

УДК 624.012.25: 539.386

ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ В КОНСТРУКЦІЯХ У СЕЙСМІЧНИХ РЕГІОНАХ: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ

USING SHAPE MEMORY ALLOYS IN CONSTRUCTIONS IN SEISMIC ZONES: REVIEW AND FUTURE NEEDS

**Ворончак В.І., аспірант, Ясній О.П., д.т.н. проф., Ясній В.П.,
д.т.н. доц. (Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, Тернопіль)**

**Voronchak V. I., postgraduate, Yasniy O.P., Dr. Science, Prof.,
Yasniy V.P., Ph.D. Assoc. (Ternopil Ivan Puluj National Technical
University, Ternopil)**

У зв'язку із збільшенням кількості землетрусів, забезпечення стійкості до сейсмічного впливу стає все більш актуальним питанням. Один з можливих шляхів вирішення цього завдання - використання сплавів з пам'яттю форми. В даній статті проведено аналіз поточного стану та перспективи використання сплавів з пам'яттю форми в конструкціях для зниження сейсмічного впливу. Висвітлюються унікальні властивості цих матеріалів, особливо їх здатність відновлювати форму після деформації. Наведено результати досліджень використання сплавів з пам'яттю форми. Окреслено проблеми та обмеження, пов'язані з широким застосуванням в будівельній галузі сплавів з пам'яттю форми, та показано перспективні дослідження даних функціональних матеріалів.

In today's environment of increasing seismic activity and toughening requirements for the resistance of buildings to seismic impact, the use of shape memory alloys (SMAs) in structures is becoming one of the most promising areas. This article is devoted to an extended analysis of the current state of the art and prospects for using SMAs to reduce seismic impact on buildings. Shape memory alloys (SMAs) are a special class of materials that can retain their shape and restore it after deformation under external factors such as thermal or mechanical loads. This unique property of FRPs makes them attractive for building structures subjected to seismic loads. One of the key mechanisms of action of SMA is thermoelastic deformation. Under the influence of a certain temperature or mechanical forces, the alloy activates its shape memory and returns to its original configuration. This allows the SMA to adapt to changing environmental conditions and absorb the energy generated during seismic events. Expanded polystyrene in structures reduces the seismic impact on buildings, protecting them from damage and destruction. FRPs can have different chemical compositions, but nickel and titanium

(NiTi) alloys are the most common. They are characterized by high strength, corrosion resistance, and good electrical properties. NiTi alloys can withstand significant deformations, which makes them effective in ensuring the seismic resistance of structures. In addition, other types of SMAs, such as copper-aluminium (Cu-Al) and iron-titanium (Fe-Ti) alloys, also have their characteristics and can be used in seismic construction. The main advantages of using SMAs in seismic structures are their ability to adapt to changing seismic loading conditions, energy absorption, and reduction of transmitted forces and deformations to the building. Research is being conducted to develop new types of seismic isolators based on SMAs that have improved properties and provide even greater efficiency in reducing seismic impact. However, some problems and limitations are associated with using SMA. These include the high cost of materials, the complexity of designing and testing structures, and the need to ensure stable conditions under operating SMAs in different climatic conditions. As a result, using shape memory alloys in structures to reduce seismic impact is a promising area of research. They have unique properties that contribute to the seismic stability of buildings. Continued research and development of SMAs will help overcome existing problems and ensure the effective use of these materials in seismic construction.

Ключові слова: сплави з пам'яттю форми, ефект псевдопружності, сейсмічні ізолятори, розсіювання енергії, коливання, динамічні навантаження.

Keywords: shape memory alloys, pseudoelasticity, seismic insulators, energy dissipation, vibrations, dynamic loads.

Вступ. Сейсмічна активність є однією з найпоширеніших природних катастроф, яка приносить значні руйнування та загрозу життю людей. Землетруси становлять серйозний виклик для будівельних конструкцій, оскільки вони можуть спричинити значні деформації та руйнування будівель. Тому розробка нових технологій та матеріалів, які допомагають знизити сейсмічний вплив на конструкції і забезпечити їх стійкість, є надзвичайно важливим завданням.

Одним з перспективних напрямків в цьому контексті є використання сплавів з пам'яттю форми в будівельних конструкціях. Сплави з пам'яттю форми (СПФ) - це клас матеріалів, які можуть відновлювати свою форму після деформації під дією зовнішніх факторів, таких як термічні або механічні навантаження. Це унікальна властивість, завдяки якій їх ефективно застосовувати в конструкціях, які піддаються динамічним навантаженням, зокрема сейсмічним.

Механізм дії СПФ базується на явищі термоеластичної деформації. Під впливом певної температури або механічних сил, сплав активує свою пам'ять форми і повертається до свого початкового стану. Це дозволяє СПФ адаптуватися до змін у навколишніх умовах та розсіювати енергію, що виникає під час динамічних навантажень. Таким чином, вони можуть знижувати сейсмічний вплив на будівлі та конструкції, захищаючи їх від пошкоджень та руйнувань. СПФ можуть мати різний хімічний склад, однак, найбільш поширені є на основі нікелю (Ni) та титану (Ti). Часто до

складу СПФ також включають додаткові елементи, що можуть покращувати їх властивості, наприклад, мідь (Cu), алюміній (Al), кобальт (Co), хром (Cr) та інші. За хімічним складом окрім нікель-титанових (Ni-Ti) сплавів які, містять близько 50-55% нікелю та 45-50% титану також незначній кількості домішок, таких як кобальт, хром або залізо є: мідь-алюмінієві (Cu-Al) сплави містять близько 10-15% алюмінію та 85-90% міді, додаткові домішки, такі як нікель, титан або цирконій; Залізо-титанові (Fe-Ti) сплав містить варіації заліза та титану залежно від конкретного сплаву. Можуть містити додаткові елементи, такі як нікель, кобальт, хром тощо.

Нітінол характеризується високою міцністю, корозійною стійкістю, біосумісністю та відмінними електричними властивостями. Крім цього, NiTi сплави можуть витримувати високі деформації (до 8%) [1]. Межа міцності сплавів на основі нікелю та титану (NiTi) може значно варіюватися залежно від хімічного сплаву, обробки та умов випробування [2]. Зазвичай границя міцності NiTi сплавів знаходиться у діапазоні від 300 до 1000 МПа. Висока границя міцності сплавів NiTi пов'язана з їх унікальними механізмами деформації, такими як псевдопружність та мартенситні перетворення. Ці механізми дозволяють NiTi сплавам витримувати значні навантаження без постійного пошкодження або деформації завдяки чому вони широко використовуються в багатьох сферах, зокрема в медицині [3], авіації [4, 5, 6], машинобудуванні [7, 8, 9, 10], будівництві [10, 11, 12, 13] та ін.

В контексті сейсмостійкого будівництва, одним з потенційних застосувань СПФ є їх використання в сейсмічних ізоляторах.

Сейсмічні ізолятори - це конструктивні елементи, які ізолюють будівлю від землі, знижуючи передачу сейсмічних хвиль від ґрунту до будівлі. Вони використовуються в сейсмостійких конструкціях з метою поглинання та розсіювання енергії землетрусу, що допомагає зменшити руйнування будівлі.

Приклади застосування СПФ у конструкціях

Сплави із пам'яттю форми можуть застосовуватися у конструкціях в якості різних елементів: дротин, стержнів, пружин, самоцентрувальних демпферів [14].

У дослідженні [11] розроблено альтернативні самоцентрувальні пристрої, що характеризуються інтелектуальним елементом, який зменшує пошкодження сталевих щільних демпферів розсіювання енергії (Рис. 1). Поєднання сталевих щільних демпферів із надпружними стержнями із СПФ забезпечують самоцентрування при розвантаженні та відповідно, сприяють зменшенню постійної деформації сталевих демпферів. Сталеві щільні демпфери в поєднанні з надпружними згинальними стержнями СПФ оцінювали з точки зору непружної поведінки, змодельованої за допомогою уточненого аналізу методом скінчених елементів. Моделі

щілинних демпферів, що піддаються циклічним навантаженням, відкалібрували за наявними результатами випробувань з метою точного прогнозування поведінки. Реакції запропонованих щілинних демпферів порівняли з реакціями традиційних щілинних демпферів. В результаті, використання СПФ-стержнів допомагають зменшити постійну деформацію в середньому на 27% порівняно зі звичайною щілинною демпferною системою. Коефіцієнти самоцентрування демпферів із використанням СПФ перевищують 76% для всіх модельних випадків.

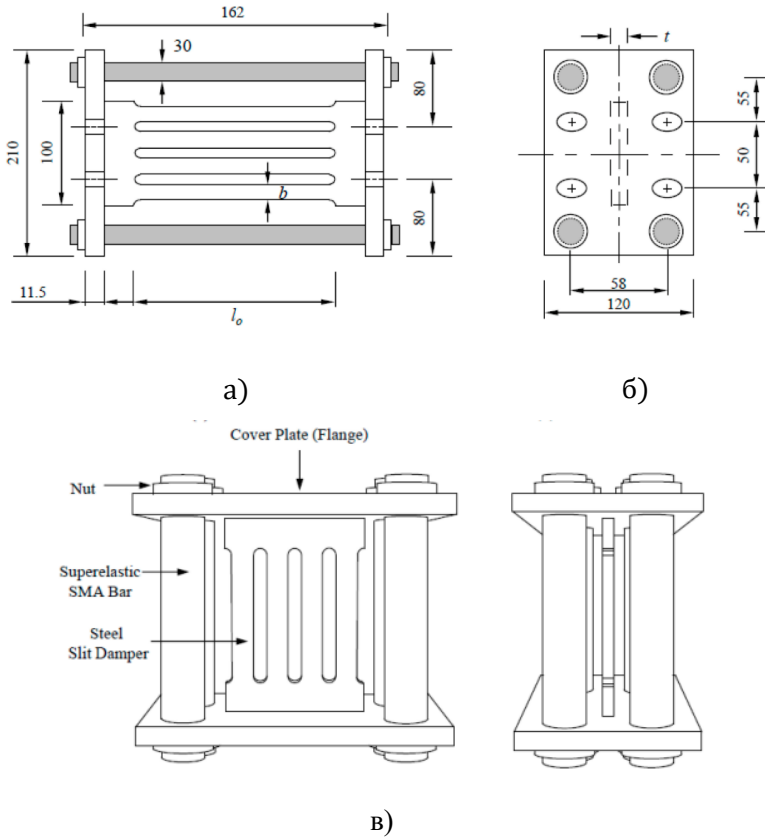


Рис. 1. Схема щілинного демпфера із надпружними СПФ-стержнями:
а) вид спереду; б) вид зверху; в) 3D вид [11]

Дослідження [12] демонструє перспективу у застосуванні СПФ-пружин, в якості елемента підвищення сейсмічної стійкості будівельних конструкцій завдяки компактній формі, демпфуючим властивостям, здатності до відновлення і гнучкій жорсткості. Авторами представлено

концепцію пружини, виготовленої з надпружного СПФ-дроту із (NiTi) сплаву (Рис. 2). Для визначення та оцінки втомних характеристик, пружину піддали циклічному навантаженню. Отримані результати (Таблиця 1) було використано при моделюванні поведінки СПФ.



Рис. 2. Пружина із СПФ-дроту [12]

Таблиця 1

Властивості СПФ для моделювання методом скінченних елементів

E_A	E_M	σ_{Ms}	σ_{Mf}	σ_{As}	σ_{Af}	ϵ_t
48 ГПа	38 ГПа	550 МПа	760 МПа	520 МПа	300 МПа	0,04

Методом скінченних елементів, підтверджено подібність модельної поведінки до натурної. На основі скінченно-елементної моделі, побудованої в платформі для моделювання сейсмостійкості OpenSees, СПФ-пружину досліджено на рівні ізоляції триповерхової сталеві рами. Результати порівнювались із звичайною еластичною пружиною. Обидві ізольовані рами піддавались трьом динамічним навантаженням, що відповідають записам дійсних землетрусів. Порівняння показало, що використання пружин СПФ є більш ефективним у контролі максимальної та залишкової деформації для захисту споруд. СПФ-пружина продемонструвала відмінну здатність до самоцентрування, еквівалентний коефіцієнт демпфування становив більше 2%.

У статті [13] розглянуто сейсмічну дію і характеристики самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб, які піддавали декільком максимальним або проєктним коливанням ґрунту під час землетрусу. Самоцентрувальні фрикційні демпферні скоби використовували як частину системи кріплення. Деталі самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб схематично зображено на Рис. 3. Самоцентрувальні фрикційні демпферні скоби складаються із двох зрізних пластин, чотирьох болтів, отворів для болтів і багатожильного надпружного дроту СПФ. У

порівнянні зі звичайними розпірними елементами для використання в сталевих концентрично закріплених конструкціях рам, ці самоцентрувальні фрикційні демпферні елементи найкраще продемонстрували свою здатність до самоцентрування для мінімізації залишкових деформацій. Таким чином, витримавши задане навантаження необхідності у заміні елемента не було. У цьому дослідженні описано конфігурацію та механізм реагування самоцентрувальних фрикційних скоб та проведено параметричні дослідження за допомогою нелінійного аналізу часової історії, виконаного на чисельних моделях пружин з одним ступенем вільності. Після аналізу результатів дослідження запропоновано методологію проектування, яка оптимально враховує здатність до самоцентрування та дисипації енергії відповідно до їхніх порівняльних параметрів, з метою використання переваг енергетичного потенціалу та одночасної мінімізації залишкових деформацій.

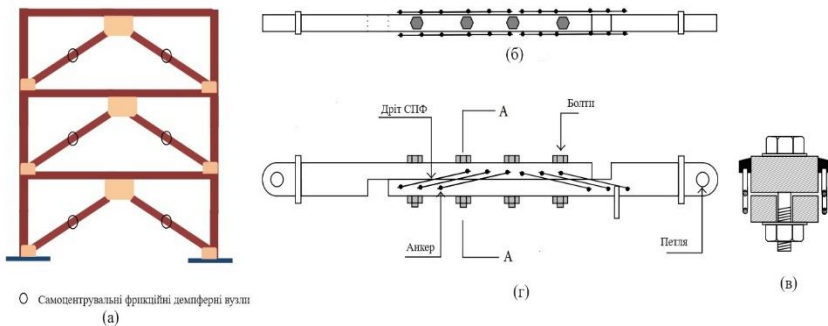


Рис. 3. Схема рами із застосування самоцентрувальних фрикційних демпферних скоб: а) рама з розкосами (вид спереду); б) вид спереду; в) розрізі А-А; г) вид зверху [13]

Для досягнення оптимальної конструкції, яка б забезпечувала зменшення постійної деформації і збільшення здатності до розсіювання енергії, сили самоцентрування повинні бути трохи більшими або, принаймні, рівними силам тертя. Це може бути досягнуто шляхом регулювання початкового натягу болтів з метою простого контролю сил тертя в системі. Ця оптимальна концепція проектування, застосована до інтелектуальних систем самоцентрування, перевірена за допомогою статистичного дослідження, виконаного на основі декількох результатів аналізу.

Результати досліджень підтверджують потенціал застосування СПФ в активних системах контролю вібрацій для покращення стійкості будівельних конструкцій під дією динамічних навантажень, зокрема

землетрусів. Використання СПФ-елементів дозволяє ефективно дисипувати енергію та знижувати амплітуду коливань, забезпечуючи більшу безпеку та стійкість будівель.

References

1. DesRoches, R.; Smith, B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *J. Earthq. Eng.* 2004, 8, 415–429.
2. Iasnii V., Bykiv N., Yasniy O., Budz V. (2022) Methodology and some results of studying the influence of frequency on functional properties of pseudoelastic SMA. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 107, no 3, pp. 45-50
3. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 65. P. 299–303.
4. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.
5. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.
6. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 527–559.
7. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des*. Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.
8. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.
9. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 785–808.
10. Yasnij P.V., Yasnij V.P. Dempfuyuchy`j pry`strij dlya transportuvannya dovgomirny`x konstrukcij. Patent na korysnu model` #116582 vid 25.05.2017: pat. Byuleten` #10 USA. Ukrayina, 2017.
11. 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 // *Appl Sci*. 2015. Vol 5, № 3. P 187–208.
12. Liu Y. et al. Seismic behavior of superelastic shape memory alloy spring in base isolation system of multi-story steel frame // *Materials (Basel)*. 2019. Vol 12, № 6.
13. Hu J.W., Noh M.H. Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Several Earthquake Ground Motions // *Adv Mater Sci Eng*. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Vol 2015.
14. Application of alloys with shape memory in building structures Bykiv N.Z., Yasniy V.P. Modern technologies and methods of calculations in construction, 3-14.
15. Iasnii V., Yasniy O., Homon S., Budz V., Yasniy P. Capabilities of self-centering damping device based on pseudoelastic NiTi wires. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 278, 115556.

Література

1. DesRoches, R.; Smith, B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *J. Earthq. Eng.* 2004, 8, 415–429.
2. Ясній В., Биків Н., Ясній О., Будз В. (2022) Методика та деякі результати дослідження впливу частоти на функціональні властивості псевдопружних СПФ. Науковий вісник ТНТУ (Терн.), vol. 107, no 3, pp. 45-50.
3. Peng C. et al. Bio-inspired Design Methodology of Sensor-actuator-structure Integrated System for Artificial Muscle Using SMA // *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 65. P. 299–303.
4. Zhang Q. et al. Development and experimental verification of an adaptive structure for phased antenna array using SMA bunch // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 225. P. 111293.
5. Ajaj R.M. et al. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft // *Prog Aerosp Sci*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 120. P. 100682.
6. Pecora R. et al. SMA for aeronautics // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 527–559.
7. Leary M. et al. Design of shape memory alloy actuators for direct power by an automotive battery // *Mater Des*. Elsevier, 2013. Vol. 43. P. 460–466.
8. Zadafiya K. et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 32. P. 217–227.
9. Riccio A. et al. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges // *Shape Memory Alloy Engineering*. Elsevier, 2021. P. 785–808.
10. Ясній П.В., Ясній В.П. Демпфуючий пристрій для транспортування довгомірних конструкцій. Патент на корисну модель №116582 від 25.05.2017: пат. Бюлетень №10 USA. Україна, 2017.
11. 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 // *Appl Sci*. 2015. Vol 5, № 3. P 187–208.
12. Liu Y. et al. Seismic behavior of superelastic shape memory alloy spring in base isolation system of multi-story steel frame // *Materials (Basel)*. 2019. Vol 12, № 6.
13. Hu J.W., Noh M.H. Seismic Response and Evaluation of SDOF Self-Centering Friction Damping Braces Subjected to Several Earthquake Ground Motions // *Adv Mater Sci Eng*. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Vol 2015.
14. Застосування сплавів із пам'яттю форми У будівельних конструкціях Биків Н.З., Ясній В.П. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 3-14.
15. Ясній В., Ясній О., Гомон С., Будз В., Ясній П. Можливості самоцентруючого демпферного пристрою на основі псевдопружних NiTi дротів. Інженерні конструкції. 2023. Vol. 278, 115556.