма деформування СПФ при температурі 19 °С та швидкості переміщення траверси 0,00208 мм/с

Враховуючи високу частоту запису даних (100 значень за секунду) та певний розкид значень на діаграмі деформування (Рисунок 3.2) було проведено апроксимацію даних при побудові петлі гістерезису. Такий розкид зумовлений повільною швидкістю навантаження зразка.

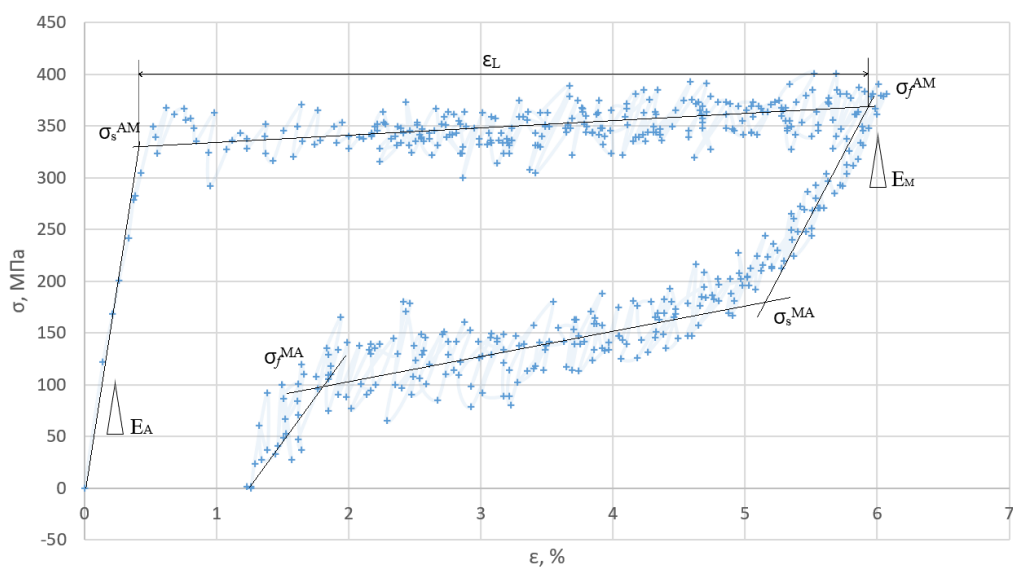


Рисунок 3.3. Апроксимація петлі гістерезису

На Рисунок 3.4 представлено діаграму деформування СПФ при температурі 22°C та швидкості переміщення траверси 0,0045 мм/с

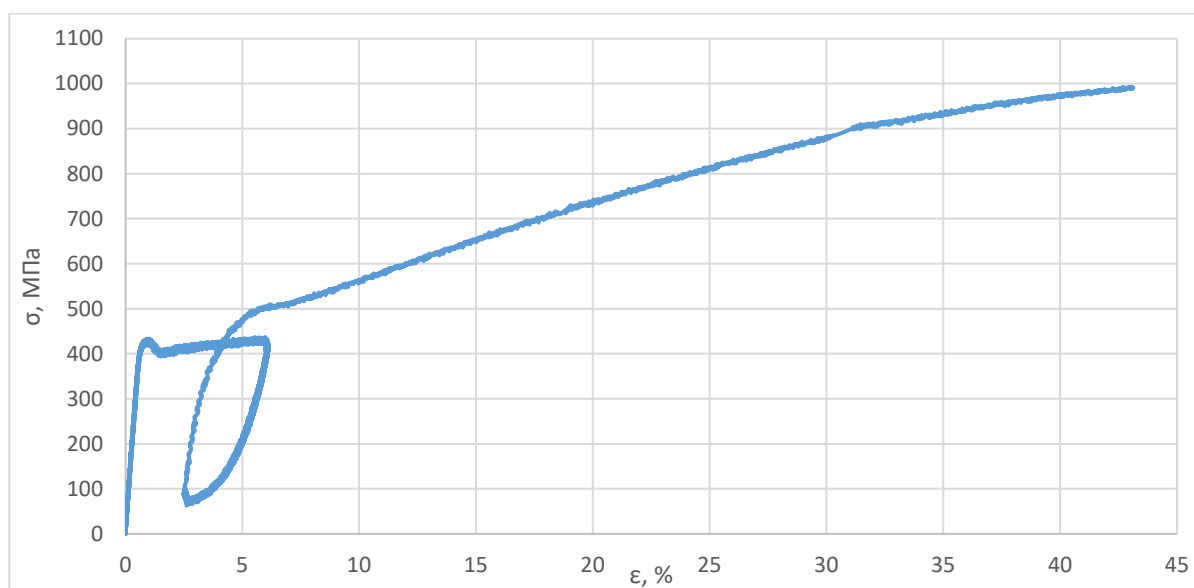


Рисунок 3.4. Діаграма деформування СПФ при температурі 22°C та швидкості переміщення траверси 0,0045 мм/с

У таблиці 3.2 подано узагальнені результати механічних властивостей матеріалу отримані за різних температур та швидкостей деформації.

Таблиця 3.2. Основні термомеханічні параметри СПФ

№ зразка	T, °C	v, мм/с	σ_s^{AM} , МПа	σ_f^{AM} , МПа	σ_s^{MA} , МПа	σ_f^{MA} , МПа	E_A , ГПа	E_M , ГПа	ε_L , %	ε_L , $10^{-3} c^{-1}$
1	18,8	0.00208	332	368	174	103	72,4	18,7	5,4	2,25
2	22	0,0045	408	428	-	-	68,2	19,2	5,5	34,4

Отримані характеристики СПФ із досліджень дещо відрізняються від зазначених у сертифікаті (Таблиця 3.3). Так межа текучості ($\sigma_{0.2}$) від зазначеної у сертифікаті більша на 3,75 % (зразок 1) та на 27,5% (зразок 2); межа міцності (σ_u) – менша на 4,58% та більша на 10,7%; максимальне відносне видовження (ε_{max}) –

більша на 6,3 % та 23,1% у зразках 1 та 2 відповідно. Це пояснюється впливом температури випробування та швидкістю навантаження [98].

Щоб зрозуміти чи вплинула швидкість навантаження на петлю характеристики сплаву, чи це вплив зовнішньої температури, використано формулу Клаузіуса-Клапейрона адаптовану до сплавів із пам'яттю форми [99] :

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\rho\Delta S}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

де σ – напруження; T – температура; ρ – густина сплаву; ΔS – зміна ентальпії, ε – відносне видовження фазового перетворення.

Таблиця 3.3. Порівняння наданих та отриманих характеристик СПФ

	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2},$ МПа	$\sigma_u,$ МПа	$\varepsilon_{\max}, \%$	$A_{f\max}, ^\circ\text{C}$	$d\sigma/dT,$ МПа/ $^\circ\text{C}$	$-\rho\Delta S/\varepsilon,$ МПа/ $^\circ\text{C}$
Сертифікат	–	320	895	20	15	–	–
Зразок 1	18,8	332	854	26,3	14,7	23,8	23,6
Зразок 2	22	408	991	43,1			

Визначені коефіцієнти Клаузіуса-Клапейрона (Таблиця 3.3) вказують на те, що відмінність напружень фазових перетворень у значній мірі зумовлена зміною температур, а не швидкості навантаження.

3.2. Вплив асиметрії циклу навантаження на функціональні властивості псевдопружного NiTi сплаву

Вплив асиметрії циклу навантаження на функціональні властивості псевдопружного Ni_{55.75}Ti_{44.15} сплаву (Таблиця 3.2 та Таблиця 3.3) досліджували за одновісного розтягу циліндричних зразків. Таким чином, експериментально встановлено залежності зміни залишкових деформацій, розмаху деформацій та дисипованої енергії від асиметрії циклу навантаження.

На Рисунок 3.5 представлено петлі гістерезису для відповідних зразків. Із наближенням втомного руйнування петлі зразків 3, 4, 8 та 9 змінювали свою форму на *I*-подібну. Після 50-100 циклів навантаження, за обох асиметрій, петлі зменшувались у площі. Тільки за максимального розмаху напружень при $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$ петлі гістерезису залишаються практично незмінними аж до зруйнування зразка.

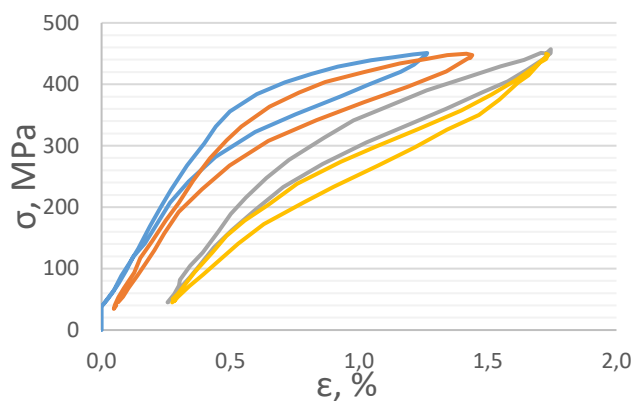
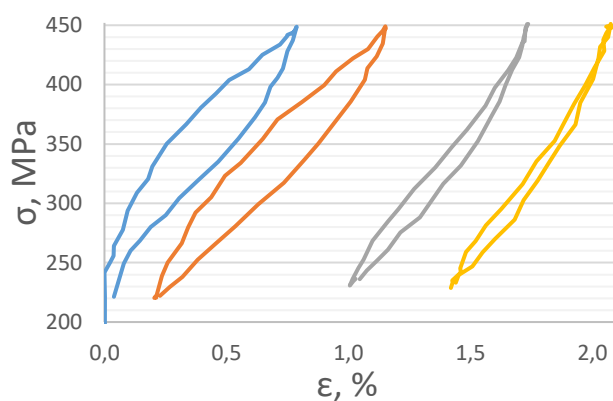
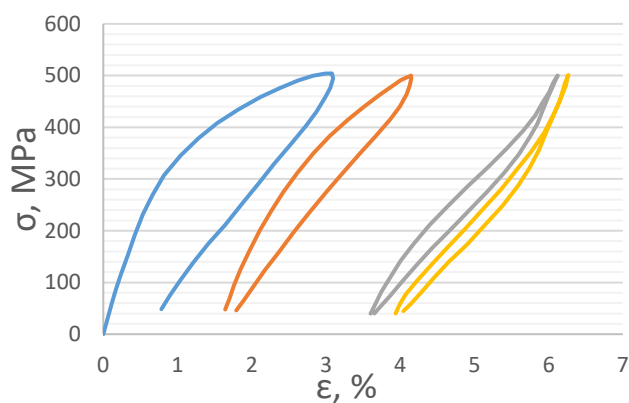
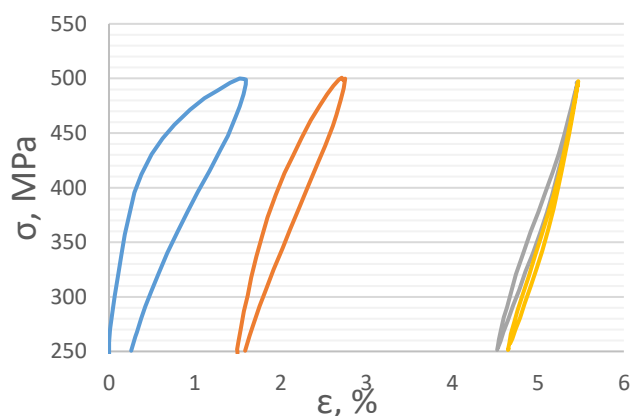
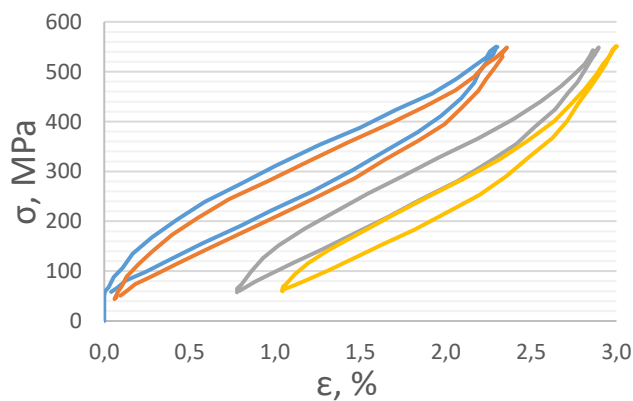
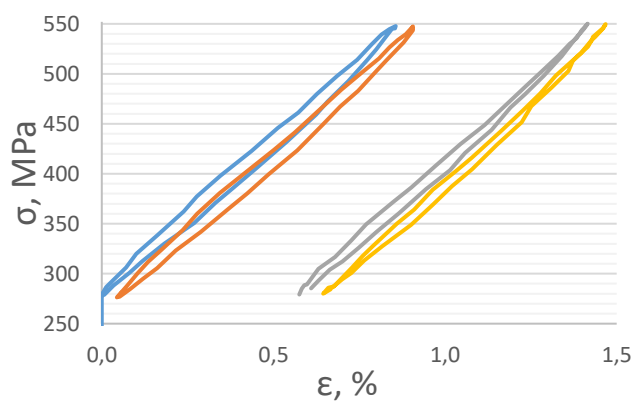
*a**б**в**г**г**д*

Рисунок 3.5 Петлі гістерезису циклів 1 (блакитний), 10 (помаранчевий), 100 (сірий) та 1000 (жовтий) для зразків 3 (*a*), 4 (*б*), 6(*в*), 8(*г*), 9(*г*), 7 (*д*)

Крива залишкової деформації ϵ_{res} на усіх зразках зростає спочатку інтенсивніше впродовж перших 100 циклів, тоді стабілізується і перед руйнуванням зростає, за винятком зразка 4. Для зразка три руйнування відбувається у платоподібній ділянці залишкової деформації.

При значенні максимальних напружень $\sigma_{\max} = 450$ МПа у циклі навантаження, збільшення асиметрії навантаження призводить до збільшення рівня ε_{res} у кожному циклі навантаження. Тоді як за вищого рівня $\sigma_{\max} = 550$ МПа характер зміни ε_{res} залишається практично незмінним після досягнення платоподібної ділянки.

Поведінка кривих розмаху відносних деформацій (Рисунок 3.6б) відрізняється у кожного зі зразків. Подібність спостерігається між зразками 4, 7 та 9 і між зразками 3, 6 та 8. У зразків 4, 7 та 9, значення розмаху відносних деформацій плавно зменшуються після 20-го циклу. Подібна плавність зменшення розмаху відносних деформацій спостерігається для зразка 3 після 100-го циклу навантаження. У зразків 3, 6 та 8, значення розмаху відносних деформацій плавно зростають до 100-го циклу, після чого, криві зразків 6 та 8 перебувають на відносному плато.

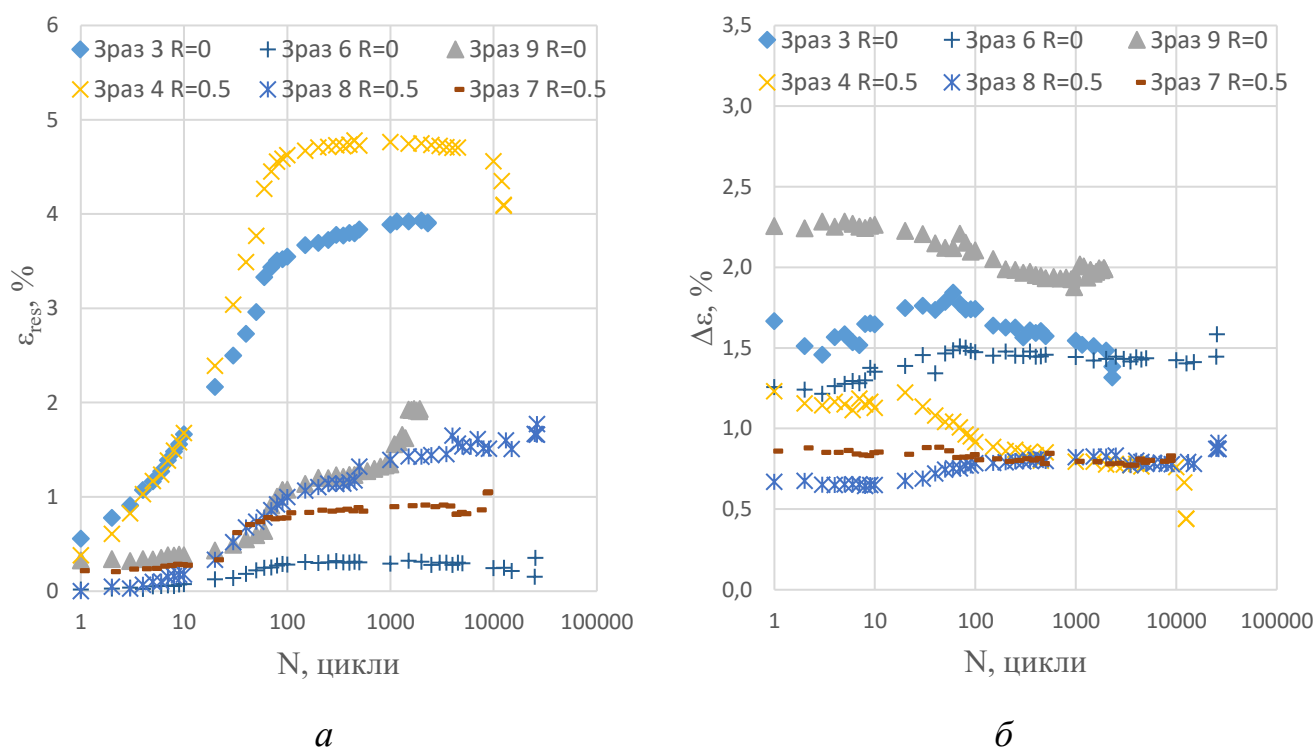


Рисунок 3.6. Діаграми залежностей залишкових відносних деформацій (а) та розмаху відносних деформацій (б) до кількості циклів

Додатково спостерігається вплив коефіцієнту асиметрії напружень R_{σ} на розмах відносних деформацій $\Delta\varepsilon$ між зразками 3 і 4 ($\sigma_{\max} = 500$ МПа), зразками 6 і

8 ($\sigma_{\max} = 450$ МПа), та зразками 9 і 7 ($\sigma_{\max} = 550$ МПа). Збільшення коефіцієнту асиметрії напружень, а отже і зменшення розмаху напружень, призводить до зменшення розмаху відносних деформацій. Так, відносне зменшення розмаху напружень $\Delta\sigma$ на 44 % зменшило відносний розмах деформацій на 49 %, 57 % та 57 % при значеннях максимальних напружень 500 МПа, 450 МПа та 550 МПа, відповідно.

Оскільки кількість розсіяної енергії W_{dis} має пряму залежність до площі петлі гістерезису то збільшенням коефіцієнта асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 призводить до зменшення дисипованої енергії за цикл (Рисунок 3.7).

Впродовж перших 10-20 циклів, за обох значень асиметрії циклу навантаження, значення розсіяної енергії різко знижується і входить в область стабілізації.

Попри це, помітна різниця кількості розсіяної енергії для зразків із різним коефіцієнтом асиметрії. Так, між зразками 3 і 4 різниця у кількості розсіяної енергії становить 0,86 МДж/м³ на 100-му циклі, що складає 46%

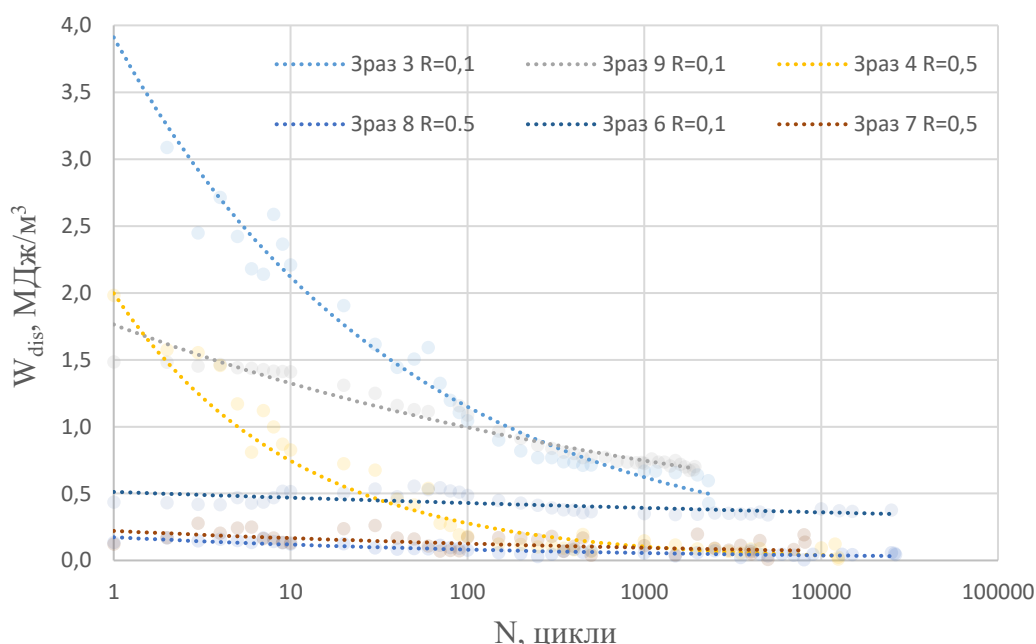


Рисунок 3.7. Кількість розсіяної енергії W_{dis}

Беручи до уваги, що в псевдопружних СПФ, за дії циклічного навантаження, відбувається виродження петлі гістерезису на початкових циклах, тому доцільно

розглядати параметри на більш пізніх етапах. В якості ділянки стабілізації прийнято 1000-ий цикл навантаження для кожного із зразків.

Із представлених залежностей розсіяної енергії від розмаху напружень (Рисунок 3.8) видно, що підвищення асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 погіршує функціональні властивості матеріалу, а саме зменшує енергію дисипації. Зокрема, за однакового значення максимального напруження NiTi сплаву енергія дисипації, на ділянці стабілізації, при $R_\sigma = 0,1$ приблизно втричі більша за $\sigma_{max} = 450$ МПа ніж при $R_\sigma = 0,5$. При чому, із збільшенням максимального напруження, ця різниця зростає, і при $\sigma_{max} = 550$ МПа за коефіцієнта асиметрії 0,1 енергія дисипації у 4,2 рази більша ніж при $R_\sigma = 0,5$.

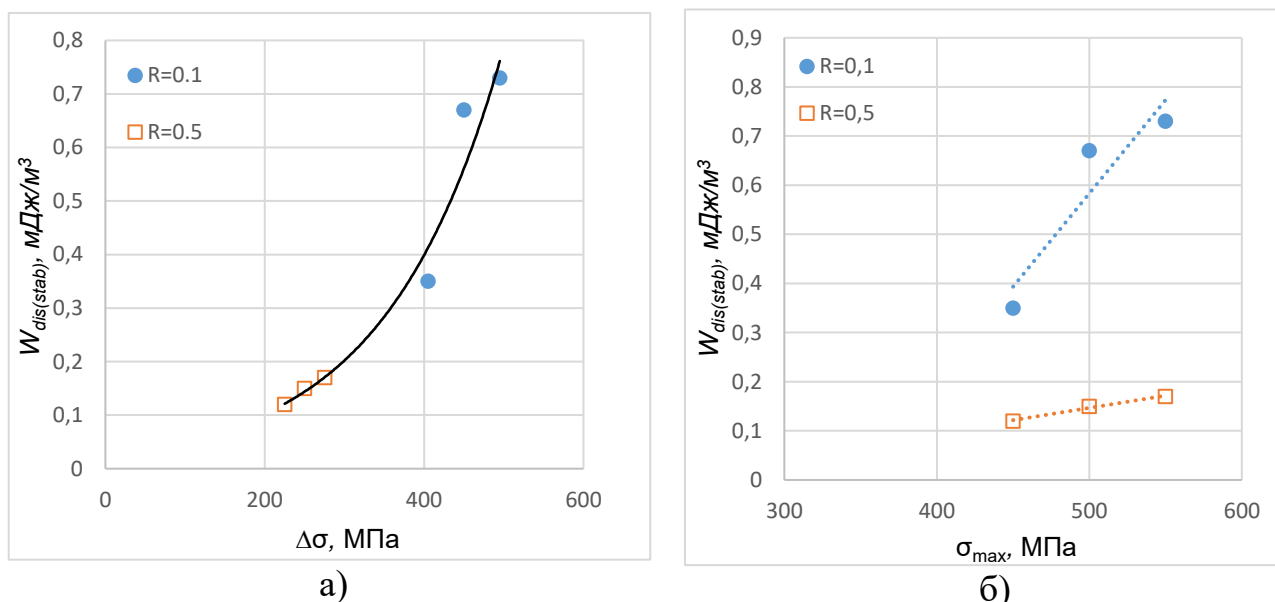


Рисунок 3.8. Залежності дисипованої енергії, на ділянці стабілізації, від розмаху напружень – а) та від максимальних напружень – б) за асиметрії циклу навантаження $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$

Для обох асиметрій циклу навантаження залежності розсіяної енергії, на ділянці стабілізації, від розмаху напружень можуть бути описані експоненціальною функцією (3.2):

$$W_{dis(stab)} = \alpha_1 \cdot e^{m_1 \cdot x} \quad (3.2)$$

де $a_1 = 0,0263$; $m_1 = 0,0068$ – параметри матеріалу.

Окрім енергії дисипації, для опису демпфувальної здатності матеріалу використовують коефіцієнт втрат η . Він є ефективним параметром для вимірювання здатності демпфування пристрою чи матеріалу та визначається як питома сила демпфування на радіан циклу демпфування за формулою (2.4).

На початковому етапі навантаження, упродовж перших 10-ти циклів відбувається різке зменшення коефіцієнта втрат псевдопружного NiTi сплаву (Рисунок 3.9). В подальшому тенденція до зменшення залишається, проте це відбувається більш поступово аж до зруйнування зразка.

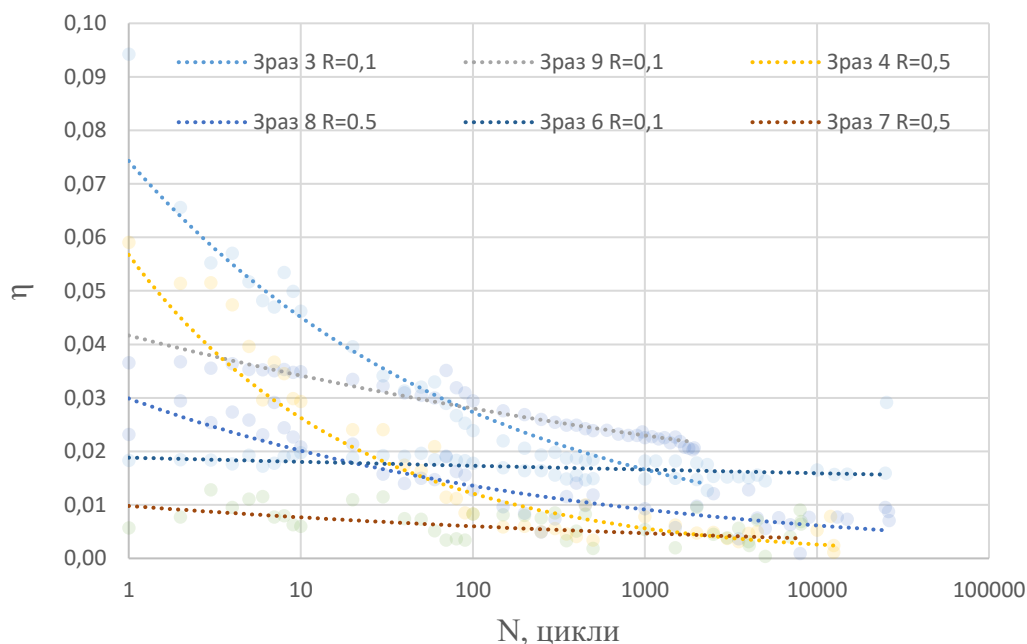


Рисунок 3.9. Залежність коефіцієнту втрат від кількості циклів

Для всіх зразків, за коефіцієнту асиметрії 0,1, коефіцієнт втрат є більшим при тих самих значеннях максимальних напружень, ніж при коефіцієнту асиметрії 0,5 (Рисунок 3.10). Це можна пояснити меншим розмахом напружень за коефіцієнту асиметрії 0,5 і відповідно меншою площею петлі гістерезису.

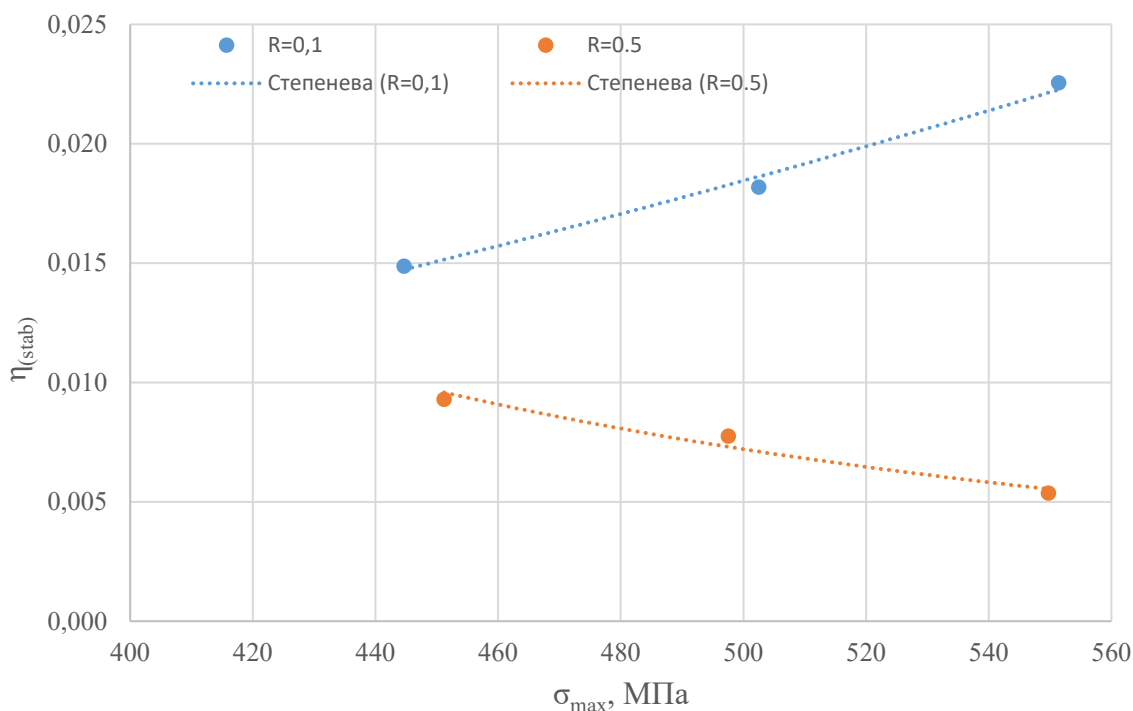


Рисунок 3.10. Залежність коефіцієнту втрат від максимального напруження

Експериментально встановлено, що на ділянці стабілізації (на 1000-му циклі навантаження) коефіцієнт втрат η за $R_\sigma = 0,5$ зменшується із збільшенням максимального напруження, а за $R_\sigma = 0,1$ — збільшується.

3.3. Вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність псевдопружного NiTi сплаву

Вивчення поведінки СПФ за дії циклічного навантаження є важливим для розуміння зміни їх функціональних властивостей. Тому відома значна кількість робіт, які стосуються впливу частоти навантаження [100], температури [98] коефіцієнта асиметрії циклу навантаження [101], та інших чинників на силові, деформаційні та енергетичні критерії втомного руйнування псевдопружного СПФ.

Вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність $Ni_{55.75}Ti_{44.15}$ сплаву досліджували за кімнатної температури на циліндричних зразках діаметром 4 мм і довжиною робочої ділянки 12 мм, вирізаних із прутка діаметром 8 мм. Експериментальні дослідження проводили за м'якого режиму навантаження ($\Delta\sigma = \text{const}$) при $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$.

Петлі гістерезису псевдопружного NiTi сплаву при 20°C за різних значень максимальних напружень та кількості циклів навантаження показані на Рисунок 3.5.

Залежності максимальних напружень та розмаху напружень від кількості циклів до зруйнування подано у вигляді діаграм малоциклового втомного руйнування NiTi сплаву (Рисунок 3.11). Дослідження проведено за температури 20°C і коефіцієнтах асиметрії циклу навантаження $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$.

За однакового розмаху напруження із збільшенням R_σ від 0,1 до 0,5 втомна довговічність NiTi сплаву значно збільшується в межах 1900-12500 циклів навантаження. Слід відмітити що, за найменшого значення максимального напруження (450 МПа) зміна коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 практично не впливає на втомну довговічність. А при $\sigma_{\max} = 550$ МПа та 500 МПа втомна довговічність, за $R_\sigma = 0,5$, більша у 5,4 та 4,2 рази відповідно, порівняно із $R_\sigma = 0,1$.

Аналогічно із максимальними напруженнями, із збільшенням розмаху напружень, втомна довговічність псевдопружного NiTi сплаву зменшується за обох коефіцієнтів асиметрії навантаження.

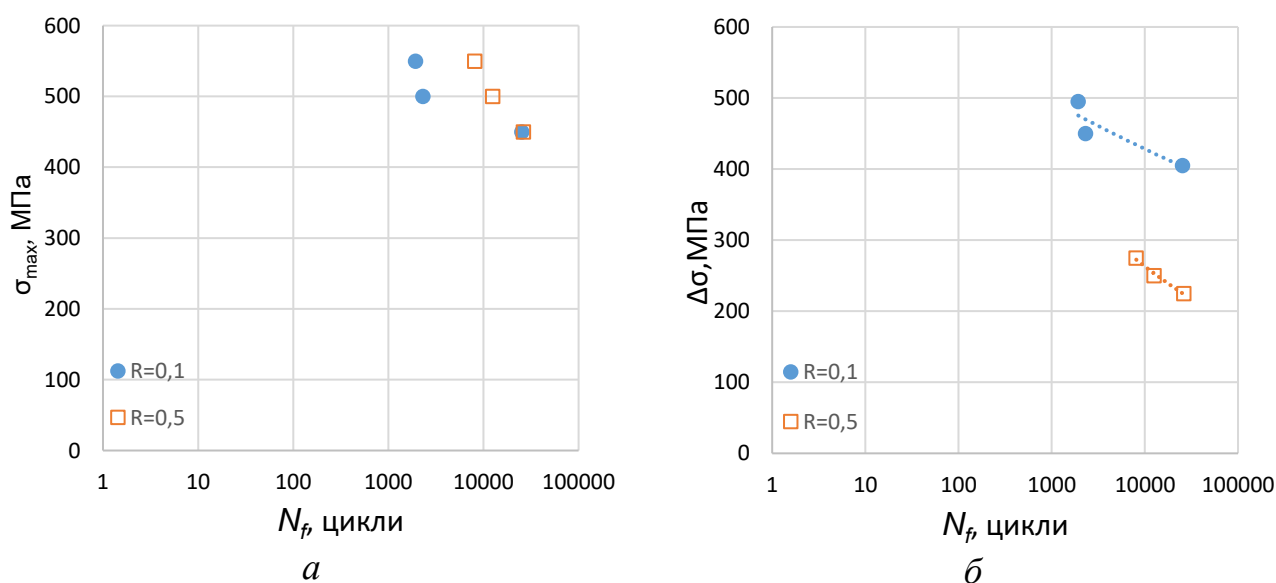


Рисунок 3.11. Залежність максимальних напружень – (а) та розмаху напружень на 1000-му циклів навантаження – (б) від кількості циклів до зруйнування при $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$.

На Рисунок 3.12 та Рисунок 3.13 подані діаграми малоциклового втомного руйнування псевдопружного NiTi сплаву від розмаху деформації та дисипованої енергії відповідно. Значення розмаху деформацій на ділянці стабілізації відповідає 1000-му циклу навантаження для кожного із зразків. Подібно до розмаху напружень, втомна довговічність буде зменшуватися із зростанням розмаху деформацій. Апроксимувавши отримані результати, можна припустити що за однакового значення $\Delta\varepsilon_{stab}$, втомна довговічність при коефіцієнті асиметрії 0,5 буде меншою ніж при 0,1. Це можна пояснити меншою площею та формою петлі гістерезису при $R_\sigma = 0,5$, що у СПФ відповідає за фазові трансформації та накопичення незворотних деформацій. Враховуючи цю особливість, значення дисипованої енергії на ділянці стабілізації $W_{dis(stab)}$ від кількості циклів до зруйнування буде мати схожі закономірності стосовно впливу асиметрії циклу навантаження.

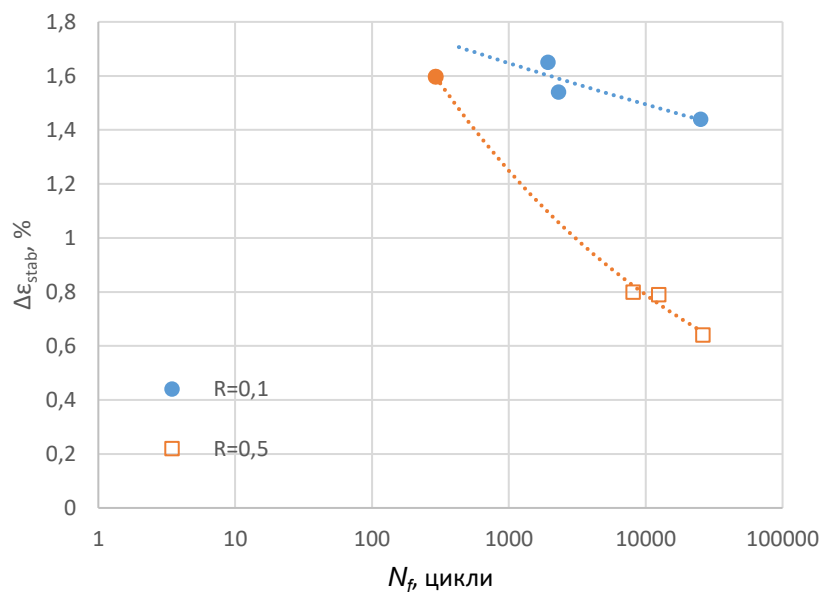


Рисунок 3.12. Залежність розмаху деформації на 1000-му циклі навантаження від кількості циклів до зруйнування при $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$.

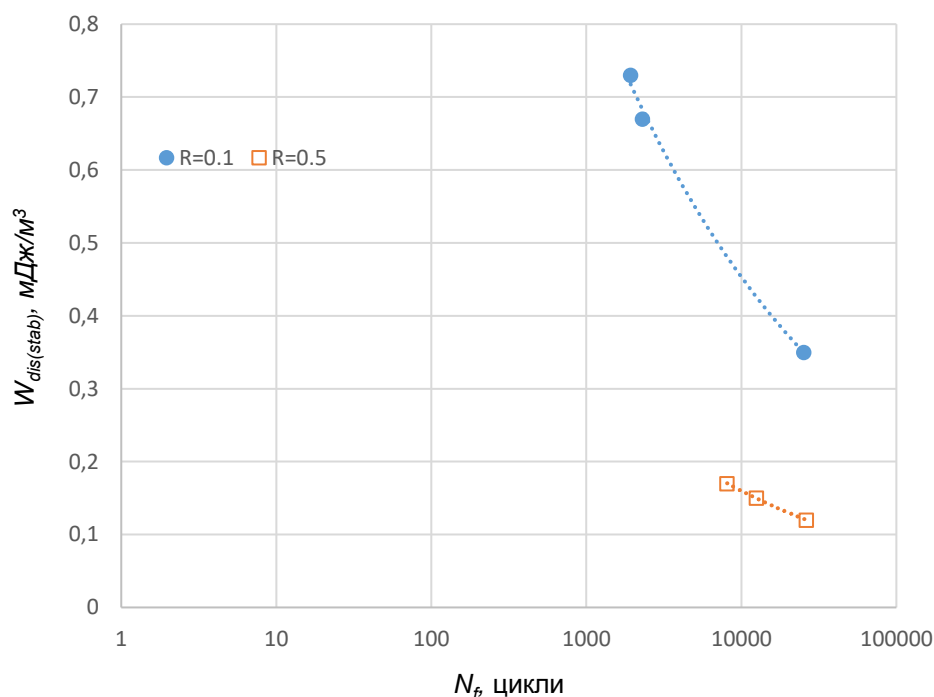


Рисунок 3.13. Залежність дисипованої енергії на 1000-му циклів навантаження від кількості циклів до зруйнування при $R_\sigma = 0,1$ та $R_\sigma = 0,5$.

На Рис. 3.14 представлено діаграму зміни модуля пружності аустеніту E_A із зміною залишкових деформацій для двох різних коефіцієнтів асиметрії напружень ($R_\sigma = 0,1$ і $R_\sigma = 0,5$). При низькому коефіцієнті $R_\sigma = 0,1$, модуль пружності значно знижується зі збільшенням залишкових деформацій, починаючи від 60000 МПа при $\varepsilon_{res} \approx 0\%$ і досягаючи близько 30000 МПа при $\varepsilon_{res} \approx 4\%$. Це свідчить про втрату жорсткості матеріалу. У випадку високого коефіцієнта асиметрії $R_\sigma = 0,5$, модуль пружності змінюється менш виражено, що вказує на кращу збереженість жорсткості матеріалу при високих циклічних навантаженнях. Отже, при високих значеннях R_σ матеріал краще зберігає свої механічні властивості навіть зі значними залишковими деформаціями, тоді як при низьких значеннях R_σ – швидше втрачає жорсткість.

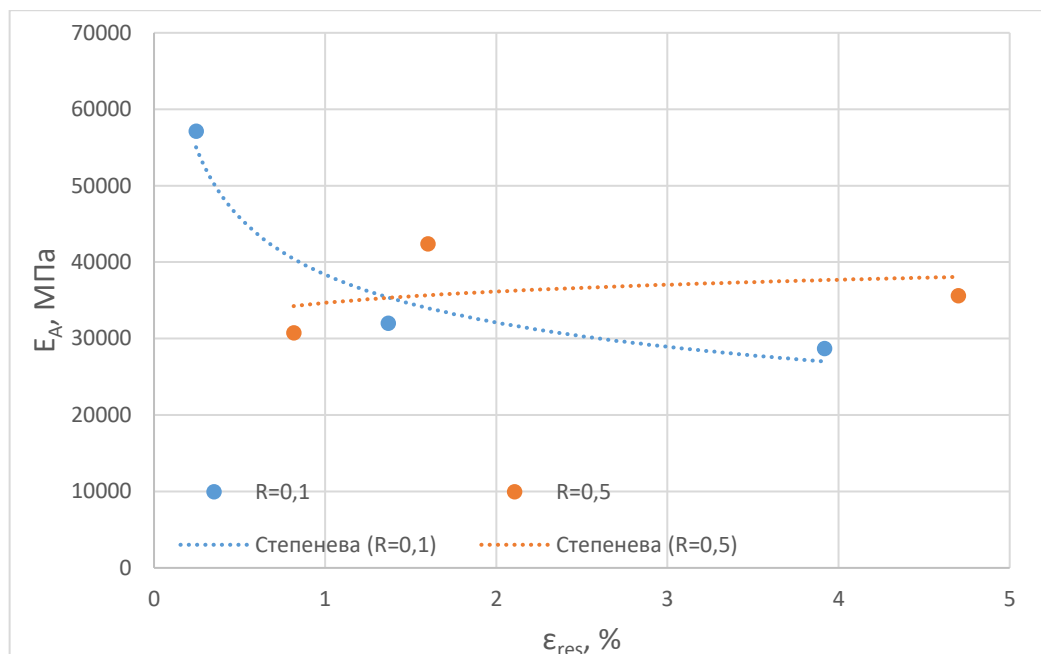


Рисунок 3.14. Діаграма зміни модуля пружності аустеніту із зміною залишкових деформацій

Дослідивши зразки за циклічного навантаження, побудовано діаграму втомного руйнування. Враховано асиметрії циклу.

3.4. Фрактографічні особливості втомного руйнування сплаву типу нітинол з пам'яттю форми

3.4.1. Утомне навантаження як чинник впливу на фазові перетворення в нітинолі

В експериментальних дослідженнях аналізували злами гладких циліндричних зразків діаметром 4 мм, виготовлені із нітинолу, після їх випробувань на втому довговічність. Частота навантаження під час випробувань усіх зразків становила 0,5 Гц. Зразки випробовували за двох значень коефіцієнта асиметрії R (0,1 та 0,5) та двох рівнів максимальних напружень в циклі навантаження σ_{\max} (450 та 550 МПа). Температуру під час випробувань підтримували на рівні $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Ця температура була вищою за температуру завершення перетворення нітинолу в аустеніт ($A_f = 14^\circ\text{C}$, [102]), а отже перед прикладанням навантаження нітинол знаходився у стабільному аустенітному стані. Модуль пружності нітинолу в аустенітному стані становив 52,7 ГПа, а пряме перетворення аустеніту в мартенсит

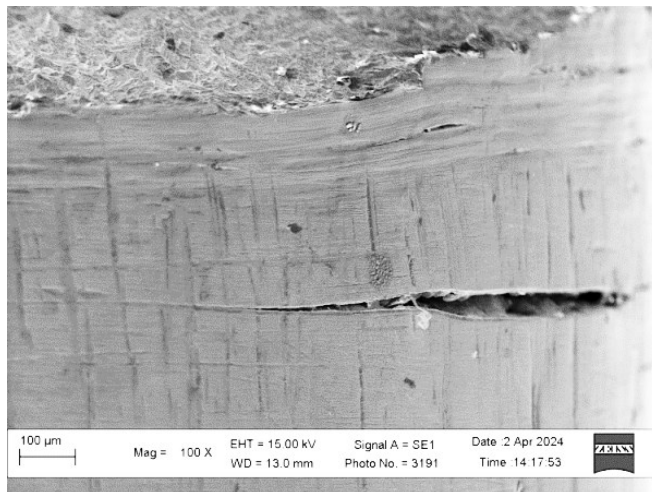
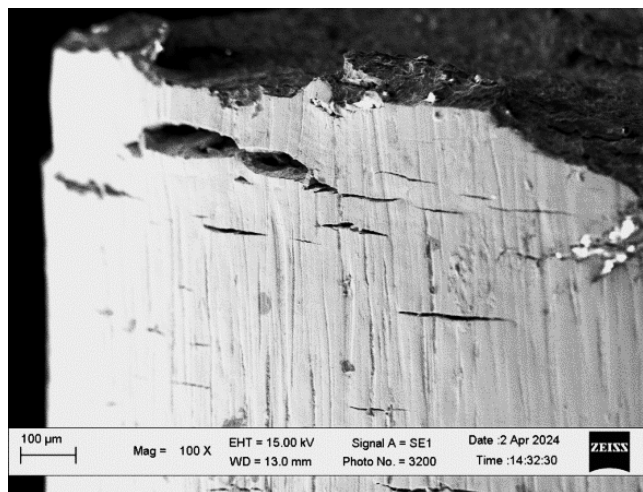
ставало можливим за напружень розтягу понад 338 МПа. Два обрані рівня максимального напруження розтягу в циклі навантаження зразків (450 і 550 МПа) сприяли протіканню напруженнями спричиненому фазовому перетворенню аустеніту в мартенсит у кожному циклі навантаження кожного із випробуваних зразків за досягнення у їх перерізі рівня напружень 338 МПа. Зрозуміло, що за нижчого з обраних для аналізу рівня максимального напружень ($\sigma_{\max} = 450$ МПа) та за нижчого значення коефіцієнта асиметрії $R = 0,1$ у півциклі навантаження зразка аж до напружень 338 МПа відбувалося лише деформування аустеніту, а за вищих від 338 МПа (аж до досягнення рівня напружень 450 МПа) – трансформація аустеніту в мартенсит. У кожному півциклі розвантаження спочатку відбувалось зворотне фазове перетворення мартенситу в аустеніт з його подальшим розвантаженням за зниження рівня напружень до 45 МПа. За вищої асиметрії в циклі навантаження ($R = 0,5$) процес розвантаження аустеніту міг відбуватися лише частково, адже мінімальне напруження в циклі навантаження σ_{\min} за обраного значення $\sigma_{\max} = 450$ МПа становило 225 МПа, що не на багато нижче за 338 МПа, коли відбувалася зворотна трансформація нітинолу в аустеніт.

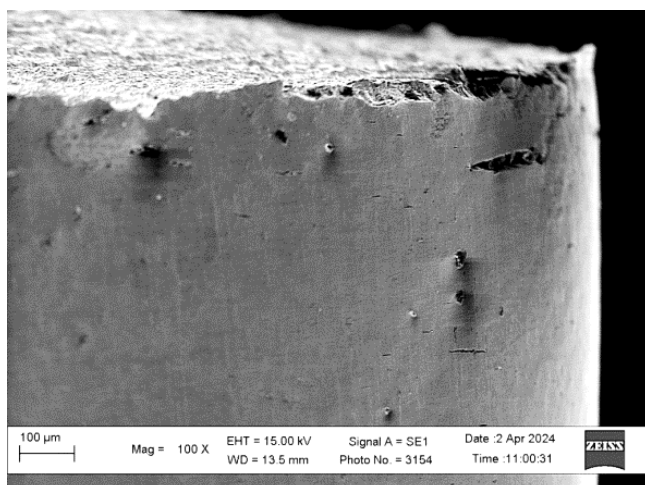
Ситуація дещо змінювалася за вищого з аналізованих рівнів $\sigma_{\max} = 550$ МПа. Адже у цьому випадку створювалися передумови для глибшого протікання фазових перетворень і за нижчого, і за вищого значення коефіцієнта R . Це стосується в першу чергу сприятливих умов для деформування новоутвореного мартенситу. Адже при вищому σ_{\max} перетворений з аустеніту мартенсит мав можливість значно сильніше деформуватися. Причому це відбувалося незалежно від коефіцієнта R . А ось для зворотного перетворення мартенситу в аустеніт у півциклі розвантаження за значення $R = 0,5$ умови були менш сприятливими, ніж за $R = 0,1$. Практично впродовж усього циклу навантаження в основному відбувалося деформування мартенситу. Тоді як за нижчого $R = 0,1$, коли σ_{\min} становило лише 55 МПа, впродовж кожного циклу навантаження в нітинолі відбувався повний цикл фазових перетворень (спочатку прямого з перетворенням аустеніту в мартенсит в півциклі навантаження, а тоді зворотного з трансформацією мартенситу в аустеніт у півциклі розвантаження). З'ясування

наслідків таких перетворень дасть змогу визначити вплив кожного з цих чинників на механізм руйнування нітинолу, а отже, наблизить нас до прогнозування його довговічності в умовах втомних навантажень.

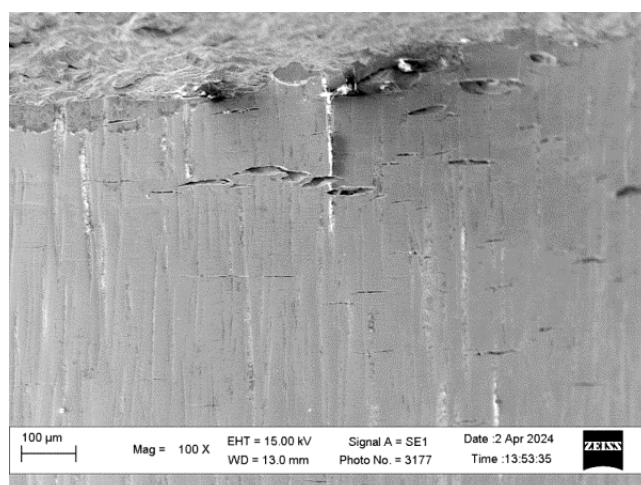
3.4.2. Ознаки зародження втомного руйнування у нітинолі, виявлені на бокових поверхнях зразків

Ознаки, пов'язані з локалізацією деформівних процесів в нітинолі, аналізували на бокових поверхнях зруйнованих зразків на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP. Оскільки зародження втомних тріщин на гладких зразка як правило відбувається від їх зовнішньої поверхні, то перш за все проаналізували деталі топографії цих поверхонь, пов'язані із цим. Відзначили, що в околі поверхонь зламів усіх випробуваних зразків спостерігали концентрацію тріщиноподібних дефектів, орієнтованих паралельно зламам (Рисунок 3.15, Рисунок 3.16 та Рисунок 3.17).

*a**б*



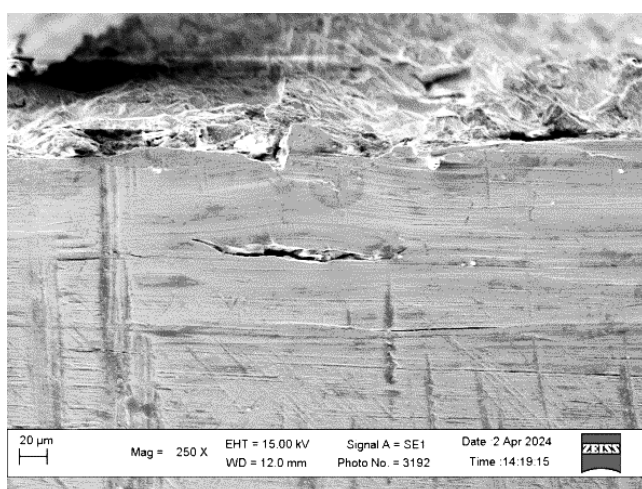
в



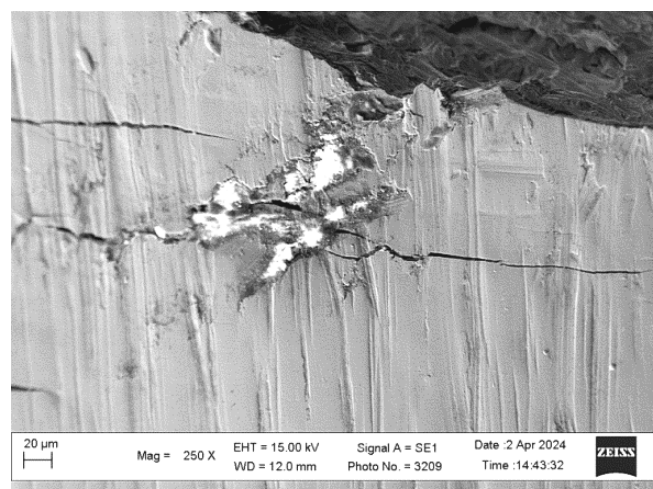
з

Рисунок 3.15. Особливості руйнування нітинолу, виявлені на бічній поверхні зразків, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (а, в) та 0,5 (б, з) та максимального напруження у циклі 450 (а, б) та 550 (в, з) МПа

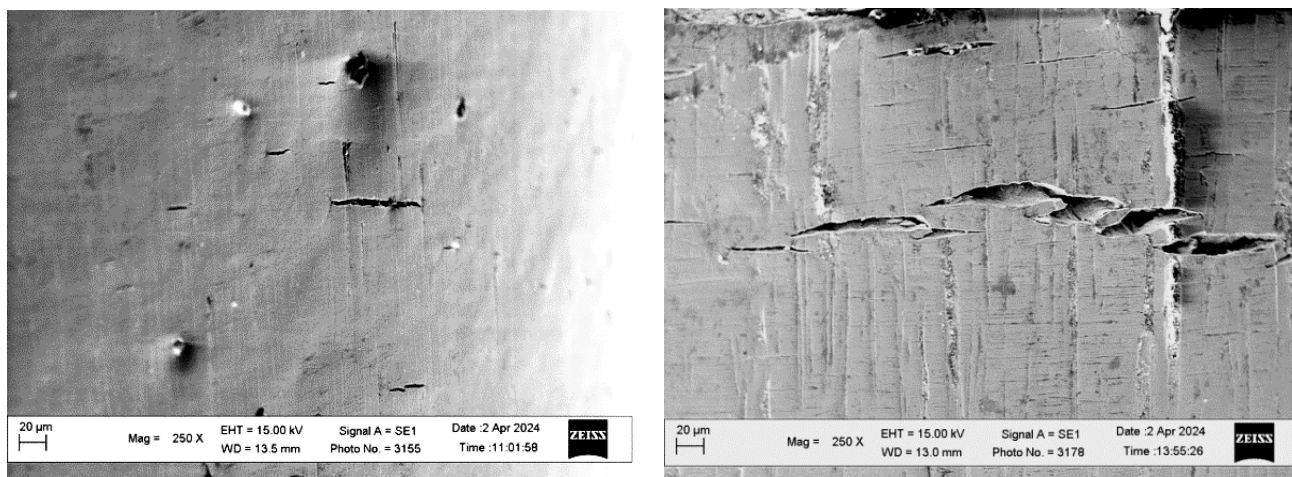
Причому, що вищою була асиметрія циклу навантаження, то більше зародків втомних тріщин виявляли в околі зламів. Окрім цього, якщо порівняти тріщини за розкриттям їх берегів, то з підвищенням R їх розкриття також зростало. Такий результат узгоджується з уявленням, що саме статична складова циклу навантаження відповідальна за розкриття берегів тріщини у циклі навантаження



а



б



а

б

Рисунок 3.16. Особливості руйнування нітинолу, виявлені на бічній поверхні зразків, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (*а, в*) та 0,5 (*б, з*) та максимального напруження у циклі 450 (*а, б*) та 550 (*в, з*) МПа. На всіх фрактограмах злами розташовані зверху

Виявилось, що за нижчого з аналізованих варіантів σ_{\max} (450 МПа) та $R = 0,1$ розкриття берегів поодиноких тріщин, що виявили безпосередньо під зломом, було незначним (Рисунок 3.17*а*). І навіть за $R = 0,5$ розкриття тріщин, розташованих на віддалі до 1 мм від зламу, було ледь помітним (Рисунок 3.17*б*), що засвідчило значну локалізацію деформівних процесів після завершення формування магістральної втомної тріщини. Завдяки її появі практично припинився розвиток тріщин поза зоною локалізації деформівних процесів.

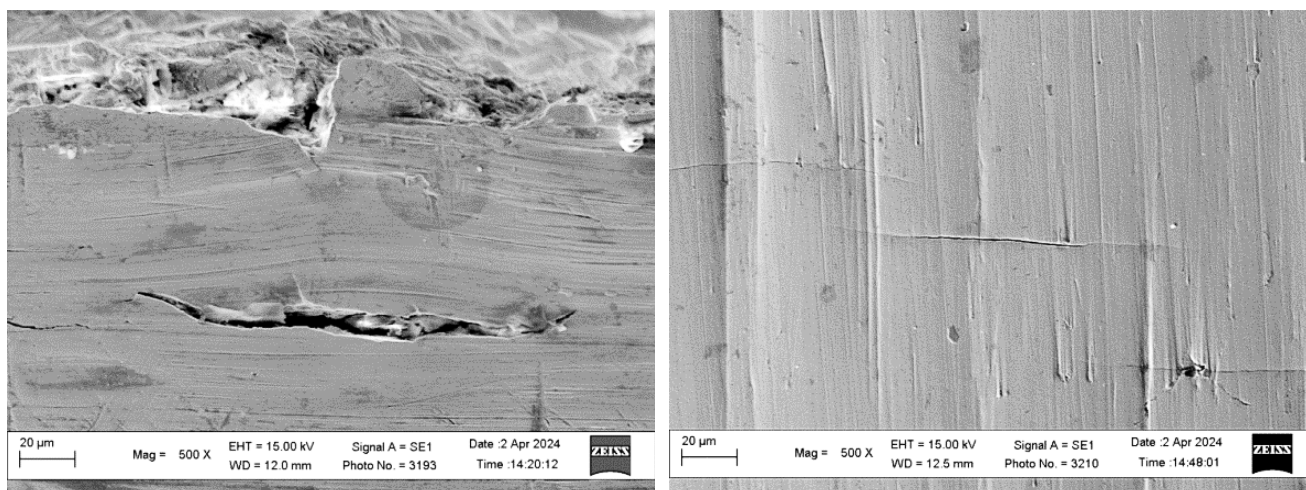


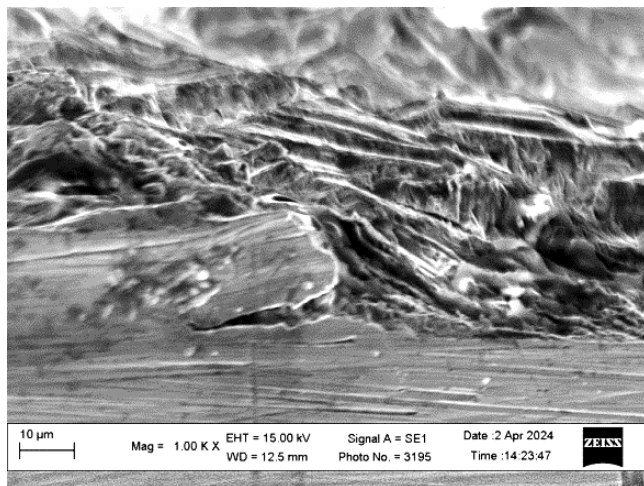


Рисунок 3.17. Особливості руйнування нітинолу в околі зламів, виявлені на бічній поверхні зразків, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (а, в) та 0,5 (б, г) та максимального напруження у циклі 450 (а, б) та 550 (в, г) МПа

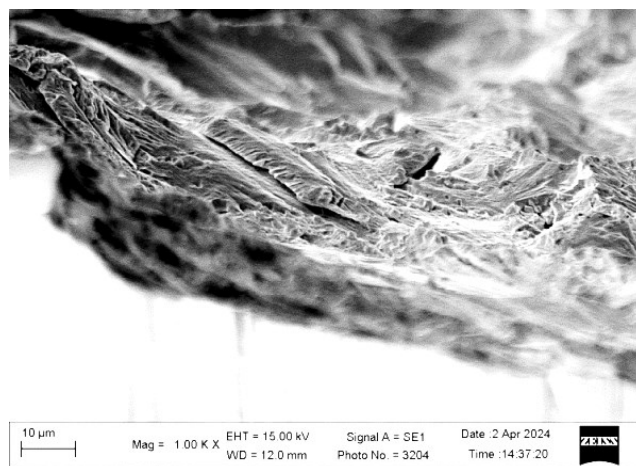
Відзначили також, що розкриття берегів тріщини зростало також із підвищенням σ_{\max} у циклі навантаження (особливо чітко це проявилось за вищого значення R). Так з порівняння Рисунок 3.17б (за $\sigma_{\max} = 450$ МПа) та Рисунок 3.17г (за $\sigma_{\max} = 550$ МПа) очевидно, що за вищого σ_{\max} розкриття берегів тріщин було більшим ніж за нижчого. Причому за нижчого R вершини цих вторинних тріщин затуплювались і розгалужувались, гальмуючи своє подальше поширення (Рисунок 3.17в), тоді як за вищого (завдяки вищій густині тріщин в околі зламу) виникали передумови для їх об'єднання з формуванням єдиного фронту поширення руйнування (Рисунок 3.17г).

Та найінформативнішими виявились осередки зародження руйнування на зламах зразків, які можна було аналізувати в околі бокових поверхонь зразків (Рисунок 3.18, Рисунок 3.19). На всіх ділянках, віднесених до осередків зародження руйнування зразків, спостерігаги чіткі сліди поетапного просування фронту тріщин вглиб робочого перерізу зразків. Звісно, що злами зразків, випробувані за нижчої асиметрії в циклі навантаження виявилися більш ушкодженими через

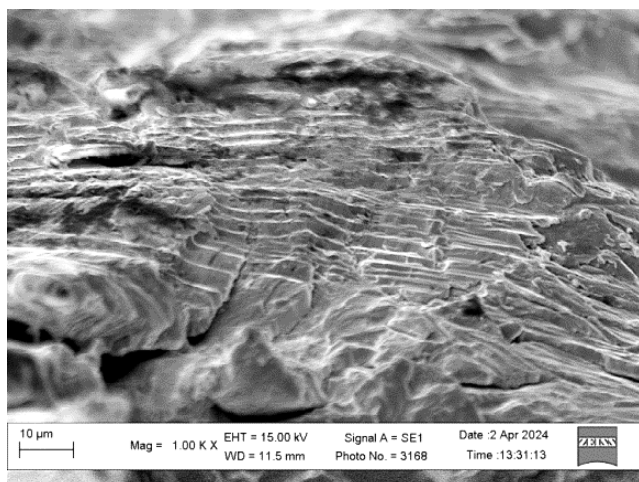
контактування берегів тріщини (особливо на етапі її зародження). Негативний вплив закриття тріщини на дрібні деталі зламу найчіткіше проявився за низьких значень $\sigma_{\max} = 450$ МПа при $R = 0,1$ (Рисунок 3.18а та Рисунок 3.18б).



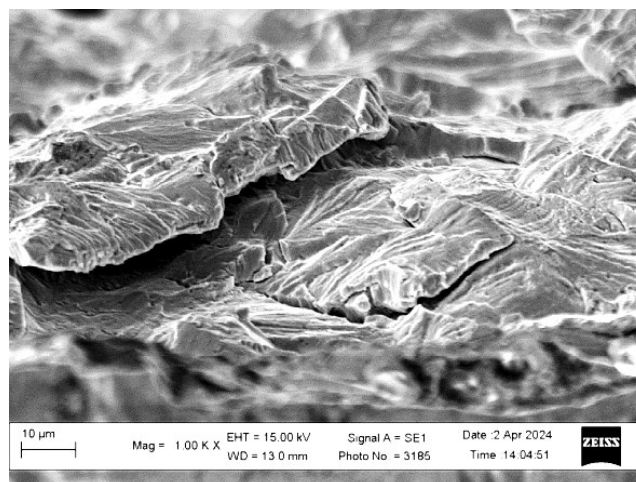
а



б



в



г

Рисунок 3.18. Особливості руйнування нітинолу в осередках зародження від бічних поверхонь зразків, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (а, в) та 0,5 (б, г) та максимального напруження у циклі 450 (а, б) та 550 (в, г) МПа. На всіх фрактограмах бічна поверхня зразків знаходиться знизу

Внаслідок контактування берегів тріщини дрібні елементи зламу затирилися і мікродеталі, характерні для руйнування на етапі зародження тріщини,

знищувалися. Причому за вищої роздільної здатності (Рисунок 3.19а та Рисунок 3.19б) їх зникнення зі зламу стало ще очевиднішим. Вважали, що нижча асиметрія в циклі навантаження, яка сприяла контактуванню берегів тріщини в околі її вершини і тим самим створювала передумови для локального розігрівання нітинолу в зоні передруйнування. А це один з чинників сприяння дисипації енергії в кожному циклі навантаження. Отже, висновок фактографічного аналізу добре узгоджується з висновком механічних випробувань про вищий рівень дисипованої енергії за нижчого коефіцієнта R ніж за вищого.

Аналіз зламів нітинолу, отриманих за вищого рівня σ_{\max} під час випроб на малоциклову втому, підтвердив висновок про узгодженість фактографічних і механічних оцінок тенденції зміни дисипованої енергії за вищого коефіцієнта асиметрії R . Адже і в цьому випадку за випробувань при $R = 0,1$ (як і у випадку випробувань за $\sigma_{\max} = 450$ МПа) дрібні деталі зламу виявляли лише на тих ділянках зламу нітинолу, які розташовувалися у заглибинах і завдяки цьому не контактували з відповідними виступами на спряженій поверхні зламу. Лише завдяки цьому вдалося виявити характерні втомні боріздки на зламі зразка, випробуваному за $\sigma_{\max} = 550$ МПа та $R = 0,1$ (Рисунок 3.18в та Рисунок 3.19в).

Тоді як за вищого $R = 0,5$ під час формування рельєфу починала домінувати статична складова циклу навантаження (σ_{\max}), що сприяло появі ознак значного вторинного розтріскування (яке раніше спостерігали також на бічній поверхні зразка) та чітко розмежованих окремих фасеток, на поверхні яких з однієї точки віялом розходилися гребені з незначним кутом розходження (Рисунок 3.18г та Рисунок 3.19г). Такі елементи зламу нагадували традиційний рельєф кризьзерених відколів, які відповідають крихкому руйнуванню сталей (зокрема під час їх випробувань на ударну в'язкість за від'ємних температур). Проте у випадку нітинолу ці гребені на фасетках зламу пов'язали із поетапним локальним підростанням тріщини в кожному з циклів деформування зразка під час випроб на малоциклову втому (Рисунок 3.18г та Рисунок 3.19г). Адже ці гребені були або паралельними, або розташовувались під невеликим кутом до бічної поверхні зразка, випробуваного за умов $\sigma_{\max} = 550$ МПа та $R = 0,5$. Вершини цих гребенів

окреслювалися досить широкими лініями, що свідчило про значні деформації, які спричинили їх появу.

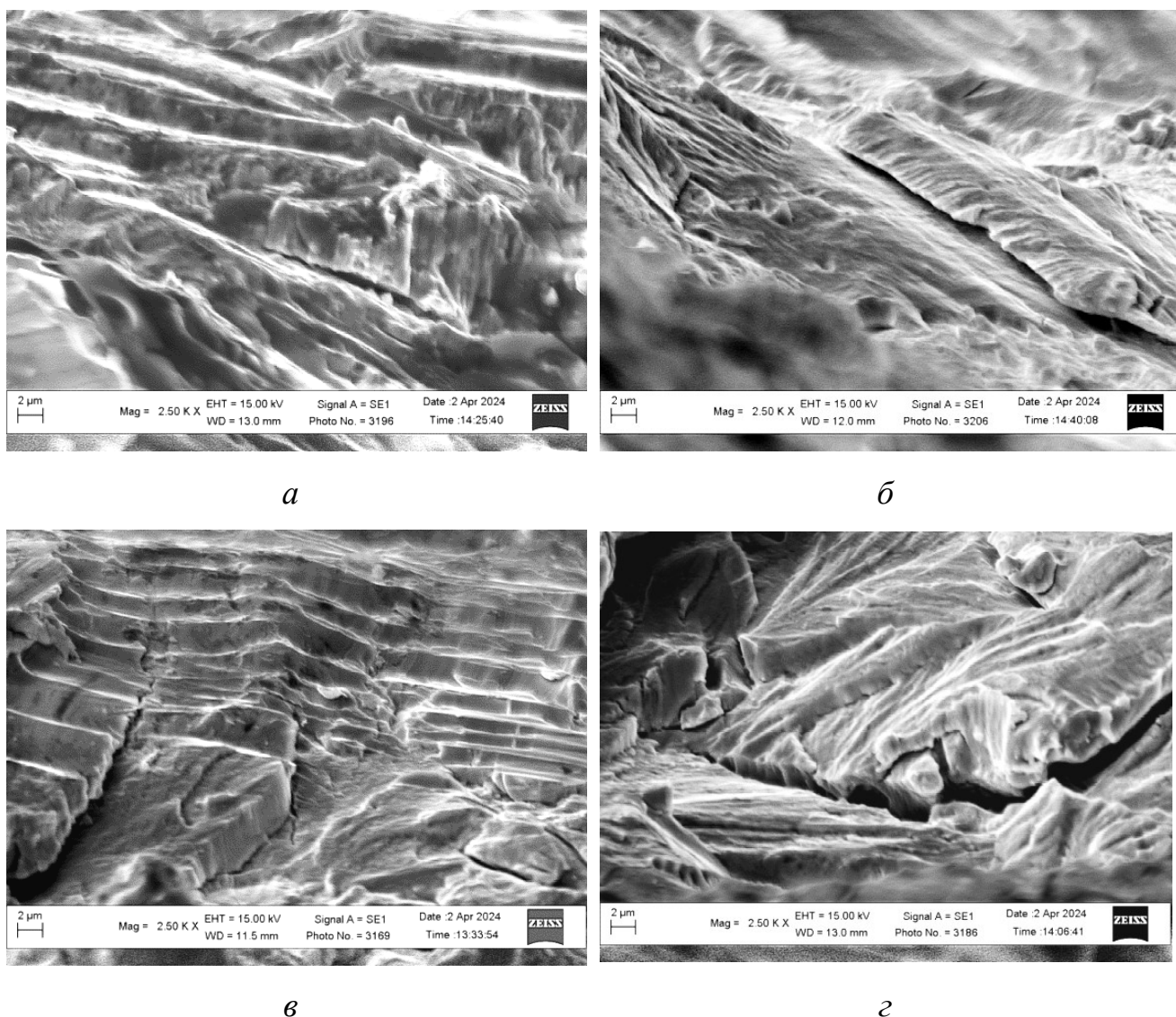


Рисунок 3.19. Особливості руйнування нітинолу в осередках зародження від бічних поверхонь зразків, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (*а*, *в*) та 0,5 (*б*, *г*) та максимального напруження у циклі 450 (*а*, *б*) та 550 (*в*, *г*) МПа. На всіх фрактограмах бічна поверхня зразків знаходиться знизу

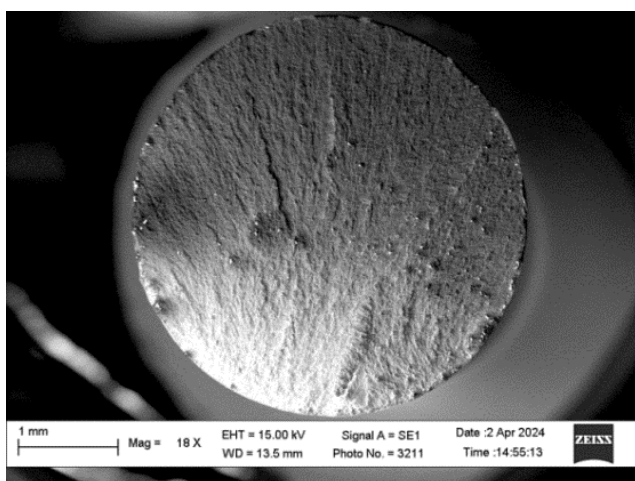
Це узгоджується з даними механічних випроб, які кількісно підтвердили значно вищу залишкову деформацію ϵ_{res} нітинолу у кожному циклі навантаження за $R = 0,5$ порівняно з випробами за $R = 0,1$. Урахувавши переважаючу орієнтацію

цих гребенів (приблизно паралельну до бічної поверхні зразка з незначним відхиленням від цього правила в межах окремих фасеток), вважали, що вони можуть відповідати місцю розташуванню вершини тріщини в циклі навантаження на кожній з локальних ділянок фронту тріщини, на якій цей ріст став можливим. І створювали ці сприятливі передумови для підростання тріщини у кожному циклі навантаження фазові перетворення, спричинені дією напружень. Зокрема прямого (аустеніту в мартенсит у півциклі навантаження зразка) і зворотного (мартенситу в аустеніт у півциклі його розвантаження) перетворень.

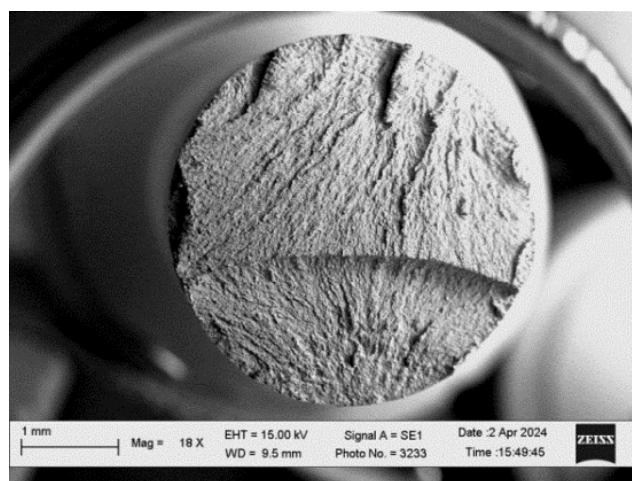
Подібне поширення гребенів утомних боріздов зафіксували також і на зламі нітинолу, випробуваному за нижчого $R = 0,1$ (Рисунок 3.19в). У цьому випадку підростання тріщини в межах існування аустеніту (окреслене двома тоненькими паралельними лініями) в зоні передруйнування вершини тріщини проявилось навіть чіткіше. Адже розмах навантажень у цьому випадку давав можливість не лише відбутися прямому і зворотному фазовому перетворенню (за $\sigma_{\max} = 338$ МПа), але ще й значною мірою залучити до деформаційного процесу у зоні передруйнування нітинол в аустенітному стані (причому в досить широкому діапазоні напружень від 55 до 338 МПа). Тоді як за випробувань при $R = 0,5$ діапазон напружень, в якому могла відбуватися деформація аустеніту перед його трансформацією в мартенсит (і у зворотньому напрямі), був значно вужчим (від 275 до 338 МПа) і, відповідно, смуга на вершинах гребенів була менш чітко окреслена. Зона ж, яка відповідає підростанню тріщини на етапі деформування мартенситу визначалася однаковим розмахом напружень (212 МПа) за обох значень R і тому немає підстав очікувати суттєвих відмінностей на етапі підростання тріщини в кожному з циклів навантаження, коли нітинол в зоні передруйнування перебував у стані мартенситу. Для детальнішого з'ясування всіх можливих варіантів поширення руйнування в нітинолі слід ретельніше проаналізувати злами зразків у повному обсязі.

3.4.3. Вплив параметрів циклу навантаження на макрофрактографічні особливості рельєфу втомного руйнування нітинолу

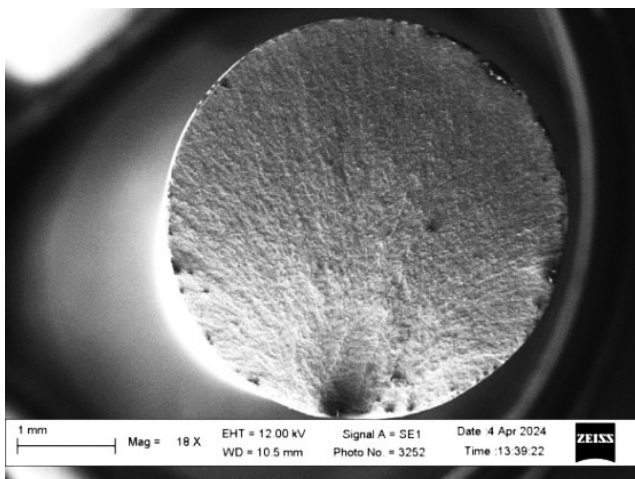
Аналізуючи ознаки утомних зламів нітинолу на макроскопічному рівні після випробувань зразків на втому взяли до уваги два аспекти. Перший з них пов'язаний з рельєфністю зламів зразків, випробуваних за однакового σ_{\max} , але з різним коефіцієнтом асиметрії в циклі навантаження. А другий – з наявністю осередків зародження руйнування від зовнішньої поверхні циліндричних зразків за такої ж зміни параметрів циклу навантаження. Макрозлами зразків приведені на Рисунок 3.20. Відзначили, що рельєф зламів зростає із підвищенням коефіцієнта асиметрії R , що зумовлено впливом, по-перше, чисто механічного чинника (адже чим вище значення R , тим менше контактують між собою береги утомної тріщини у кожному циклі навантаження і, як наслідок, менше згладжується рельєф зламу), а по-друге, чинника впливу статичної складової циклу навантаження (адже за вищих напружень, які діють впродовж всього циклу навантаження, більші об'єми металу залучаються до деформівних процесів, що відбуваються в околі вершини утомної тріщини, що сприяє зростанню топографії рельєфу зламу). Так рельєфність зламів нітинолу, сформованих за $R = 0,1$ (Рисунок 3.20а, в), нижча ніж за $R = 0,5$ (Рисунок 3.20б, г).



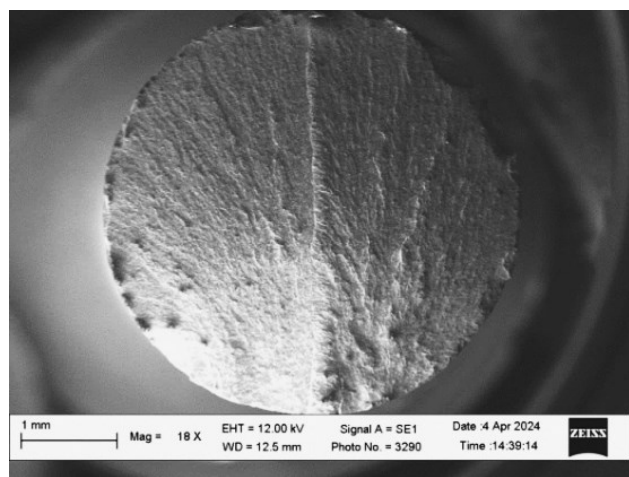
а



б



6



2

Рисунок 3.20. Макрофрактограми зразків нітинолу, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (а, в) та 0,5 (б, з) та максимального напруження у циклі 450 (а, б) та 550 (в, з) МПа

Щодо осередків зародження руйнування, то за випробувань з асиметрією 0,5 кількість осередків зародження макротріщин була, за правило, більшою ніж за випробувань з асиметрією 0,1. Зокрема за нижчого рівня максимальних напружень в циклі навантаження (450 МПа) таких осередків зародження було значно більше за $R = 0,5$ (Рисунок 3.20б) ніж за $R = 0,1$ (Рисунок 3.20а). А за вищого $\sigma_{\max} = 550$ МПа вплив асиметрії на кількість осередків виявився ще очевиднішим. Адже за $R = 0,1$ (Рисунок 3.20в) чітко виділяється єдиний осередок зародження, тоді як $R = 0,5$ (Рисунок 3.20з) їх кількість була більшою.

Звісно, що невисока роздільна здатність представлених макрофрактограм не дала можливість повною мірою судити про особливості рельєфу в осередках зародження руйнування на зламах, сформованих за різних механічних умов випробувань. Проте, застосувавши вищі збільшення, не лише підтвердили висновки, зроблені на основі практично візуального порівняння зламів, але й відзначили додаткові особливості, які не були очевидними раніше (Рисунок 3.21).

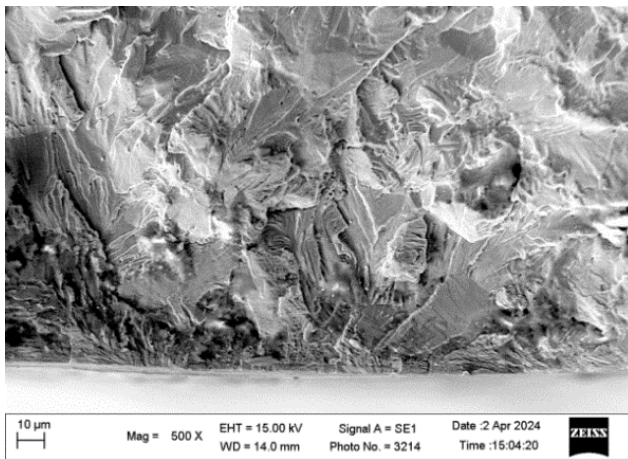
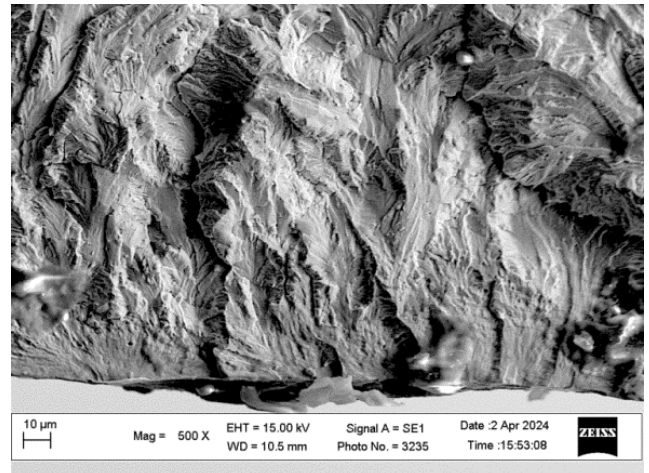
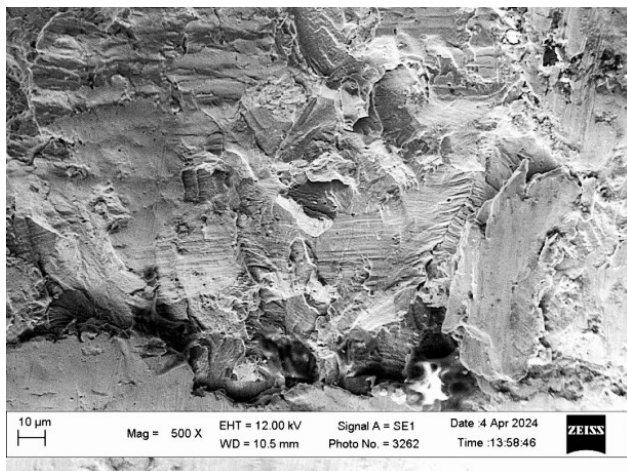
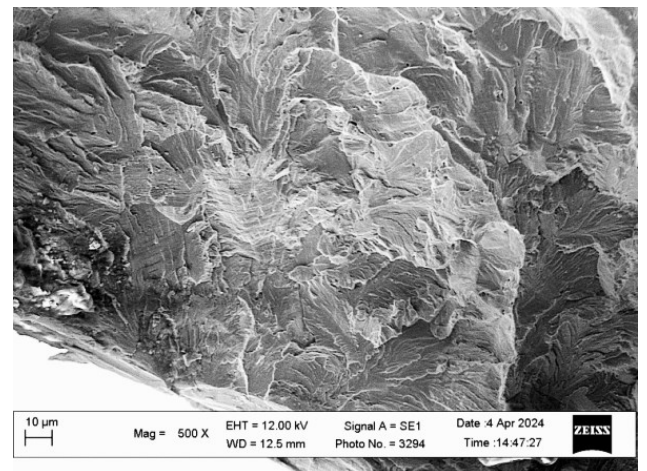
*a**б**в**г*

Рисунок 3.21. Макрофрактограми зразків нітинолу, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (*a*, *в*) та 0,5 (*б*, *г*) та максимального напруження у циклі 450 (*a*, *б*) та 550 (*в*, *г*) МПа

Огрубіння рельєфу зламів в зонах зародження втомного руйнування з підвищенням R стало очевидним і справдилося за обох рівнів σ_{\max} . Спільною для всіх зламів нітинолу стала поява на них ділянок локального росту тріщин, що зародилися від бічних поверхонь зразків. Вони відзначалися характерним рельєфом, що нагадував річкові візерунки з гребенями відриву витягненими у напрямі поширення руйнування, які віялом розходилися від осередку його зародження. Їх чіткіше ідентифікували на зламах нітинолу випробуваного за асиметрії 0,5 (Рисунок 3.21*б*, *г*), ніж 0,1 (Рисунок 3.21*а*, *в*). Як правило їх трактують як елементи крихкого низько енергоємного руйнування внаслідок крізьзеренного

відколу. Подібні елементи зламів спостерігали також, під час аналізу зон зародження руйнування безпосередньо у приповерхневих шарах зразків у попередньому параграфі 1.2. Важливо зазначити, що на зламах ці віялоподібні ділянки в основному зорієнтовані в напрямі поширення руйнування вглиб перерізу зразків. Вони стали визначальною ознакою втомного руйнування на етапі поширення руйнування (особливо за вищих значень і асиметрії, і σ_{\max}). Очевидно, після формування єдиного фронту макротріщини руйнування нітинолу поширювалося завдяки деформівним процесам в зоні передруйнування вздовж всього фронту тріщини, обираючи найсприятливіше орієнтовані зерна, в яких трансформований мартенсит залишався практично впродовж всього циклу навантаження. Отже на етапі поширення руйнування саме максимальний рівень напружень ставав визначальним для формування рельєфу зламів. Проте для того щоб судити про їх роль у процесі руйнування нітинолу необхідно також проаналізувати фрактографічні ознаки зламів, виявлені на мікроскопічному рівні, з використанням для цього вищих збільшень.

3.4.4. Вплив параметрів циклу навантаження на мікрофрактографічні ознаки втомного рельєфу руйнування нітинолу

Аналіз зламів з використанням вищої роздільної здатності дав змогу розкрити деталі руйнування, спричинені і параметрами циклу навантаження, і фізичними процесами, які відбувалися впродовж кожного циклу з відповідними фазовими перетвореннями, зумовленими напруженнями. Всі особливості рельєфу, описані у попередніх дослідженнях і бічної поверхні зразків, і осередків зародження руйнування безпосередньо під бічними поверхнями підтвердились під час аналізу зламів на мікроскопічному рівні (Рисунок 3.22).

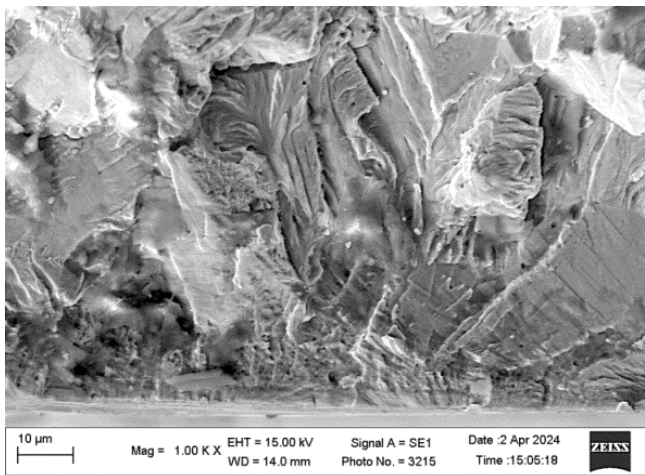
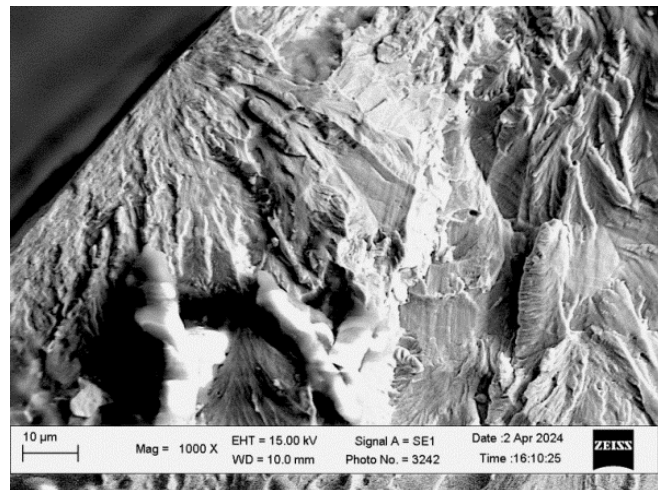
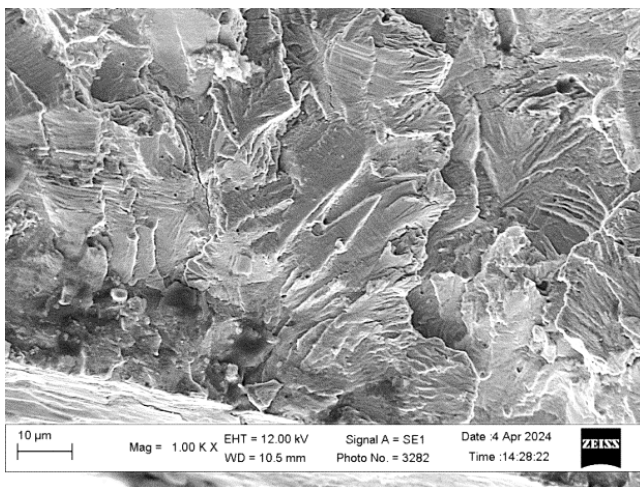
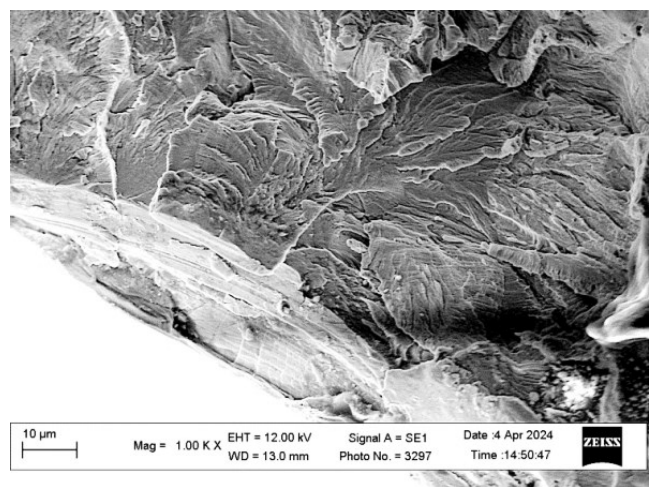
*a**б**в**г*

Рисунок 3.22. Мікрофрактограми зразків нітинолу, випробуваних на втомну витривалість за частоти навантаження 0,5 Гц, коефіцієнта асиметрії 0,1 (*a*, *в*) та 0,5 (*б*, *г*) та максимального напруження у циклі 450 (*a*, *б*) та 550 (*в*, *г*) МПа, виявлені в осередках зародження руйнування

Очевидним були віялоподібні ділянки за всіх умов випробувань з їх домінуванням за вищих значень R , σ_{\max} та довжини тріщини, на якій здійснювали аналіз. Проте в усіх випадках навіть за 1000 кратного збільшення не було можливості проаналізувати особливості руйнування в зонах зародження тріщини, яка виглядала заглаженою (особливо за нижчої асиметрії, Рисунок 3.22*a*, *в*) при обох рівнях навантаження.

3.5. Висновки до розділу 3

Методом ДСК визначено температури фазових перетворень даного сплаву. Показано, що із збільшенням швидкості нагріву зразка від $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ до $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ зростають температури початку і завершення аустенітної трансформації (A_s та A_f) та зменшується температура початку мартенситної фази M_s .

На основі проведених досліджень визначено вплив циклічного навантаження із урахування асиметрії циклу навантаження, на механічну поведінку та функціональні властивості псевдопружного Ni-Ti сплаву з пам'яттю форми за контрольованого напруження. Для цього використовували зразки діаметром 4 мм, що виготовлені із $\text{Ni}_{55,75}\text{Ti}_{44,15}$ СПФ у вигляді прутка діаметром 8 мм.

Результати показали, що підвищення асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 погіршує функціональні властивості матеріалу, а саме зменшує енергію дисипації. Зокрема, за однакового значення максимального напруження NiTi сплаву енергія дисипації, на ділянці стабілізації, при $R_{\sigma} = 0,1$ приблизно втричі більша за $\sigma_{\text{max}} = 450$ МПа ніж при $R_{\sigma} = 0,5$. При чому, із збільшенням максимального напруження, ця різниця зростає, і при $\sigma_{\text{max}} = 550$ МПа за коефіцієнта асиметрії 0,1 енергія дисипації у 4,2 рази більша ніж при $R_{\sigma} = 0,5$. Окрім енергії дисипації, для опису демпфувальної здатності матеріалу було використано коефіцієнт втрат η . Встановлено, що на початковому етапі навантаження, упродовж перших 10-ти циклів відбувається різке зменшення коефіцієнта втрат псевдопружного NiTi сплаву. В подальшому тенденція до зменшення залишається, проте це відбувається більш поступово аж до зруйнування зразка.

Встановлено, що із збільшенням R_{σ} від 0,1 до 0,5 втомна довговічність NiTi сплаву значно збільшується в межах 1900-12500 циклів навантаження. За найменшого значення максимального напруження 450 МПа зміна коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0,1 до 0,5 практично не впливає на втомну довговічність. А при $\sigma_{\text{max}} = 550$ МПа та 500 МПа втомна довговічність, за $R_{\sigma} = 0,5$, більша у 5,4 та 4,2 рази відповідно, порівняно із $R_{\sigma} = 0,1$. Аналогічно із максимальними напруженнями, із збільшенням розмаху напружень, втомна

довговічність псевдопружного NiTi сплаву зменшується за обох коефіцієнтів асиметрії навантаження.

Фрактографічним аналізом показано, що асиметрія циклу навантаження впливає на кількість зародків втомних тріщин та рельєф зламів. За більшої асиметрії спостерігалось більше зародків тріщин та збільшення розкриття їх берегів, що узгоджується з механічними випробуваннями, які показали вищий рівень дисипованої енергії за меншого коефіцієнта асиметрії.

Таким чином, результати дослідження підтвердили, що циклічне навантаження та його параметри значно впливають на механічну поведінку та функціональні властивості псевдопружного NiTi сплаву, що має важливе значення для подальшого застосування цього матеріалу у будівельних конструкціях та інших галузях.

РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ У КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДЕФОРМІВНОСТІ ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

4.1. Забезпечення міцності з'єднання СПФ елемента з арматурою

Сплави пам'яті форми, такі як NiTi, є надзвичайно привабливими матеріалами для різноманітних індустрій. Однак процеси з'єднання цих сплавів стикаються з численними викликами, які обмежують їх широке використання. Аналіз проблематики зварювання СПФ детально представлено у роботі [103].

Однією з основних проблем, пов'язаних зі зварюванням NiTi, є зниження міцності зварного шва. Це зумовлено утворенням інтерметалевих сполук, які характеризуються більшою крихкістю та негативно впливають на механічні характеристики з'єднання. Крім того, під час зварювання висока температура буде зміщувати напруження фазових перетворень СПФ, що призведе до впливу на ефект пам'яті форми та псевдопружність.

При зварюванні NiTi також виникає проблема зміни структури матеріалу в зоні термічного впливу (ЗТВ) та зоні розплаву (ЗР). Це може призводити до утворення нерівномірної мікроструктури, що знижує загальну міцність зварного з'єднання та може спричинити появу тріщин.

З'єднання NiTi з іншими матеріалами, такими як сталь або алюміній, створює ще більш складні проблеми. Основна складність полягає в різниці термічних та фізичних властивостей матеріалів, що призводить до неоднорідності теплових потоків під час зварювання. Це спричиняє утворення інтерметалевих сполук на межі з'єднання, які можуть бути крихкими та знижувати міцність зварного шва.

Аналіз наукових праць за напрямком дослідження ефективності застосування сплавів із пам'яттю форми [25, 104–106] показав, що застосування муфтових втулок є ефективним методом з'єднання прутка із СПФ із ребристою арматурою. Тому для подальшого досліджень було розроблено прототип із застосуванням 3Д-друку, оскільки сучасні технології дозволяють виготовити виріб з металів чи навіть сплавів [107]. В якості матеріалу обрано полімер із високою міцністю, жорсткістю

і ударною в'язкістю. Здатність полімерів до рівномірних змін об'єму під час нагрівання чи охолодження використано, як природній метод обтискання стержнів.

Для виготовлення прототипу муфти, обрано та досліджено полімери: PLA+; T-PLA; Elastan D100. Для кожного з полімерів було виготовлено по три зразки типу 3 відповідно до ISO 8256:2004. Випробування на розтяг проведено на сервогідравлічній машині СТМ-100 (Рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Дослідження зразка PLA+

Швидкість навантаження була постійною і становила 3,3 мм/с. Середнє арифметичне значення для кожного полімеру представлено в Таблиця 4.1 і на діаграмі (Рисунок 4.2) та порівняно з характеристиками матеріалу згідно з сертифікатом.

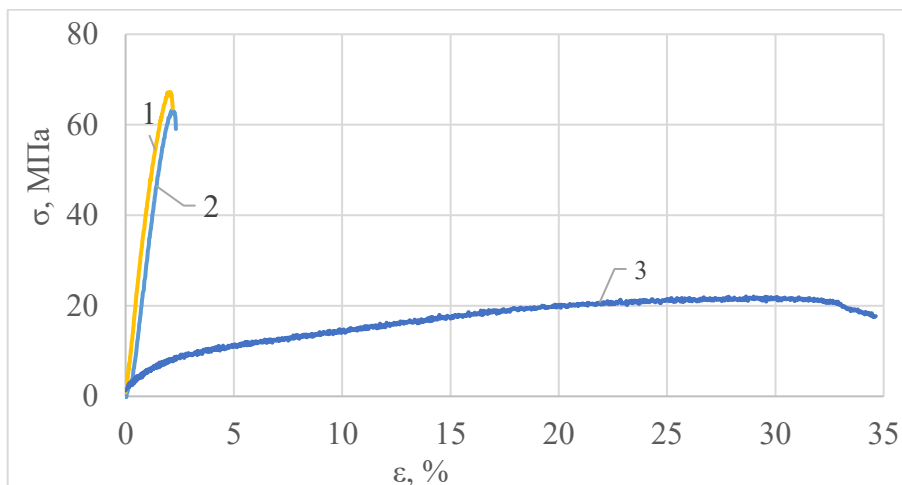


Рисунок 4.2. Залежність напружень-деформацій: (1)PLA+; (2)T-PLA;
(3)Elastan D100

Відповідно до результатів, для виготовлення та випробування з'єднувального елемента було обрано PLA+. Необхідний поперечний переріз з'єднувального елемента був підібраний методом скінченно-елементного моделювання у середовищі ANSYS. Визначено, що зовнішній діаметр з'єднувального елемента повинен бути не менше 24 мм для забезпечення міцності з'єднання арматури 400С діаметром 12 мм.

Таблиця 4.1. Результати дослідження полімерів

Полімер	Міцність за згину, МПа	Міцність за розтягу, МПа	
	Сертифікат	Сертифікат	Дослід
PLA+	87	60	58
T-PLA	72	60	66
Elastan D100	46	68	-

На 3D-принтері надруковано трубку з полімеру PLA+ розмірами: довжина $L = 100$ мм; діаметри $D = 24$ мм і $d_l = 12$ мм (Рисунок 4.3). Після друку трубка охолочила і фактичні розміри склали: $L = 98$ мм, $D = 23$ мм, $d_l = 11$ мм.

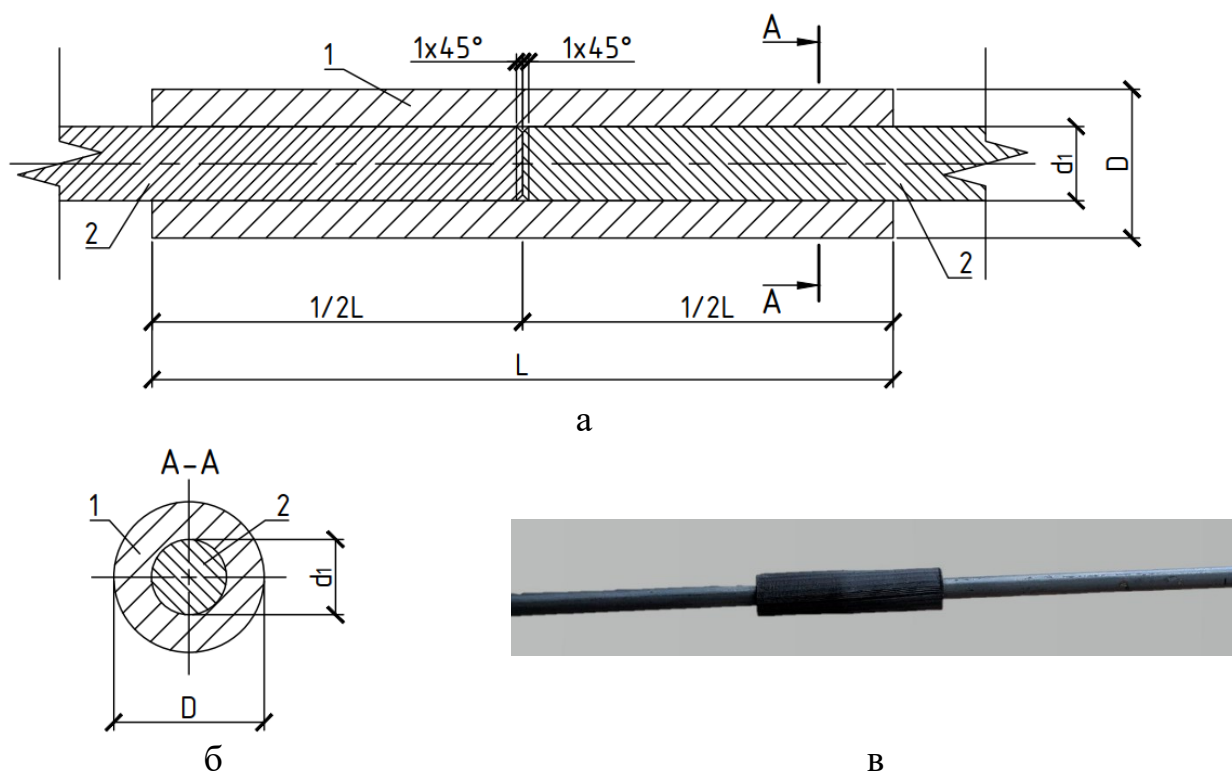


Рисунок 4.3. Схема (а), (б) та фото (в) муфтового з'єднання

З'єднані стрижні піддавали одновісному розтягу на сервогідравлічній машині СТМ-100 зі швидкістю навантаження 3,3 мм/с. У результаті було визначено статичне тертя $F_{cm} = 0,45$ кН.

Даної міцності щеплення між полімером та гладким стержнем нітинолу недостатньо. Як показали експериментальні дослідження, це призвело до висмикування арматури з муфти за незначних зусиль. Як результат, у залізобетонній конструкції виникла тріщина, яка миттєво розкрилася до критичних значень (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4. Розкриття тріщини у місці з'єднання

Тому виконано інший метод з'єднання з використанням металевої муфти та двокомпонентного епоксидного клею (Рисунок 4.5). Для з'єднання використано: арматуру $\varnothing 12$ мм (Рисунок 4.5, поз. 1); стержень нітинолу $\varnothing 8$ мм довжиною 300 мм (Рисунок 4.5, поз. 2); з'єднувальна муфта $\varnothing 18$ мм довжиною 120 мм (Рисунок 4.5, поз. 3); чотири болти М6 у якості фіксуючих різьбових штифтів (Рисунок 4.5, поз. 4).

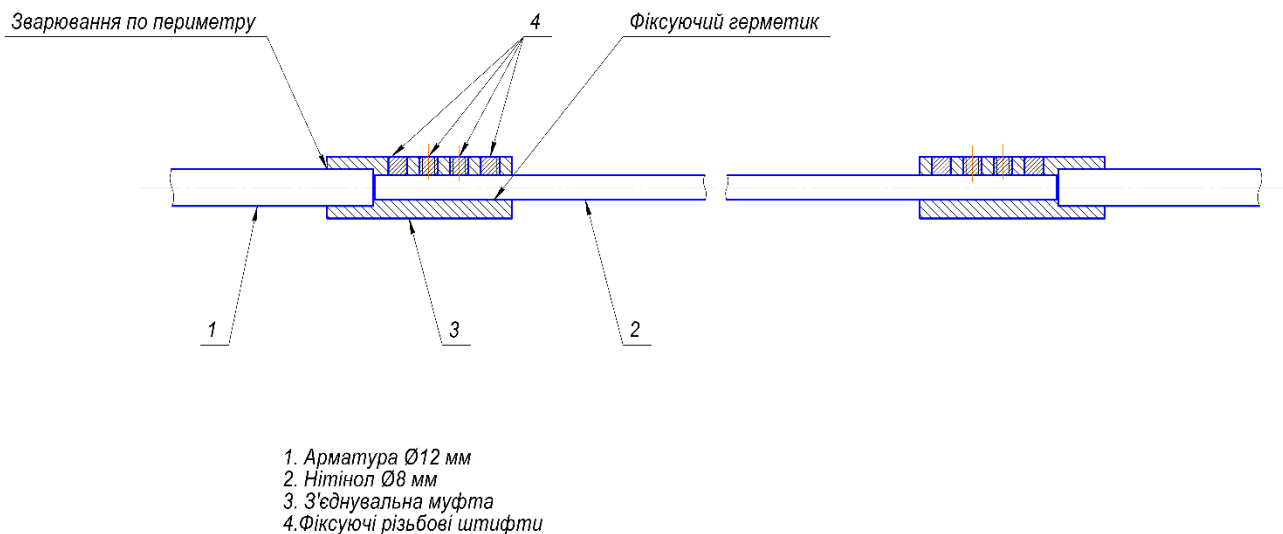


Рисунок 4.5. Схематичне зображення з'єднання арматури з нітинолом

Для виготовлення муфти було використано сталевий гарячекатаний круглий прокат зі сталі 40Х діаметром 18 мм і довжиною 120 мм (Рисунок 4.5, поз. 3). Спершу в прокаті просвердлили наскрізний отвір діаметром 8,5 мм. Центруючись по цьому отвору, з протилежного кінця арматури виточили діаметр 13 мм на глибину 60 мм. Ці операції було виконано на токарному верстаті з використанням відповідних свердел для точного внутрішнього оброблення. Додатково, в муфті просвердлили чотири бокових отвори, в яких була нарізана різьба М6 (Рисунок 4.5, поз. 4) для подальшого закріплення болтів.

Процес з'єднання розпочався з поміщення ребристої арматури діаметром 12 мм (Рисунок 4.5, поз. 1) у муфту, після чого арматуру надійно зафіксували до муфти за допомогою кутового електрозварювання постійним струмом. Після вистигання до кімнатної температури, за допомогою статичного змішувача і монтажного пістолета, високоміцну епоксидну композицію TEROSON EP 5055

фірми Henkel було нанесено на внутрішню поверхню отвору муфти, діаметром 8,5 мм, під нітиноловий стержень.

Стержень з нітинолу (Рисунок 4.5, поз. 2) плавними циклічними рухами з прокручуванням поміщено у муфту, що забезпечило витіснення повітря і залишкового епоксиду крізь отвори з різьбою. Виконано фіксацію нітинолу 4-ма болтами М6 класу міцності 10,9 до максимально-допустимого ступеня затягування.

Отриманий виріб залишено у стані спокою на понад 12 годин, необхідних для полімеризації епоксидної композиції, що забезпечило максимальну міцність з'єднання нітинолу з муфтою. Частини болтів, що виступали з муфти, було видалено, а поверхню зачищено абразивом, зберігаючи геометричну форму.

Дане з'єднання перевірено на міцність за одновісного розтягу на сервогідравлічній машині СТМ-100 (Рисунок 4.6).



Рисунок 4.6. Випробування муфтового з'єднання на СТМ-100

Результати випробування даного з'єднання представлено діаграмою залежності зусилля F до деформацій Δ (Рисунок 4.7) за одновісного навантаження

на розтяг. По горизонтальній осі відкладена деформація Δ в міліметрах (мм), по вертикальній осі – зусилля F в кілоньютонах (кН).

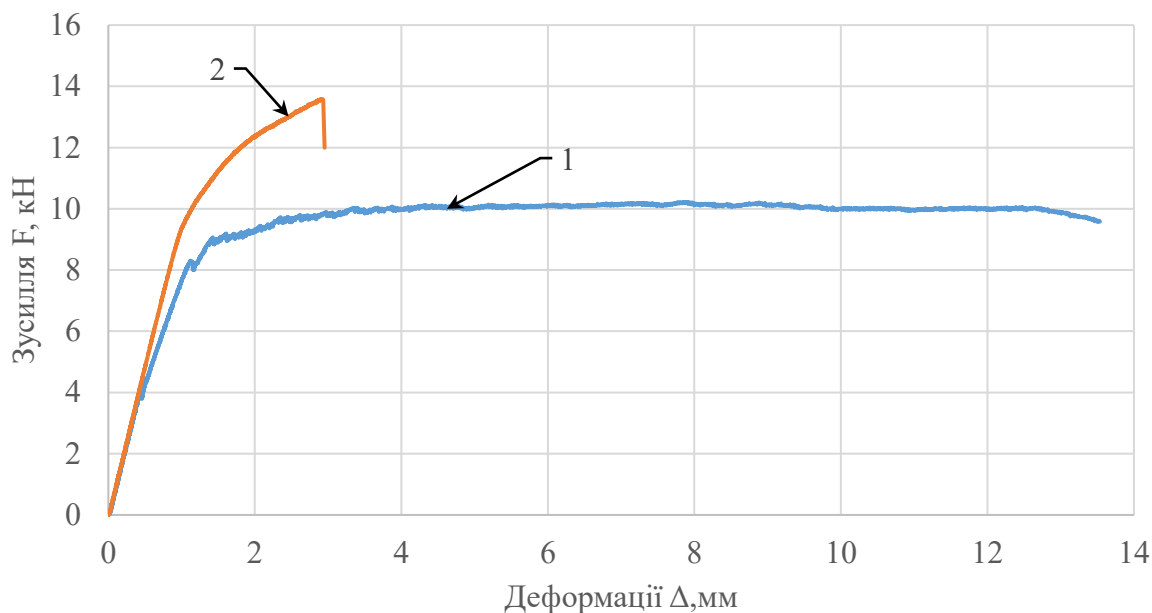


Рисунок 4.7. Діаграми розтягу з'єднання сталевих муфт та епоксидом

На даній діаграмі представлено дві криві:

Крива зусилля-деформації під номером 1 – демонструє процес деформації матеріалу під навантаженням, яке досягає приблизно 10 кН при деформації близько 4 мм. Після цього, зразок досягає певного плато деформації без значного збільшення зусилля. Дане плато демонструє поведінку роботи нітинолу, а саме етап аустенітно-мартенситного перетворення. Деформації продовжувались до максимально допустимих переміщень штоку випробувальної машини СТМ-100.

Крива зусилля-деформації під номером 2 демонструє повторне навантаження зразка після збільшення розмаху переміщення штоку випробувальної машини. Навантажено до 13,57 кН при деформації 2,92 мм. Після цього спостерігається різке зниження зусилля, зумовлене відривом кріплення арматури до захвату випробувальної машини СТМ-100.

4.2. Розроблення модельного зразка будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами

Для розроблення модельного зразка будівельної конструкції, взято за зразок дослідження однометрової залізобетонної балки зі вставками нітинолу, довжиною 200 мм, посередині довжини робочої арматури (Рисунок 4.8) [108].

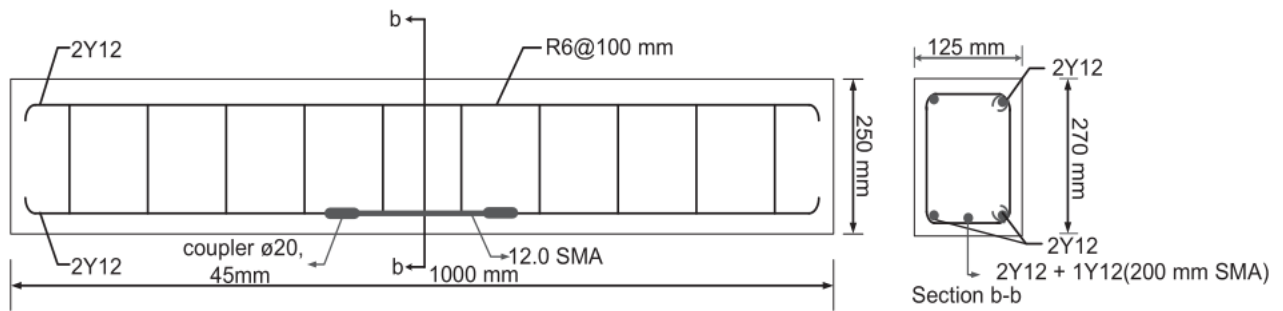


Рисунок 4.8. Схема залізобетонної балки з СПФ-вставкою взірця [108]

Для дослідження було виготовлено натурний зразок залізобетонної балки зі вставками нітинолу, довжиною 300 мм. Бетонну суміш виготовлено із портландцементу ПЦ ІІ 400, щебеню фракції 5-20 мм та піску будівельного. Відношення компонентів становило 1:1,6:3,2:0,6 (цемент: пісок: щебінь: вода). Арматура класу 400 С використовувалася з мінімальними значеннями межі текучості ($\sigma_{0,2}$) 607 МПа та межі міцності (σ_u) 678 МПа, згідно з сертифікатом постачальника. Нітинол застосовано з використанням муфтового з'єднання описаного у підрозділі 4.1.

Геометричні розміри залізобетонної балки становили 140x80x1250 мм. Арматування одинарне із загальною довжиною 1240 мм. Захисний шар бетону становив 25 мм. Додатково виготовлено залізобетонні балки без нітинолу для порівняння поведінки. Також, для визначення міцності бетону, відлито бетонні призми із розмірами 40x40x160 мм, відповідно до ДСТУ [109]. Такий розмір призми забезпечує відсутності впливу тертя на міцність бетону. Випробування проводились методом одноосового стиску та триточкового згину на сервогідролічній машині СТМ-100.

Під час випробування на одноосьовий стиск зразки встановлювались вертикально між пресові штоки і піддавались поступово-зростаючому навантаженню до моменту руйнування (Рисунок 4.9). Програмним продуктом Test Buikder, виконувався запис даних (20 записів за секунду).



Рисунок 4.9. Зруйнована бетонна призма за одноосьового стиску

Для визначення міцності бетону на розтяг проводилось випробування триточковим згином (Рисунок 4.10). Відстань між опорами становила 120 мм, діаметр опорних роликів – 24 мм, а радіус пуансона – 10 мм. Навантаження зразків відбувалось зі швидкістю 0,2 мм/сек. Зразки встановлювались на опори так, щоб середина зразка була під пуансоном. Навантаження прикладалось до моменту руйнування. Запис даних виконано із частотою 20 записів за секунду.



Рисунок 4.10. Зруйнована бетонна призма за триточкового згину

Результати випробувань представлені кривими руйнування бетону за одноосьового стиску (Рисунок 4.11) та за триточкового згину (Рисунок 4.12). дозволили визначити модуль пружності бетону, максимальні навантаження руйнування за одновісного стиску та розтягу згину, межі міцності на стиск та розтяг, початок нелінійної поведінки бетону та інших параметри для моделювання.

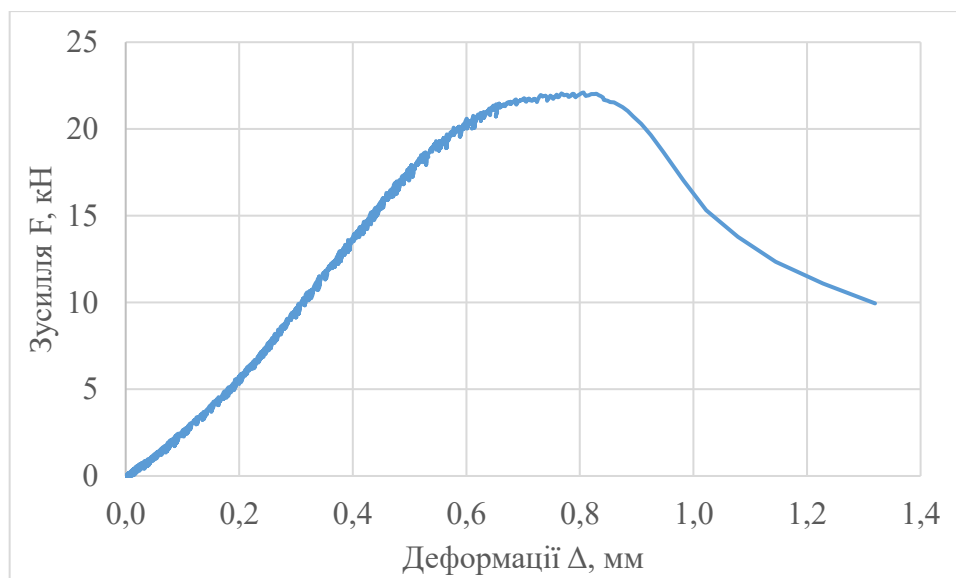


Рисунок 4.11. Крива руйнування бетону за одноосьового стиску

Із результатів зламу бетонних призм за одноосьового стиску визначено, що зусилля руйнування бетону становить 22 кН. Це означає, що характеристична значення призмової міцності виготовленого бетону становить 13 МПа. Дана міцність відповідає класу бетону С12/15.

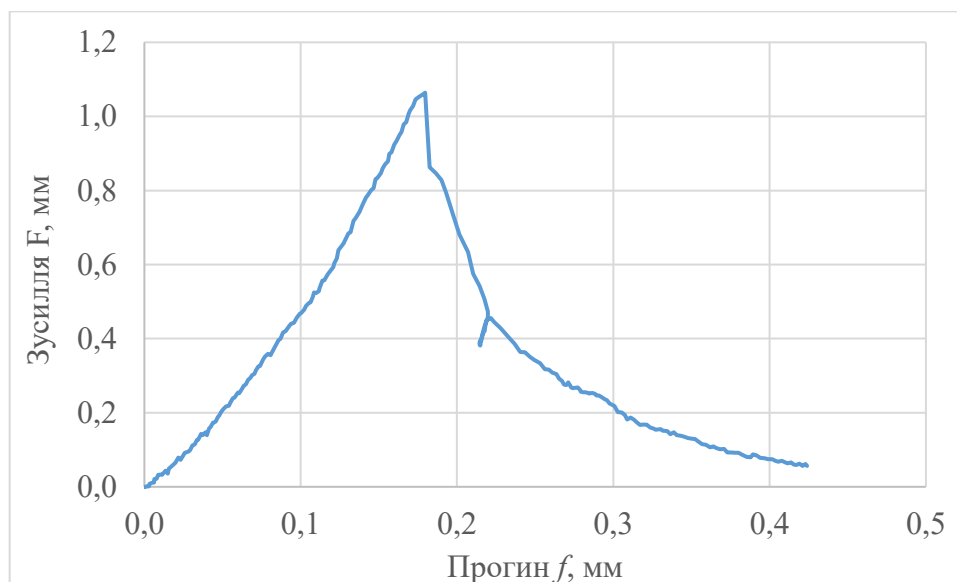


Рисунок 4.12. Крива руйнування бетонної призми за триточкового згину

Із результатів зламу бетонних призм за триточкового згину визначено, що зусилля руйнування бетону становить 1,1 кН. Це означає, що характеристична міцність виготовленого бетону на розтяг становить 2,5 МПа. Дана міцність відповідає класу бетону С20/25.

Оскільки міцність бетону на стиск відповідає класу міцності бетону С12/15, а міцність бетону на розтяг – С20/25, для моделювання та порівняння обрано клас міцності бетону С12/15.

Аналітичним методом визначено очікувану несучу здатність залізобетонної балки з розмірами поперечного перерізу 140x80 мм за чотириточкового згину. Матеріали балки: бетон класу С12/15 ($f_{ck,cube} = 15$ МПа $E_{ck} = 20$ ГПа) та арматура класу А400С 1Ø12 ($f_{yk} = 600$ МПа). Розрахунки виконано згідно будівельним нормам [110] за формулами (4.1), (4.2), (4.3).

$$M_u = \zeta f_{yk,d} A_s d \quad (4.1)$$

$$\zeta = 1 - 0,4\xi \quad (4.2)$$

$$\xi = \frac{f_{yk,d} \times A_s}{0,8 \times f_{ck,d} \times b \times d} \quad (4.3)$$

Відповідно, очікувана несуча здатність залізобетонної балки, без використання додаткового армування у стиснутій зоні, становить 23 кН.

Відповідно до п.п.7.4.4.5 [111], допустимий прогин залізобетонної балки без СПФ-вставки – 8 мм.

4.3. Експериментальні дослідження експлуатаційних і функціональних характеристик модельного зразка

Залізобетонні балки розмірами 140x80x1250 мм із одиничним армуванням із застосуванням СПФ-вставки та без неї досліджено під дією чотириточкового згину на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 (Рисунок 4.13). Опори розведені на відстань 1200 мм, відстані між опорами та зусиллями – 400 мм. На установці моделюється поведінка двохшарнірної вільноопертої балки.

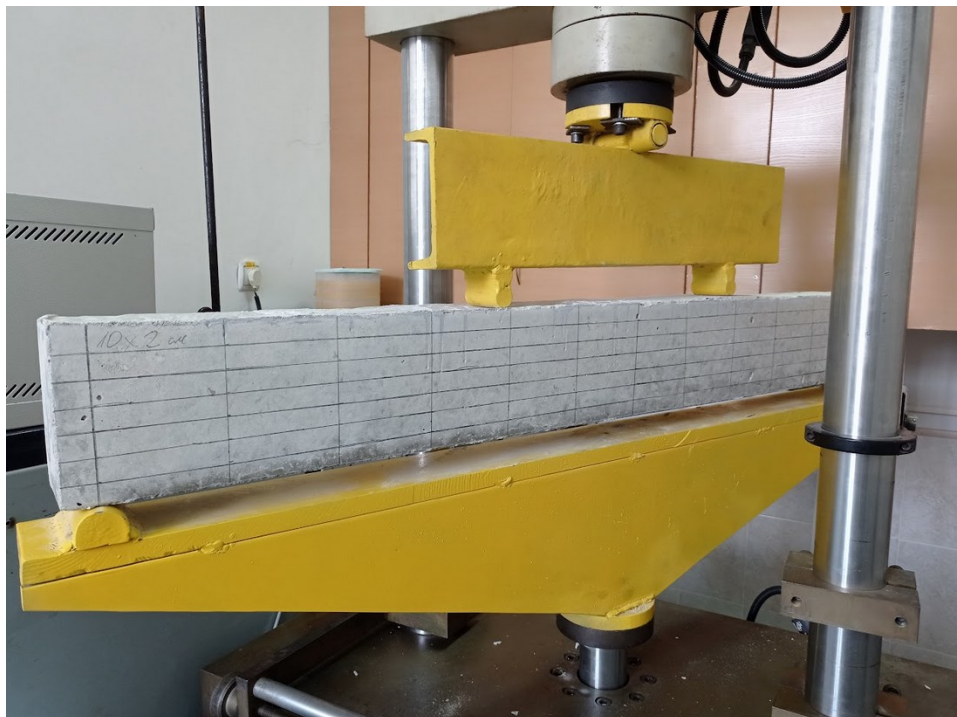


Рисунок 4.13. Фото залізобетонної балки на випробувальній машині СТМ-100

Графік на Рисунку 4.14 ілюструє залежність зусилля F (в кН) від часу t (в с) під час циклічного навантаження залізобетонної балки. Вимірювання проводились при циклічному навантаженні з частотою 0,5 Гц. Амплітуда навантаження зростала на 2 кН кожні 3 цикли.

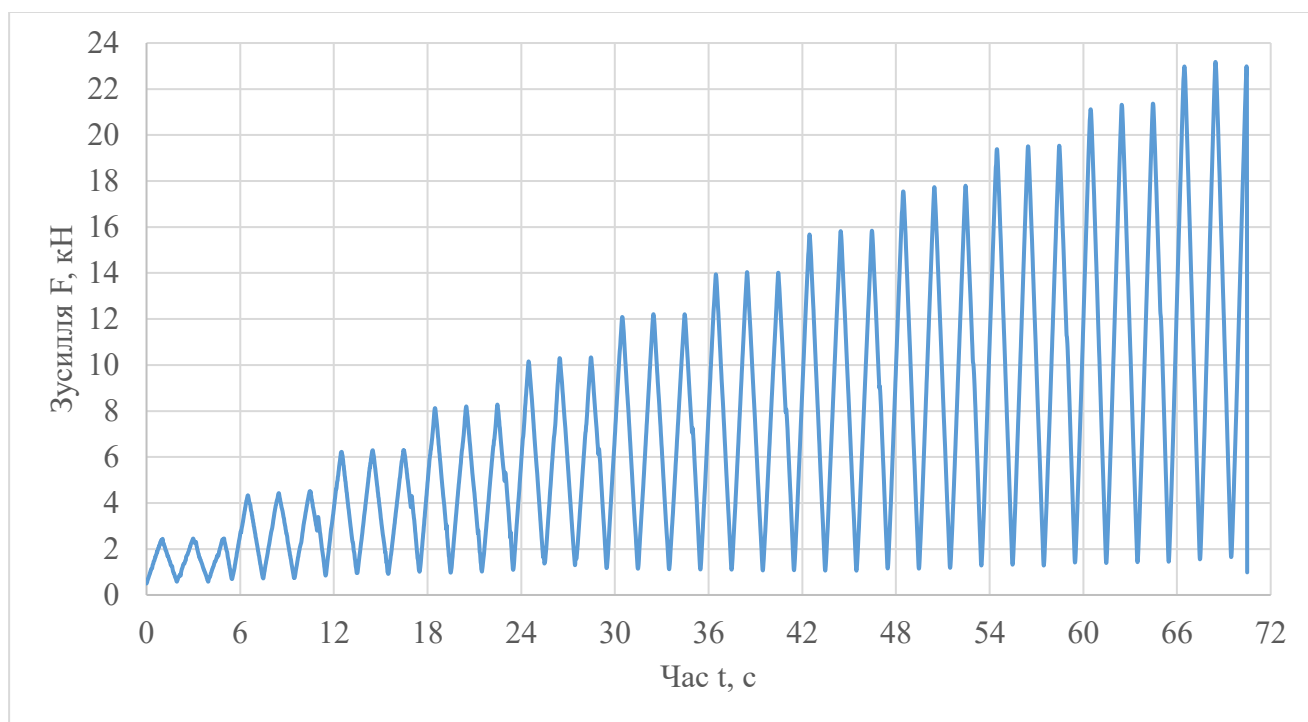


Рисунок 4.14. Шлях циклічного навантаження на залізобетону балку

На початку експерименту навантаження було мінімальним і збільшувалося поступово. Як видно з графіку, амплітуда навантаження збільшується кроками приблизно кожні 6 секунд, що відповідає 3 циклам при частоті 0,5 Гц.

Кожна хвиля на графіку відображає один цикл навантаження, а зростання пікових значень хвиль показує поступове збільшення амплітуди навантаження. Такий характер навантаження дозволяє визначити кілька важливих параметрів:

Загалом, графік чітко демонструє прогресивне збільшення навантаження, що допомагає визначити ключові параметри поведінки залізобетонної балки під час циклічного навантаження.

Із результатів випробування залізобетонної балки зі звичайним армуванням побудовано залежність зусилля F (в кН) від прогину f (в мм) під дією циклічного

навантаження (Рисунок 4.15). Графік показує поступове збільшення навантаження, що веде до руйнування балки.

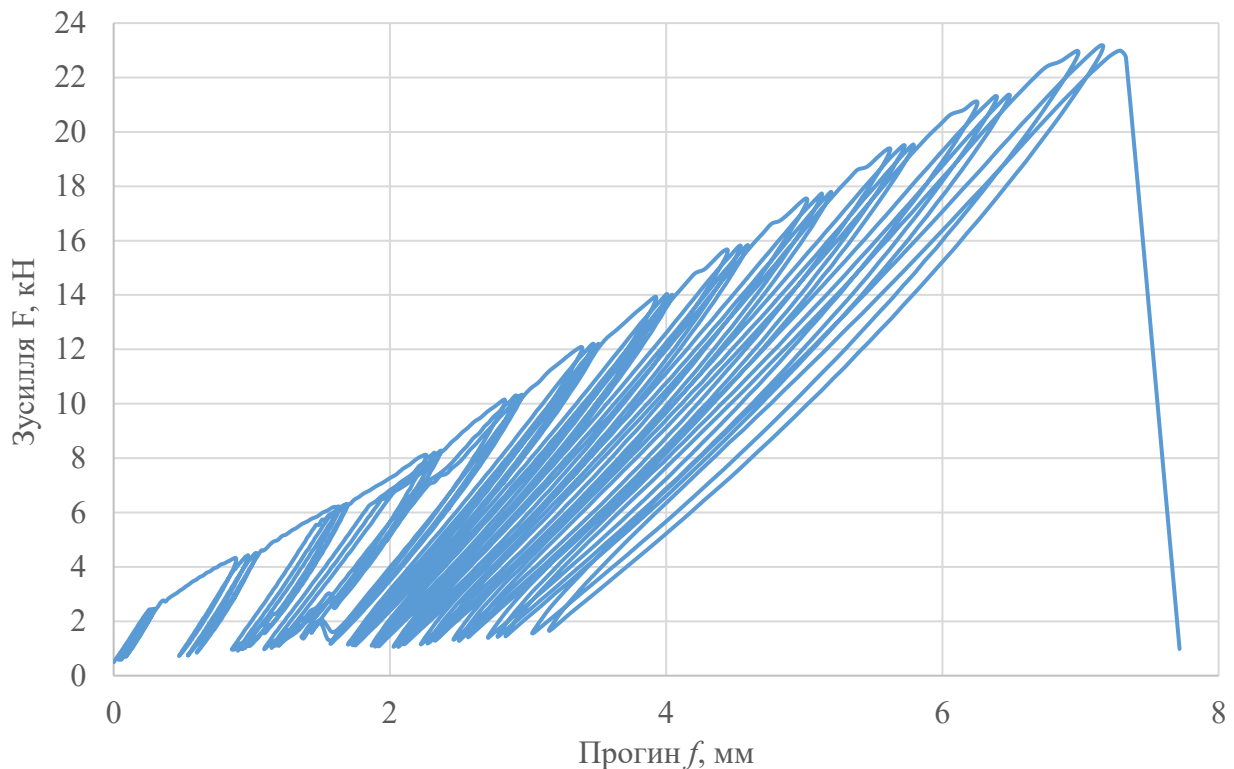


Рисунок 4.15. Залежність зусилля від прогину під час циклічного навантаження залізобетонної балки

Можна виділити такі основні етапи поведінки балки: початкова фаза навантаження, фаза розвитку тріщин, фаза критичного навантаження та руйнування.

На початковій фазі навантаження спостерігається поступове збільшення зусилля з невеликим прогином, що вказує на еластичну поведінку балки. Ця фаза характеризується лінійною залежністю зусилля від прогину, що свідчить про збереження цілісності матеріалу без значних пошкоджень.

Зі збільшенням навантаження зусилля продовжує зростати, але починають утворюватися тріщини, що видно по зміні нахилу кривих на графіку. Виникнення і розвиток тріщин призводить до збільшення прогину при відносно менших зростаннях зусилля, що свідчить про початок пластичної деформації та часткову втрату міцності.

Балка досягає максимального зусилля у 22,99 кН при прогині 7,29 мм. Після досягнення цієї точки відбувається різке падіння зусилля, що свідчить про початок руйнування балки. Цей момент є критичним, оскільки після нього балка втрачає здатність витримувати додаткове навантаження.

Після досягнення максимального зусилля балка не витримує подальшого навантаження і руйнується, що підтверджується різким спадом зусилля на графіку. Ця фаза є кінцевою і демонструє повну втрату несучої здатності конструкції.

Також було побудовано залежність зусилля F (в кН) від прогину f (в мм) під дією циклічного навантаження з результатів випробування залізобетонної балки зі СПФ-вставкою (Рисунок 4.16).

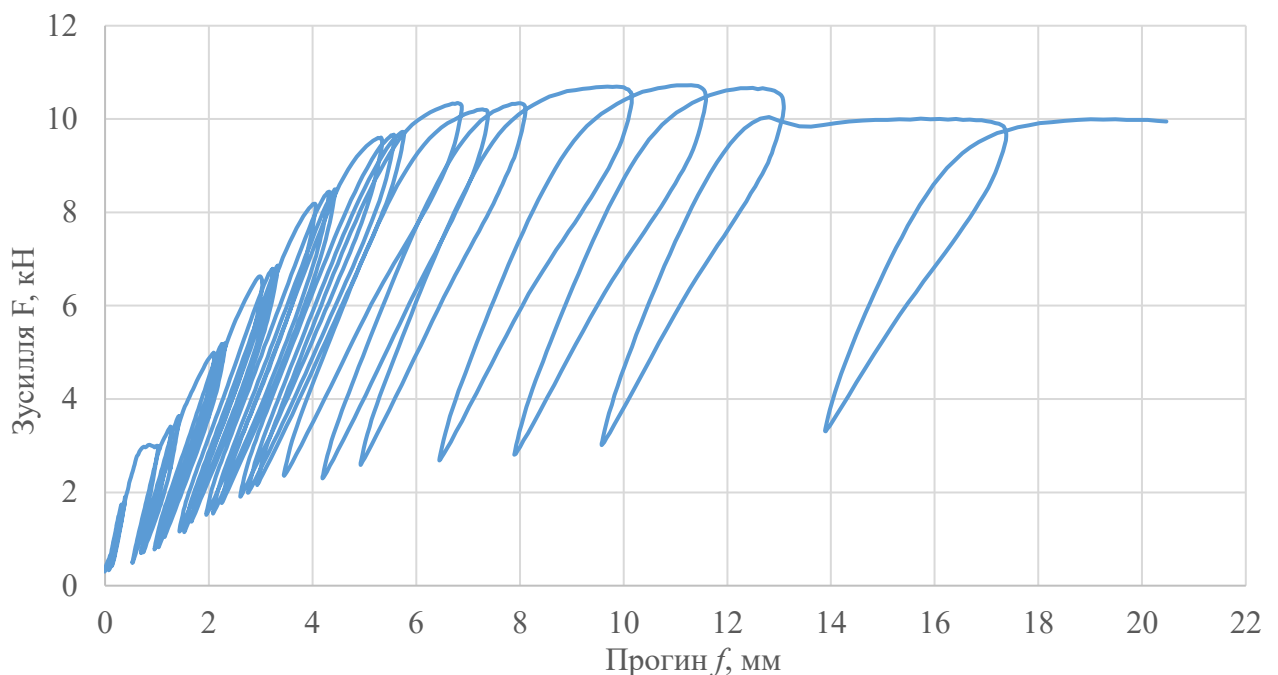


Рисунок 4.16. Залежність зусилля від прогину під час циклічного навантаження залізобетонної балки зі СПФ-вставкою

Цю залежність можна розділити на такі основні етапи: початкова фаза навантаження, утворення тріщин і вплив нітинолової вставки.

На початковій фазі навантаження зусилля поступово зростає, що супроводжується невеликим прогином. Цей етап характеризується переважно еластичною поведінкою балки без видимих тріщин.

При прогині 5,59 мм та зусиллі 9,63 кН спостерігається утворення тріщин у бетоні, що вказує на початок зміни механічних властивостей балки. Нітиноловий стержень, інтегрований у середину прольоту балки, впливає на деформівність конструкції. Після утворення тріщин прогин продовжує збільшуватись при відносно стабільному зусиллі.

Після досягнення прогину у 12 мм на графіку видно, що зусилля зменшилось до 10 кН, тоді як прогини збільшилися до 17 мм. Це вказує на інтенсивний розвиток тріщин у бетоні, зумовлений зменшенням жорсткості конструкції, що відбувається на початку фазового перетворення у СПФ-стержні. Проте, при розвантаженні балки зі СПФ-вставкою, спостерігається зменшення прогинів на 3,5 мм. Отже, залізобетонна конструкція все ще не перейшла у стан повзучого руйнування та продовжує нести навантаження, яке не перевищує 10 кН.

Порівнюючи поведінку обох типів балок, можна зробити наступні висновки:

Для балок без нітинолових вставок максимальне зусилля, при якому відбувається крихке руйнування, становить 22,99 кН. У випадку з балками, що мають нітиноловий стержень, руйнування відбувалося пластично. Визначити зусилля повної руйнації балки з СПФ-вставкою не вдалося.

Балка без нітинолових вставок руйнується при прогині 7,29 мм. У той же час, для балки з нітиноловим стержнем утворення тріщин відбувається при прогині 5,59 мм. Після цього, при подальшому збільшенні навантаження, спостерігається значне збільшення прогину, що особливо помітно після досягнення прогину у 12 мм, де максимальний прогин перевищує 20 мм. Така поведінка вказує на підвищену здатність до деформації та адаптації до навантажень у балок з нітиноловими вставками.

У балок без нітинолових вставок розвиток тріщин менш помітний. Це зумовлено жорсткістю конструкції, що у подальшому призвело до крихкого руйнування балки. Відсутність значних змін у зусиллі після досягнення максимального прогину свідчить про те, що після зняття навантаження балка не повертається до попередньої форми. Залишкові деформації накопичуються із

кожним циклом. У останніх циклах навантаження, арматурі вдалось відновити 0,4 % власної довжини.

Натомість, у балок з нітиноловими стержнями досягнення прогину у 12 мм, графік демонструє зменшення зусилля при подальшому збільшенні прогину. Це свідчить про те, що нітинолові вставки допомагають частково поглинати деформації. Завдяки псевдопружним властивостям нітинолу, при знятті деформації, нітинолу вдалось відновити 1,17 % власної довжини. Це підтверджується більшими значеннями відновлених деформацій порівняно з балкою без нітинолу (Рисунок 4.17). Так на 16-му циклі навантаження, балка із СПФ-вставкою у 1,7 разів (на 66%) краще відновила деформації згину.

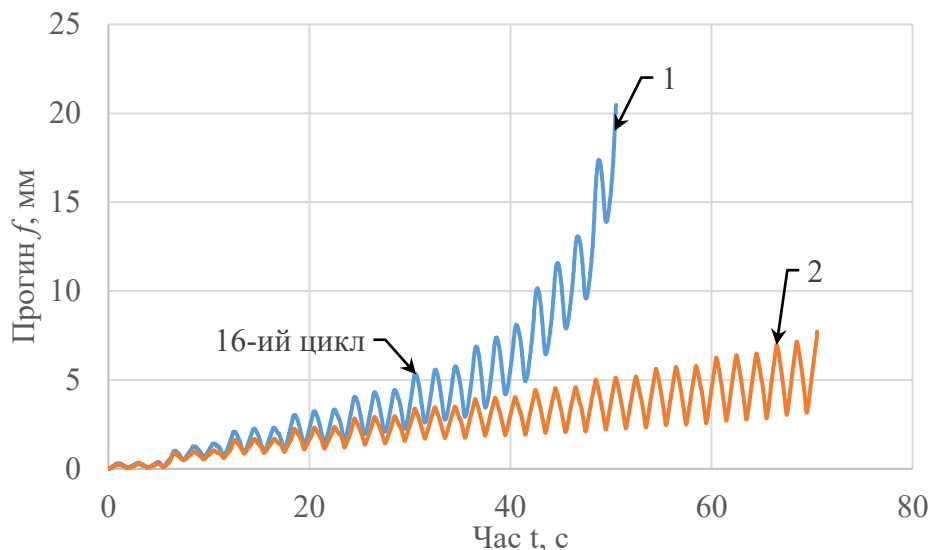


Рисунок 4.17. Залежність прогину від часу за циклічного навантаження залізобетонних балок із СПФ-вставкою (1) та без СПФ-вставки (2)

Наявність тріщин у бетоні свідчить про те, що бетон вже не справляється з навантаженням. Тріщини є індикатором того, що бетон працює в зоні своїх граничних можливостей. Арматура з нітинолу бере на себе основне навантаження після появи тріщин. Завдяки псевдопружним властивостям, нітинол може витримувати значні деформації і повертатися до початкового стану після зняття навантаження. Нітинол продовжує забезпечувати несучу здатність балки навіть при наявності тріщин у бетоні.

Отже, балка вважається зруйнованою, якщо вона більше не може виконувати свою несучу функцію, тобто не здатна витримувати передбачені навантаження без значної деформації або ризику повного руйнування. Проте, якщо арматура з нітинолу ефективно працює і забезпечує несучу здатність балки, навіть при наявності тріщин, балка може вважатися функціональною.

4.4. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі наукової роботи шляхом використання вставки із псевдопружного СПФ у залізобетонній балці підвищено її деформівності за малоциклових навантажень, а також вирішено проблематику з'єднання елемента СПФ у вигляді прутка діаметром 8 мм із робочою арматурою 12 мм в діаметрі.

Проведено експериментальні дослідження з використанням полімерних матеріалів PLA+, T-PLA та Elastan D100 для виготовлення прототипу муфти. Найкращий результат міцнісних властивостей показав матеріал PLA+, в якому на 15 МПа більша міцність згину і лиш на 8 МПа менша міцність розтягу, у порівнянні з T-PLA.

На основі проведених досліджень запропоновано метод з'єднання стержня із псевдопружного NiTi сплаву із арматурою з використанням металевої муфти та епоксидного клею, який забезпечив вищу контактну міцність з'єднання у понад 37 разів, у порівнянні з прототипом.

Розроблено та випробувано модельний зразок залізобетонної балки зі вставками нітинолу під дією малоциклового навантаження. Виявлено, що руйнування ЗББ відбувається при значенні прогину 7,3 мм, а в ЗББ-СПФ при – 20,3 мм, що підвищує деформівність конструкції у 2,8 разів, у порівнянні із залізобетонною балкою з арматурою 600С.

Експериментально встановлено, що деформівність балки із СПФ-вставкою, почалась при навантаженні у 2,1 раз меншим, ніж зруйнувалася балка без СПФ. Це зумовлено тим, що межа текучості арматури 600С у 1,8 рази вища від напруження початку фазового переходу СПФ.

Показано, що балка із СПФ-вставкою здатна відновлювати форму, а саме зменшення значення прогинів із кожним наступним циклом навантаження. Так, на 16-му циклі балка із СПФ-вставкою відновила у 1,7 разів більше значення прогину, ніж залізобетонна балка з арматурою 600 С.

Також використання СПФ у конструкціях змінює їх характер руйнування. Вставка із СПФ зумовила повільне пластичне руйнування залізобетонної балки, а відсутність такої вставки – до різкого крихкого руйнування залізобетонної балки.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

5.1. Створення скінченно-елементної моделі будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами

Використовуючи програмне забезпечення ANSYS 2024 R1, створено проект моделюючого розрахунку залізобетонної балки із СПФ-елементом. Початковим етапом моделювання було створення задачі розрахунку конструкцій Static Structural. У першому розділі даної задачі Engineering Data було створено матеріали із нелінійною фізико-механічною поведінкою: бетон (Бетон C12/15), арматура (Арматура 600С) та нітинол ($\text{Ni}_{55,75} \text{Ti}_{44,15}$) (Рисунок 5.1).

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Ni55.75 Ti44.15			E	
4	Арматура 600С				
5	Бетон C12/15			G	
*	Click here to add a new material				

Рисунок 5.1. Створені матеріали моделювання

Відповідно до описаної методики у розділі 2.3. та результатів досліджень у Розділ 3, сформовано властивості досліджуваного нітинолу $\text{Ni}_{55,75} \text{Ti}_{44,15}$ для створення цифрової моделі поведінки у середовищі ANSYS Workbench 2024 R1 (Рисунок 5.2). Значення густини подано у грамах на сантиметр кубічний, модулі пружностей у фазах аустеніту та мартенситу, напруження перетворень подані у мегапаскалях.

Properties of Outline Row 3: Ni55.75 Ti44.15				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	6.45	g cm ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	72400	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.36		
10	Bulk Modulus	8.619E+10	Pa	
11	Shear Modulus	2.6618E+10	Pa	
12	Superelasticity			
13	Sigma SAS	332	MPa	
14	Sigma FAS	368	MPa	
15	Sigma SSA	174	MPa	
16	Sigma FSA	103	MPa	
17	Epsilon	0.054	m m ⁻¹	
18	Alpha	0		
19	Es	72400	MPa	

Рисунок 5.2. Властивості Ni_{55,75}Ti_{44,15} у середовищі ANSYS

Проведено верифікацію властивостей моделі нітинолу із експериментальним зразком. Для цього, згідно методики моделювання властивостей СПФ, описаної у розділі 2.3. задано амплітуду переміщення у 0,6 мм та виконано розрахунок. Результати експерименту та моделювання (Рисунок 5.3) дозволили зробити наступні висновки.

Початкова еластична деформація демонструє різке збільшення напруження до 332 МПа при деформації до 0,54% як в моделі, так і в експериментальних даних. Це свідчить про правильність моделювання еластичної поведінки нітинолу на початковій стадії навантаження. В псевдопружній зоні модель адекватно відображає поведінку, де напруження плавно зростає до 368 МПа при збільшенні деформації до 6%. Експериментальні дані також підтверджують цей феномен, хоча мають певний розкид навколо теоретичної кривої, зумовлений високою частотою записів даних (200 записів за секунду).

При зворотному ході деформації модель демонструє зменшення напруження приблизно до 130 МПа при деформації 2%, що добре узгоджується з експериментальними спостереженнями. Це свідчить про правильне моделювання

процесу розвантаження та зворотного переходу фаз. Модель також показує добре виражену гістерезисну петлю, що є характерним для матеріалів з пам'яттю форми. Експериментальні дані підтверджують наявність гістерезису.

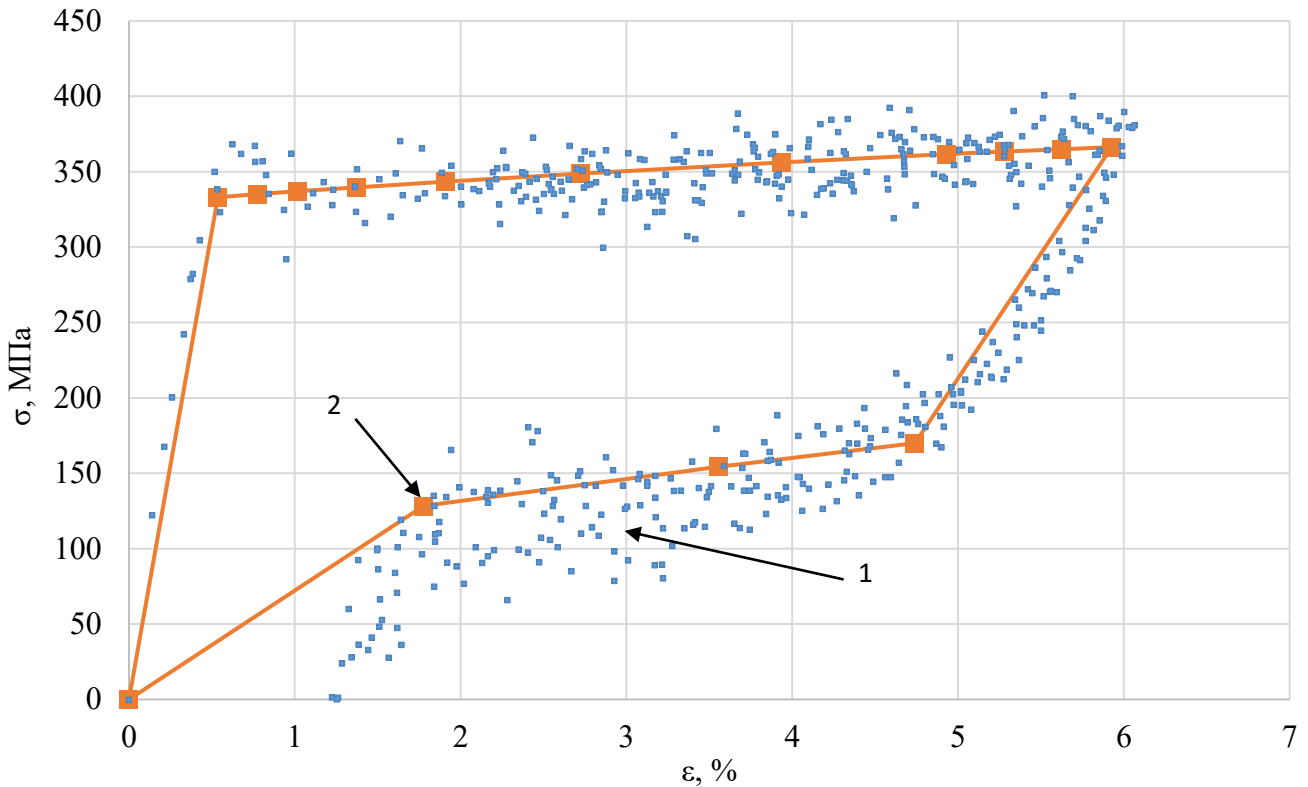


Рисунок 5.3. Петлі гістерезису натурального зразка (1) та моделі (2) $\text{Ni}_{55,75}\text{Ti}_{44,15}$

Загальна форма петель гістерезису та ключові точки деформації добре узгоджуються з моделлю. Це свідчить про адекватність моделі для прогнозування поведінки нітинолу при циклічних навантаженнях. Проведена верифікація властивостей моделі нітинолу $\text{Ni}_{55,75}\text{Ti}_{44,15}$ показала її високу відповідність експериментальним даним. Модель адекватно відображає ключові характеристики поведінки матеріалу з пам'яттю форми, такі як початкова еластична деформація, псевдопружна поведінка, зворотний хід деформації та гістерезисна петля. Виявлені розбіжності між моделлю та експериментальними даними можуть бути пов'язані з неоднорідністю натурального зразка та технічними аспектами проведення експериментів, що потребує подальшого дослідження та уточнення.

Рисунок 5.4 відображає властивості арматури 600С у середовищі ANSYS. Необхідні параметри взяті з наданого сертифікату виробника PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih, що забезпечує точність і достовірність моделювання.

























Properties of Outline Row 4: Арматура 600С				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Density	7850	kg m ⁻³	 
4	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	 Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹	 
6	 Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	2.1E+05	MPa	 
9	Poisson's Ratio	0.3		
10	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa	
11	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa	
12	 Bilinear Isotropic Hardening			
13	Active Table	Total		
14	Yield Strength	600	MPa	 
15	Tangent Modulus	4000	MPa	 

Рисунок 5.4. Властивості арматури 600С у середовищі ANSYS

З іншого боку, властивості бетону С12/15 (Рисунок 5.5), визначено експериментальним шляхом. Дослідження бетонних призм виконано на сервогідравлічній машині СТМ-100, що дозволило визначити межі міцності на стиск і розтяг та модуль пружності згідно зі стандартами [104, 105].

Додатково, із графіків руйнування бетонних призм, визначено значення пластичної деформації стиску, граничної ефективної пластичної деформації при стиску (Ultimate effective plastic strain in compression), відносного напруження при початку нелінійного зміцнення (Relative stress at start of nonlinear hardening), залишкового відносного напруження при стиску (Residual compressive relative stress), межі пластичної деформації при розтягу (Plastic strain limit in tension), залишкового відносного напруження при розтягу (Residual tensile relative stress). Детальне моделювання властивостей та поведінки бетону є важливим для

розуміння його поведінки під навантаженням, зокрема щодо утворення і розкриття тріщин, що впливає на загальну міцність і довговічність конструкції.

Properties of Outline Row 5: Бетон C12/15				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.4E-05	C ⁻¹	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	20000	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.2		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.111E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8.333E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/> Menetrey-Willam			<input type="checkbox"/>
13	<input type="checkbox"/> Menetrey-Willam Base			
14	Uniaxial Compressive Strength	11	MPa	<input type="checkbox"/>
15	Uniaxial Tensile Strength	1.6	MPa	<input type="checkbox"/>
16	Biaxial Compressive Strength	18	MPa	<input type="checkbox"/>
17	Dilatancy Angle	30	degree	<input type="checkbox"/>
18	<input type="checkbox"/> Softening			<input type="checkbox"/>
19	Active Table	Linear		
20	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0.0025		<input type="checkbox"/>
21	Ultimate Effective Plastic Strain in Compression	0.007		<input type="checkbox"/>
22	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0.6		<input type="checkbox"/>
23	Residual Compressive Relative Stress	0.2		<input type="checkbox"/>
24	Plastic Strain Limit in Tension	0.01		<input type="checkbox"/>
25	Residual Tensile Relative Stress	0.2		<input type="checkbox"/>

Рисунок 5.5. Властивості бетону C12/15 у середовищі ANSYS

У другому розділі даної задачі Geometri, у середовищі Space Claim, було створено геометричні параметри балки, а саме: прямокутний паралелепіпед із довжинами ребер 148x80x1250 мм; два циліндри діаметром 12 мм і довжиною 475 мм; один циліндр діаметром 8мм та довжиною 300 мм (Рисунок 5.6).

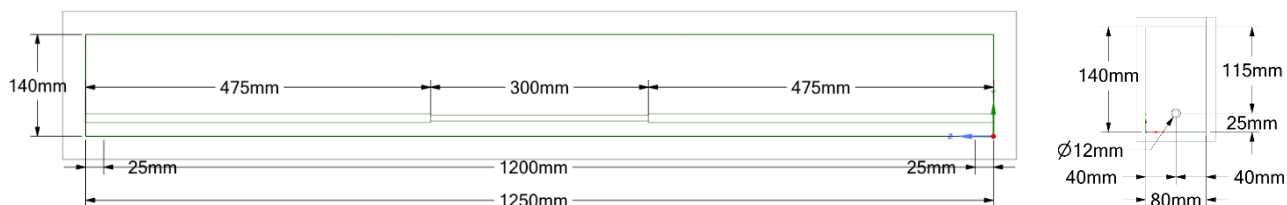


Рисунок 5.6. Геометричні розміри залізобетонної балки із СПФ

Після переходу до третього розділу Model автоматично виконується запуск модуля ANSYS Mechanical, який є інтегрованим середовищем для проведення механічного аналізу. У гілці Geometri дерева моделі Model Tree розташовано всі геометричні об'єкти задачі. Для кожного об'єкта у властивостях Details задано параметр Material Assignment на відповідний матеріал зі списку доступних матеріалів. Для прямокутного паралелепіпеда обрано матеріал Бетон C12/15, для двох циліндрів діаметром 12 мм – Арматура 600С, а для циліндра діаметром 8 мм – $Ni_{55,75}Ti_{44,15}$.

У гілці Mesh виконано поділ тіл на скінченні елементи із різними характеристиками. Поділ тіла бетону виконано із використанням тетрагональних елементів з нелінійною поведінкою Tet10 (Рисунок 5.7).

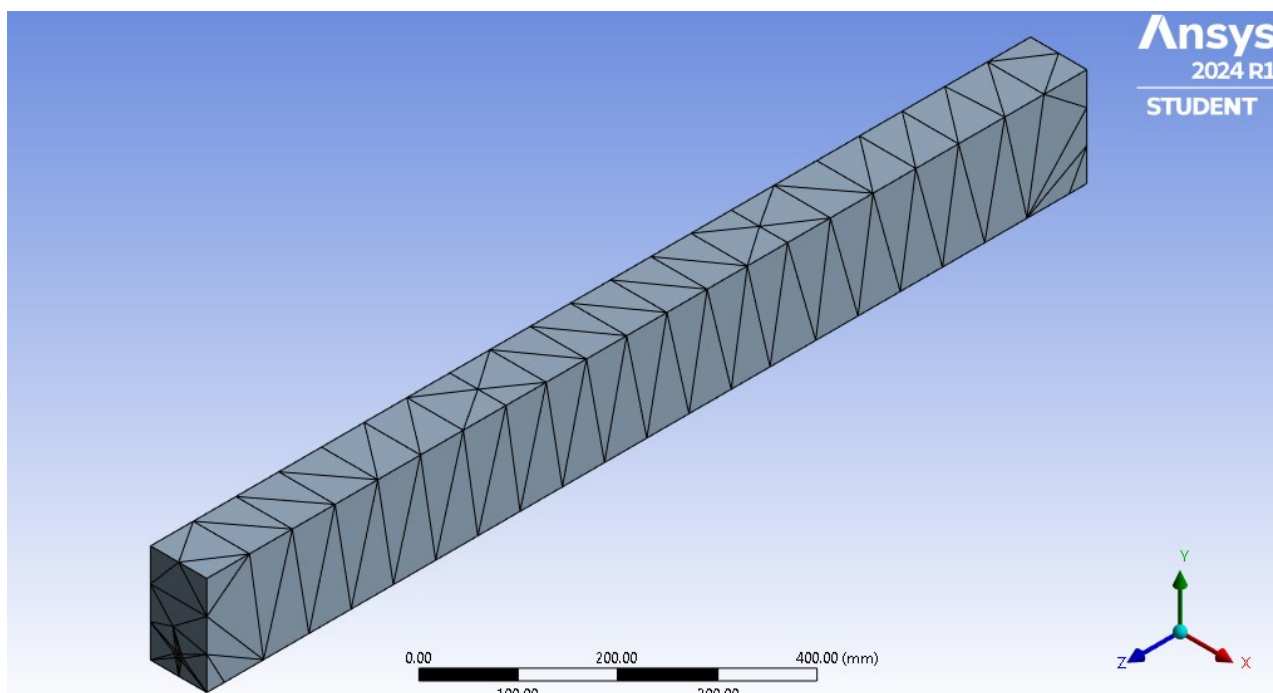


Рисунок 5.7. Поділ на скінченні елементи тіла бетону

Тетрагональні елементи є ефективними для моделювання складних тривимірних форм та деформацій, завдяки їх здатності адаптуватися до нерегулярних геометрій. Використання нелінійних елементів дозволяє враховувати зміни у властивостях матеріалів при значних деформаціях, що є важливим для адекватного моделювання поведінки конструкції під великими навантаженнями. Додатково задано параметр адаптації сітки і її елементів під час розрахунку, для підвищення точності визначення переміщень у елементах та вузлах.

Поділ тіл арматури та нітинолу виконано із використанням гексагональних елементів з нелінійною поведінкою Hex20 (Рисунок 5.8), який забезпечує підвищену точність при моделюванні тіл круглого січення матеріалу. Гексагональні елементи часто використовуються у поєднанні з тетрагональними для досягнення оптимального балансу між точністю і обчислювальними витратами.

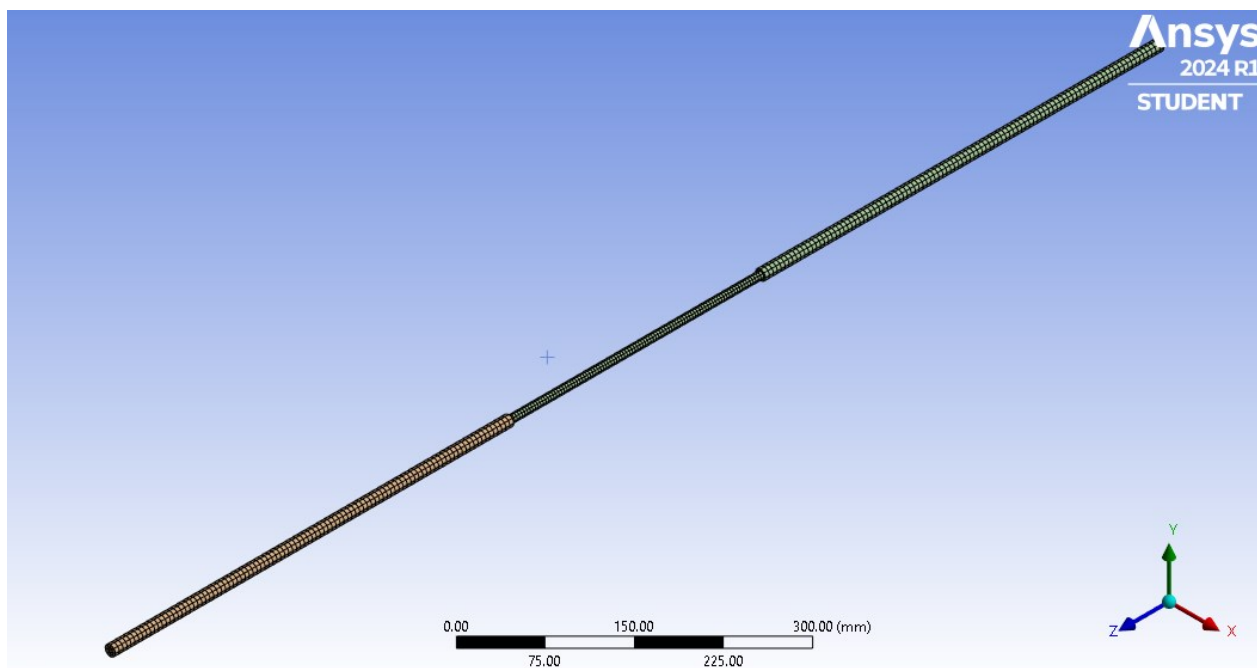


Рисунок 5.8. Поділ на скінченні елементи тіл арматур та нітинолу

Для коректного моделювання інженерної конструкції важливо задати правильні граничні умови. Граничні умови визначають, як конструкція закріплена і які навантаження на неї діють. На розрахунковій схемі (Рисунок 5.9) представлено

місця прикладання зусилля А та D зі сумарним значенням 2 кН на першому циклі. Напрямок дії сил протилежний до осі Y.

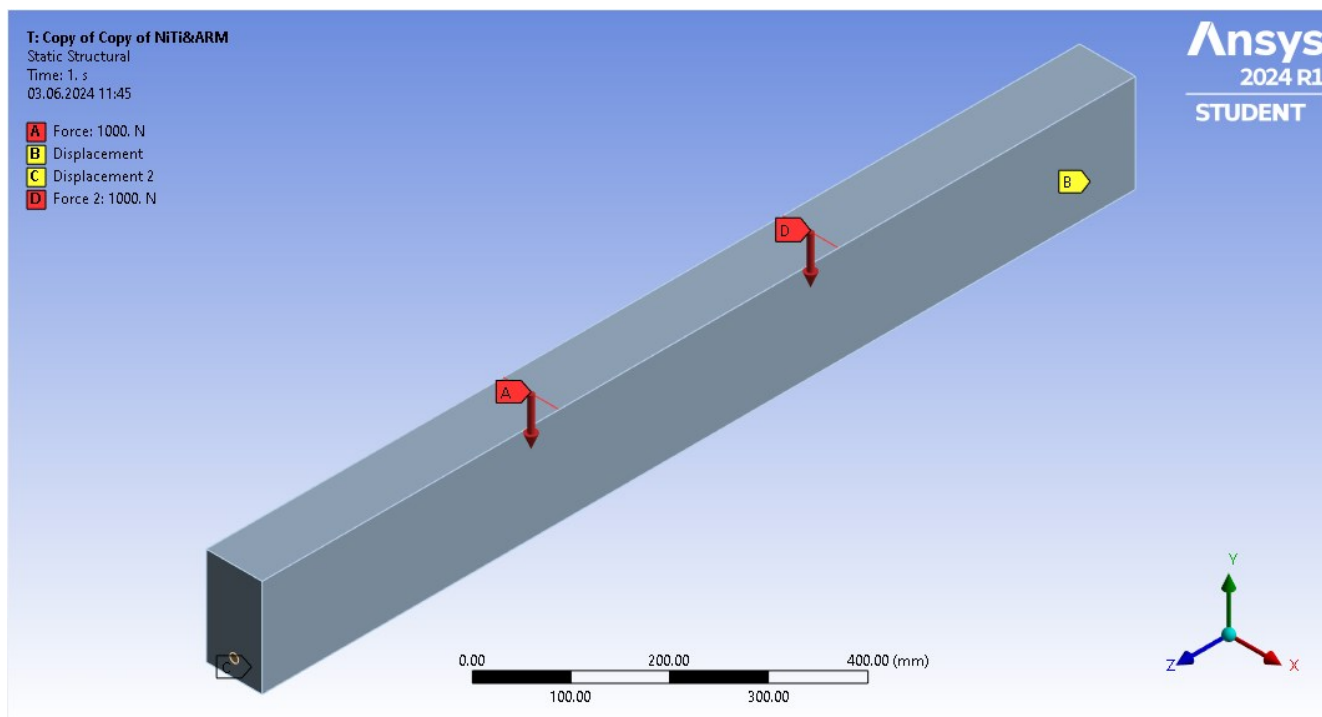


Рисунок 5.9. Розрахункова схема у середовищі ANSYS

Закріплення тіла виконано у позиціях B та C. Навантаження та закріплення геометрії застосовано на усю ширину поперечного перерізу, по верхній та нижній гранях відповідно.

Для точного моделювання реальної поведінки двохпертої залізобетонної балки умови закріплення задані методом обмеження переміщень тіла у координатних осях X, Y та Z (Таблиця 5.1). Умова повної фіксації (Displacement: 0 мм для всіх осей) використано для моделювання нерухомого шарніру, тоді як умови часткової фіксації (Displacement 2: 0 мм для X та Y осей, вільне переміщення для Z осі) використано для моделювання рухомого шарніру. Таким чином геометрична модель перебуває в умові часткового переміщення вздовж осі Z.

Таблиця 5.1. Параметри обмеження переміщень

	X	Y	Z
Displacement	0 мм	0 мм	0 мм
Displacement 2	0 мм	0 мм	Free

На графіку (Рисунок 5.10) представлено історію задання циклічного навантаження у середовищі ANSYS. Горизонтальна вісь представляє час, а вертикальна вісь показує величину прикладеного навантаження у ньютонках. Під віссю абсцис (час) позначено номери кроку навантаження. Усього передбачено 33 цикли навантаження-розвантаження. Кожні 3 цикли, амплітуда навантаження зростає на 2 кН.

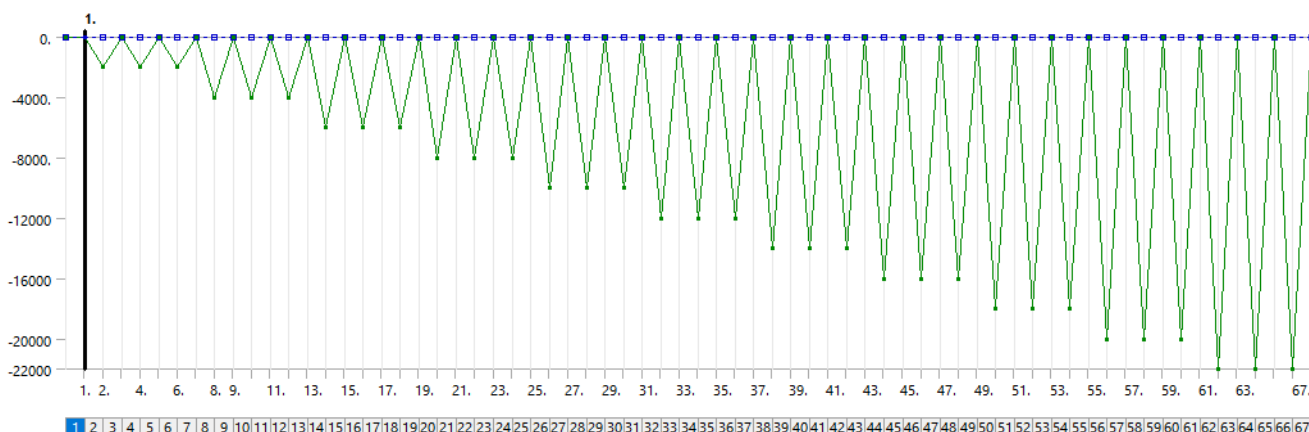


Рисунок 5.10. Історія циклічного навантаження у середовищі ANSYS

Даний графік відповідає циклічному навантаженню із натурального експерименту (Рисунок 4.14).

5.2. Результати моделювання поведінки будівельної (інженерної) конструкції із СПФ-елементами

Для верифікації отриманих результатів моделювання, побудовано залежності зусилля від прогину для моделей залізобетонної балки без СПФ-вставки (далі ЗББ, Рисунок 5.11а) та залізобетонної балки з СПФ-вставкою (далі ЗББ-СПФ, Рисунок 5.11б). Порівняння модельних результатів із експериментальними демонструє подібність поведінки для обох типів балок. Так, на 30-му циклі навантаження, модель ЗББ прогнулася на 5,35 мм, а натурна – на 5,67 мм. Модель ЗББ-СПФ на 15-му циклі навантаження прогнулась на 4,13 мм, натурна з СПФ – 4 мм. Таким чином,

підтверджено достатню точність поведінки моделей, для подальшого аналізу результатів та формування висновків.

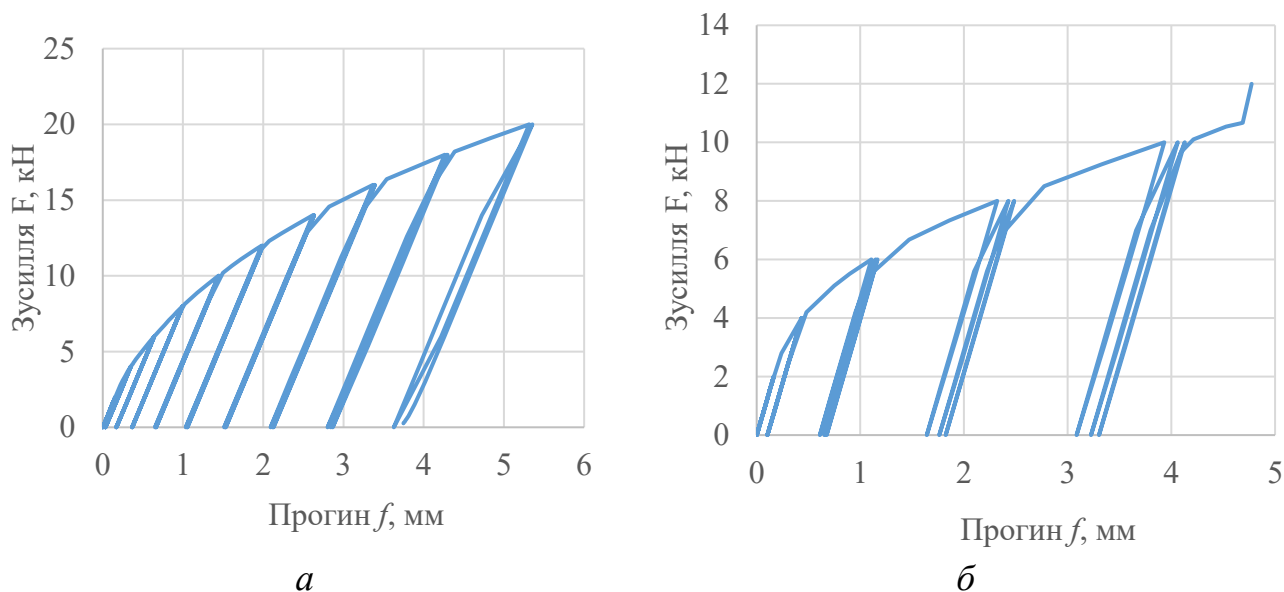


Рисунок 5.11. Залежності зусилля від прогину моделей ЗББ (а) та ЗББ-СПФ (б)

Під час розрахунку моделей відбулась адаптація сітки поділу на скінченні елементи. У моделі ЗББ, елементи скінченної сітки було змінено із тетрагональних на квадратичні для геометричного тіла бетону. У моделі ЗББ-СПФ, тип елементів не зазнав зміни, проте розміри було адаптивно змінено до 3 мм.

Аналіз отриманих результатів моделей умовно розділено на кілька основних етапів: поява тріщин у бетоні, ріст тріщин у бетоні, зупинка розрахунку системою ANSYS (зумовлено обмеженнями студентської версії).

Кожен із етапів розрахунку представлено трьома типами даних.

Перший тип – розподіл нормальних напружень вздовж осі Z за максимального навантаження циклу, що дозволяє наочно побачити зони поширення стиску та розтягу з діапазоном значень напружень.

Другий тип – розподіл нормальних напружень вздовж осі Z при розвантаженій моделі того ж циклу.

Третій тип – розподіл пластичних деформацій об'єкту Бетон С12/15 після конкретного етапу, що дозволяє побачити теоретичне поширення тріщин у бетоні.

Усі етапи представлено візуалізацією результатів розрахунку моделі ЗББ (Рисунок 5.12-Рисунок 5.23) та моделі ЗББ-СПФ (Рисунок 5.24-Рисунок 5.34).

Напруження у бетоні досягли значень міцності на розтяг (1,6 МПа) на 4-му циклі навантаження із зусиллям у 4 кН (Рисунок 5.12). Напруження у арматурі становлять не більше 25 МПа. Залишкові напруження у бетоні демонструють діапазон від -0,6 МПа до 0,4 МПа (Рисунок 5.13). Залишкові напруження у арматурі досягають значень у 5 МПа.

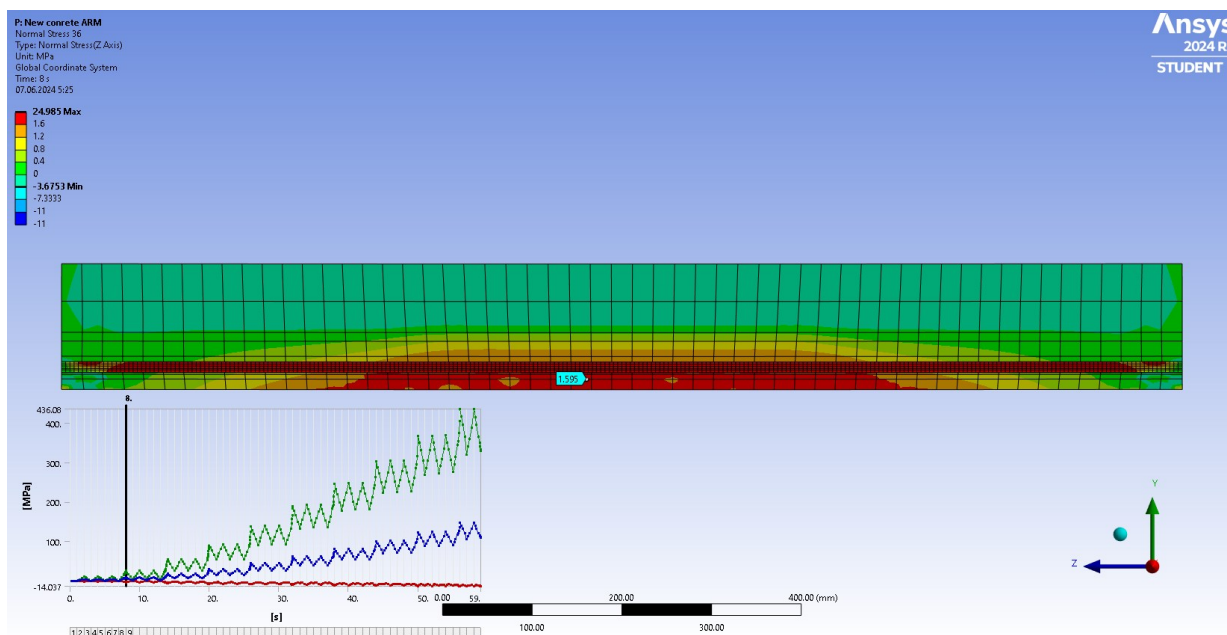


Рисунок 5.12. Розподіл нормальних напружень при появі тріщи у ЗББ

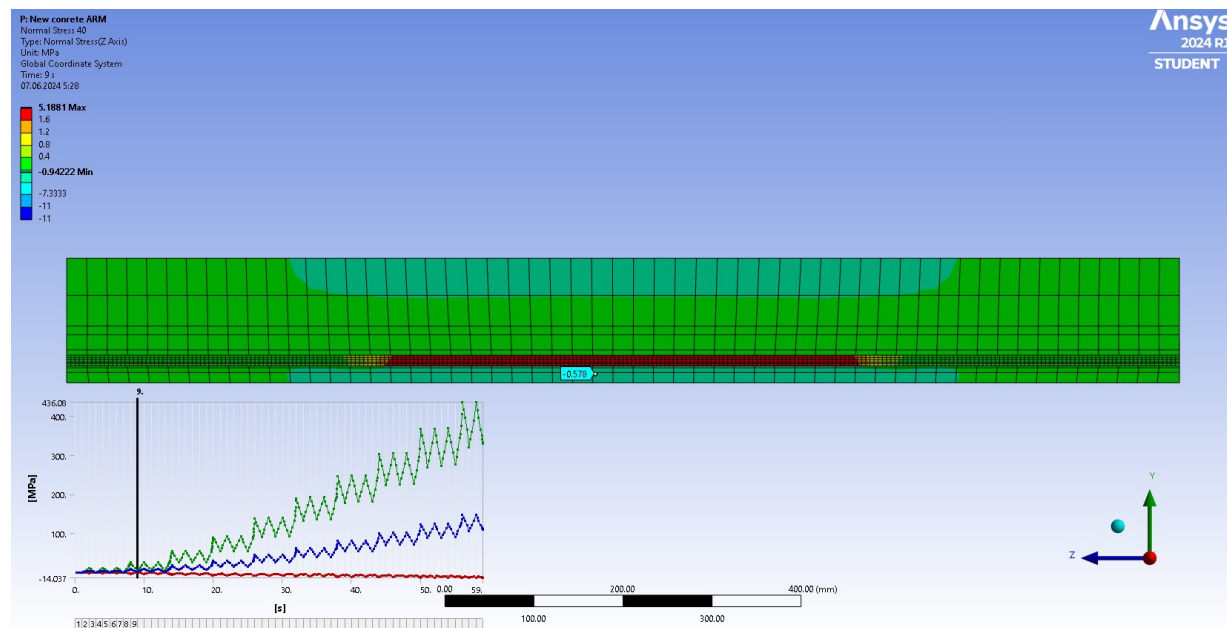


Рисунок 5.13. Розподіл нормальних напружень при розвантаженому стані ЗББ після появи тріщин

Зона пластичних деформацій бетону відповідає зоні напружень міцності бетону за розтягу (Рисунок 5.14). максимальні значення пластичних деформацій становлять $5,89 \times 10^{-5}$ мм/мм.

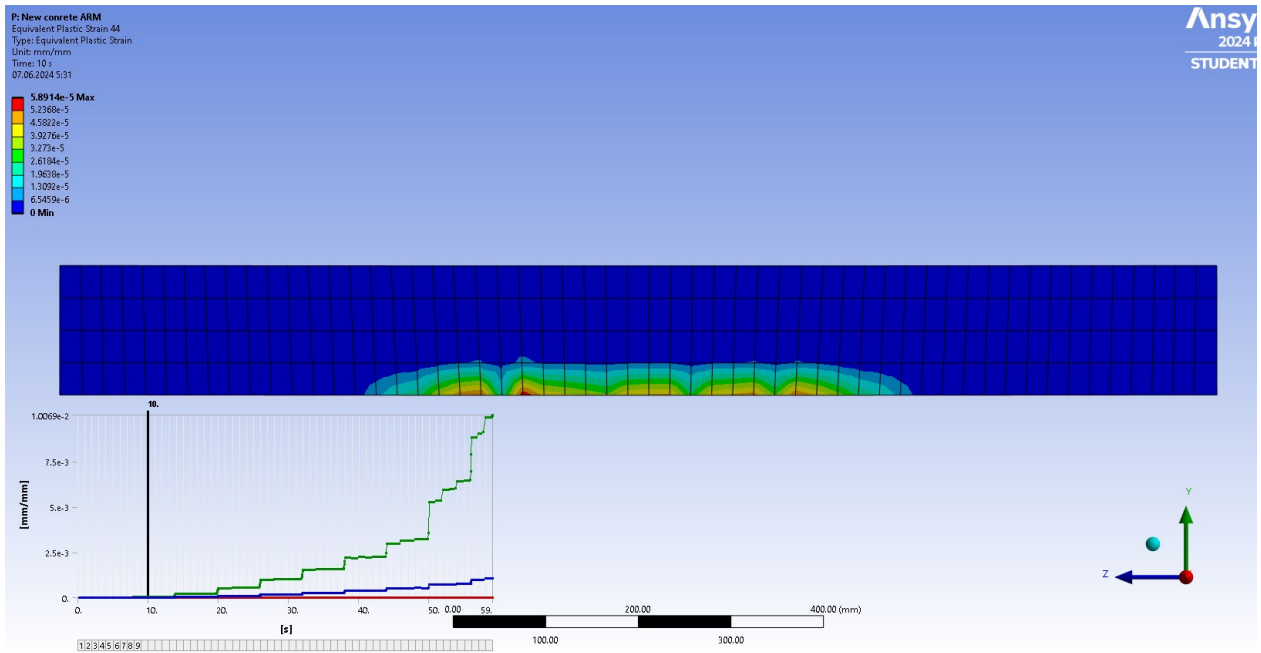


Рисунок 5.14. Розподіл пластичних деформацій після появи тріщин у ЗББ

Розподіл напружень на 7-му циклі навантаження (Рисунок 5.15) демонструє менші ділянки переходу межі у 1,6 МПа, але відбулось поширення цих напружень у напрямку до нейтральної лінії. Поширення небезпечних напружень свідчить про поширення або ріст тріщин у розтягнутій зоні бетону. Максимальні напруження у арматурі зросли до 34 МПа.

Після розвантаження 7-го циклу (Рисунок 5.16) розподіл напружень змінився. Утворились залишкові напруження розтягу у центральній ділянці тіла бетону. Дані напруження не перевищують межю у 1,6 МПа. Проте, нейтральна лінія візуально зміщена у напрямку осі Y, що означає про потенційне зменшення стиснутої зони бетону. Зросло значення напружень стиску у нижній ділянці бетону. Це зумовлено стиском пластично zdeформованих елементів сітки. Залишкові напруження у арматурі становлять 25,5 МПа, що не є критичним для даного матеріалу. Важливо відзначити, що накопичення напружень має періодичний характер, що відповідає циклічній природі навантаження.

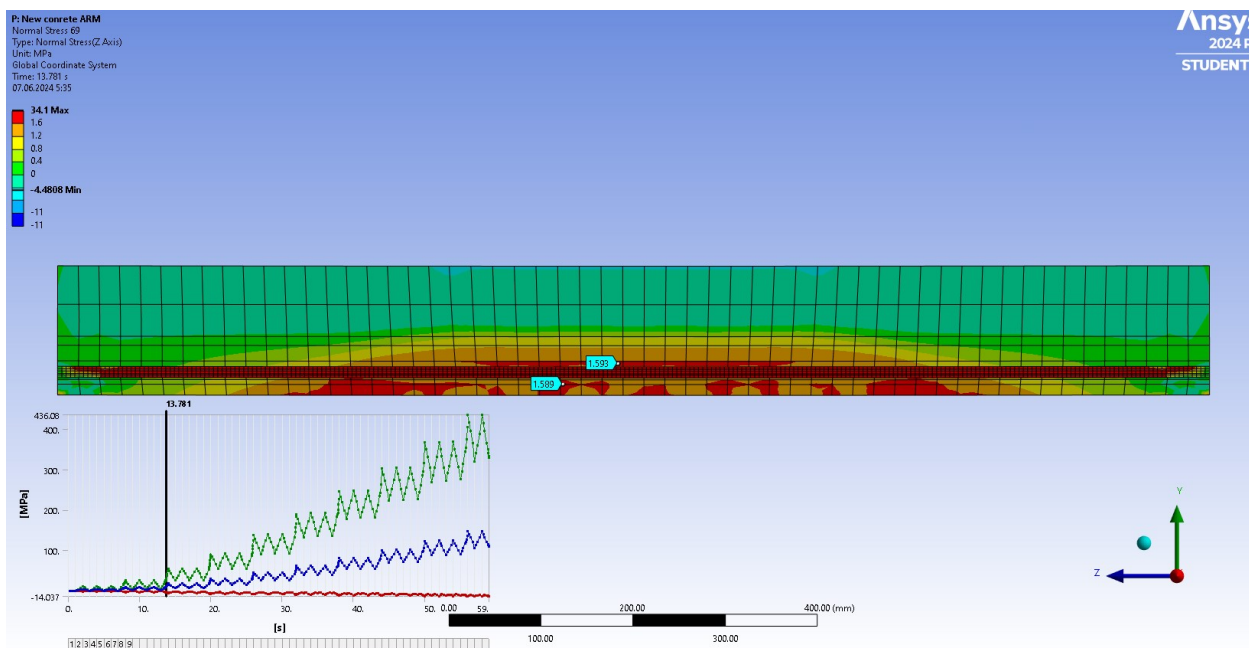


Рисунок 5.15. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ на 7-му циклі навантаження

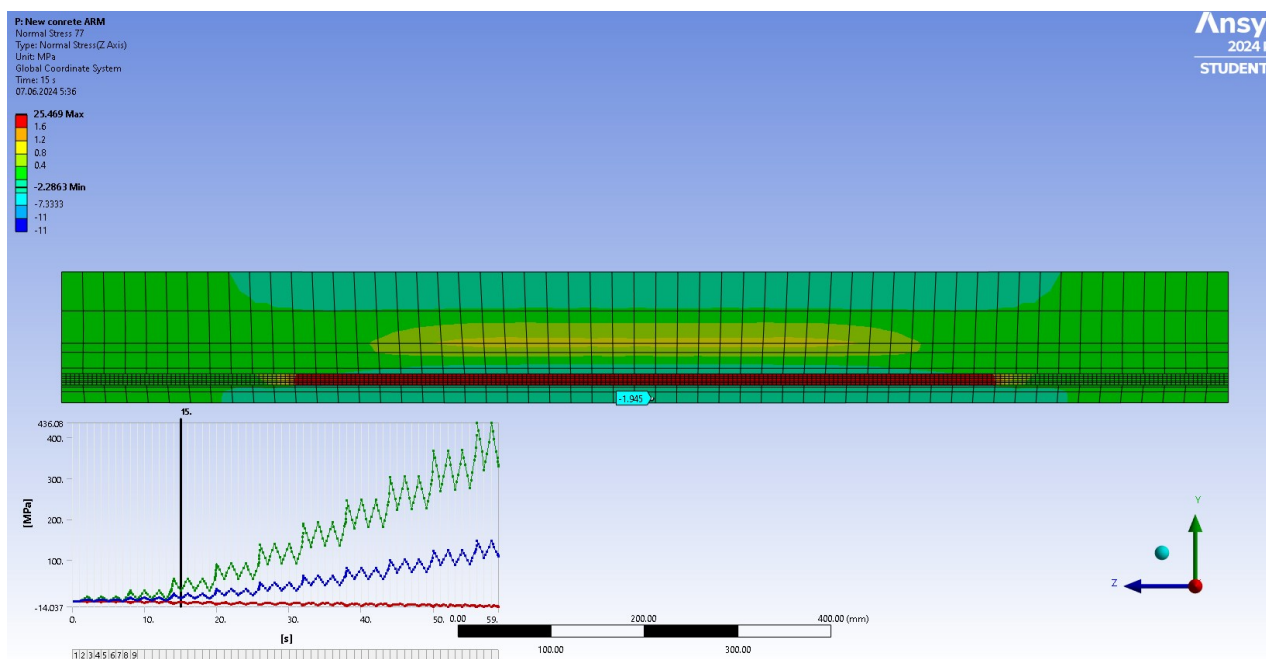


Рисунок 5.16. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ на 7-му циклі розвантаження

Пластичні деформації після 7-го циклу накопичуються в зоні тріщин, досягаючи максимальних значень $2,3 \times 10^{-4}$ мм/мм (Рисунок 5.17). Це свідчить про значні зміни в структурі матеріалу балки, що викликає розвиток незворотних

деформацій. Пластичні деформації поширились у нижній частині балки, що відповідає спектру поширення небезпечних напружень.

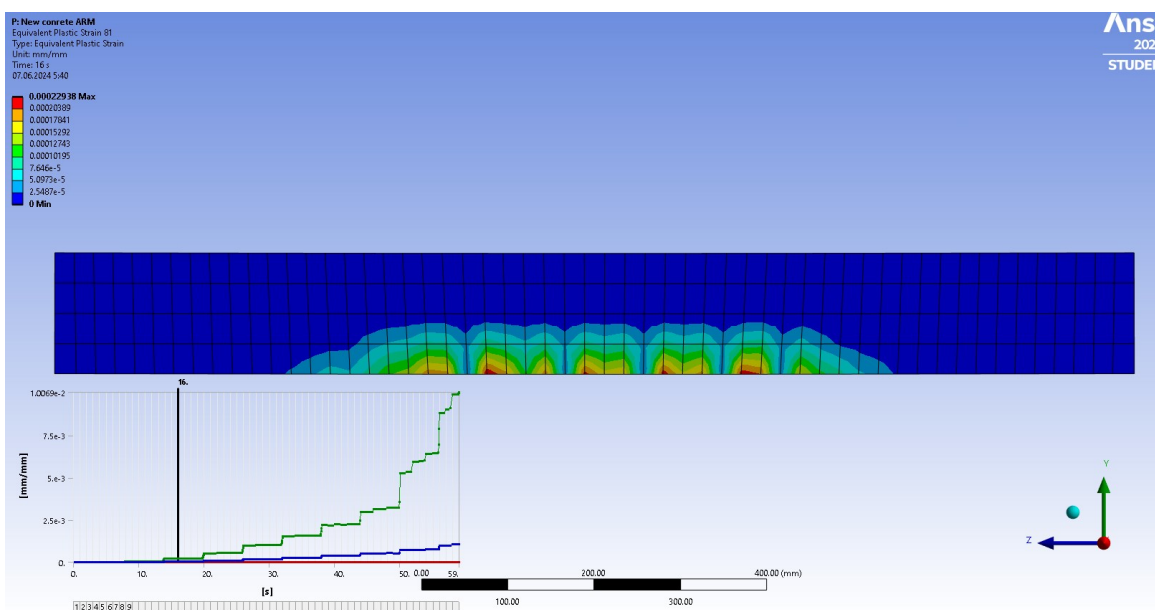


Рисунок 5.17. Розподіл пластичних деформацій при рості тріщин у ЗББ після 7-го циклу

На десятому циклі навантаження зона поширення небезпечних напружень зростає (Рисунок 5.18). Нейтральна лінія зміщена у напрямку осі Y, проте стиснута зона все ще достатньо велика.

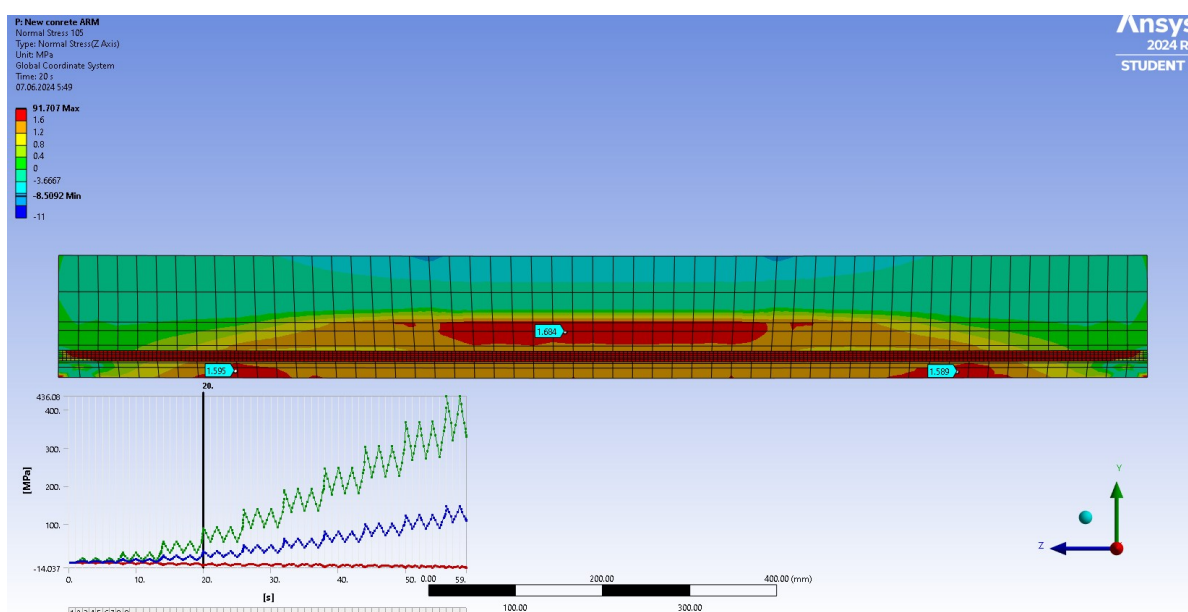


Рисунок 5.18. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ на 10-му циклі навантаження

Залишкові напруження у арматурі зросли до 53,58 МПа. Спектр поширення залишкових напружень стиску та розтягу у бетоні теж зростають. Максимальні напруження стиску все ще низькі і становлять 3,64 МПа. З кожним циклом розвантаження залишається певний рівень напружень, який сприяє утворенню та розвитку тріщин.

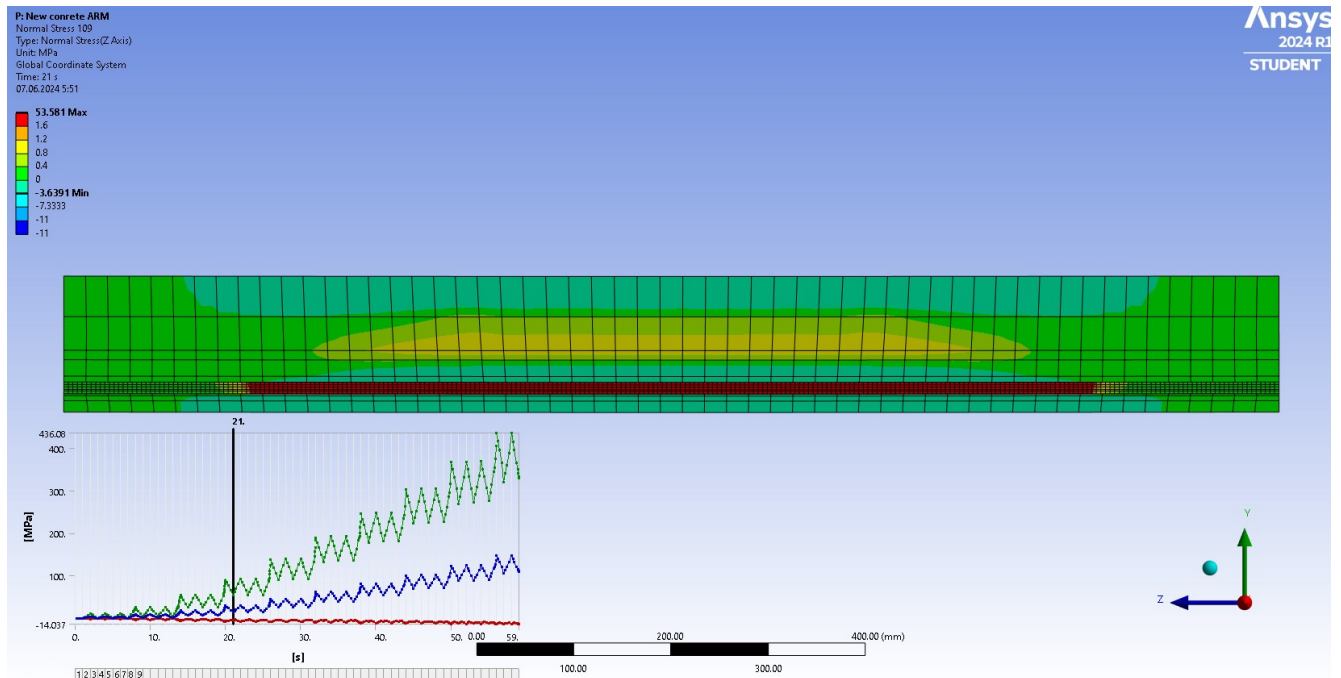


Рисунок 5.19. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ на 10-му циклі розвантаження

Після 10-го циклу навантаження (Рисунок 5.20) максимальні значення пластичних деформацій досягають $5,3 \times 10^{-4}$ мм/мм, що у двічі більше ніж, після 7-го циклу. Помітним є процес локалізації пластичних деформацій у сегментах, розділених зонами без пластичних ушкоджень. Спектр пластичних деформацій візуально наблизився до середини висоти балки.

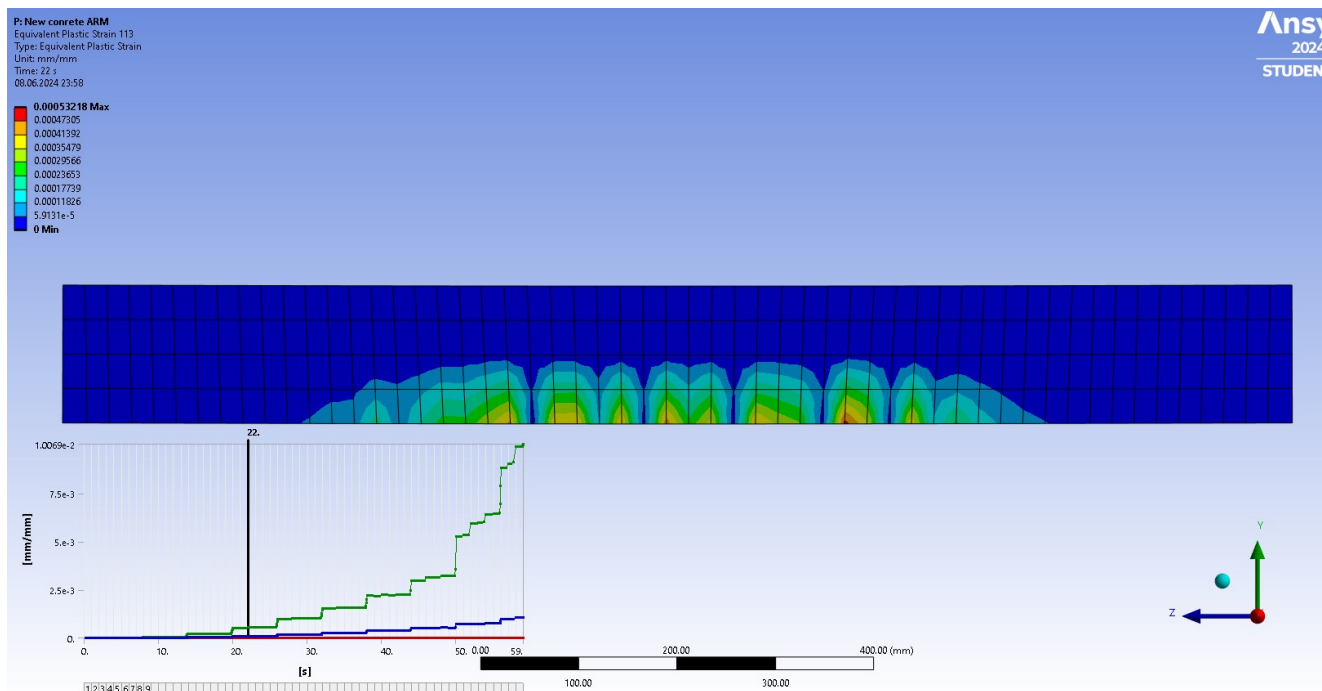


Рисунок 5.20. Розподіл пластичних деформацій при рості тріщин у ЗББ після 10-го циклу

На розподілі нормальних напружень у ЗББ на останньому циклі навантаження (Рисунок 5.21) помітно виражені зони руйнування бетону стиском. Напруження у них перевищують призмову міцність бетону С12/15 за стиску 11 МПа. Напруження розтягу, що перевищують значення у 1,6 МПа – відсутні. Це свідчить про нездатність бетону чинити опір розтягу.

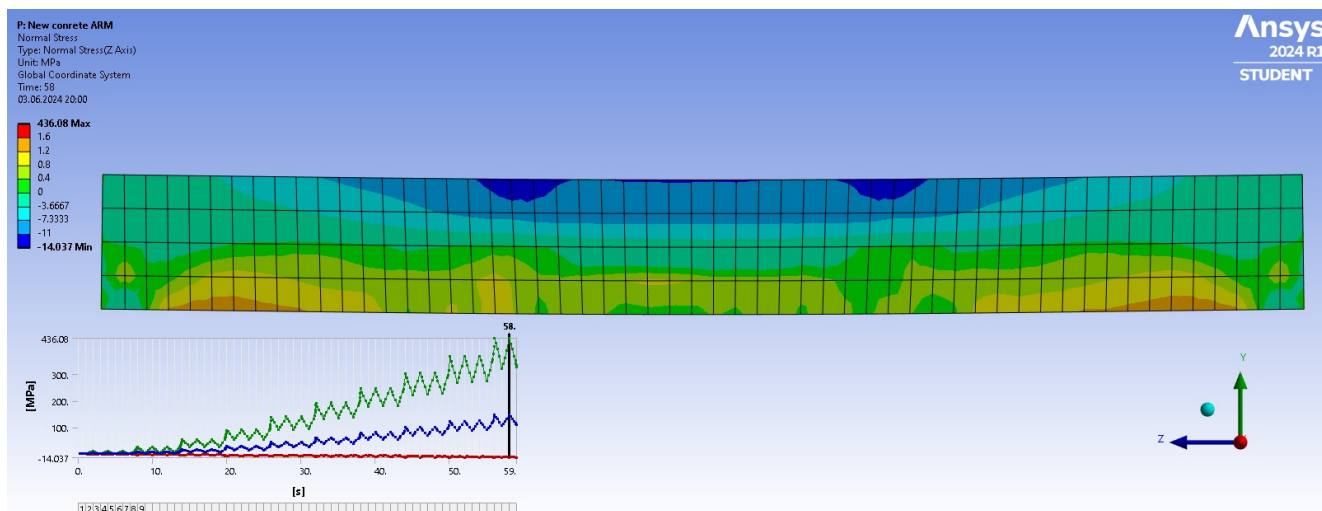


Рисунок 5.21. Розподіл нормальних напружень у ЗББ на останньому циклі навантаження

Із розподілу нормальних напружень останнього циклу після розвантаження (Рисунок 5.22) помітні залишкові напруження у арматурі, що становлять 436 МПа. Це не критично для даного класу арматури із межею текучості у 603 МПа, проте це вказує на значну загальну втому конструкції. Пластичні деформації зросли до 1×10^{-2} мм/мм (Рисунок 5.23). Пластичні деформації у стиснутій зоні ознака зменшення ефективної стиснутої зони. Отже, відбулось повне руйнування бетону.

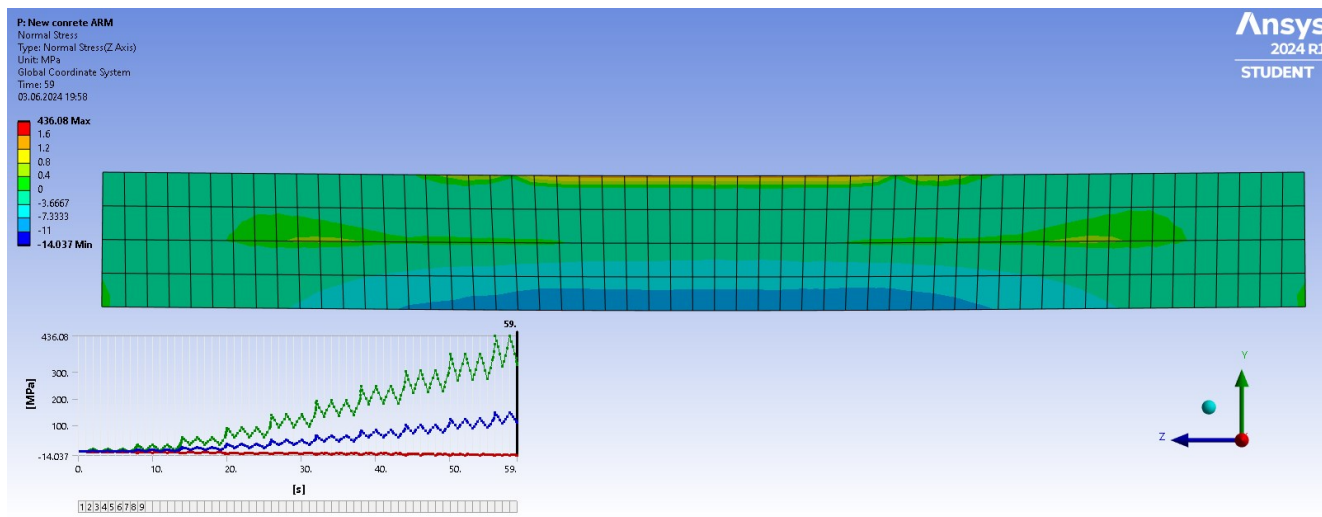


Рисунок 5.22. Розподіл нормальних напружень у ЗББ на останньому циклі розвантаження

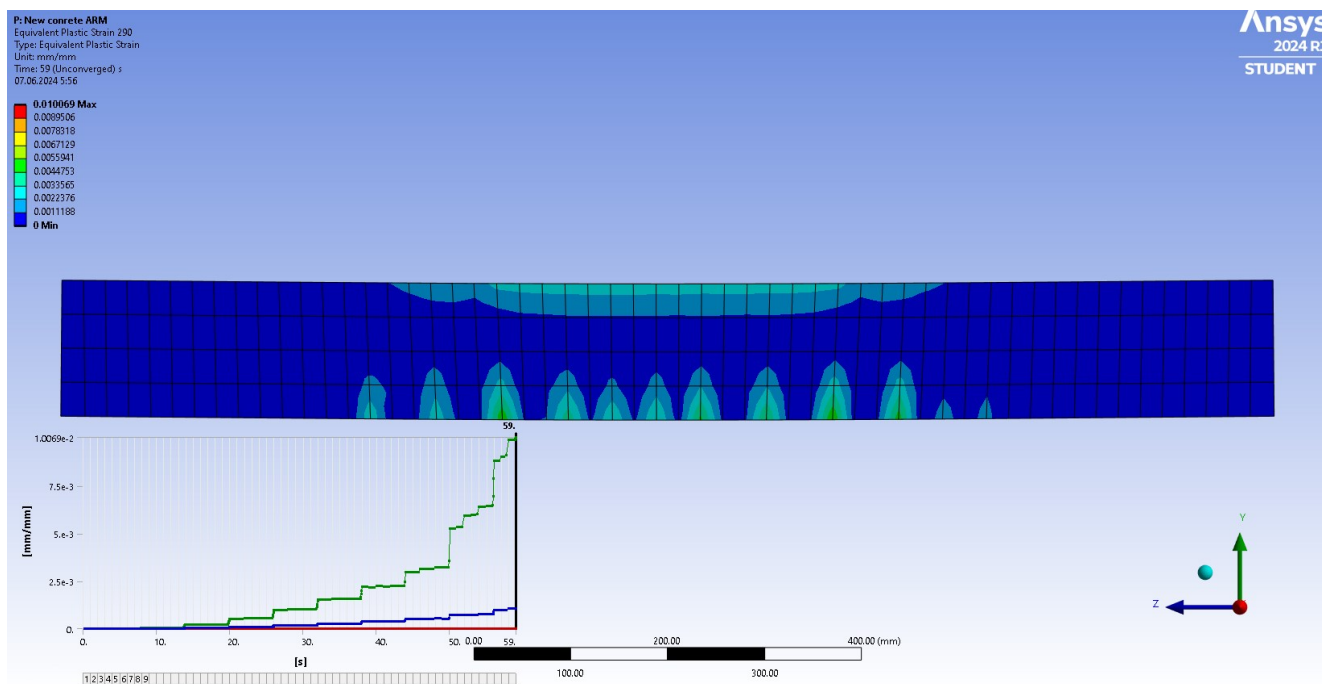


Рисунок 5.23. Розподіл пластичних деформацій у ЗББ на останньому циклі розвантаження

Щодо результату в моделюванні ЗББ-СПФ. Під дією 4-го циклу навантаження, у нижній частині бетону виникли напруження, що перевищують межу міцності бетону за розтягу (Рисунок 5.24). Максимальні напруження були зосереджені у нітинолі, та становили 104,78 МПа, що у 4 рази більше, ніж у ЗББ. Після розвантаження, залишкові напруження становили 40 МПа.

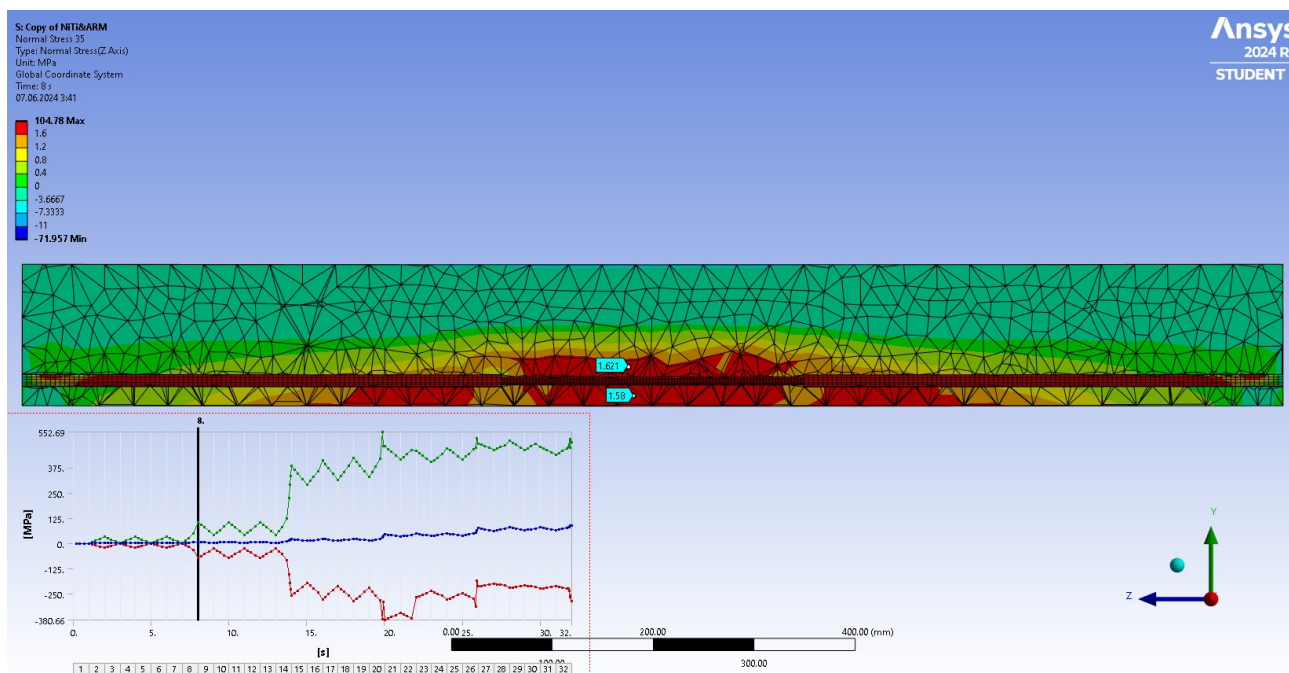


Рисунок 5.24. Розподіл нормальних напружень при появі тріщин у ЗББ-СПФ

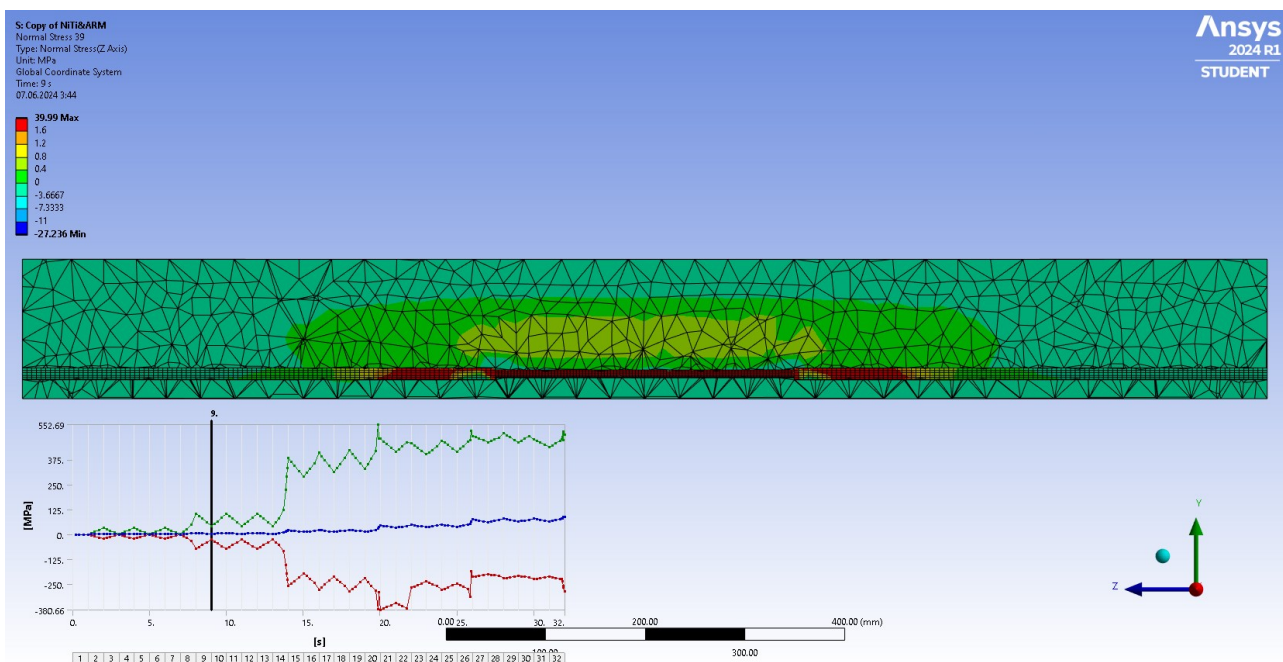


Рисунок 5.25. Розподіл нормальних напружень при розвантаженому стані ЗББ-СПФ після появи тріщин

Пластичні деформації після 4-го циклу становили у $7,98 \times 10^{-4}$ мм/мм (Рисунок 5.26). Це перевищує відповідні значення у ЗББ. Проте, спектр поширення пластичних деформацій бетону менший у порівнянні з ЗББ.

Також, після розвантаження, напруження стиску у нижній частині бетону становлять до 2 МПа (Рисунок 5.25), що свідчить про роботу нітинолу у закритті тріщин уже на ранніх циклах.

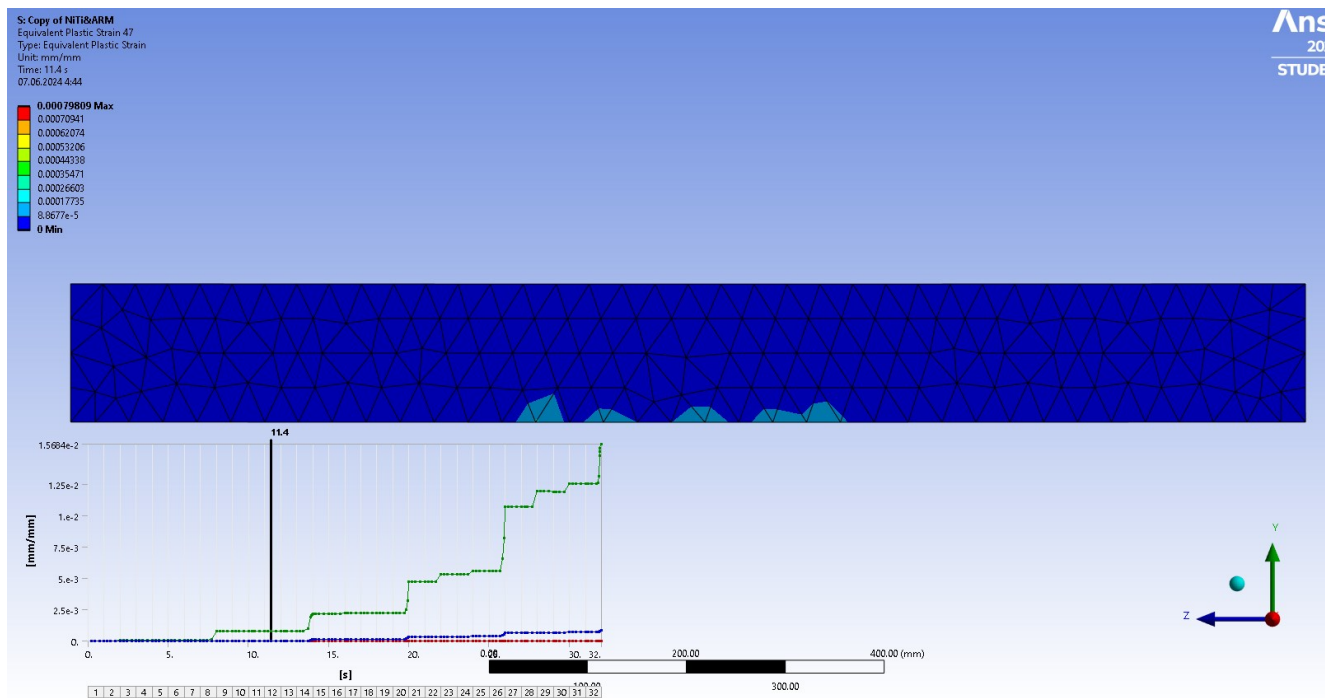


Рисунок 5.26. Розподіл пластичних деформацій після появи тріщин у ЗББ-СПФ

На 7-му циклі навантаження, напруження різко зросли до максимальних значень 335 МПа (Рисунок 5.27). Даний цикл навантаження відповідає значенню зусилля у 6 кН. У елементах бетону значно поширилась зона напружень, що перевищують призмову міцність бетону у 1,6 МПа. Нейтральна лінія змістилась у напрямку осі Y, та набрала аркоподібну форму. Це зменшує ефективну стиснуту зону бетону у середині прольоту. Проте, це також відповідає плавній руйнації балки, у порівнянні із крихким та раптовим руйнуванням ЗББ.

Розподіл нормальних напружень у розвантаженій балці 7-го циклу демонструє цікавий ефект (Рисунок 5.28). Спрацювання пружності вставки з

нітинолу викликало напруження розтягу у центральній зоні балки. Ці напруження перевищують значення у 1,6 МПа.

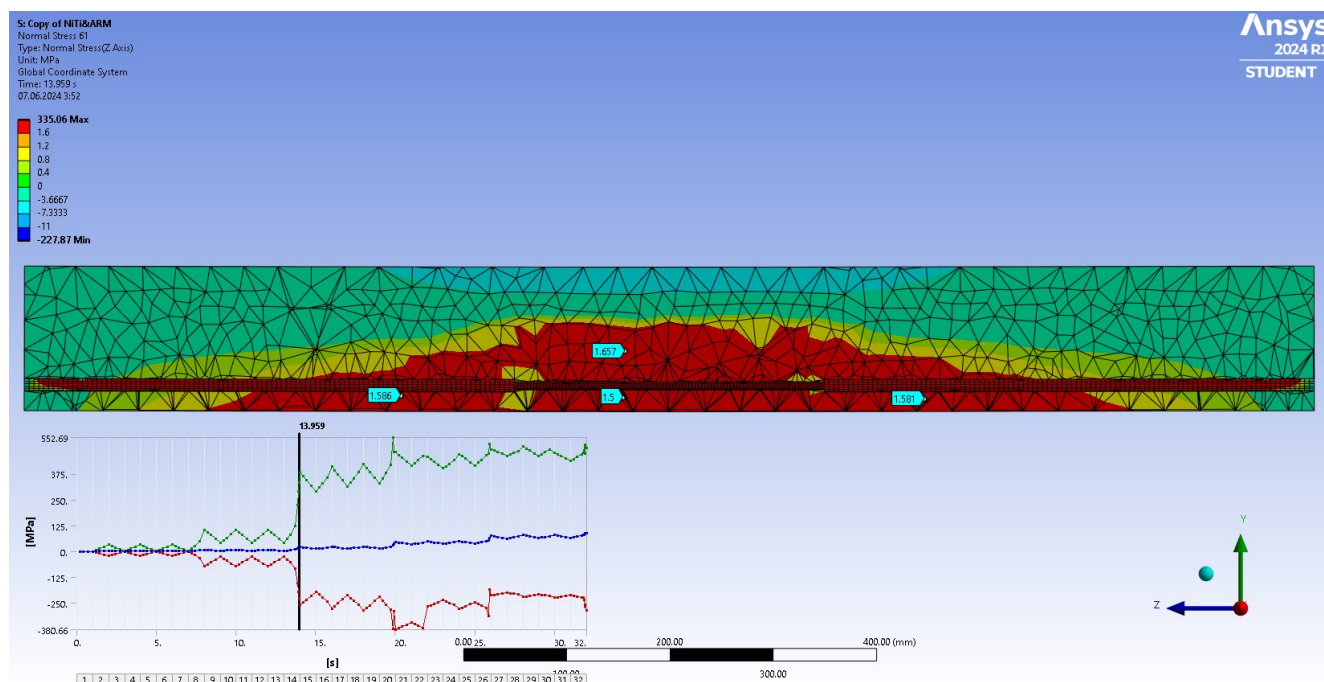


Рисунок 5.27. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ-СПФ на 7-му циклі навантаження

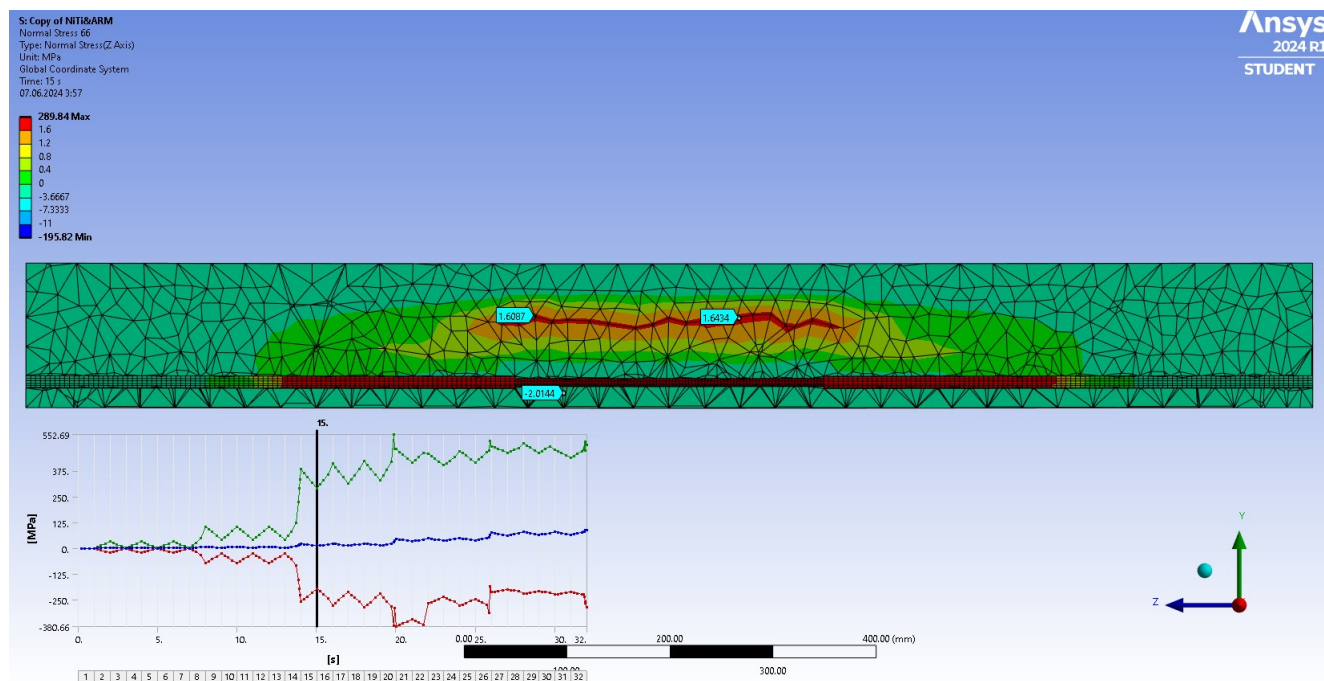


Рисунок 5.28. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ-СПФ на 7-му циклі розвантаження

Відбулось поширення пластичних деформацій у бетоні після 7-го циклу (Рисунок 5.29). Значення зросли до $2,2 \times 10^{-3}$ мм/мм. Пластичних деформацій, що поширились вище середини висоти перерізу балки – не виявлено.

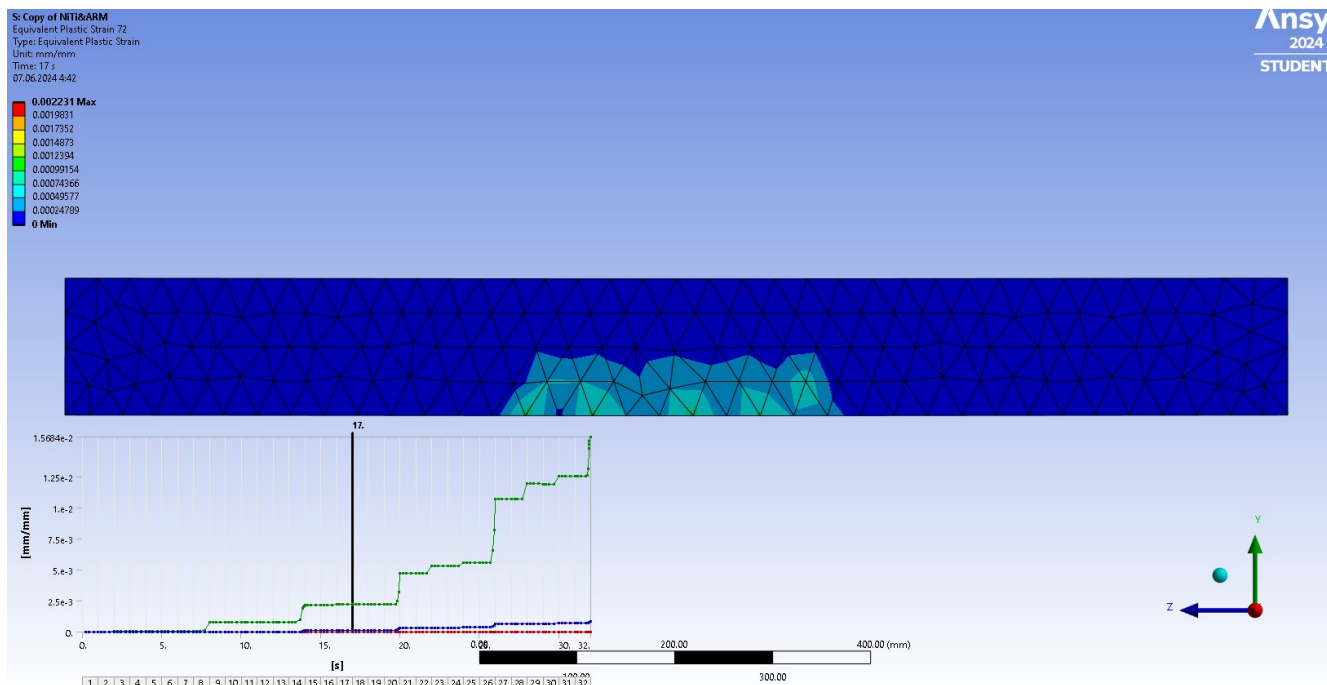


Рисунок 5.29. Розподіл пластичних деформацій при рості тріщин у ЗББ-СПФ після 7-го циклу

На 10-му циклі навантаження із розподілу нормальних напружень виявлено, що в центральній частині балки були відсутні напруження, що перевищують 1,6 МПа (Рисунок 5.30). Це свідчить про розкриття тріщини посередині прольоту балки. Відбувся перерозподіл напружень у бетоні. У СПФ-вставці концентруються найбільші напруження до 483 МПа. Отже, у нітинолі відбуваються процеси фазових перетворень. Не велика червона зона у центрі прольоту із напруженням близьким до 1,6 МПа – теоретично, вершина тріщини, де бетон все ще чинив опір розтягу та росту тріщини. Арматура продовжувала підтримувати жорсткість конструкції і, разом з нітинолом, сприймала навантаження. У верхній зоні бетону з'явилися від'ємні напруження із значенням 8,61 МПа, що близькі до межі міцності бетону на стиск у 11 МПа.

Після розвантаження ЗББ-СПФ у 10-му циклі, виникли напруження розтягу в центральній частині балки, проте їх значення не перевищували межу в 1,6 МПа. Нижня частина балки була стиснута із напруженням у 3,5 МПа.

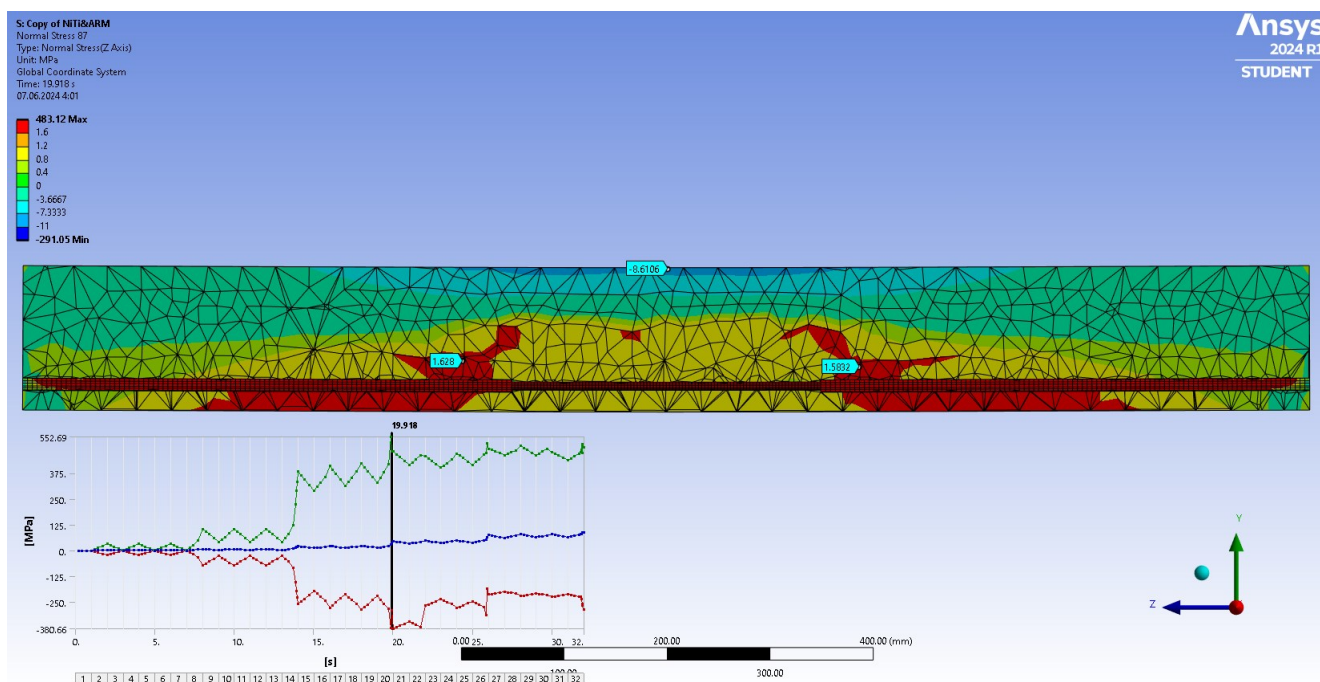


Рисунок 5.30. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ-СПФ на 10-му циклі навантаження

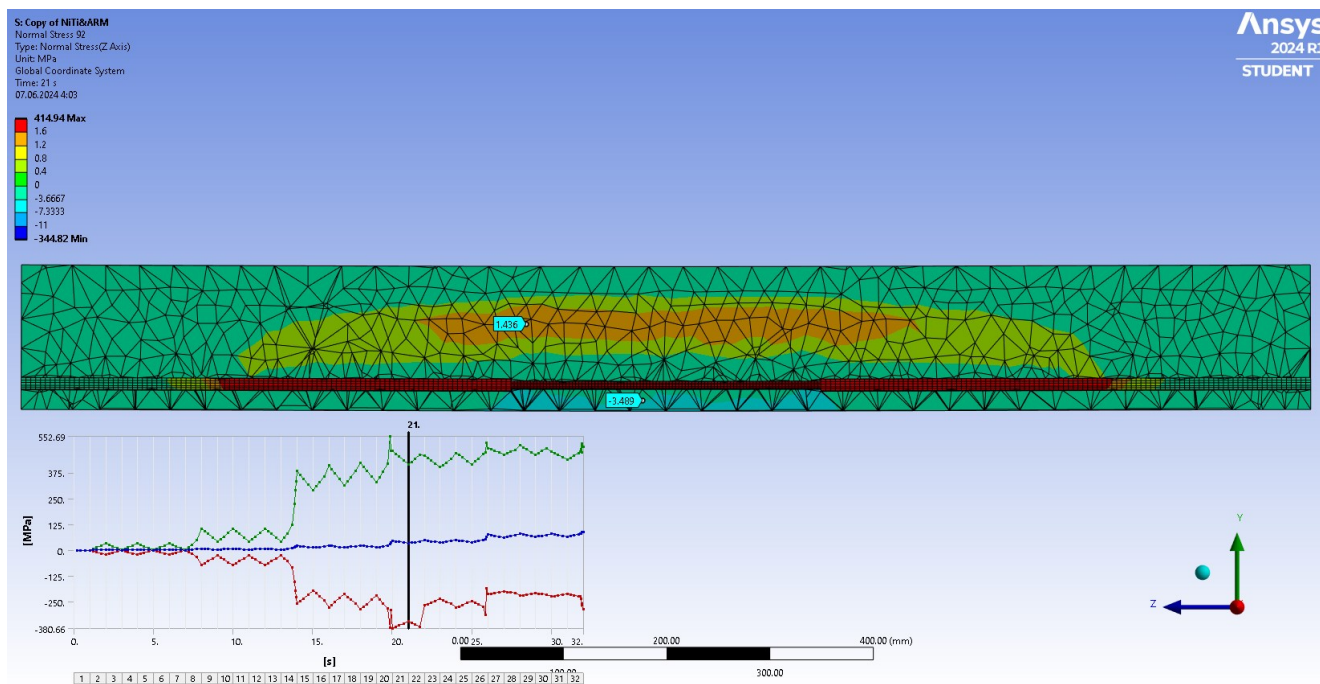


Рисунок 5.31. Розподіл нормальних напружень при рості тріщин у ЗББ-СПФ на 10-му циклі розвантаження

Пластичні деформації після 10-го циклу (Рисунок 5.32) демонструють подальше поширення у напрямку осі Y. Поширення відбулось вище середини висоти балки. Максимальні значення зросли із $2,2 \times 10^{-3}$ мм/мм до $5,3 \times 10^{-3}$ мм/мм. Частково відбулась локалізація пластичних деформацій.

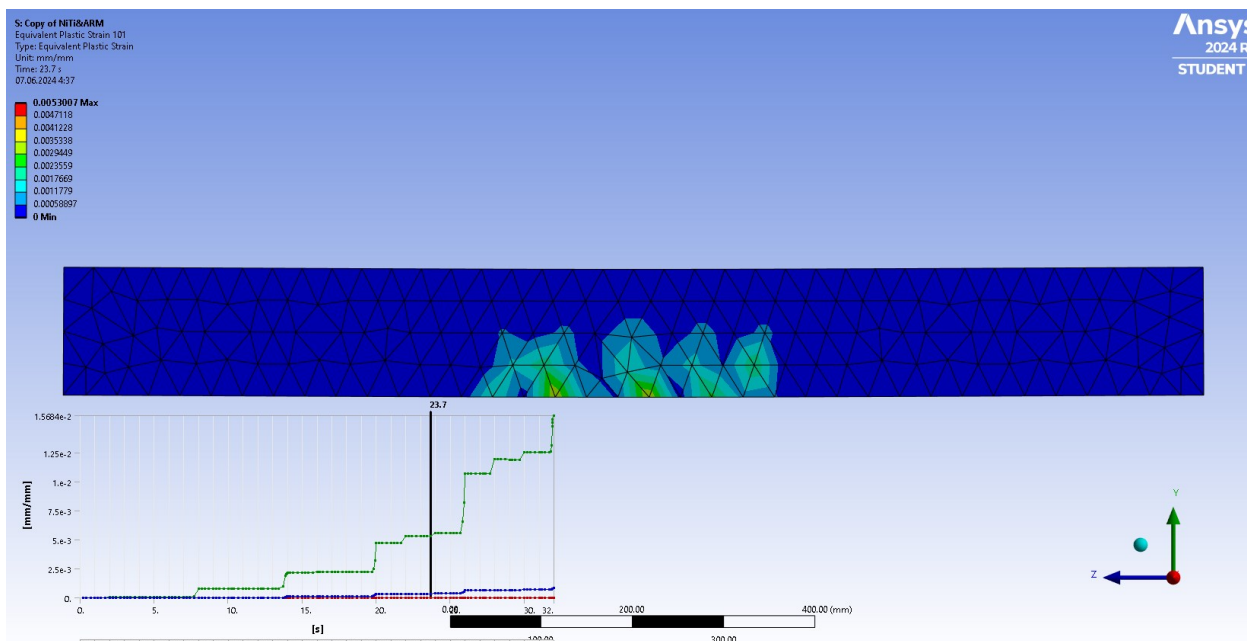


Рисунок 5.32. Розподіл пластичних деформацій при рості тріщин у ЗББ-СПФ після 10-го циклу

У момент колапсу, напруження у бетоні симетрично розподілені відносно середини прольоту балки. Максимальні напруження у бетоні (1,5 МПа), виникли під стержнями арматури 600С, що свідчить про присутність достатньої жорсткості та про продовження роботи балки.

Найбільші напруження були сконцентровані у стержнях арматури та нітинолу, із значеннями до 511,44 МПа. Це означає, що у нітинолі відбулось аустенітно-мартенситне перетворення, що змінило жорсткість балки у більш гнучку. Це додатково пояснює утворення та розвиток тріщин у середині прольоту балки.

У верхній частині балки, напруження стиску дійшли до значень межі призмової міцності стиску (11 МПа), але лише у незначній ділянці верхнього шару бетону. У інших ділянках верхньої зони стиску, напруження не перевищували

значень призмової міцності стиску. Пластичні деформації, у момент колапсу ЗББ-СПФ (Рисунок 5.34), локалізувались у середині прольоту балки та досягли максимальних значень у $1,6 \times 10^{-2}$ мм/мм. Подібних значень досягла й ЗББ у останньому циклі.

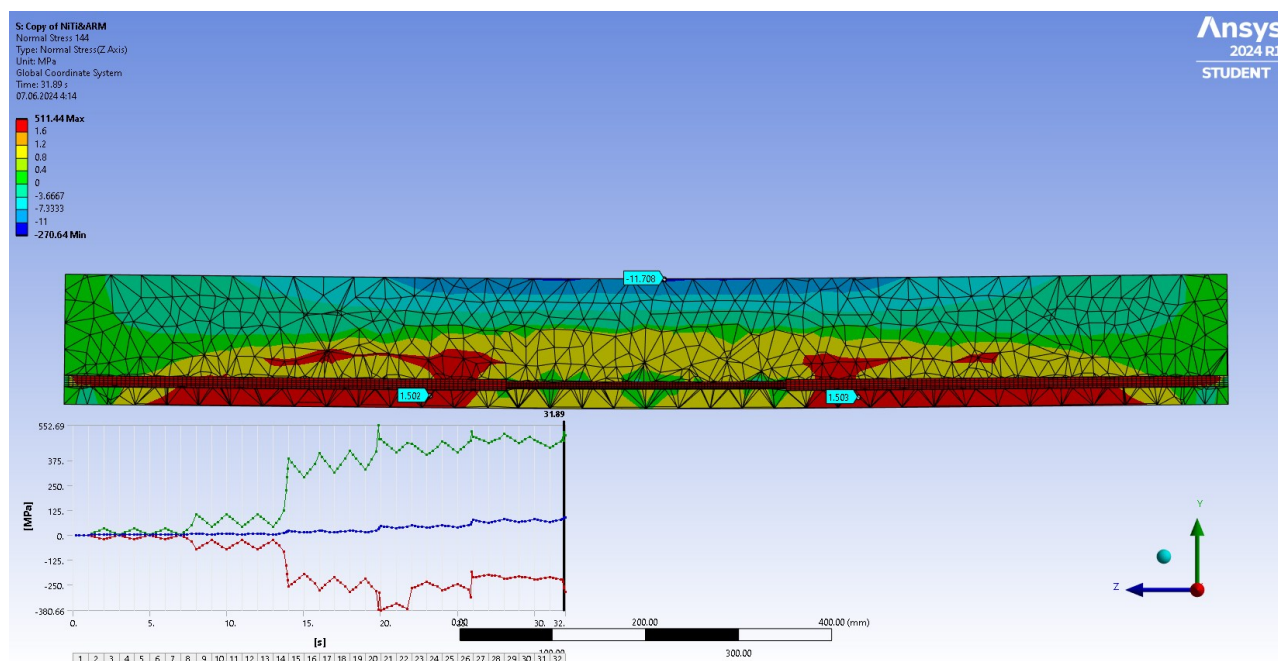


Рисунок 5.33. Розподіл нормальних напружень у момент колапсу ЗББ-СПФ

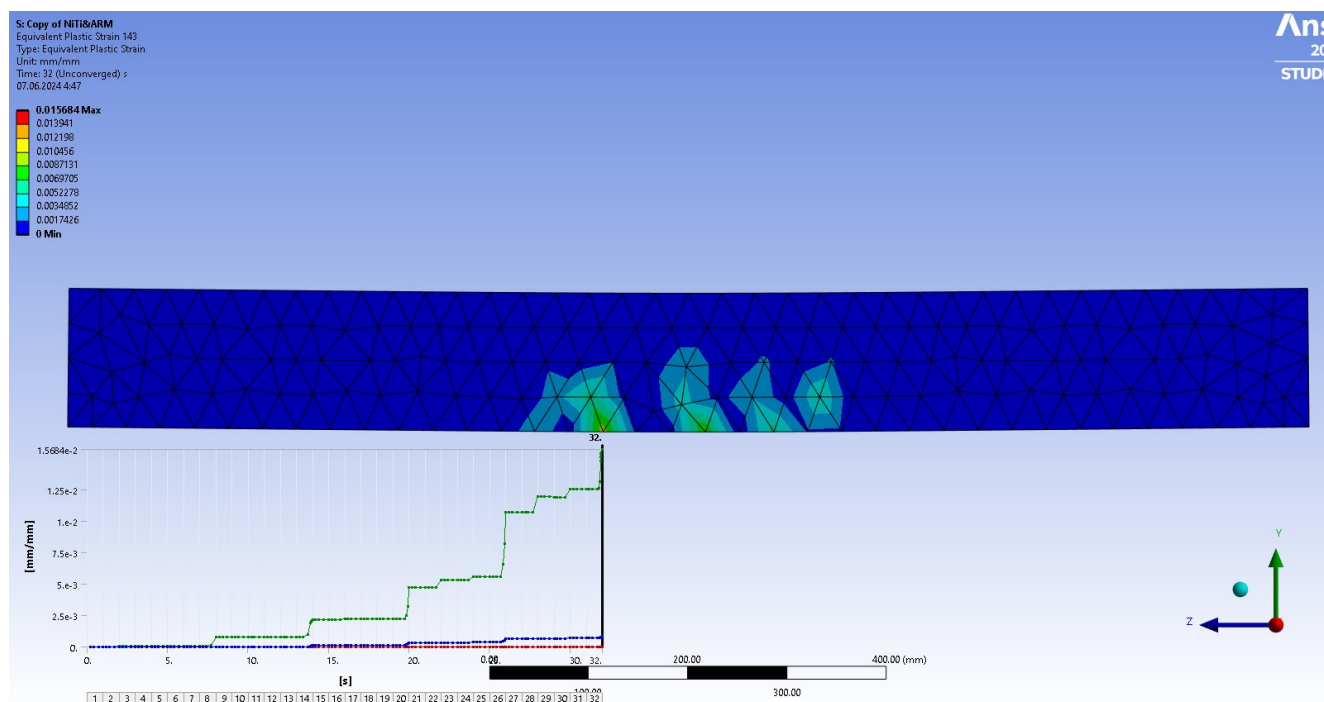


Рисунок 5.34. Розподіл пластичних деформацій у момент колапсу ЗББ-СПФ

У момент колапсу, напруження у стержні нітинолу перебували у діапазоні від -270 МПа до 511 МПа (Рисунок 5.35). Середнє значення напружень у стержні становило 250 МПа. Максимальні та мінімальні значення виникали точково у випадкових вузлах елемента Дана нерівномірність виникає через складність розрахунку контакту між елементами бетону та нітинолу.

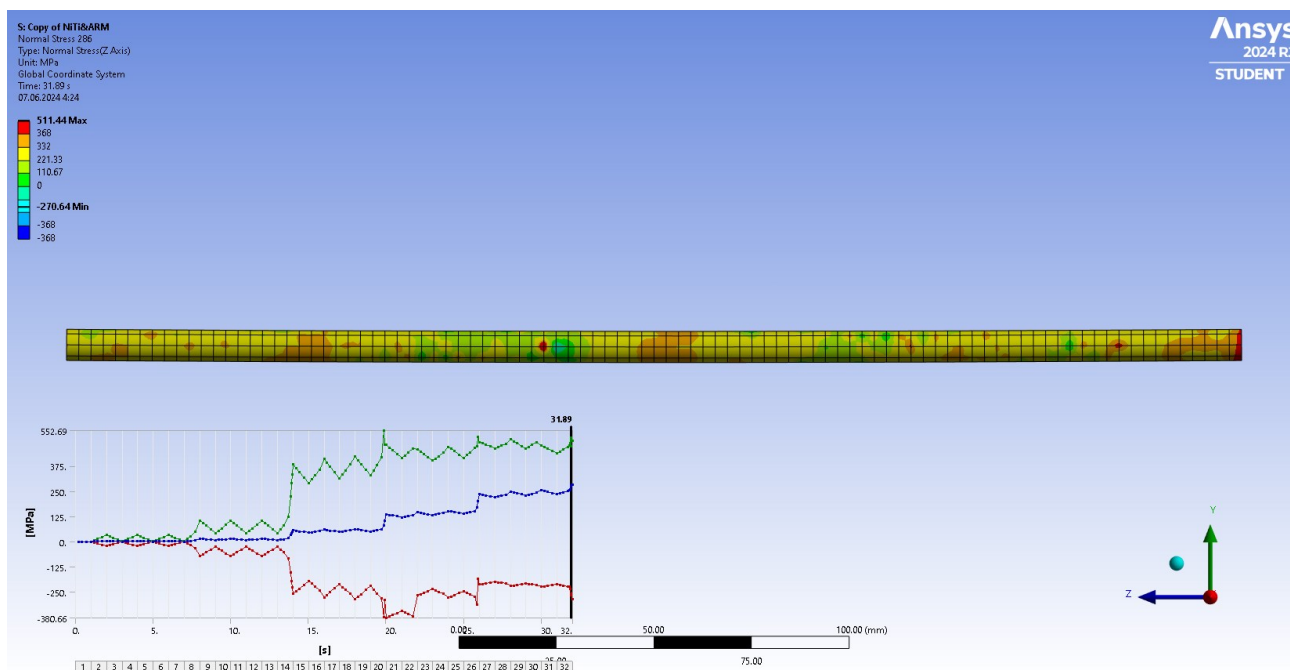


Рисунок 5.35. Розподіл напружень у стержні нітинолу в момент колапсу ЗББ-СПФ

Розподіл нормальних напружень у арматурі 600С залізобетонної балки зі вставкою нітинолу (Рисунок 5.36) демонструє діапазон від -95 МПа до 387 МПа. Розподіл стиснутої ділянки до розтягнутої поступово переходить від вільного кінця (ліворуч) до місця контакту зі стержнем нітинолу (праворуч). При самому контакті з СПФ-вставкою, арматура зазнавала стиску.

Залежність зміни напруження в арматурі від часу (Рисунок 5.36) демонструє різкі стрибки напружень зі збільшенням амплітуди навантаження. Така ж поведінка спостерігається у ЗББ. Отже, такі стрибки з'являються у момент утворення тріщин у бетоні та перерозподілу напружень.

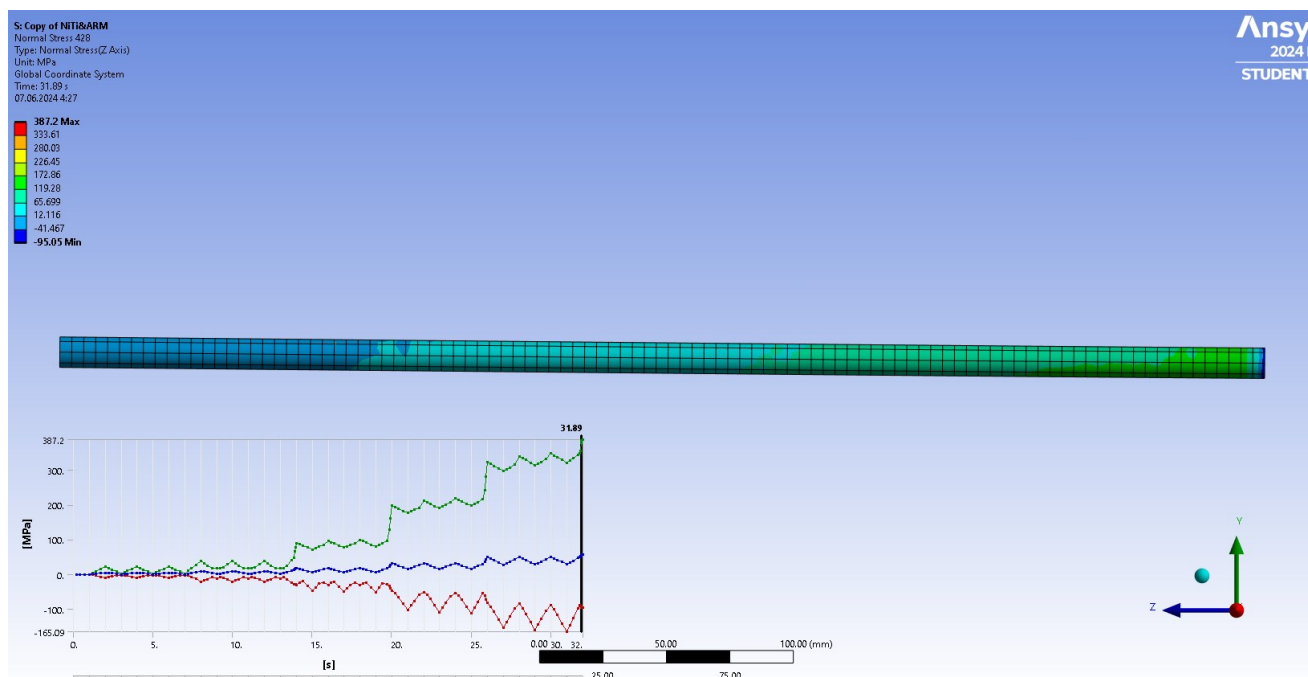


Рисунок 5.36. Розподіл напружень у арматурі в момент колапсу ЗББ-СПФ

Для порівняльного аналізу, виведено основні результати моделювання для залізобетонних балок (ЗББ) та залізобетонних балок зі сплавами із пам'яттю форми (ЗББ-СПФ) під різними циклами навантаження (Таблиця 5.2).

Таблиця 5.2. Основні результати моделювання

Конструкція	Цикл навантаження	σ_{\max} , МПа	σ_{res} , МПа	ϵ_{plast} , мм/мм
ЗББ	4	24,99	5,19	$5,89 \times 10^{-5}$
	7	34,10	25,47	$2,29 \times 10^{-4}$
	10	91,71	53,58	$5,32 \times 10^{-4}$
	29	436,08	436,08	$1,01 \times 10^{-2}$
ЗББ-СПФ	4	104,78	39,99	$7,98 \times 10^{-4}$
	7	335,06	289,84	$2,23 \times 10^{-3}$
	10	483,12	414,94	$5,30 \times 10^{-3}$
	16	511,44	-	$1,57 \times 10^{-2}$

Результати моделювання показують, що залізобетонні балки (ЗББ) демонструють значно нижчі значення максимальних і залишкових напружень, а

також пластичної деформації порівняно із залізобетонними балками зі сплавами із пам'яттю форми (ЗББ-СПФ) на всіх етапах малоциклового навантаження. На 4-му циклі навантаження, максимальні напруження у СПФ-вставці залізобетонної балки були у 4 рази більші за максимальні напруження у арматурі залізобетонної балки без СПФ-прутка. На 7-му циклі – у 9 разів більші, а на 10-му циклі – у 5 разів більші. Це зумовлено тим, що діаметр СПФ-прутка у 1,5 рази менший за діаметр робочої арматури.

Відмінність поведінки залізобетонних балок у розподілі пластичних деформацій наступна: на 4-му циклі максимальні значення пластичних деформацій ϵ_{plast} у ЗББ в 13,5 разів менші; на 7-м циклі – у 9,7 разів менші; на 10-му циклі – у 9,9 разів.

Проте, руйнування ЗББ відбулося раптово, що небезпечно при проектуванні, оскільки складно передбачити подібну поведінку і виконати ремонтні чи евакуаційні заходи. У той же час, вставка з СПФ створює плавне пластичне руйнування, що дає додаткового часу на реагування та виконання ремонтні чи евакуаційні заходи.

5.3. Розроблення рекомендацій щодо застосування СПФ для зменшення циклічних навантажень на будівельну (інженерну) конструкцію

На основі проведеного дослідження та отриманих результатів були розроблені наступні рекомендації щодо застосування сплавів із пам'яттю форми (СПФ) для зменшення циклічних навантажень на будівельні конструкції.

Для забезпечення ефективного зменшення циклічних навантажень рекомендується використовувати нітинол (Ni-Ti) як основний матеріал для СПФ. Нітинол відзначається високою псевдопружністю та здатністю до відновлення після деформацій, що робить його ідеальним для зниження циклічних навантажень. Крім того, цей матеріал має високі показники механічної міцності та стійкості до корозії.

Включення СПФ-елементів у критичні зони будівельних конструкцій, де найбільше відчуваються циклічні навантаження, є важливим кроком. До таких зон

належать вузли з'єднання, основні балки та колони. Особливо ефективним є розташування СПФ-елементів у центральних зонах прольоту балок або інших елементів, де максимальні згинальні моменти можуть викликати утворення тріщин.

Для визначення оптимального розташування та кількості СПФ-елементів слід використовувати програмне забезпечення для моделювання поведінки будівельних конструкцій, зокрема ANSYS. Моделювання дозволяє оцінити напружено-деформований стан конструкції під дією циклічних навантажень за допомогою чисельного аналізу із використанням методу скінченних елементів.

Експериментальні дослідження натурних моделей конструкцій із СПФ-елементами мають підтвердити ефективність запропонованих рішень. Для цього рекомендується використовувати сервогідравлічні машини для випробувань натурних зразків на циклічні навантаження, що дозволить визначити їх стійкість та довговічність.

Впровадження систем моніторингу стану будівельних конструкцій із СПФ-елементами є необхідним для вчасного виявлення та усунення можливих пошкоджень. Регулярне технічне обслуговування таких конструкцій забезпечить їхню надійність та довговічність.

У конструкціях, що експлуатуються у сейсмічно активних регіонах, використання СПФ-елементів сприятиме підвищенню деформівності та безпеки будівель під час землетрусів. Розробка спеціальних конструкційних рішень для будівельних елементів із СПФ дозволить ефективно поглинати та розсіювати сейсмічну енергію.

Важливим є аспект сумісності за механічною поведінкою матеріалів. Згідно з останніми дослідженнями, найкращими партнерами для поєднання з нітинолом є інженерний цементний бетон (ЕСС) та полімерні волокна. ЕСС відзначається високою здатністю до розтягування, що запобігає руйнуванню при циклічних навантаженнях, а полімерні волокна допомагають контролювати утворення тріщин та зберігати цілісність матеріалу. Це поєднання забезпечує підвищену стійкість до корозії та біологічних впливів, що дозволяє збільшити довговічність та надійність конструкцій [112].

Основні переваги застосування СПФ:

Зниження динамічних навантажень: СПФ-елементи ефективно зменшують динамічні навантаження завдяки своїм псевдопружним властивостям, що дозволяє їм поглинати та розсіювати енергію;

Підвищення довговічності конструкцій: Використання СПФ-елементів сприяє зменшенню утворення тріщин та пошкоджень у будівельних конструкціях, що підвищує їх довговічність та надійність;

Здатність до самовідновлення: СПФ-елементи мають здатність до відновлення після деформацій, що забезпечує додатковий захист конструкцій від руйнувань під дією циклічних навантажень;

Економічна ефективність: Застосування СПФ-елементів може знизити витрати на обслуговування та ремонт будівельних конструкцій завдяки їхній підвищеній деформівності та довговічності;

Стійкість до корозії: СПФ-елементи відзначаються високою стійкістю до корозії, що є важливою характеристикою для тривалої експлуатації в агресивних середовищах;

Стійкість до біологічних впливів: СПФ-елементи також демонструють стійкість до біологічних впливів, що дозволяє зменшити ризик біологічного руйнування конструкцій.

5.4. Висновки до розділу 5

Розроблено та проведено верифікацію поведінки модельного зразка нітинолу із результатами досліджень, описаних у розділі 3. Загальна форма петель гістерезису та ключові точки деформації добре узгоджуються з моделлю, що свідчить про адекватність моделі нітинолу для прогнозування поведінки елементів конструкцій за малоциклових навантажень.

Розроблено тривимірні моделі залізобетонних балок зі СПФ-вставкою та без неї. Проведено верифікацію отриманих результатів моделювання із результатами натурних випробувань. Похибка для залізобетонної балки без СПФ-прутка становить 5,64%, а похибка для залізобетонної балки із СПФ-вставкою – 3,25%.

Визначено, що СПФ-вставка із прутка діаметром меншим у 1,5 рази від діаметру робочої арматури, спричиняє збільшенню значень максимальних напружень у конструкції в 4, 9 та 5 разів на 4-му, 7-му та 10-му циклах навантаження.

Моделювання підтверджує підвищення деформівних властивостей елементів конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів із пам'яттю форми.

Розроблено рекомендацій щодо впровадження СПФ-прутків у елементи конструкцій для підвищення деформівних властивостей за циклічних навантажень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено та описано властивості сплавів з пам'яттю форми (СПФ), зокрема нікель-титанових сплавів (нітинол). Встановлено, що ці матеріали демонструють унікальні псевдопружні властивості, які дозволяють відновлювати форму після деформації. Визначено основні фізико-механічні властивості, включаючи модулі пружності та напруження фазових перетворень, які залежать від температури та швидкості деформації.

2. Проаналізовано вплив асиметрії циклічного навантаження на функціональні властивості псевдопружного NiTi сплаву. Встановлено, що асиметрія циклу навантаження значно впливає на залишкові деформації, розмах деформацій та дисиповану енергію. Виявлено, що за різних асиметрій спостерігаються зміни у формі петель гістерезису та кількості розсіяної енергії.

3. Проведений фрактографічний аналіз підтвердив, що асиметрія циклу навантаження впливає на властивості та мікроструктуру СПФ, зокрема змінює кількість зародків втомних тріщин та рельєф зламів. За більшої асиметрії спостерігалось більше зародків тріщин та збільшення розкриття їх берегів, що узгоджується з механічними випробуваннями, які показали вищий рівень дисипованої енергії за меншого коефіцієнта асиметрії.

4. Виконано експериментальні дослідження та моделювання поведінки залізобетонних балок з використанням СПФ-елементів під дією циклічних навантажень. Розроблено метод з'єднання гладких стержнів із псевдопружного NiTi сплаву з арматурою, із використанням металевої муфти та епоксидного клею. Доведено, що цей метод забезпечує високу контактну міцність з'єднання.

5. Встановлено, що руйнування ЗББ відбувається при значенні прогину 7,3 мм, а в ЗББ-СПФ при – 20,3 мм, що підвищує деформівність конструкції у 2,8 разів, у порівнянні із залізобетонною балкою з арматурою 600С. Підтверджено, що застосування нітинолових вставок підвищує здатність конструкцій забезпечує

плавне пластичне руйнування, на відміну від раптового крихкого руйнування балок без СПФ.

6. З використанням методу скінченних елементів детально проаналізовано поведінку елементів конструкцій з використанням СПФ під дією циклічних навантажень. Завдяки моделюванню в програмному забезпеченні ANSYS, було отримано точні дані про розподіл напружень та деформацій в обидвох балках. Це підтвердило ефективність використання СПФ-елементів для підвищення деформівності та довговічності конструкцій, а також допомогло розробити рекомендації щодо їх застосування в будівництві.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sharpe R. D., Bentley R. J. Dynamics of structures by Ray W. Clough and Joseph Penzien. McGraw-Hill 1975. 634 pp. illus. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 1977. Вип. 10, № 2. С. 109–110.
2. Janke L., Czaderski C., Motavalli M., Ruth J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2005. Вип. 38, № 279. С. 578–592.
3. Dolce M., Cardone D., Marnetto R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2000. Вип. 29, № 7. С. 945–968.
4. Liang C., Rogers C. A. One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials.
<http://dx.doi.org/10.1177/1045389X9000100205>. 1990. Вип. 1, № 2. С. 207–234.
5. Song G., Ma N., Li H. N. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*. 2006. Вип. 28, № 9. С. 1266–1274.
6. Zhang Q., Tang B., Cai J., Yang R., Feng J. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch. *Engineering Structures*. 2020. Вип. 225. С. 111293.
7. Ajaj R. M., Parancheerivilakkathil M. S., Amoozgar M., Friswell M. I., Cantwell W. J. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*. 2021. Вип. 120. С. 100682.
8. Pecora R., Dimino I., Bray M., Bray R. SMA for aeronautics. *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. С. 527–559.
9. Leary M., Huang S., Ataalla T., Baxter A., Subic A. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery. *Materials and Design*. 2013. Вип. 43. С. 460–466.
10. Zadafiya K., Dinbandhu, Kumari S., Chattarjee S., Abhishek K. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review. Elsevier Ltd, 2021.
11. Riccio A., Sellitto A., Ameduri S., Concilio A., Arena M. Shape memory alloys

- (SMA) for automotive applications and challenges. *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. С. 785–808.
12. Mao S., Dong E., Jin H., Xu M., Zhang S., Yang J., Low K. H. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs. *Journal of Bionic Engineering*. 2014. Вып. 11, № 3. С. 400–411.
 13. Hadi A., Yousefi-Koma A., Moghaddam M. M., Elahinia M., Ghazavi A. Developing a novel SMA-actuated robotic module. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2010. Вып. 162, № 1. С. 72–81.
 14. Mansour N. A., Jang T., Baek H., Shin B., Ryu B., Kim Y. Compliant closed-chain rolling robot using modular unidirectional SMA actuators. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2020. Вып. 310. С. 112024.
 15. Peng C., Yin Y. H., Hong H. B., Zhang J. J., Chen X. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA. Elsevier B.V., 2017.
 16. Chekotu J. C., Groarke R., O'Toole K., Brabazon D. Advances in selective laser melting of Nitinol shape memory alloy part production. 2019.
 17. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. Pergamon, 2005.
 18. Contardo L., Guénin G. Training and two way memory effect in CuZnAl alloy. *Acta Metallurgica Et Materialia*. 1990. Вып. 38, № 7. С. 1267–1272.
 19. Биків Н. Дослідження сплавів пам'яті форми з ефектом надпружності в якості елементів підсилення будівельних конструкцій. Тернопіль:2020. 72 с.
 20. Фірстов Г. С. Високотемпературні сплави з пам'яттю форми. Київ:Наук. думка, 2019. 199 с. ISBN 978-966-00-1687-3.
 21. Mei W., Sun J., Wen Y. ARTICLE Martensitic transformation from b to a9 and a0 phases in Ti-V alloys: A first-principles study. 2017.
 22. Wayman C. M., Otsuka K. SMA - Space Antenna TiNi shape memory book - Space antenna 2002. 2002.
 23. Ren X., Miura N., Zhang J., Otsuka K., Tanaka K., Koiwa M., Suzuki T., Chumlyakov Y. I., Asai M. A comparative study of elastic constants of Ti-Ni

- based alloys prior to martensitic transformation. *Materials Science and Engineering A*. 2001. Вып. 312, № 1–2. С. 196–206.
24. Fernandes D. J., Peres R. V., Mendes A. M., Elias C. N. Understanding the Shape-Memory Alloys Used in Orthodontics. *ISRN Dentistry*. 2011. Вып. 2011. С. 1–6.
 25. Azadpour F., Maghsoudi A. A. Experimental and analytical investigation of continuous RC beams strengthened by SMA strands under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2020. Вып. 239. С. 117730.
 26. Qian H., Zhang Q., Zhang X., Deng E., Gao J. Experimental investigation on bending behavior of existing rc beam retrofitted with sma-ecp composites materials. *Materials*. 2022. Вып. 15, № 1.
 27. Moumni Z., Zhang Y., Wang J., Gu X. A Global Approach for the Fatigue of Shape Memory Alloys. *Shape Memory and Superelasticity*. 2018. Вып. 4, № 4. С. 385–401.
 28. Kim Y. K. Alloys, Shape Memory. 2006. ISBN 9780387476841.
 29. Otsuka K., Wayman C. M. Shape Memory Materials. Cambridge, Mass, USA: Cambridge University Press, 1998. 284 с.
 30. Huang W. M., Ding Z., Wang C. C., Wei J., Zhao Y., Purnawali H. Shape memory materials. *Materials Today*. 2010. Вып. 13, № 7. С. 54–61.
 31. Chen Q., Thouas G. A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015. Вып. 87. С. 1–57.
 32. Sun L., Huang W. M., Ding Z., Zhao Y., Wang C. C., Purnawali H., Tang C. Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Materials & Design*. 2012. Вып. 33. С. 577–640.
 33. Park M., Hartford N. Introduction to Nitinol. 2017. С. 40.
 34. Iasnii V., Yasniy P., Lapusta Y., Yasniy O., Dyvdyk O. Functional Behavior of Pseudoelastic NiTi Alloy Under Variable Amplitude Loading. *Acta Mechanica et Automatica*. 2020. Вып. 14, № 3. С. 154–160.
 35. 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. Вып. 5, № 3. С.

- 187–208.
36. Abuzaid W., Sehitoglu H. Superelasticity and functional fatigue of single crystalline FeNiCoAlTi iron-based shape memory alloy. *Materials and Design*. 2018. Вып. 160. С. 642–651.
 37. Humbeeck J. Van. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 1999. Вып. 273–275. С. 134–148.
 38. Muntasir Billah A. H. M., Alam M. S. Bond behavior of smooth and sand-coated shape memory alloy (SMA) rebar in concrete. *Structures*. 2016. Вып. 5. С. 186–195.
 39. 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. Вып. 29, № 8. С. 1889–1902.
 40. Hu J. W., Noh M. H. Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Several Earthquake Ground Motions. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Вып. 2015.
 41. Saedi S., Acar E., Raji H., Saghaian S. E., Mirsayar M. Energy damping in shape memory alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Вып. 956. С. 170286.
 42. Zhang Y., You Y., Moumni Z., Anlas G., Zhu J., Zhang W. Experimental and theoretical investigation of the frequency effect on low cycle fatigue of shape memory alloys. *International Journal of Plasticity*. 2017. Вып. 90. С. 1–30.
 43. Zheng L., He Y., Moumni Z. Investigation on fatigue behaviors of NiTi polycrystalline strips under stress-controlled tension via in-situ macro-band observation. *International Journal of Plasticity*. 2017. Вып. 90. С. 116–145.
 44. Pelton A. R., Schroeder V., Mitchell M. R., Gong X.-Y., Barney M., Robertson S. W. Fatigue and durability of Nitinol stents. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2008. Вып. 1, № 2. С. 153–164.
 45. Pelton A. R. Nitinol Fatigue: A Review of Microstructures and Mechanisms. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011. Вып. 20, № 4. С. 613–

- 617.
46. Robertson S. W., Pelton A. R., Ritchie R. O. Mechanical fatigue and fracture of Nitinol. *International Materials Reviews*. 2012. Вып. 57, № 1. С. 1–37.
 47. Sgambitterra E., Magarò P., Niccoli F., Renzo D., Maletta C. Low-to-high cycle fatigue properties of a NiTi shape memory alloy. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Вып. 18. С. 908–913.
 48. Chernenko V. A., L’Vov V. A., Cesari E., Kosogor A., Barandiaran J. M. Transformation Volume Effects on Shape Memory Alloys. *Metals 2013, Vol. 3, Pages 237-282*. 2013. Вып. 3, № 3. С. 237–282.
 49. Wang Z., Luo J., Kuang W., Jin M., Liu G., Jin X., Shen Y. Strain Rate Effect on the Thermomechanical Behavior of NiTi Shape Memory Alloys: A Literature Review. *Metals 2023, Vol. 13, Page 58*. 2022. Вып. 13, № 1. С. 58.
 50. Stachiv I., Alarcon E., Lamac M. Shape Memory Alloys and Polymers for MEMS/NEMS Applications: Review on Recent Findings and Challenges in Design, Preparation, and Characterization. *Metals 2021, Vol. 11, Page 415*. 2021. Вып. 11, № 3. С. 415.
 51. Pyndus Y., Yasniy O., Fostyk V., Maruschak P. Assessment of Minimal Fatigue Crack Growth Rate After a Single Overload in D16chT Alloy. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. Вып. 42, № 4. С. 341–346.
 52. Yasnii V. P., Student O. Z., Yasnii P. V., Nykyforchyn H. Micromechanism of Propagation of Fatigue Cracks in Pseudoelastic NiTi Shape-Memory Alloy. *Materials Science*. 2021. Вып. 56, № 4. С. 461–465.
 53. López G. A. Shape Memory Alloys 2020. *Metals 2021, Vol. 11, Page 1618*. 2021. Вып. 11, № 10. С. 1618.
 54. Morais J., Morais P. G. De, Santos C., Costa A. C., Candeias P. Shape Memory Alloy Based Dampers for Earthquake Response Mitigation. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Вып. 5. С. 705–712.
 55. 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.
56. Dolce M., Cardone D. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. Вип. 43, № 11. С. 2657–2677.
57. Tamai H., Kitagawa Y. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building. *Computational Materials Science*. 2002. Вип. 25, № 1–2. С. 218–227.
58. Каур А., Altay O., Klinkel S. Strain amplitude effects on the seismic performance of dampers utilizing shape memory alloy wires. *Engineering Structures*. 2021. Вип. 244. С. 112708.
59. Qiu C., Zhu S. Shake table test and numerical study of self-centering steel frame with SMA braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2017. Вип. 46, № 1. С. 117–137.
60. Ma H., Cho C. Feasibility study on a superelastic SMA damper with re-centring capability. *Materials Science and Engineering A*. 2008. Вип. 473, № 1–2. С. 290–296.
61. Zhou P., Liu M., Li H., Song G. Experimental investigations on seismic control of cable-stayed bridges using shape memory alloy self-centering dampers. *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. Вип. 25, № 7. С. e2180.
62. Zhang Z., Bi K., Hao H., Sheng P., Feng L., Xiao D. Development of a novel deformation-amplified shape memory alloy-friction damper for mitigating seismic responses of RC frame buildings. *Engineering Structures*. 2020. Вип. 216. С. 110751.
63. Torra V., Casciati S., Vece M. Shape Memory Alloys Wires: From Small to Medium Diameter. *Advances in Science and Technology*. 2016. Вип. 101. С. 79–88.
64. Aloisio A., Pasca D. P., Santis Y. De, Hillberger T., Giordano P. F., Rosso M. M., Tomasi R., Limongelli M. P., Bedon C. Vibration issues in timber structures: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Вип. 76. С. 2352–

- 7102.
65. Xie Q., Zhang L., Zhou W., Wang L., Zhou T. Cyclical behavior of timber mortise-tenon joints strengthened with shape memory alloy: experiments and moment-rotation model. *https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1501116*. 2018. Вип. 13, № 8. С. 1209–1222.
 66. Saadat S., Salichs J., Noori M., Hou Z., Davoodi H., Bar-on I., Suzuki Y., Masuda A. An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy. *Smart Materials and Structures*. 2002. Вип. 11, № 2. С. 218–229.
 67. 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.
 68. DesRoches R., McCormick J., Delemont M. Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars. *Journal of Structural Engineering*. 2003. Вип. 130, № 1. С. 38–46.
 69. Buckle I. G., Friedland I., Mander J. B., Martin G., Nutt R., Power M. Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures : Part 1 – Bridges. 2006. № January. С. 1–658.
 70. Neelakanta P. *Smart Materials*. 2013. Вип. 4, № 3. С. 4172.
 71. Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій: пат. 116582 Україна: F16F 7/12. № u 2016 12829; заявл. 16.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10. 3 с., .
 72. Choi S. B., Park Y. K., Fukuda T. A proof-of-concept investigation on active vibration control of hybrid smart structures. *Mechatronics*. 1998. Вип. 8, № 6. С. 673–689.
 73. Yuvaraja M., Senthilkumar M. Comparative Study on Vibration Characteristics of a Flexible GFRP Composite Beam Using SMA and PZT Actuators. *Procedia Engineering*. 2013. Вип. 64. С. 571–581.
 74. Lu L. Y., Lin C. C., Lin G. L., Lin C. Y. Experiment and analysis of a fuzzy-controlled piezoelectric seismic isolation system. *Journal of Sound and Vibration*. 2010. Вип. 329, № 11. С. 1992–2014.

75. Lu L. Y., Lin G. L., Lin C. Y. Experimental verification of a piezoelectric smart isolation system. *Structural Control and Health Monitoring*. 2011. Вип. 18, № 8. С. 869–889.
76. Zhan M., Zhang L., Chen X., Wang S. Dynamic response control of engineering structure equipped with smart compound damper. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*. 2022. Вип. 175, № 2. С. 129–140.
77. Bykiv N. Z., Yasnii P. V., Iasnii V. P. Modeling of mechanical behavior of reinforced concrete beam reinforced by the shape memory alloy insertion using finite elements method. *Сучасні Технології Та Методи Розрахунків У Будівництві*. 2020. Вип. 3, № 13. С. 24–34.
78. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Understanding the compressive behavior of shape memory alloy (SMA)-confined normal- and high-strength concrete. *Composite Structures*. 2018. Вип. 202. С. 943–953.
79. 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.
80. Ai-Rong L., Chun-Hui L., Ji-Yang F., Yong-Lin P., Yong-Hui H., Jun-Ping Z. A Method of Reinforcement and Vibration Reduction of Girder Bridges Using Shape Memory Alloy Cables. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2017. Вип. 17, № 7. С. 6–23.
81. Abraik E., Al O. Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars Emad Abraik. .
82. Soul H., Yawny A. Self-centering and damping capabilities of a tension-compression device equipped with superelastic NiTi wires. *Smart Materials and Structures*. 2015. Вип. 24, № 7. С. 075005.
83. DBN V.1.2-2:2006 Navantazhennia ta vplyvy. Normy proektuvannia : ДБН В.1.2-2:2006. — [Чинний від 2006].
84. Rajasekaran S. Structural dynamics of earthquake engineering. Theory and application using MATHEMATICA and MATLAB. Woodhead Publishing

- Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK, 2009. 903 с. ISBN 9781855739673.
85. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. — [Чинний від 2014]. — 118 с.
 86. Tateo V., Casolo S. Explicit dynamic analysis by a rigid body-spring model of impact loads of artillery on middle age fortifications. *Buildings*. 2021. Вип. 11, № 12.
 87. Nguyen T.-H., Tuong T., Phan V., Le T.-C., Ho D.-D., Huynh T.-C., Ruggieri S. Numerical Simulation of Single-Point Mount PZT-Interface for Admittance-Based Anchor Force Monitoring. 2021.
 88. Katsikadelis J. T. *Dynamic Analysis of Structures*. 2020. 1–786 с. ISBN 9780128186435.
 89. 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.
 90. Azhir P., Asgari Marnani J., Panji M., Rohanimanesh M. S. A Coupled Finite-Boundary Element Method for Efficient Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction Modeling. *Mathematical and Computational Applications*. 2024. Вип. 29, № 2. С. 24.
 91. Azadpour F., Maghsoudi A. A. Experimental and analytical investigation of continuous RC beams strengthened by SMA strands under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2020. Вип. 239.
 92. Lyu P., Fang Z., Wang X., Huang W., Zhang R., Sang Y., Sun P. Explosion Test and Numerical Simulation of Coated Reinforced Concrete Slab Based on BLAST Mitigation Polyurea Coating Performance. *Materials*. 2022. Вип. 15, № 7.
 93. ASTM F2516-14. Standard Test Method for Tension Testing of Nickel-Titanium Superelastic Materials. Book of Standards Volume: 13.02. — [Чинний від 2014].
 94. 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.
95. 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.
 96. Wang Z. G., Zu X. T., Huo Y. Effect of heating/cooling rate on the transformation temperatures in TiNiCu shape memory alloys. *Thermochimica Acta*. 2005. Вип. 436, № 1–2. С. 153–155.
 97. Çakmak U. D., Major Z., Fischlschweiger M. Mechanical consequences of dynamically loaded niti wires under typical actuator conditions in rehabilitation and neuroscience. *Journal of Functional Biomaterials*. 2021. Вип. 12, № 1. С. 11–17.
 98. Iasnii V., Yasniy P., Baran D., Rudawska A. The effect of temperature on low-cycle fatigue of shape memory alloy. 2019. Вип. 50. С. 310–318.
 99. Kök M., Dağdelen F., Aydoğdu A., Aydoğdu Y. The change of transformation temperature on NiTi shape memory alloy by pressure and thermal ageing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Вип. 667, № 1.
 100. Sidharth R., Mohammed A. S. K., Sehitoglu H. Functional Fatigue of NiTi Shape Memory Alloy: Effect of Loading Frequency and Source of Residual Strains. *Shape Memory and Superelasticity*. 2022. Вип. 8, № 4. С. 394–412.
 101. Lara-Quintanilla A., Bersee H. E. N. Active Cooling and Strain-Ratios to Increase the Actuation Frequency of SMA Wires. *Shape Memory and Superelasticity*. 2015. Вип. 1, № 4. С. 460–467.
 102. Iasnii V., Junga R. Phase Transformations and Mechanical Properties of the Nitinol Alloy with Shape Memory. *Materials Science*. 2018. Вип. 54, № 3. С. 406–411.
 103. Oliveira J. P., Miranda R. M., Braz Fernandes F. M. Welding and Joining of NiTi Shape Memory Alloys: A Review. *Progress in Materials Science*. 2017. Вип. 88. С. 412–466.
 104. Hamid N. A., Ibrahim A., Adnan A., Ismail M. H. Behaviour of smart reinforced concrete beam with super elastic shape memory alloy subjected to monotonic

- loading. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Вип. 1958.
105. Elbaky Y. I., Youssef M. A., Meshaly M., Elbaky Y. I., Youssef M. A., Meshaly M. Numerical investigation of reinforced-concrete beam-column joints retrofitted using external superelastic shape memory alloy bars. *AIMS Materials Science* 2021 5:716. 2021. Вип. 8, № 5. С. 716–738.
106. Zafar A., Andrawes B. Seismic behavior of SMA–FRP reinforced concrete frames under sequential seismic hazard. *Engineering Structures*. 2015. Вип. 98. С. 163–173.
107. Gupta M. 3D Printing of Metals. *Metals* 2017, Vol. 7, Page 403. 2017. Вип. 7, № 10. С. 403.
108. Hamid N. A., Ibrahim A., Adnan A., Ismail M. H. Behaviour of smart reinforced concrete beam with super elastic shape memory alloy subjected to monotonic loading. American Institute of Physics Inc., 2018. ISBN 9780735416598.
109. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. — [Чинний від 2010].
110. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції Будинків І Споруд. Бетонні Та Залізобетонні Конструкції. Основні Положення. Зі Зміною № 1. — [Чинний від 2011]. — 67 с.
111. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні Конструкції. Основні положення. — [Чинний від 2020].
112. Saiidi M. S., O'Brien M., Mahmoud S. Z. Cyclic response of concrete bridge columns using superelastic nitinol and bendable concrete. *ACI Structural Journal*. 2009. Вип. 106, № 1. С. 69–77.

ДОДАТОК А. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНА КОМПАНІЯ АРХІТЕКТОР»

Тернопільська область, м. Тернопіль, вул. Микулинецька буд 3А, офіс 817,
код ЄДРПОУ – 39458521

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ІБК АРХІТЕКТОР»

Світозар ЯНКОВИЙ

10 листопада 2023 року



А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи

Биків Назарія Зіновійовича

«Підвищення деформівних властивостей елементів конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми»

м. Тернопіль

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Биків Н.З. «Підвищення деформівних властивостей елементів конструкцій за циклічних навантажень шляхом застосування сплавів з пам'яттю форми», а саме результати моделювання методом скінченних елементів залізобетонної балки з, та без, використання вставки із псевдопружного NiTi сплаву за дії циклічних навантажень були використані для оцінки ефективності регулювання залишкових напружень у залізобетонних конструкціях з метою підвищення їх стійкості.

Головний інженер
ТОВ «ІБК АРХІТЕКТОР»

Дайчак І.В.