

dr inż. Kacper Wasilewski¹⁾
ORCID: 0000-0001-9138-7682

Mechanical properties testing of shape memory alloys

Badania właściwości mechanicznych stopów z pamięcią kształtu

DOI: 10.15199/33.2025.12.28

Abstract. The article presents the results of mechanical testing of SMA wire related to the superelastic effect. Parameters relevant to construction applications were determined, thereby extending beyond standard SMA testing procedures. The elastic moduli and stress levels associated with phase transformations were identified. The influence of cyclic loading and temperature on the material properties was highlighted.

Keywords: superelasticity; shape memory alloys; smart materials; Nitinol.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań mechanicznych drutu SMA związanych z efektem supersprężystości. Wyznaczono wartości, które są istotne z punktu widzenia zastosowania w budownictwie, rozszerzając tym samym typowe, normowe badania SMA. Określono moduły sprężystości oraz poziomy naprężeń przemian fazowych. Podkreślono wpływ cyklicznego obciążania i temperatury na właściwości materiału.

Słowa kluczowe: supersprężystość; stopy z pamięcią kształtu; materiały inteligentne; Nitinol.

Shape Memory Alloys (SMA) belong to the group of so-called smart materials, which properties can change in a controlled manner in response to external stimuli. Two key features distinguishing SMAs are the shape memory effect and superelasticity [1]. From a macroscopic perspective, both phenomena involve the material's ability to recover its initial shape after prior deformation, in response to a temperature change or unloading. The shape memory effect consists in the return of a deformed specimen to its original (programmed) shape upon heating. On the other hand, superelastic materials can fully recover its shape after mechanical deformation upon unloading without any temperature change. These unique properties result from phase transformations between two stable crystallographic structures: high-temperature austenite with a cubic structure (parent phase) and low-temperature martensite with lower symmetry, typically tetragonal, orthorhombic, or monoclinic [1].

Since their discovery in the late 20th century, SMAs have found applications in engineering fields such as aviation [2], space engineering [3], and civil engineering [4], as well as in medical applications [5], particularly as cardiovascular stents [6]. In structural engineering, SMAs are used primarily to enhance structural resilience to environmental actions, especially dynamic loads such as earthquakes. They are applied in new structures as bracings, connectors, or elements of seismic isolators, and in the strengthening of existing structures, including historic buildings, mainly as ties. These applications rely predominantly on superelasticity. The shape memory effect has also been studied for SMA reinforcement in reinforced concrete members, including as external prestressing reinforcement [7].

Stopy z pamięcią kształtu (ang. *Shape Memory Alloys*, SMA) należą do grupy tzw. materiałów inteligentnych, czyli takich, których właściwości mogą w kontrolowany sposób być zmieniane w wyniku zewnętrznego wymuszenia. Dwie szczególne cechy wyróżniające SMA to pamięć kształtu oraz supersprężystość [1]. W obu przypadkach, opisując te właściwości w sposób makroskopowy, mamy do czynienia ze zdolnością materiału do odzyskiwania pierwotnego kształtu, po uprzednim odkształceniu, w odpowiedzi na zmianę temperatury lub usunięcie obciążenia. Efekt pamięci kształtu polega na powrocie odkształconej próbki do pierwotnego (zaprogramowanego) kształtu po jej podgrzaniu. Z kolei w przypadku supersprężystości, materiał odkształcony mechanicznie może całkowicie odzyskać swój kształt po odciążeniu bez konieczności zmiany temperatury. Wyjątkowe właściwości SMA wynikają z przemian fazowych pomiędzy dwiema stabilnymi strukturami krystalicznymi: wysokotemperaturowym austenitem o strukturze sześcienniej (faza macierzysta) oraz niskotemperaturowym martenzytem, przyjmującym układ tetragonalny, rombowy lub jednoskośny [1].

Od czasów odkrycia szczególnych właściwości SMA w drugiej połowie XX wieku, znajdują one zastosowanie zarówno w dziedzinach technicznych, takich jak lotnictwo [2], inżynieria kosmiczna [3], czy budownictwo [4], ale także w dziedzinach pozatechnicznych, jak np. medycyna [5] (przede wszystkim jako stenty sercowo-naczyniowe [6]). SMA są wykorzystywane w budownictwie głównie do poprawy odporności konstrukcji na oddziaływanie środowiskowe, a szczególnie oddziaływanie dynamiczne, takie jak np. trzęsienia ziemi. Stosowane są zarówno w nowo projektowanych budynkach jako stężenia, łączniki lub elementy izolatorów wstrząsów, jak i podczas wzmocniania istniejących obiektów, w tym historycznych, gdzie znajdują zastosowanie głównie jako elementy ściągów. W tego typu zastosowaniach wykorzystywane jest przede wszystkim zjawisko supersprężystości. Zjawisko pamięci kształtu było natomiast analizowane przez zastosowanie SMA jako zbrojenia elementów żelbetowych, w tym zewnętrznego zbrojenia sprężającego [7].

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej;
kacper.wasilewski@pw.edu.pl

This article presents the results of mechanical tests of SMA wire samples focused on characterizing superelastic behavior. The analysis is based on cyclic tensile testing (Figure 1). When the specimen is strained at a temperature above the characteristic temperature required to maintain austenitic

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych próbek drutu ze stopu z pamięcią kształtu, związane z zjawiskiem supersprężystości. W tym celu przeanalizowano wynik próby cyklicznego rozciągania próbki SMA (rysunek 1). W przypadku, gdy próbka zostanie odkształco-

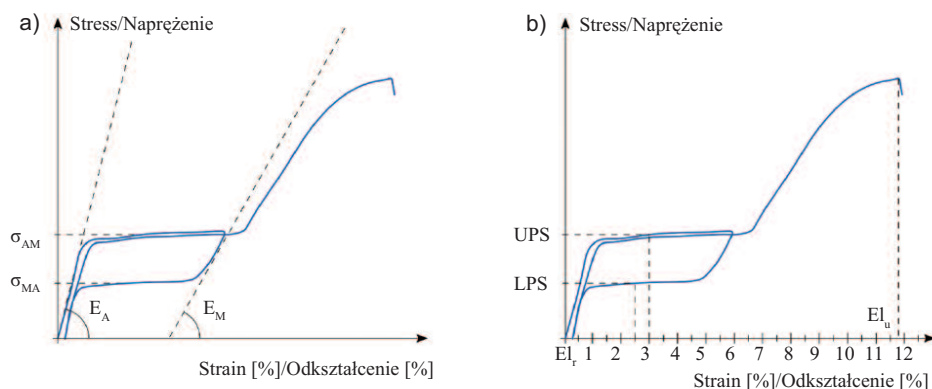


Fig. 1. Designations of SMA mechanical properties: a) determined during the author's tests; b) determined during the tests acc. to ASTM standard [8]

Rys. 1. Zależność naprężeń od odkształceń wraz z oznaczeniami właściwości mechanicznych SMA: a) wyznaczanych podczas badań autora; b) wyznaczanych podczas badania wg normy ASTM [8]

structure, a phase transformation into oriented (detwinned) martensite occurs once the stress reaches a certain level. This is accompanied by a significant strain increase with only a limited change in stress. After the transformation, the specimen regains stiffness and further deformation is associated with a clear increase in stress. During unloading, martensite becomes unstable and transforms back into austenite, allowing full shape recovery. A plateau in the stress – strain response is also observed in some conventional metals (e.g., steel), but is associated with irreversible plastic deformation. In contrast, reversible strain recovery in typical metals is below 1%, whereas superelastic SMAs can recover up to 8% of strain [1].

Methodology

The most widely referenced standard for superelastic SMA testing is ASTM F2516: *Standard Test Method for Tension Testing of Nickel – Titanium Superelastic Materials* [8]. The standard procedure defines characteristic stress levels (*UPS* – upper plateau stress, *LPS* – lower plateau stress, and σ_{max} – tensile strength) as well as deformation parameters (El_r – difference in strain between the beginning and end of the loading – unloading cycle, and El_u – strain at fracture). However, the standard does not address parameters crucial for structural engineering applications, such as elastic stiffness of the individual phases. Therefore, the present research focused on determining the following SMA mechanical properties:

- Young's modulus of martensite (E_M) and austenite (E_A);

- stress levels associated with phase transformations: (σ_{AM}) (start of martensitic transformation) and (σ_{MA}) (start of reverse transformation).

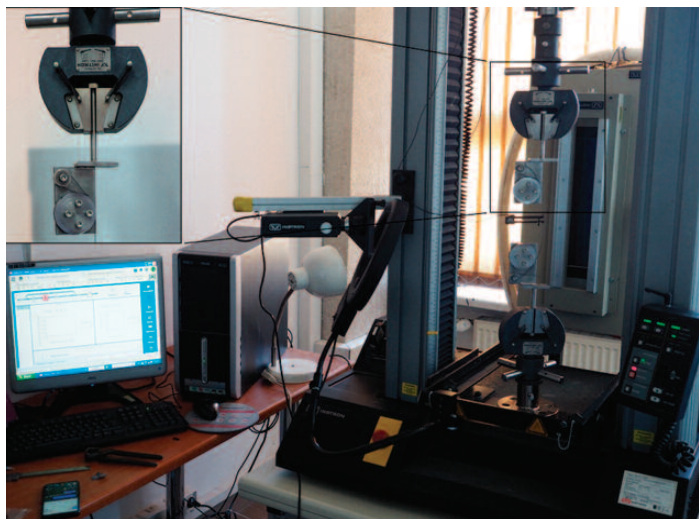
na w temperaturze powyżej charakterystycznej temperatury, która zapewnia formę krystaliczną w postaci austenitu, to po osiągnięciu odpowiedniego poziomu naprężeń zachodzi w niej przemiana fazowa w martenzyt zorientowany (odblinaczony). Towarzyszy temu znaczny przyrost odkształceń przy niewielkim (lub niemal zerowym) przyroście naprężeń. Po zakończeniu przemiany próbka „odzyskuje” sztywność i dalszy przyrost odkształceń wiąże się z zauważalnym przyrostem naprężeń. Podczas odciążania próbki, martenzyt staje się niestabilny i następuje odwrotna przemiana w austenit, prowadząc do pełnego odzyskania pierwotnego kształtu. Obecność *plateau* na wykresie zależności naprężeń od odkształceń jest charakterystyczna także w przypadku innych stopów metali (np. stali), ale wiąże się z niemożliwymi do „odzyskania” odkształceniami plastycznymi. Możliwość sprężystego odzyskania odkształceń typowych metali to mniej niż 1%, natomiast w przypadku stopów charakteryzujących się supersprężystością, takich jak SMA, osiąga nawet 8% [1].

Metoda badań

Najczęściej przywoływaną normą odnoszącą się do badania supersprężystości SMA jest norma ASTM F2516: *Badanie rozciągania supersprężystych stopów niklu i tytanu* międzynarodowej organizacji ASTM International [8]. Wynikiem badania normowego jest określenie charakterystycznych poziomów naprężeń (*UPS* – poziom odpowiadający „górnemu” *plateau*, *LPS* – poziom odpowiadający „dolnemu” *plateau* oraz σ_{max} – poziom naprężeń przy zerwaniu próbki) oraz odkształceń (wydłużeń) próbki (El_r – różnica odkształceń na początku i na końcu cyklu odciążania i obciążania próbki oraz El_u – wydłużenie próbki przy zniszczeniu). Norma nie określa sposobu ustalenia parametru, istotnego z punktu widzenia aplikacji w budownictwie, takiego jak sztywność poszczególnych struktur krystalicznych. W związku z tym przeprowadzone badania by-

The test procedure was developed using existing standards and methodologies described in the literature (e.g., [9, 10]). Whenever possible, the notation used in ASTM F2516 [8] was adopted. The phase transformation stresses were denoted in accordance with plateaus stresses from the ASTM standard: $\sigma_{AM} = UPS$ and $\sigma_{MA} = LPS$. The elastic moduli (E_A , E_M) were determined graphically as tangents to the stress–strain curve in the appropriate regions: E_A – during loading up to the upper plateau, E_M – during unloading between the upper and lower plateau. The loading protocol specified in ASTM F2516 – one loading-unloading cycle followed by loading to failure, was extended by three additional preliminary conditioning cycles.

Tests were performed on three samples of nickel-titanium alloy (Nitinol) wire specimens with a diameter of 1 mm. All experiments were carried out at room temperature. The recorded temperatures exceeded the characteristic temperature for completion of austenitic transformation, ensuring austenitic phase necessary for superelastic behavior. A universal testing machine INSTRON 5567 with 5 kN load cell was used. Strain measurements were performed with a dynamic extensometer INSTRON 2620-601 (gauge length 12.5 mm, strain range $\pm 40\%$). Since the full wire length serves as the gauge length, special grips were designed to avoid stress concentration. The test setup with a close-up of the gripping device is shown in the photo.



The test setup during the experiment with a close-up of the gripping device

Stanowisko badawcze w trakcie badania ze zbliżeniem na szczęki mocujące

Discussion of results

The test results are presented in tables summarizing the mechanical properties of each specimen (Table 1), averaged results for all specimens divided by test cycle (Table 2), and stress – strain diagrams (Figures 2 ÷ 4). Analysis of results of individual tests and general trends based on averaged results reveals a clear decrease in the stress levels at which phase transformations occur. Between the first and fourth cycles, the reduction reached 14.8% for martensitic (from austenitic to

ły zorientowane na ustalenie następujących właściwości mechanicznych SMA:

- moduły Younga dwóch faz: martenzytu (E_M) i austenitu (E_A);
- poziomy naprężeń odpowiadających przemianom fazowym: martenzytycznej (σ_{AM}) oraz odwrotnej (σ_{MA}).

Jako podstawę do opracowania procedury badawczej wykorzystano istniejące normy oraz doświadczenia opisane w literaturze, m.in. [9, 10]. W miarę możliwości wyznaczanym charakterystykom przypisano wartości i sposób ich oznaczenia przyjęty w normie ASTM F2516 [8]. Wielkościom naprężeń odpowiadających przemianom fazowym przypisano normowe wartości, przyjmując odpowiednio $\sigma_{AM} = UPS$, a $\sigma_{MA} = LPS$. Wartości sztywności materiału w poszczególnych fazach (E_A , E_M) wyznaczono graficznie, jako styczne do wykresu zależności naprężeń od odkształceń w odpowiednich fazach: E_A – podczas obciążania do poziomu górnego plateau; E_M – podczas odciążania pomiędzy poziomami górnego a dolnego plateau. Procedurę obciążenia przewidzianą w normie [8], na którą składa się pojedynczy cykl obciążenia i odciążenia próbki, a następnie obciążenie do zniszczenia, rozszerzono o dodatkowe trzy cykle obciążenia i odciążenia poprzedzające właściwe badanie.

Badania przeprowadzono na trzech próbkach SMA ze stopu niklu i tytanu (Nitinol) w formie drutu o średnicy 1 mm. Doświadczenia przeprowadzono w temperaturze pokojowej, wykonując pomiar indywidualnie każdej próbki. Zarejestrowana temperatura była na poziomie powyżej temperatury charakterystycznej na etapie zakończenia przemiany austenitycznej. Oznacza to, że materiał miał odpowiednią strukturę krystaliczną w przypadku zaobserwowania zjawiska supersprężystości. Badania wykonano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5567, wyposażonej w głowicę do pomiaru siły o zakresie do 5 kN. Pomiar odkształceń wykonano za pomocą dynamicznego ekstensometru INSTRON 2620-601 o bazie pomiarowej równej 12,5 mm i zakresie pomiaru odkształceń $\pm 40\%$. W przypadku badań próbek w formie drutu długością pomiarową jest cała długość próbki, co powoduje konieczność przeciwdziałania koncentracji naprężeń w miejscu zamocowania. W tym celu wykorzystano specjalnie zaprojektowane uchwyty mocujące. Stanowisko badawcze, wraz ze zbliżeniem na uchwyty mocujące, przedstawiono na fotografii.

Omówienie wyników

Wyniki badań przedstawiono w formie tabel zawierających wyznaczone właściwości w przypadku każdej próbki (tabela 1), uśrednione wynikami dotyczącymi wszystkich próbek z uwzględnieniem podziału na poszczególne cykle badania (tabela 2) oraz wykresów przedstawiających zależność naprężeń od odkształceń uzyskanych w wyniku przeprowadzonych badań (rysunki 2 ÷ 4). Analizując wyniki dotyczące poszczególnych próbek oraz ogólną tendencję w przypadku wyników średnich, wyraźnie widoczne jest zmniejszenie wartości naprężeń, przy których dochodzi do przemian fazowych. Zmiana pomiędzy pierwszym a czwartym cyklem wynosi 14,8% w przypadku przemiany martenzytycznej (z austenitu w martenzyt) oraz 6,8% w przypadku przemiany odwrotnej. Zdecydowanie

Table. 1. Mechanical properties values of NiTi alloy samples determined from laboratory tests
Tabela. 1. Wartości właściwości mechanicznych próbek ze stopu NiTi ustalone w wyniku badań laboratoryjnych

Sample/ Próbka	Test/Badanie	σ_{AM} [MPa]	σ_{MA} [MPa]	El [%]	El _u [%]	E _A [GPa]	E _M [GPa]	σ_{max} [MPa]	T [°C]
NiTi_S1	cycle 1/cykl 1	752,535	427,211	0,038	–	70,340	32,920	–	22,0
	cycle 2/cykl 2	684,627	419,153	0,145	–	68,564	32,103	–	
	cycle 3/cykl 3	679,593	416,795	0,020	–	69,962	29,627	–	
	ASTM	610,662	366,245	0,118	11,143	66,624	31,945	1 329,09	
NiTi_S3	cycle 1/cykl 1	762,994	441,339	0,106	–	69,065	37,698	–	23,4
	cycle 2/cykl 2	722,784	430,463	0,098	–	69,924	39,609	–	
	cycle 3/cykl 3	696,848	420,971	0,022	–	66,073	34,807	–	
	ASTM	661,785	419,683	0,047	12,343	65,867	30,901	1 330,46	
NiTi_S4	cycle 1/cykl 1	773,385	444,579	0,006	–	67,843	34,620	–	24,3
	cycle 2/cykl 2	719,906	447,484	0,042	–	67,507	31,098	–	
	cycle 3/cykl 3	690,116	441,079	0,050	–	67,983	32,924	–	
	ASTM	677,190	437,710	0,011	11,217	67,941	33,808	1 331,81	

Table. 2. Averaged test results for samples in specified loading cycles

Tabela. 2. Uśrednione wartości wyników badań próbek w poszczególnych cyklach obciążenia

Test/ Badanie	σ_{AM} [MPa]	σ_{MA} [MPa]	E _A [GPa]	E _M [GPa]
Cycle 1 Cykl 1	762,971	437,710	69,083	35,079
Cycle 2 Cykl 2	709,105	432,367	68,665	34,270
Cycle 3 Cykl 3	688,852	426,282	68,006	32,453
ASTM	649,879	407,879	66,810	32,218

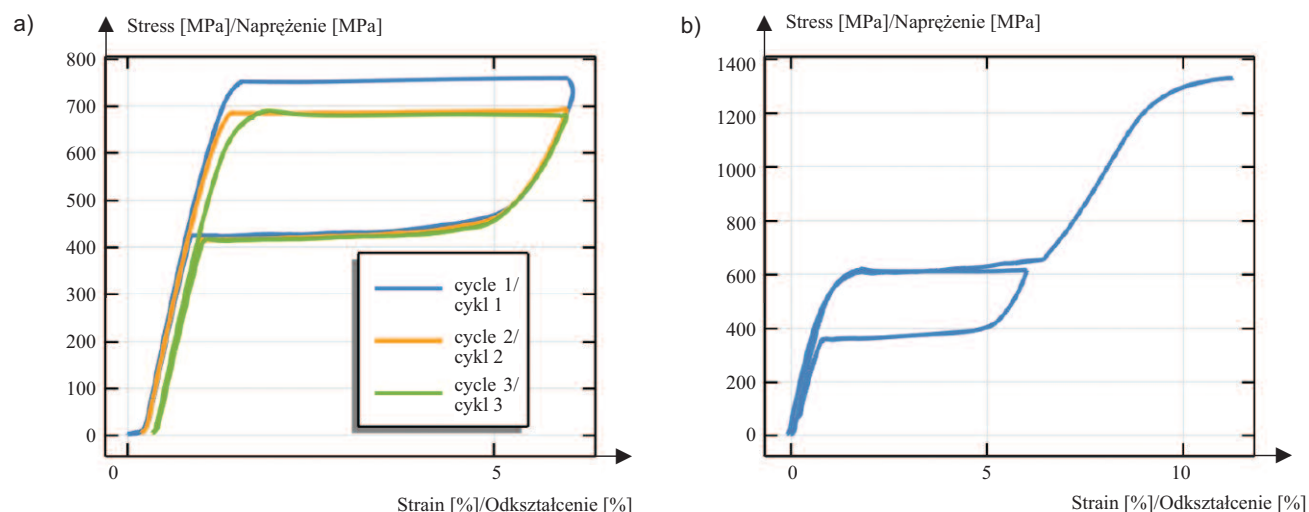


Fig. 2. Stress–strain curves for the sample NiTi_S1 obtained from: a) preliminary cyclic loading; b) standard ASTM test procedure [8]
Rys. 2. Zależność naprężeń od odkształceń w przypadku próbki NiTi_S1 otrzymana w wyniku: a) wstępnego obciążenia cyklicznego; b) badania normowego [8]

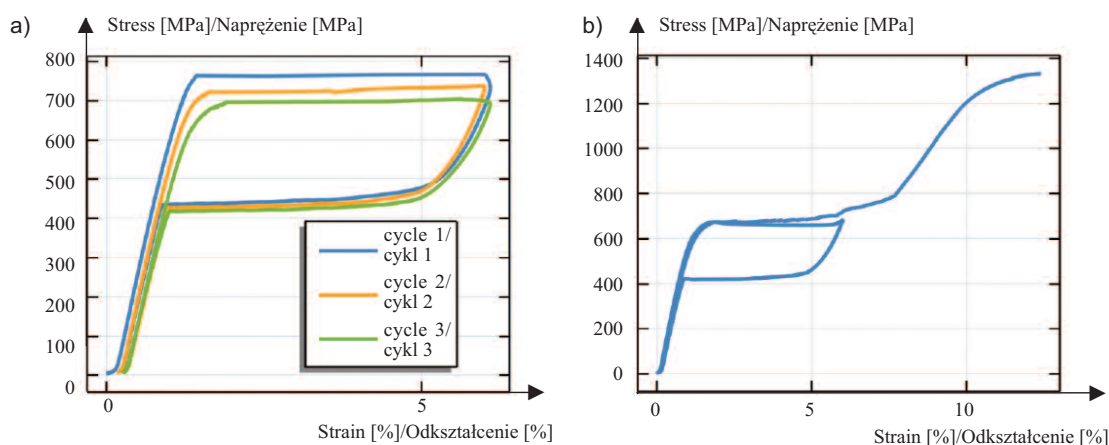


Fig. 3. Stress–strain curves for the sample NiTi_S3 obtained from: a) preliminary cyclic loading; b) standard ASTM test procedure [8]
Rys. 3. Zależność naprężeń od odkształceń w przypadku próbki NiTi_S3 otrzymana w wyniku: a) wstępnego obciążenia cyklicznego; b) badania normowego [8]

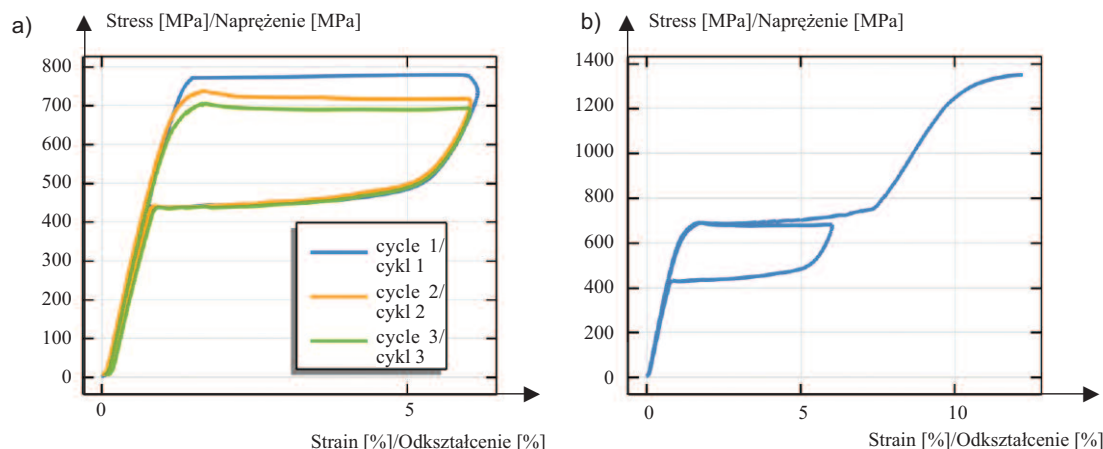


Fig. 4. Stress–strain curves for the sample NiTi_S4 obtained from: a) preliminary cyclic loading; b) standard ASTM test procedure [8]
Rys. 4. Zależność naprężeń od odkształceń w przypadku próbki NiTi_S4 otrzymana w wyniku: a) wstępnego obciążenia cyklicznego; b) badania normowego [8]

martensitic phase) transformation and 6.8% for reverse transformation. Changes in stiffness of each phases were significantly smaller (3.3% for austenite and 8.2% for martensite). This phenomenon, reported in the literature [11], is attributable to the so-called SMA training process, wherein repeated cycling stabilizes material behavior.

It should be noted that the standard stiffness value for martensite (E_M) corresponds to unloading after reaching 6% strain, which is the normative limit of reversible superelastic deformation and thus the assumed end of martensitic transformation. However, charts obtained from normative tests (Figures 2b – 4b) show that in some cases the re-stiffening (increase in curve slope) occurred at higher strains. Since the stiffness increase corresponds to the actual end of transformation, the martensitic modulus determined in this manner (E_M^*) is reported in Table 3. These values are, on average, 40% lower than those determined using earlier assumptions.

Another important observation was the dependence of the phase transformation stress level on temperature. Although this effect is well-known [10], it is noteworthy that even within a narrow temperature range (22.0 – 24.3°C), the trend remained clear, with transformation stress varying by 3 – 4%.

Table. 3. Martensite stiffness values after complete phase transformation

Tabela. 3. Wartości sztywności martenzytu po pełnej przemianie fazowej

	NiTi_S1	NiTi_S3	NiTi_S4	Mean value Średnia
E_M^* [GPa]	22,314	18,896	20,434	20,548

Conclusions

This paper presents an extended experimental program for SMA mechanical characterization relevant to describing superelastic behavior in structural engineering applications. The results highlight the specificity of SMA testing, which

mniejsza różnica dotyczy sztywności poszczególnych struktur krystalicznych (3,3% dla austenitu i 8,2% dla martenzytu). Jest to zjawisko opisywane w literaturze [11] i wiąże się z tzw. treningiem elementów SMA, rozumianym jako cykliczne obciążenie, po którym właściwości materiału stabilizują się.

Należy zwrócić uwagę, że wskazywana dotychczas wartość sztywności martenzytu E_M odpowiada sztywności w trakcie odciążania próbki po osiągnięciu odkształcenia na poziomie 6%, co normowo uznane jest za granice odwracalnych odkształceń, związanych ze zjawiskiem supersprężystości, a co za tym idzie, koniec przemiany martenzytycznej. Na wykresach próby normowej (rysunki 2b – 4b) widoczne jest, że w niektórych przypadkach ponowne „usztynwienie” próbki (wyraźny wzrost nachylenia wykresu) nastąpiło przy większych odkształceniach. Przyrost sztywności związany jest z faktycznym zakończeniem przemiany martenzytycznej. Wartości modułu Younga dla martenzytu po zakończeniu przemiany E_M^* podano w tabeli 3. Wartości odczytane w ten sposób są mniejsze od tych wyznaczonych przy wcześniejszych założeniach średnio o 40%.

Kolejną istotną obserwacją była zależność poziomu naprężeń, przy których dochodzi do przemiany fazowej od temperatury. Efekt ten jest powszechnie opisywaną cechą SMA [10], jednak warto zwrócić uwagę, iż pomimo że badania były przeprowadzane w warunkach o zbliżonej temperaturze (max. 24,3°C, min. 22,0°C), trend był zauważalny, a zmiana wynosiła 3 – 4% wartości naprężeń.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki rozszerzonego zakresu badań właściwości mechanicznych SMA istotnych z punktu widzenia opisu zjawiska supersprężystości wykorzystywanego w zastosowania budowlanych tych materiałów. Przeprowadzone doświadczenia prezentują specyfikę badania materiałów z pamięcią kształtu jako szczególnie wymagające w odniesieniu do badań typowych materiałów budowlanych. Wyniki badań mogą posłużyć jako dane wejściowe do symulacji

is significantly more demanding compared with traditional construction materials. The obtained data can serve as input for numerical simulations of SMA-based structural systems relying on superelastic behavior, particularly those employing phenomenological constitutive models [12]. However, the results pertain exclusively to isothermal conditions.

Modern SMA applications in civil engineering primarily aim to mitigate high-intensity loads by exploiting superelasticity. A particularly promising research direction is the use of SMA reinforcement in reinforced concrete elements, both as internal reinforcement prior to casting and as externally bonded strengthening components [13]. Such reinforcement may provide self-centering capabilities and prestressing effects as a result of specific external conditions.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology.

Received: 29.01.2025
Revised: 08.09.2025
Published: 23.12.2025

zastosowań SMA w konstrukcjach budowlanych zorientowanych na wykorzystanie zjawiska supersprężystości, w których wykorzystywane są fenomenologiczne modele materiałowe [12] z zastrzeżeniem, że wyznaczone właściwości odnoszą się jedynie do izotermicznych warunków pracy.

Współczesne zastosowania SMA w budownictwie opierają się głównie na ograniczeniu oddziaływań o wysokiej intensywności, wykorzystując zjawisko supersprężystości. Szczególnie obiecującym kierunkiem badań jest zastosowanie SMA jako zbrojenia elementów żelbetowych, zarówno jako dodatkowego zbrojenia wprowadzonego przed ich betonowaniem, jak i elementów naprawczych mocowanych na istniejących konstrukcjach żelbetowych [13]. Takie zbrojenie może być wykorzystane jako elementy prowadzące do odzyskania pierwotnego kształtu lub położenia w konstrukcji (ang. self-centering), a także jako elementy doprężające konstrukcję w odpowiednich warunkach.

Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 29.01.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.09.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Antonucci V, Martone A. Phenomenology of shape memory alloys, in Shape Memory Alloy Engineering, Elsevier. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00004-2.
- [2] Pecora R, Dimino I, Bray M, Bray R. SMA for aeronautics, Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00015-7.
- [3] Viscuso S, Gualandris S, de Ceglia G, Visentin V. Shape memory alloys for space applications. Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00018-2.
- [4] Gwoździewicz P, Dębska A. Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu w budownictwie. Materiały Budowlane. 2011; 2 (462): 25 ÷ 27.
- [5] Auricchio F, Boatti E, Conti M, Marconi S. SMA biomedical applications. Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Application. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00019-4.
- [6] Auricchio F, Conti M, Marconi S, Morganti S, Scocozza F. SMA cardiovascular applications and computer-based design. Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00020-0.
- [7] Casagrande L, Menna C, Asprone D, Ferraioli M, Auricchio F. Buildings. Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-819264-1.00021-2.

- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM F2516: Standard Test Method for Tension Testing of Nickel-Titanium Superelastic Materials. 2015. [Online]. Available: www.astm.org.
- [9] Hartl DJ, Lagoudas DC. Thermomechanical Characterization of Shape Memory Alloy Materials, in Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, D. C. Lagoudas, Ed., Boston, MA: Springer US, 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-47685-8_2.
- [10] Faiella G, Antonucci V. Experimental Characterization of Shape Memory Alloys, in Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications, L. Lecce and A. Concilio, Eds., Elsevier Ltd. 2015. DOI: 10.1016/B978-0-08-099920-3.00003-6.
- [11] Kumar PK, Lagoudas DC. Introduction to Shape Memory Alloys, in Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, D. C. Lagoudas, Ed., Boston, MA: Springer US. 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-47685-8_1.
- [12] Wasilewski K, Zbiciak A, Terlikowski W. Equation-Based Modeling of Shape Memory Alloys for Reinforcement of Masonry Structures Against Out-of-Plane Excitation. Materials. 2025. DOI: 10.3390/ma-18133124.
- [13] Raza S, Shafei B, Saiid Saiidi M, Motavalli M, Shahverdi M. Shape memory alloy reinforcement for strengthening and self-centering of concrete structures – State of the art. Construction and Building Materials. 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2022.126628.