

dr inż. Janusz Rogowski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4080-5976

dr inż. Ewelina Kołodziejczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-3533-4145

dr inż. Tomasz Waśniewski¹⁾

ORCID: 0000-0001-7303-4920

prof. dr hab. inż. Renata Kotynia¹⁾

ORCID: 0000-0002-7247-1229

The active confinement of reinforced concrete columns using shape memory materials

Aktywne skrepowanie słupów żelbetowych przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu

DOI: 10.15199/33.2025.11.02

Abstract. The article reviews the state of the art in active confinement of RC columns using shape memory alloys (SMA). The previous research in this area showed that confinement with SMA had a positive effect on the deformability and capacity of the elements. In conclusion, future research directions were identified for the influence of concrete strength and reinforcement ratio, the anchoring method of SMA reinforcement, SMA relaxation, and the column slenderness on the effectiveness of the method.

Keywords: active confinement; shape memory alloys; reinforced concrete column; SMA; strengthening.

Streszczenie. Artykuł stanowi przegląd stanu wiedzy dotyczącej aktywnego skrepowania słupów żelbetowych przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu (SMA – z ang. *Shape Memory Alloy*). Wcześniejsze badania wykazały, że skrepowanie przez SMA wpłynęło pozytywnie na odkształcalność i nośność elementów. W podsumowaniu wskazano kierunki dalszych badań dotyczących wpływu wytrzymałości betonu i stopnia zbrojenia, sposobu kotwienia zbrojenia SMA, relaksacji SMA, a także wpływu smukłości słupów na efektywność metody.

Słowa kluczowe: aktywne skrepowanie; materiał z pamięcią kształtu; słup żelbetowy; SMA; wzmacnianie.

Reinforced concrete structures are commonly used in engineering practice and are often associated with longevity and durability. In reality, however, there is frequently a need to strengthen them. The reasons for such interventions may include aging, changes in the function of the building, accidental events, increasing load requirements, or design errors. In such circumstances, strengthening the structure is generally a more cost-effective and convenient option than replacing the old structure with a new one or introducing additional load-bearing systems to change the static scheme. It is also more beneficial from the perspective of sustainable development policies.

One of the main elements of the load-bearing structure that may require strengthening are columns. In Poland, the most common method for strengthening reinforced concrete columns involves applying an additional concrete layer, typically characterized by high compressive strength, along the lateral surfaces of the element, which is called a concrete jacket. The jacket is usually reinforced with additional longitudinal bars and stirrups. However, this solution has limited applicability due to the usually significant increase in column cross-section, which in many cases is not feasible for architectural and functional reasons, and also involves a demanding technological process. Another well-known

obiekty o konstrukcji żelbetowej są powszechnie stosowane w praktyce inżynierskiej i często utożsamiane z długowiecznością i trwałością. W rzeczywistości jednak niejednokrotnie spotykamy się z potrzebą ich wzmocnienia. Powodem tych działań mogą być procesy starzenia, zmiany funkcji budynku, zdarzenia losowe, zwiększające się wymagania dotyczące obciążenia czy błędy projektowe. Wzmocnienie konstrukcji w tej sytuacji jest na ogół bardziej opłacalną i wygodną opcją niż wymiana starej konstrukcji na nową, czy wprowadzanie dodatkowych układów nośnych w celu zmiany schematu statycznego. Jest to również korzystniejsze z punktu widzenia polityki zrównoważonego rozwoju.

Jednym z głównych elementów ustroju nośnego, który może wymagać wzmocnienia, są słupy. W Polsce w przypadku metod wzmacniania słupów żelbetowych najczęściej stosuje się dodatkową warstwę betonu, zwykle o dużej wytrzymałości na ściskanie, na powierzchniach bocznych elementu, który nazywany jest płaszczem betonowym. Płaszcz jest zwykle zbrojony dodatkowymi prętami podłużnymi i strzemionami. Rozwiązanie to ma jednak ograniczone zastosowanie ze względu na zazwyczaj znaczne zwiększenie przekroju słupa, co w wielu przypadkach nie jest możliwe ze względów architektonicznych i funkcjonalnych, a także wiąże się z trudnym procesem technologicznym. Innym dobrze znanym rozwiązaniem jest płaszcz stalowy. W przypadku słupów o przekroju okrągłym może być on wykonany z wykorzystaniem stalowej rury, która tworzy zewnętrzną warstwę wokół elementu,

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*}) Correspondence address: janusz.rogowski@p.lodz.pl

solution is a steel jacket. In the case of circular columns, it may consist of a steel tube forming an external layer around the element, and the gap between the tube and the column filled with new concrete or mortar. In square columns, steel reinforcement is usually introduced using steel angles attached to the corners of the cross-section, which are connected by steel ties placed along the height of the column. It is assumed that such a steel profile corset provides concrete confinement, but it may also contribute to transferring the axial load [1]. More innovative solutions employing composite materials are also popular. The first of these is strengthening with *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) composites [2–5]. An alternative solution is surface strengthening with cementitious matrix composites (FRCM – *Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) [6–8].

By limiting lateral deformations, these solutions introduce confinement to the concrete in the cross-section of the strengthened elements, which may have a positive effect on the load-bearing capacity and ductility of concrete columns. However, all of these techniques provide only passive confinement, and therefore only become active in near-failure conditions when significant deformations occur. An alternative solution is active confinement, which acts on the concrete from the moment of application, which can delay the increase in lateral deformations of the cross-section and improve the behavior of the element. A comparison of both situations in terms of the increase in volumetric strain is shown in figure 1.

The strength increase in the case of passively confined concrete may range from a few to several dozen percent and is accompanied by a significant increase in ultimate strain, while in the case of active confinement, the results may be greater. The main determining factors are the level of confining pressure and the deformability of the concrete. The key difference between passive and active confinement is the presence of initial prestress in the jacket material in the latter case. Such circumferential prestressing introduces the concrete core into a multiaxial stress state from the moment of strengthening (without requiring further external loading to initiate deformation of the concrete). This method will therefore be more independent of the current load state of the column. However, this solution has rarely been used so far due to difficulties associated with inducing prestress in the materials traditionally used for strengthening.

Attempts to introduce active confinement in columns have been undertaken, among others, by Saatcioglu et al. [9], who used steel wires with tensioning accessories, and by Wang et al. [10], who used CFRP composites. Their results demonstrate that confinement led to a significant increase in peak stress compared to unstrengthened specimens. Therefore, new methods of active strengthening are still being sought

a szczelina między płaszczem a elementem jest wypełniona nowym betonem lub zaprawą. W słupach kwadratowych, wzmocnienie stalowe jest zwykle wprowadzane za pomocą stalowych kątowników przymocowanych do narożników przekroju poprzecznego, które są połączone przewiązkami stalowymi umieszczonymi wzdłuż wysokości słupa. Zakłada się, że taki gorset z profili stalowych zapewnia skrzepowanie betonu, ale może być również uwzględniony w przenoszeniu obciążenia siłą osiową [1]. Popularne są także bardziej innowacyjne rozwiązania z zastosowaniem materiałów kompozytowych. Jako pierwsze można wymienić wzmocnienie materiałami kompozytowymi (FRP – z ang. *Fiber Reinforced Polymer*) [2–5]. Alternatywnym rozwiązaniem jest wzmocnienie powierzchniowe na matrycy cementowej FRCM (z ang. *Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) [6–8].

Wymienione rozwiązania, przez ograniczenie odkształceń poprzecznych, wprowadzają skrzepowanie betonu w przekroju wzmocnianych elementów, co może wpłynąć pozytywnie na nośność i ciągliwość słupów betonowych. Wszystkie te rozwiązania prowadzą jedynie do pasywnego skrzepowania betonu, a więc uaktywniają się dopiero w sytuacji bliskiej awarii, gdy występują znaczne odkształcenia. Alternatywnym rozwiązaniem jest skrzepowanie aktywne, które działa na beton od momentu zastosowania, co może opóźnić narastanie odkształceń poprzecznych przekroju i poprawić zachowanie elementu. Porównanie obu sytuacji w odniesieniu do przyrostu odkształceń objętościowych przedstawiono na rysunku 1.

Przyrost wytrzymałości w przypadku betonu skrzepowanego pasywnie może wynosić od kilku do kilkudziesięciu procent i towarzyszy temu znaczny wzrost odkształceń granicznych, a w przypadku skrzepowania aktywnego wyniki mogą być większe. Główne czynniki decydujące to poziom naprężenia kłępującego oraz odkształcalność betonu. Kluczową różnicą między skrzepowaniem pasywnym i aktywnym jest występowanie w przypadku tego drugiego wstępnego naprężenia materiału płaszcza. Takie obwodowe sprężenie od chwili wzmocnienia wprowadza betonowy rdzeń w złożony stan naprężenia (bez konieczności odkształcania betonu pod wpływem dalszego obciążania zewnętrznego).

Metoda ta będzie zatem bardziej niezależna od aktualnego stanu obciążenia słupa. Dotychczas to rozwiązanie było jednak rzadko stosowane ze względu na niedogodności związane z wywoływaniem naprężenia wstępnego w materiałach stosowanych tradycyjnie do wzmocniania.

Próby wprowadzenia aktywnego skrzepowania w słupach podejmowali m.in. Saatcioglu i in. [9], którzy stosowali drut stalowy z akcesoriami napinającymi, czy Wang i in. [10] przy użyciu kompozytów CFRP. Ich wyniki pokazują, że skrzepowanie prowadziło do znacznego zwiększenia maksymalnego naprężenia w porównaniu z próbką niewzmocnioną. Wydaje się więc, że nowe metody aktywnego wzmocniania są nadal poszukiwane i rozwijane ze względu

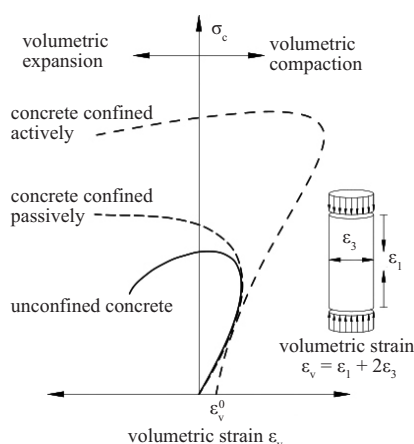


Fig. 1. Stress as a function of concrete volumetric deformation – the effect of confinement

Rys. 1. Naprężenie w funkcji odkształcenia objętościowego betonu – wpływ skrzepowania

and developed due to the limitations of existing solutions, such as costly and cumbersome implementation and complex anchoring systems, or the need to use hydraulic devices for prestressing steel or carbon composites [11]. One of the promising ideas for solving these problems, which is currently gaining attention among researchers, is the application of shape memory alloys (SMA).

Shape memory alloys

SMA are metal alloys that are classified as so-called smart materials, for which a change in properties can be controlled in response to external influences. In the case of SMA materials, this is the ability to recover their original shape after experiencing permanent deformation, which must be activated by a change in temperature (then referred to as the shape memory effect) or strain (superelasticity) [12]. These phenomena are related to the transformation in the SMA crystal lattice between two primary phases: austenite (a high-temperature phase with a regular crystal lattice) and martensite (a low-temperature phase, occurring in multiple variants with an irregular crystal lattice) [13]. This phenomenon is illustrated in figure 2.

The first phase of the transformation, called the forward transformation, occurs as a result of cooling the material (in the absence of stress) or, as in the example in figure 3, due to mechanical loading, and is called **martensitic transformation**. Martensite begins to form at the M_s temperature (martensite start) and constitutes the total content in the material (100%) at the M_f temperature (martensite finish). If the material is subsequently heated, above the temperature known as A_s (the start of austenite formation), a reverse transformation begins, leading to the formation of austenite (provided the material is in the martensitic state).

na ograniczenia istniejących rozwiązań, takie jak kosztowna i niewygodna implementacja oraz skomplikowane systemy kotwienia, czy konieczność stosowania urządzeń hydraulicznych do sprężania za pomocą stali lub kompozytów węglowych [11]. Jednym z pomysłów na rozwiązanie tych problemów, który obecnie zdobywa popularność wśród badaczy, jest zastosowanie materiału z pamięcią kształtu (SMA).

Materiały z pamięcią kształtu

SMA to stopy metali, które klasyfikuje się jako tzw. inteligentne materiały, w przypadku których można kontrolować zmianę właściwości w odpowiedzi na pewne zewnętrzne oddziaływanie. W przypadku materiałów SMA będzie to zdolność do odzyskiwania pierwotnego kształtu po doznaniu trwałej deformacji, która musi zostać aktywowana przez zmianę temperatury (określana wówczas jako efekt pamięci kształtu) czy wyężenia materiału (supersprężystość) [12]. Zjawiska te są związane z przemianami sieci krystalicznej SMA między dwiema głównymi fazami: austenitem (faza wysokotemperaturowa o regularnej sieci krystalicznej) oraz martenzytem (faza niskotemperaturowa, występująca w wielu wariantach o nieregularnej sieci krystalicznej) [13]. Zjawisko to zobrazowano na rysunku 2.

Pierwsza faza przemiany, zwana przemianą w przód, zachodzi w wyniku chłodzenia materiału (przy braku naprężeń) lub, jak w przykładzie na rysunku 3, w wyniku działania naprężeń i nazywana jest **przemianą martenzytyczną**. Martenzyt zaczyna pojawiać się w temperaturze M_s (początek powstawania martenzytu) i stanowi całkowitą zawartość w materiale (100%) w temperaturze M_f (koniec powstawania martenzytu). W przypadku, gdy w dalszej kolejności następuje ogrzewanie materiału, to powyżej temperatury znanej jako A_s (początek powstawania austenitu) rozpoczyna się przemiana odwrotna prowadząca do austenitu (jeśli materiał jest w stanie

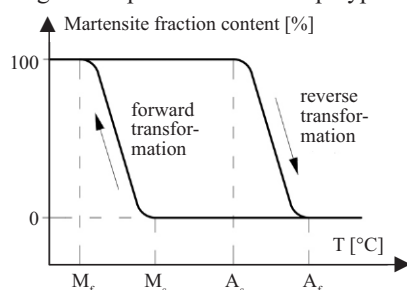
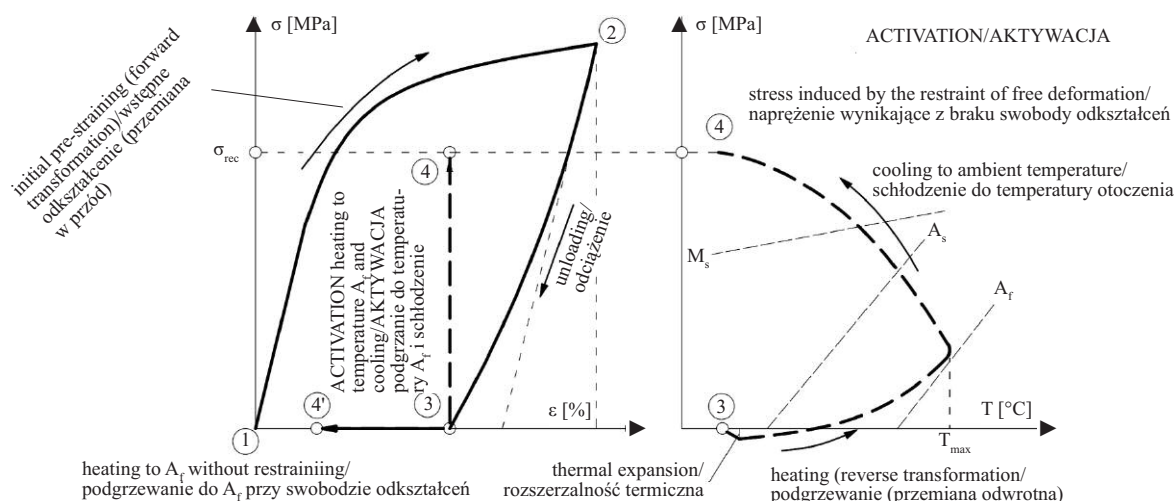


Fig. 2. Phase transformations in SMA material in the absence of stress

Rys. 2. Przemiany fazowe w materiale SMA w przypadku braku naprężeń



Rys. 3. Efekt pamięci kształtu w materiale SMA przy wstępnym obciążeniu

Fig. 3. Shape memory effect in SMA material under initial loading

The reverse transformation finishes at the temperature A_f (austenite finish).

In the presence of stresses, the transformation temperature path becomes more complex (figure 3), although the phase transformation mechanism remains analogous. As a result of the applied load, martensitic phase appears in the material (pre-straining), and upon subsequent heating the reverse transformation to austenite is triggered, causing the shape memory effect. If the deformed material is not free to deform (i.e., it cannot return to its original shape), recovery stresses σ_{rec} will develop in the SMA, which can be used to prestress flexural elements [14] or for actively confining concrete (or reinforced concrete) structural members [15]. Further information on the use of various types of SMA in construction can be found, among others, in [16].

The concept of applying active confinement in a circular reinforced concrete column is shown in figure 4. Prior to strengthening, SMA wire, bar, or strip must be pre-strained (stretched to a predefined strain level, typically on the order of a few percent), and then installed on the surface of the column and anchored at the ends in a way that prevents the material from slippage (at this stage, they may serve as passive reinforcement). After heating the material to the required temperature, the shape memory effect is activated, and restraint of deformation results in the development of shape recovery stresses in the SMA material, which ultimately exert pressure on the reinforced concrete core.

The most popular type of SMA materials are nickel- and titanium-based alloys (NiTiSMA or Nitinol). However, their widespread application in construction is limited due to the high production cost [16] and the narrow temperature hysteresis range (within which the shape memory effect can occur) which can be slightly improved by adding niobium (NiTiNbSMA) to the alloy composition [13]. Apart from cost of SMA materials, another important factor limiting their structural application is their relatively low Young's modulus, which is typically several tens of GPa (table 1).

Despite these limitations, numerous studies have been conducted using NiTi and NiTiNb SMA wires for active confinement of columns. Another type of SMA, characterized by lower production costs and higher Young's modulus, are iron-based alloys (Fe-SMA) (table 1) [18]. Their drawback is that the shape memory effect occurs only partial, which generally leads to lower recovery stresses (130 – 580 MPa, depending on the type of alloy, the pre-strain level, and the

martenzytycznym). Przemiana odwrotna kończy się w temperaturze A_f (koniec powstawania austenitu).

W przypadku występowania naprężenia przebieg granicznej temperatury jest bardziej skomplikowany (rysunek 3), choć zmiana faz przebiega analogicznie. Na skutek przyłożonego obciążenia pojawia się wówczas w materiale faza martenzytyczna (wstępne odkształcenie), a po jego ogrzaniu następuje przemiana odwrotna w austenit wywołująca efekt pamięci kształtu. W przypadku, gdy zdeformowany materiał nie ma swobody odkształceń (możliwości powrotu do pierwotnego kształtu), to pojawią się w nim naprężenia odzyskanego kształtu σ_{rec} (z ang. *recovery stress*), które mogą być wykorzystane do sprężania elementów zginanych [14] lub aktywnego skrzepowania elementów betonowych (żelbetowych) [15]. Więcej informacji o zastosowaniu różnego rodzaju SMA w budownictwie można znaleźć m.in. w [16].

Ideę wprowadzenia aktywnego skrzepowania w okrągłym słupie żelbetowym przedstawiono na rysunku 4. Przed przystąpieniem do takiego wzmocnienia drut, pręt czy taśma z SMA muszą zostać wstępnie odkształcone (rozciągnięte do określonego wcześniej poziomu odkształceń, najczęściej rzędu kilku procent), a następnie zamontowane na powierzchni słupa i przytwierdzone na końcach w sposób uniemożliwiający przemieszczenie materiału (mogą wówczas pełnić funkcję pasywnego wzmocnienia).

Po podgrzaniu materiału do określonej temperatury następuje aktywacja efektu pamięci kształtu, a ograniczenie swobody odkształceń skutkuje powstaniem w materiale SMA naprężeń odzyskanego kształtu, które ostatecznie powodują wywieranie ciśnienia na żelbetowy rdzeń.

Najpopularniej-

szym rodzajem materiałów SMA są stopy na bazie niklu i tytanu (NiTiSMA lub Nitinol). Ich powszechnie zastosowanie w budownictwie jest jednak ograniczone ze względu na wysoki koszt produkcji [16], a także wąski zakres histerezy temperatury (umożliwiający zachodzenie efektu pamięci kształtu), który może zostać nieco poprawiony przez dodanie niobu (NiTiNbSMA) do składu stopu [13]. Poza ceną materiałów SMA istotnym czynnikiem ograniczającym ich zastosowanie konstrukcyjne jest również mały moduł Younga, wynoszący zazwyczaj kilkadziesiąt GPa (tabela 1).

Pomimo wspomnianych ograniczeń przeprowadzono wiele badań z wykorzystaniem drutów NiTi- oraz NiTiNbSMA do aktywnego skrzepowania słupów. Innym rodzajem SMA, charakteryzującym się niższymi kosztami produkcji oraz większym modułem Younga, są stopy na bazie żelaza (Fe-SMA) (tabela 1) [18]. Ich wadą jest to, że efekt pamięci kształtu zachodzi jedynie częściowo, co prowadzi na ogół do mniejszych naprężeń odzyskanego kształtu (130 – 580 MPa, za-

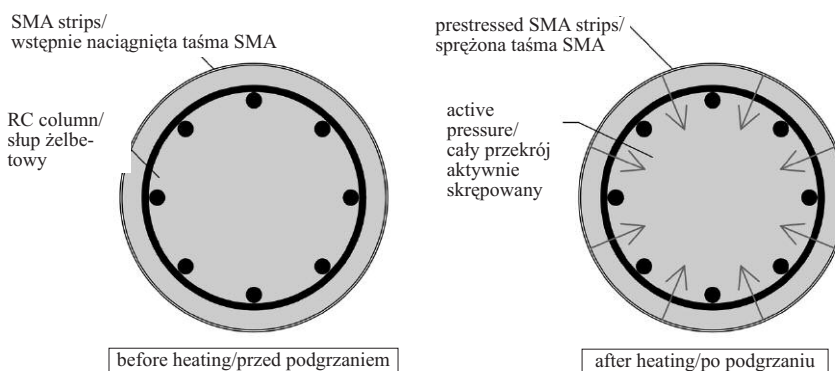


Fig. 4. The idea of active confinement using Fe-SMA materials

Rys. 4. Idea aktywnego skrzepowania przy użyciu materiałów Fe-SMA

Table 1. Properties of shape memory alloys SMA [17]

Tabela 1. Właściwości materiałów z pamięcią kształtu SMA [17]

Characteristic/Charakterystyka	SMA type/Rodzaj SMA			
	NiTi-SMA	NiTiNb-SMA	Cu-SMA	Fe-SMA
Young's modulus [GPa]/Moduł Younga [GPa]	38 – 84	25 – 63	20 – 35	75 – 165
Yield strength [MPa]/Umowna granica plastyczności [MPa]	379 – 746	232 – 350	180 – 210	400 – 550
Ultimate strain [%]/Maksymalne odkształcenia [%]	40 – 50	9 – 37	18	40
Activation temperature [°C]/Temperatura aktywacji [°C]	100 – 200	108 – 200	–	160 – 500
Optimal pre-strain [%]/Optymalne wstępne odkształcenie [%]	6 – 8	6 – 7	–	2 – 4
Recovery stress [MPa]/Napężenia odzyskanego kształtu [MPa]	400 – 700	354 – 560	–	130 – 580
Recovery strain [%]/Odkształcenia odzyskiwalne	6 – 9	5 – 7	7 – 12	0,15 – 0,4
Temperature range between M_s and A_s [°C]/Zakres temperatur pomiędzy M_s i A_s [°C]	15 – 34	123 – 161	20	167

activation temperature) [17]. Fe-SMAs are a relatively new material, used so far mainly for active strengthening of flexural members [19], but in recent years an increasing number of studies have focused on their application for active confinement of columns.

Experimental research on active confinement of columns with SMA materials

Research programs addressing the strengthening of columns with SMA materials emerged at the beginning of the 21st century and in the initial phase focused on the then-available nickel–titanium alloys. Numerous experimental studies were conducted using these alloys, both on concrete specimens [20 – 23] and reinforced concrete columns [24 – 28], which showed the positive effect of active confinement generated by the use of SMA elements, which limited the lateral deformations of the tested elements and resulted in larger ultimate axial strains at the moment of failure and the maintenance of load-bearing capacity beyond peak load. In many cases, it was also possible to increase the axial load-bearing capacity or recover the load-bearing capacity lost due to prior damage of the element [24, 29]. The authors also highlighted the short execution time associated with strengthening of the column, including the time needed to activate it (2.5 hours in the study by Jung et al. [29] and 15 hours in the study by Shin and Andrawes [24]), which may be crucial in cases of sudden structural failure. The most common solution for such strengthening was to wind a thin SMA wire onto the surface of the element (more recent studies utilized SMA strips [23]). An example of such a winding solution is shown in photo 1 [22].

In recent years, due to economic and technical limitations, the attention of civil engineering researchers has shifted mainly to the iron-based alloys (Fe-SMA). Studies on columns using

leżnie od rodzaju stopu, poziomu wstępnego odkształcenia oraz temperatury aktywacji) [17]. Fe-SMA są nowym materiałem, wykorzystywanym dotychczas przede wszystkim do czynnego wzmacniania elementów na zginanie [19], ale w ostatnich latach pojawia się coraz więcej badań dotyczących ich zastosowania do aktywnego skrępowania słupów.

Badania eksperymentalne aktywnego skrępowania słupów materiałami SMA

Programy badawcze dotyczące wzmacniania słupów materiałami SMA pojawiły się na początku XXI wieku i w pierwszej fazie skupiono się na dostępnych wtedy stopach na bazie niklu i tytanu. Przeprowadzono wiele badań z użyciem tych stopów, zarówno próbek betonowych [20 – 23], jak i słupów żelbetonowych [24 – 28], które wykazały pozytywny wpływ aktywnego skrępowania wywołanego zastosowaniem elementów SMA, ograniczających odkształcenia poprzeczne badanych elementów, co objawiało się większymi osiowymi odkształceniami granicznymi w chwili zniszczenia oraz podtrzymaniem zdolności do przenoszenia obciążeń po osiągnięciu maksymalnej siły. W wielu przypadkach udało się także uzyskać wzrost nośności na obciążenia osiowe lub odtworzyć zdolność przenoszenia sił, utraconą na skutek uszkodzenia elementu [24, 29]. Autorzy wskazywali też na krótki czas realizacji wzmocnienia słupa z uwzględnieniem jego aktywowania (2,5 h w pracy Junga i in. [29] oraz 15 h w pracy Shina i Andrawesa [24]), co może mieć istotne znaczenie w przypadku nagłej awarii konstrukcji. Najczęstszym rozwiązaniem takiego wzmocnienia było nawinięcie cienkiego drutu SMA na powierzchnię elementu (w nowszych badaniach zastosowano taśmy [23]). Przykładowe rozwiązanie takiego wzmożenia przedstawiono na fotografii 1 [22].



Photo 1. Strengthening of the column with NiTi wires in studies by Hong et al. [22]

Fot. 1. Wzmocnienie słupa drutami NiTi w badaniach Hong i in. [22]

W ostatnich latach, ze względu na ekonomiczne i techniczne ograniczenia, uwaga naukowców z dziedziny inżynierii lądowej przeniosła się głównie na odmianę na bazie żelaza (Fe-SMA). Badania słupów z wyko-

this type of SMA are summarized in table 2. Two main research directions can be distinguished in the studies, namely the strengthening elements subjected to axial compression and strengthening against lateral actions induced by seismic loading. Both concrete and reinforced concrete elements were tested. Fe-SMA bars or stripes were used for strengthening.

In the experimental program carried out by Kamal et al. [30], three columns were tested with a height of 1500 mm and a circular cross-section with a diameter of 150 mm ($f_{cm} = 35$ MPa). All specimens had identical longitudinal reinforcement ($6\phi 10$), while transverse reinforcement configurations were varied. In the first column (CS10), internal transverse reinforcement in the form of a spiral of reinforcing steel ($\phi 8$ at 50 mm spacing) was used, in the next one (CAO10) in the form of a spiral of Fe-SMA ($\phi 3$ at 30 mm spacing), while in the last element (RCSA10), a hybrid solution was used, combining the steel spiral inside and an external Fe-SMA on the surface of the element. Selected test results are presented in figure 5. The results showed that replacing of the steel

ryzowaniem tej odmiany zestawiono w tabeli 2. W badaniach można wyróżnić dwa główne kierunki, a mianowicie wzmocnienie elementów na osiowe ściskanie oraz oddziaływania poprzeczne spowodowane obciążeniem sejsmicznym. Testowane były zarówno elementy betonowe, jak i żelbetowe. Do wzmacniania stosowano pręty lub taśmy Fe-SMA.

W badaniach przeprowadzonych przez Kamal i in. [30] przebadano trzy słupy o wysokości 1500 mm i przekroju okrągłym o średnicy 150 mm ($f_{cm} = 35$ MPa). Wszystkie elementy miały jednakowe zbrojenie podłużne ($6\phi 10$), zróżnicowano natomiast zbrojenie poprzeczne. W pierwszym słupie (CS10) zastosowano wewnętrzne zbrojenie poprzeczne w postaci spirali ze stali zbrojeniowej ($\phi 8$ co 50 mm), w kolejnym (CAO10) w postaci spirali z Fe-SMA ($\phi 3$ co 30 mm), natomiast w ostatnim elemencie (RCSA10) rozwiązanie podwójne ze stalową spiralą wewnątrz i zewnętrzną Fe-SMA na powierzchni elementu. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rysunku 5. Badania wykazały, że już zmiana materiału spi-

Table 2. Experimental testing of columns strengthened with Fe-SMA materials

Tabela 2. Badania eksperymentalne słupów wzmocnionych materiałami Fe-SMA

Year/ Rok	Authors/Autorzy	Strengthening Type/Typ wzmocnienia	Element
Studies on compressed members /Badania elementów ściskanych			
2022	Kamal i in. [30]	external or internal winding using Fe-SMA bars/ zewnętrzne lub wewnętrzne uzwojenie z prętów Fe-SMA	3 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 3 słupy zbrojone – przekrój okrągły
2022	Zerbe i in. [15]	Fe-SMA strips on the surface (active and passive)/ taśmy Fe-SMA na powierzchni (aktywne i pasywne)	11 concrete columns, 4 reinforced concrete columns, 7 transversely reinforced columns – circular cross-section/ 11 słupów betonowych, 4 słupy zbrojone, 7 słupów zbrojonych tylko poprzecznie – przekrój okrągły
2022	Jeong i in. [31]	Fe-SMA strips and CFRP sheets on the surface / taśmy Fe-SMA i maty CFRP na powierzchni	10 concrete columns – circular cross-section / 10 słupów betonowych – przekrój okrągły
2023	Han i in. [32]	Fe-SMA strips and BFRP sheets on the surface/ taśmy Fe-SMA i maty BFRP na powierzchni	18 concrete columns – circular cross-section / 18 słupów betonowych – przekrój okrągły
2023	Sarmah i in. [33]	Fe-SMA strips on the surface/ taśmy Fe-SMA na powierzchni	Reinforced and concrete columns – circular cross-section/słupy zbrojone i betonowe – przekrój okrągły
2024	Han i in. [34]	Fe-SMA strips, BFRP sheets and HDPE tubes/ taśmy Fe-SMA, maty BFRP oraz rury HDPE	15 concrete columns – circular cross-section/ 15 słupów betonowych – przekrój okrągły
2024	Yeon i in. [35]	internal winding using Fe-SMA bars (active and passive)/ uzwojenie wewnętrzne z prętów Fe-SMA (aktywne i pasywne)	16 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 16 słupów zbrojonych – przekrój okrągły
2025	Han i in. [36]	Fe-SMA strips and BFRP sheets on the surface/ taśmy Fe-SMA i maty BFRP na powierzchni	16 concrete columns – circular cross-section / 16 słupów betonowych – przekrój okrągły
2025	Hong i in. [37]	Fe-SMA strips on the surface (active and passive)/ taśmy Fe-SMA na powierzchni (aktywne i pasywne)	8 reinforced concrete columns – circular cross-section / 8 słupów zbrojonych – przekrój okrągły
2025	Qiang i in. [38]	Fe-SMA strips on the surface (active and passive)/ taśmy Fe-SMA na powierzchni (aktywne i pasywne)	10 concrete columns, 4 reinforced concrete columns – circular cross-section /10 słupów betonowych, 4 słupy zbrojone – przekrój okrągły
Studies on Members Subjected to Seismic Loading/Badania elementów pod obciążeniem sejsmicznym			
2023	Lee i in. [39]	Fe-SMA winding or CFRP sheets on the surface/ uzwojenie Fe-SMA lub maty CFRP na powierzchni	3 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 3 słupy zbrojone – przekrój okrągły
2023	Raza i in. [40]	longitudinal and transverse Fe-SMA bars embedded in shotcrete/ pręty podłużne i poprzeczne Fe-SMA w warstwie torkretu	4 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 4 słupy zbrojone – przekrój okrągły
2024	Vahedi i in. [41]	longitudinal Fe-SMA bars in the core of the column cross-section/ pręty podłużne Fe-SMA w środku przekroju słupa	2 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 2 słupy zbrojone – przekrój okrągły
2024	Raza i in. [42]	longitudinal Fe-SMA bars in the core of the column cross-section/ pręty podłużne Fe-SMA w środku przekroju słupa	2 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 2 słupy zbrojone – przekrój okrągły
2024	Jeong i in. [43]	Fe-SMA strips or CFRP sheets on the surface/ taśmy Fe-SMA lub maty CFRP na powierzchni	4 reinforced concrete columns – circular cross-section/ 4 słupy zbrojone – przekrój okrągły

spiral with an Fe-SMA and thus the introduction of active confinement in the second element allowed to enhance the stiffness of the element and its load-bearing capacity compared to passive confinement. In the case of the third element, it was shown that by additionally increasing the transverse reinforcement ratio and using both passive and active confinement, the load-bearing capacity and deformability of the axially compressed element can be significantly improved. It should be emphasized, however, that with only three elements, the tests allow only very general conclusions to be drawn.

Yeon et al. [35] also used Fe-SMA bars in their study, which were used as internal winding in columns with different spacings ($\phi 10$ at 30/50/70/90 mm). The specimens were short columns with a height of 600 mm and a diameter of 200 mm. The longitudinal reinforcement consisted of four $\phi 6$ steel bars. Some Fe-SMA spirals were activated by electrical resistance heating (passing current) after concrete hardening. The influence of the concrete class (30 MPa – N, 50 MPa – H) and different activation temperatures (160°C – A1, 250°C – A2) was also investigated. The relative increase in concrete compressive strength of individual samples is shown in figure 6 (f_{cc}/f_{c0} , where f_{c0} is the concrete compressive strength before strengthening, f_{cc} is the compressive strength in the case of concrete confinement).

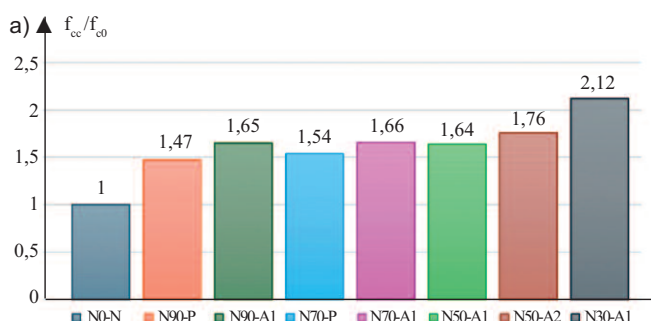


Fig. 6. Relative increase in concrete compressive strength of columns in the case of concrete compressive strength before strengthening of: a) 32 MPa; b) 48 MPa

Rys. 6. Względne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu słupów w przypadku wytrzymałości na ściskanie betonu przed wzmocnieniem co: a) 32 MPa; b) 48 MPa

For all strengthened specimens, a clear increase in peak stress and ultimate strains was observed compared to the columns without winding. Actively confined specimens made of approx. 30 MPa concrete reached approximately 10% higher results compared to passively strengthened ones, whereas no difference in load-bearing capacity was observed in the case of specimens made of approx. 50 MPa concrete. In the latter case, due to lower deformability, stronger transverse reinforcement was required to achieve the noticeable confinement effect. As expected, a higher activation temperature also resulted in an increase in the load-bearing capacity of the elements by nearly 10%. It is anticipated that even greater recovery stresses in Fe-SMA can be achieved at higher activation temperatures (up to 350°C), however, the

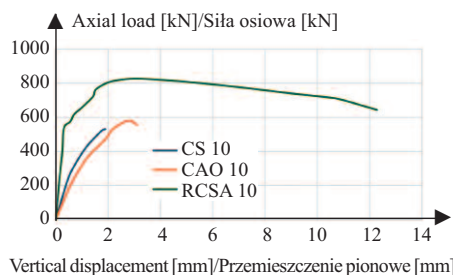


Fig. 5. Axial load of columns as a function of vertical displacements

Fig. based on selected results [30]
Rys. 5. Obciążenie osiowe słupów w funkcji pionowych przemieszczeń

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [30]

rali na Fe-SMA i tym samym wprowadzenie aktywnego skrzepowania w drugim elemencie pozwoliła zwiększyć sztywność elementu oraz jego nośność w porównaniu ze wzmocnieniem pasywnym. W przypadku trzeciego elementu pokazano, że dodatkowo zwiększając stopień zbrojenia poprzecznego i stosując jednocześnie skrzepowanie pasywne i aktywne, można znacznie zwiększyć nośność i odkształcalność elementu ściskanego. Należy podkreślić, że przy trzech elementach, badania pozwalają na wyciągnięcie jedynie bardzo ogólnych wniosków.

Yeon i in. [35] stosowali również w swoich badaniach pręty Fe-SMA, z których wykonano uzwojenie wewnętrzne słupów w zróżnicowanych rozstawach ($\phi 10$ co 30/50/70/90 mm). Były to słupy krępe o wysokości 600 mm i średnicy 200 mm. Zbrojenie podłużne stanowiły cztery stalowe pręty $\phi 6$. Część spirali Fe-SMA aktywowano przez ogrzewanie oporowe (przepływającym prądem) po stwardnieniu betonu. Analizowano też wpływ klasy betonu (30 MPa – N, 50 MPa – H) oraz różną temperaturę aktywacji (160°C – A1, 250°C – A2). Względne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie poszczególnych próbek przedstawiono na rysunku 6 (f_{cc}/f_{c0} , gdzie f_{c0} – wytrzymałość na ściskanie przed wzmocnieniem, f_{cc} – wytrzymałość na ściskanie w przypadku skrzepowania betonu).

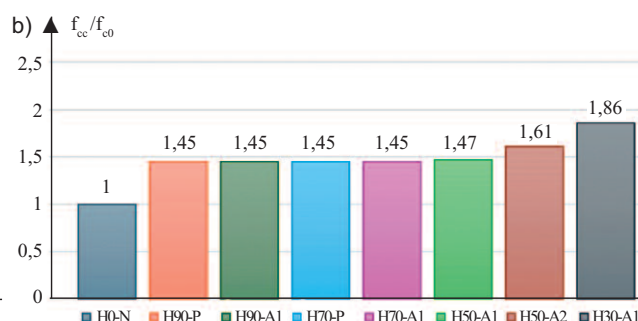


Fig. based on selected results [35]

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [35]

W przypadku wszystkich wzmocnionych próbek zaobserwowano wyraźny wzrost naprężenia maksymalnego oraz odkształceń granicznych w porównaniu ze słupem bez uzwojenia. Aktywnie skrzepowane próbki betonu o wytrzymałości ok. 30 MP wykazały dodatkowo o ok. 10% większe wyniki w porównaniu z pasywnie wzmocnionymi, jednak różnica nośności nie wystąpiła w przypadku betonu o wytrzymałości ok. 50 MPa. W tym drugim przypadku, ze względu na mniejszą odkształcalność, potrzebne było silniejsze zbrojenie poprzeczne, aby efekt był widoczny. Zgodnie z przewidywaniami wyższa temperatura aktywacji spowodowała również wzrost nośności elementów o niecałe 10%. Przy wykorzystaniu wyższej temperatury (do 350°C) spodziewane jest dalsze zwiększenie naprężeń w materiale

influence of such high temperature on the concrete surrounding the bar needs to be verified.

In the remaining experimental studies on axially compressed columns, Fe-SMA was used in the form of strips mounted on the surface of the strengthened elements. Zerbe et al. [15] used Fe-SMA strips with a thickness of 0.5 mm and a width of 50 mm, and this was the first use of this form of alloy for both passive and active confinement of concrete. The test program included 11 columns ($f_{cm} = 31$ MPa) with a diameter of 203 mm and a height of 914 mm without internal reinforcement, 7 specimens with transverse reinforcement, and 7 specimens with both transverse and longitudinal reinforcement. The strips were anchored by bending both ends at a 90° angle and fastening them with a bolt and two nuts, which eliminated the need for drilling into the concrete (photo 2). Activation of strips was carried out using heating cables, but only for selected specimens. All columns were subjected to axial compression testing. All strengthened specimens failed due to anchorage failure. The confinement effect achieved using Fe-SMA strips was reflected in increased column load-bearing capacity (up to 72%), higher peak axial strain, and the ability to transfer forces after reaching peak load. The study indicated that due to immediate losses and relaxation of the SMA, the values of the recovery stress were lower than expected. Moreover, discrepancies (in the level of strengthening effects) between twin elements reached several to more than ten percent. In the case of concrete columns, the differences between passive and active confinement were also investigated, but the obtained results did not allow for definitive conclusions to be drawn.

In a subsequent study, Fe-SMA strips were also used to strengthen axially compressed concrete cylinders [31]. Jeong et al. [31] tested small-scale cylinders (100 mm diameter, 200 mm height, $f_{cm} = 25.5$ MPa) strengthened with Fe-SMA strips of 1.5 mm thickness and 8 mm width at spacings of 3 and 5.5 cm. The strips were anchored by lap joints with screw clamps and activated with a gas burner. Cylinders strengthened with Fe-SMA exhibited lower compressive strength (38.5 MPa) compared to the specimens passively strengthened with a CFRP sheet (49.4 MPa), but showed high residual strength (80% of maximum) and ultimate strain exceeding 20%, compared with only 2% in CFRP-strengthened specimens.

Han et al. [32] tested 18 axially compressed concrete cylinders ($f_{cm} = 39$ MPa) with a diameter of 150 mm and a height of 450 mm, which were passively strengthened with BFRP strips, actively strengthened with Fe-SMA strips (1.5 mm thick, width 30 mm) or in a hybrid configuration

Fe-SMA, natomiast należy zweryfikować wpływ tak wysokiej temperatury na beton otaczający pręt.

W pozostałych badaniach słupów ściśkanych stosowano Fe-SMA w postaci taśm na powierzchni wzmacnianych elementów. Zerbe i in. [15] zastosowali taśmy Fe-SMA o grubości 0,5 mm i szerokości 50 mm i było to pierwsze wykorzystanie tej formy stopu do zarówno pasywnego, jak i aktywnego skrzepowania betonu. Badania objęły 11 słupów ($f_{cm} = 31$ MPa) o średnicy 203 mm i wysokości 914 mm bez zbrojenia wewnętrznego, 7 ze zbrojeniem poprzecznym oraz 7 ze zbrojeniem poprzecznym i podłużnym. Taśmy zostały zakotwione przez wygięcie obu końców pod kątem 90° i połączone przy użyciu śruby oraz dwóch nakrętek, dzięki czemu uniknięto wiercenia w betonie (fotografia 2). Aktywację taśm przeprowadzono przy użyciu kabli grzewczych, ale tylko w niektórych elementach. Elementy zostały poddane testowi osiowego ściskania. Wszystkie wzmocnione próbki zniszczyły się z uwagi na uszkodzenie zakotwienia. Efekt skrzepowania taśmami Fe-SMA był widoczny w postaci zwiększenia nośności słupów (do 72%), maksymalnego osiowego odkształcenia oraz zdolności do przenoszenia sił po osiągnięciu siły maksymalnej. W badaniach stwierdzono, że ze względu na straty doraźne oraz relaksację materiału SMA, wartości naprężenia odzyskanego kształtu były mniejsze niż oczekiwano. Dodatkowo różnice poziomu wzmocnienia między bliźniaczymi elementami sięgały kilkunastu procent. W przypadku słupów betonowych badano również różnice między pasywnym i aktywnym skrzepowaniem, ale uzyskane rezultaty nie pozwoliły na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków.

W kolejnych badaniach taśmy Fe-SMA zostały wykorzystane do wzmocnienia osiowo ściśkanych betonowych walców [31]. Jeong i in. [31] badali niewielkich rozmiarów walce (średnica 100 mm, wysokość 200 mm, $f_{cm} = 25,5$ MPa), które wzmocniono taśmami Fe-SMA o grubości 1,5 mm i szerokości 8 mm w rozstawach co 3 i 5,5 cm. Taśmy zostały zakotwione przez połączenie na zakład przy użyciu zacisków śrubowych i aktywowane palnikiem gazowym. Walce wzmocnione Fe-SMA uzyskiwały mniejszą wytrzymałość na ściskanie (38,5 MPa) w porównaniu z próbką wzmocnioną pasywnie matą CFRP (49,4 MPa), ale wykazywały dużą wytrzymałość resztkową (80% maksymalnej) i odkształcenia przy zniszczeniu przekraczające 20% przy 2% w przypadku walców z CFRP.

Han i in. [32] zbadali z kolei 18 osiowo ściśkanych walców betonowych ($f_{cm} = 39$ MPa) o średnicy 150 i wysokości 450 mm, które zostały wzmocnione pasywnie taśmami BFRP, aktywnie taśmami Fe-SMA (grubość 1,5 mm, szerokość 30 mm) lub



Photo 2. Strengthening of the columns with Fe-SMA strips in studies by Zerbe et al. [15]

Fot. 2. Wzmocnienie słupa taśmami Fe-SMA w badaniach Zerbe i in. [15]

combining both materials. The BFRP strips, which were bonded to the SMA, were also intended to provide corrosion protection. The Fe-SMA strips were anchored with lap joints using rivets and activated with heating jackets. All specimens failed due to strip rupture near the mid-height of the cylinder. Relative to the unstrengthened specimen, the cylinders actively strengthened with SMA strips exhibited up to 48% greater strength, while the specimens passively strengthened with BFRP showed increases of up to 31%. In the case of the hybrid solution with Fe-SMA strips in the densest spacing and three layers of BFRP, the strength increase reached 82%. The relative increase in the peak axial stress of the Fe-SMA specimens is shown in figure 7.

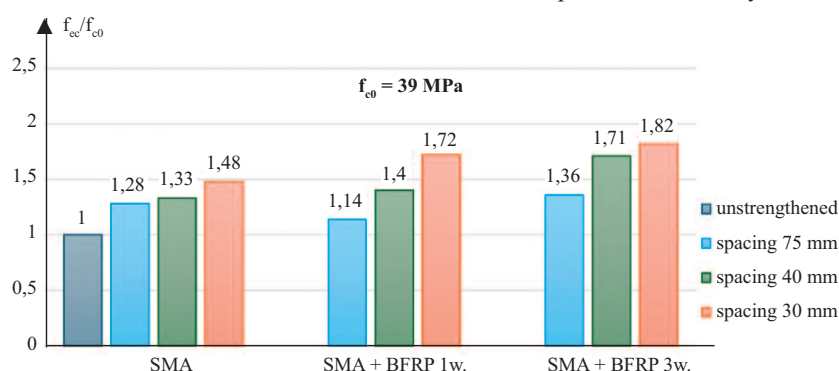


Fig. 7. Relative increase in concrete compressive strength of columns (spacing between strips is given)

Fig. based on selected results [32]

Rys. 7. Względne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu słupów (podano rozstaw między taśmami)

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [32]

Additionally, Fe-SMA-strengthened cylinders were characterized by significantly greater deformability, reaching 1.4% at failure for Fe-SMA-strengthened samples and 2.3% for hybrid configuration, compared with a maximum result of 1% for specimens under passive confinement.

The same research team continued their work by introducing an additional protective layer in the form of HDPE pipes in the same short columns [34]. The gap between the pipe and the Fe-SMA-strengthened column was filled with concrete mixed with rubber waste (approx. 30 mm layer), ensuring that the entire surface of the concrete was shielded from external factors. The outer surface of the HDPE pipe was additionally strengthened with passive BFRP strips. The strongest strengthening configuration, with Fe-SMA strips covering 50% of the column surface and a full three-layer BFRP jacket, resulted in a 274% increase in compressive strength. However, it should be noted that the complexity of the proposed strengthening version makes its practical applicability would be limited to specific cases.

The next stage of research by this group of investigators was to involve the inclusion of eccentric loading [36]. This experimental program comprised 16 concrete columns with a diameter of 200 mm and a height of 450 mm. As in the previous study [32], the strengthening solutions included Fe-SMA strips (3 mm thick, 30 mm wide), BFRP strips (one or three layers, 30 mm wide), or a hybrid configuration. In this case, Fe-SMA strips were made continuous through argon-cooled welding. The load eccentricity was 40 mm. As expected, the strengthening efficiency was significantly lower than under axial compression, though the effect remained evident. The

w sposób hybrydowy przy użyciu obu materiałów jednocześnie. Taśmy BFRP, które przyklejono na SMA, miałyby również stanowić ochronę przed korozją. Taśmy Fe-SMA zakotwiono przez połączenie na zakład przy użyciu nitów i podgrzano płaszczami grzejnymi. Wszystkie próbki zniszczyły się przez zerwanie taśm w środkowej części walca. W odniesieniu do próbki bez wzmocnienia, walce wzmocnione aktywnie taśmami SMA wykazały wytrzymałość większą o maksymalnie 48%, natomiast próbki wzmocnione pasywnie BFRP do 31%. W przypadku rozwiązania hybrydowego z taśmami Fe-SMA w najgęstszym rozstawie i trzema warstwami BFRP wzmocnienie wyniosło 82%. Względny wzrost maksymalnego naprężenia osiowego próbek z Fe-SMA przedstawiono na rysunku 7.

Dodatkowo walce z Fe-SMA charakteryzowały się znacznie większą odkształcalnością, która sięgała 1,4% przy zniszczeniu w przypadku próbek wzmocnionych Fe-SMA oraz 2,3% ze wzmocnieniem hybrydowym, przy wyniku próbek skrzepowanych pasywnie wynoszącym maksymalnie 1%. Ten sam zespół kontynuował prace, wprowadzając w tych samych krępkach słupach dodatkową warstwę ochronną w postaci rur HDPE [34]. Przestrzeń między rurą a słupem, wzmocnionym taśmami Fe-SMA, wypełniona była betonem z domieszką odpadów gumowych (warstwa ok. 30 mm), zapewniając tym samym, że cała powierzchnia betonu była osłonięta od czynników zewnętrznych. Na powierzchni rur zastosowano dodatkowe wzmocnienie pasywne w postaci pasków BFRP. Wzmocnienie w najsilniejszej wersji z paskami Fe-SMA, pokrywającymi 50% powierzchni słupa i z 3-warstwowym pełnym płaszczem BFRP, pozwoliło uzyskać zwiększenie wytrzymałości na ściskanie na poziomie 274%. Należy jednak zauważyć, że poziom skomplikowania tak zaproponowanego wzmocnienia, sprawia, że zasadność jego zastosowania ograniczałaby się jedynie do szczególnych przypadków.

Kolejnym etapem badań tej grupy badaczy było uwzględnienie obciążenia mimośrodowego [36]. Ten program badawczy objął 16 słupów betonowych o średnicy 200 mm oraz wysokości 450 mm. Tak jak poprzednio [32], do wzmocnienia stosowano taśmy Fe-SMA (o grubości 3 mm i szerokości 30 mm), taśmy BFRP (1 lub 3 warstwy, o szerokości 30 mm) lub rozwiązanie hybrydowe. W badaniu tym taśmy Fe-SMA uciągano przez spawanie z chłodzeniem argonem. Mimośród obciążenia wynosił 40 mm. Poziom wzmocnienia, zgodnie z przewidywaniami, był znacznie mniejszy niż przy ściskaniu osio-

failure load values of the columns strengthened with Fe-SMA are presented in figure 8. It can be seen that only Fe-SMA strips with the densest spacing provided a strengthening level of approximately 30%. Introducing additional passive confinement in the form of BFRP strips in the hybrid configuration did not yield further benefits. In addition, it should be mentioned that the Fe-SMA welded joints remained intact throughout testing (whereas BFRP strips ruptured), improving member ductility until the moment of failure.

wym, ale efekt był widoczny. Wartości obciążenia niszczącego słupów wzmocnionych Fe-SMA przedstawiono na rysunku 8. Widać na nim, że dopiero taśmy Fe-SMA o najgęstszym rozstawie dały wzmocnienie na poziomie 30%. Wprowadzenie dodatkowego skrepowania pasywnego w postaci taśm BFRP w rozwiązaniu hybrydowym nie przyniosło dalszych korzyści. Dodatkowo należy nadmienić, że połączenia spawane Fe-SMA pozostały nienaruszone w trakcie eksperymentu (taśmy BFRP pękły), co poprawiło ciągliwość elementów aż do chwili zniszczenia.

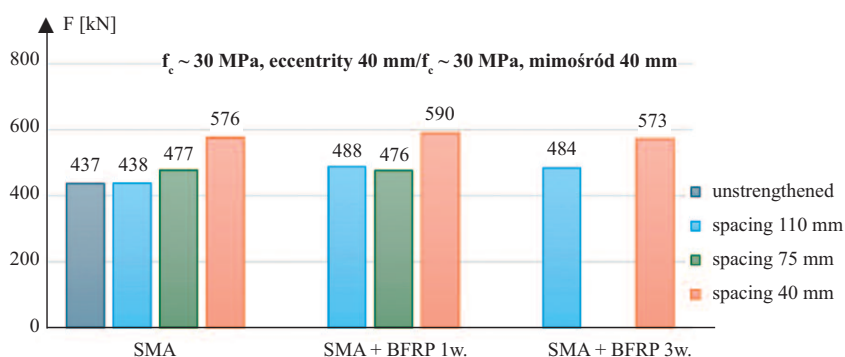


Fig. 8. Ultimate load of eccentrically compressed columns strengthened with Fe-SMA (spacing between is given) Fig. based on selected results [36]
Rys. 8. Obciążenie niszczące słupów mimośrutowo ściskanych wzmocnionych Fe-SMA (podano rozstaw między taśmami)

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [36]

Studies on reinforced elements conducted by Sarmah et al. [33] reported a similar phenomenon: decreasing the spacing of Fe-SMA strips additionally changed the failure mode from brittle to ductile. Another important aspect, namely the effectiveness of strengthening in the case of a previously damaged element, was examined by Hong et al. [37]. Their research study included 10 reinforced circular columns with a diameter of 356 mm and a height of 1524 mm ($f_{cm} = 32$ or 46 MPa), of which 6 were strengthened with Fe-SMA strips from the beginning, whereas 2 after initial damage (one of them had only numerous cracks – M, the other had a large region of concrete spalling at mid-height – S). All columns were longitudinally reinforced (6 ϕ 16) and transversely using a ϕ 13 spiral at 57 mm spacing. Additionally, the elements were strengthened by winding two or three layers of Fe-SMA strips (0.5 mm thick, 50 mm wide) spirally over the full height of the column. The strips in selected columns remained passive strengthening (P – passive, A – active). The results of the tests for individual columns are presented in figure 9.

The results demonstrate that the Fe-SMA – strengthened columns achieved a higher load-bearing capacity than the columns internal reinforcement only. The strengthening also had a positive effect on the ductility of the elements. The activation of the strips improved the stiffness of the columns and enabled slightly higher failure loads. Strengthening previously damaged columns (marked M, S) restored their stiffness and even increased the failure load by approximately 10% (1.09, 1.16) compared with the traditionally reinforced column. However, strengthening was less effective than in undamaged columns strengthened in the same manner (1.30), indicating that, in real structures, the strengthening efficiency using activated Fe-SMA will depend on the initial condition of the structural members.

W badaniach elementów zbrojonych przeprowadzonych przez Sarmah i in. [33] zaobserwowano podobne zjawisko, że zmniejszanie rozstawu taśm Fe-SMA zmieniało dodatkowo przebieg zniszczenia elementu z kruchego na ciągliwe. Kolejny istotny aspekt, a mianowicie kwestie efektywności wzmocnienia w przypadku elementu wstępnie uszkodzonego, analizowano w pracy Hong i in. [37]. Ich badania objęły 10 zbrojonych słupów okrągłych o średnicy 356 mm i wysokości 1524 mm ($f_{cm} = 32$ lub 46 MPa), z czego 6 zostało od początku wzmocnionych taśmami Fe-SMA, a 2 po wstępnym uszkodzeniu (jeden z nich miał jedynie liczne rysy – M, drugi wykruszoną znaczną część betonu w połowie wysokości – S). Wszystkie słupy były zbrojone podłużnie (6 ϕ 16) oraz poprzecznie spiralą ϕ 13 co 57 mm. Dodatkowo elementy wzmocniano przez spiralne nawinięcie dwóch lub trzech warstw taśm Fe-SMA (grubość 0,5 mm, szerokość 50 mm) na całej wysokości słupa. Taśmy w wybranych słupach pozostały wzmocnieniem pasywnym (P – pasywne, A – aktywne). Wyniki badań poszczególnych słupów przedstawiono na rysunku 9.

Wyniki pokazują, że słupy wzmocnione Fe-SMA uzyskały większą nośność od słupów zbrojonych tylko wewnętrznie. Wzmocnienie wpłynęło pozytywnie także na odkształcalność elementów. Aktywacja taśm poprawiała sztywność elementów oraz pozwoliła uzyskać nieco większe siły przy zniszczeniu. Wzmocnienie słupów wstępnie zniszczonych (ozn. M, S) pozwoliło przywrócić ich sztywność, a nawet uzyskać zwiększenie siły niszczącej na poziomie ok. 10% (1,09, 1,16) w stosunku do słupa ze zbrojeniem tradycyjnym. Było ono jednak słabsze niż nieuszkodzonego słupa wzmocnionego analogicznie (1,30), co pokazuje, że w rzeczywistych konstrukcjach efektywność wzmocnienia aktywnego Fe-SMA będzie zależać od stanu elementów wzmocnianych.

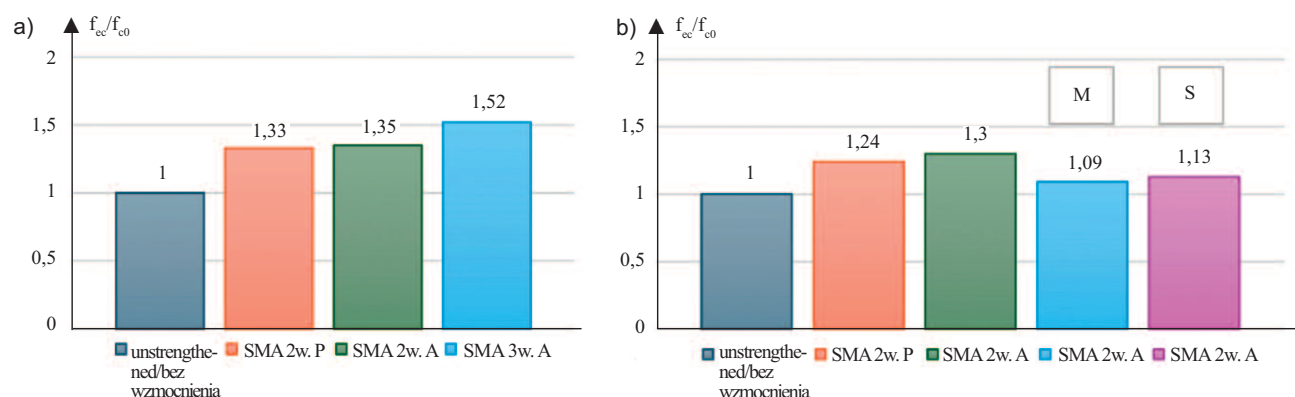


Fig. 9. Relative increase in concrete compressive strength of Fe-SMA strengthened columns: a) $f_{c0} = 32$ MPa; b) $f_{c0} = 46$ MPa

Fig. based on selected results [37]

Rys. 9. Względne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu słupów wzmocnionych Fe-SMA: a) $f_{c0} = 32$ MPa; b) $f_{c0} = 46$ MPa

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [37]

The study conducted by Qiang et al. [38] included 10 circular concrete columns (P) and 4 reinforced columns (R) ($f_{cm} = 28$ MPa) with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm. The columns were strengthened using 4, 6, or 8 Fe-SMA strips (1.5 mm thick, 10 mm wide) along the height of the elements, which were joined with lap-splice anchorage using screw clamps. The initial prestrain of the Fe-SMA strips (2 or 4%) was also modified in this study, although this did not have a significant influence on the results. The strips in the selected columns remained passive strengthening (P – passive, A – active). The failure loads obtained in tests with 2% prestrain are presented in figure 10.

As expected, the results show an increase in the strengthening effect with denser Fe-SMA strips spacing, and in the case of elements with eight strips, the difference between the solution with between active and passive confinement, which reached several to more than ten percent. Subsequent research programs listed in table 2 concerned the behavior of members under seismic loading [39 – 43]. Our goal was to focus on the phenomenon of active confinement in primarily compression-dominated members, where, in the absence of additional factors (typical, for example, in seismic environments), it is easier to assess the effectiveness of the proposed strengthening, so the following publications will only be briefly mentioned. Lee et al. [39] and Jeong et al. [43] tested reinforced concrete cantilever columns. The study was

Badania Qiang i in. [38] objęły 10 okrągłych słupów betonowych (P) i 4 słupy zbrojone (R) ($f_{cm} = 28$ MPa) o średnicy 150 i wysokości 300 mm. Słupy wzmocniono 4, 6 lub 8 taśmami Fe-SMA (grubość 1,5 mm, szerokość 10 mm) na wysokości elementu, które były łączone na zakład przez zaciski skręcane. W badaniu modyfikowano również wstępne odkształcenie taśm Fe-SMA (2 lub 4%), co jednak nie miało istotnego wpływu na wyniki. Taśmy w wybranych słupach pozostały wzmocnieniem pasywnym (P – pasywne, A – aktywne). Siły niszczące uzyskane w badaniach przy odkształceniach wstępnych 2% przedstawiono na rysunku 10.

Wyniki pokazują, zgodnie z oczekiwaniami, nasilenie efektu wzmocnienia przy zagęszczaniu taśm Fe-SMA, a w przypadku elementów z ośmioma taśmami różnicę między rozwiązaniem z aktywacją i skrupowaniem pasywnym, która wyniosła nawet kilkanaście procent. Kolejne programy badawcze przywołane w tabeli 2 dotyczyły odpowiedzi elementów na obciążenie sejsmiczne [39 – 43]. Naszym celem było skupienie się na zjawisku aktywnego skrupowania w elementach głównie ściskanych, gdzie przy braku wpływu dodatkowych czynników (specyficznych np. w przypadku obszarów sejsmicznych) łatwiej o ocenę efektywności proponowanego wzmocnienia, dlatego publikacje te będą jedynie krótko wspomniane. Lee i in. [39] oraz Jeong i in. [43] badali żelbetowe słupy wspornikowe. Badanie prowadzono pod obciążeniem osiowym oraz cy-

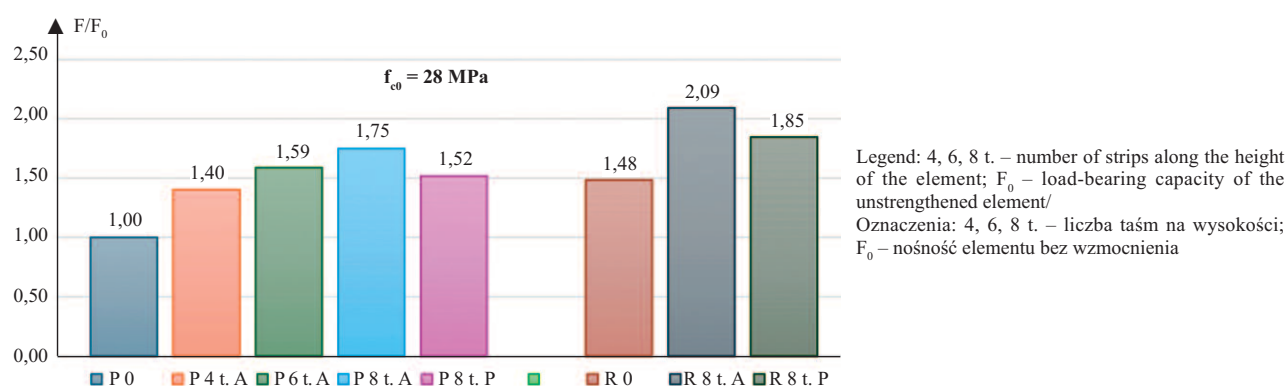


Fig. 10. Relative increase in compressive strength of Fe-SMA strengthened columns

Fig. based on selected results [38]

Rys. 10. Względne zwiększenie nośności na ściskanie słupów wzmocnionych Fe-SMA

Rys. opracowano na podstawie wybranych wyników [38]

conducted under axial and cyclic lateral loading. In both research programs, concrete confinement was applied near the column base (columns were confined passively using CFRP or actively using Fe-SMA spiral). Both types of strengthening gave satisfactory results for most of the load sequence. However, the tests revealed a clear advantage of active confinement, where the behavior of elements remained ductile for a longer duration and material degradation was delayed. Raza et al. [40] used longitudinal and transverse Fe-SMA reinforcement, which was embedded in a shotcrete layer applied after the cover was removed along the full column height. Their study focused on the self-centering effect and demonstrated that the use of prestressed smooth longitudinal Fe-SMA reinforcement allows for lower plastic deformations of the column under cyclic loading. Similar aspects were investigated by Vahedi et al. [41], who, however, used unbonded Fe-SMA bars placed in the middle of the column cross-section and also obtained lower residual deformations of the elements after the end of the load cycle compared to columns with traditional reinforcement. Finally, Raza et al. [42] used a similar centering concept in a column built from 3D-printed prefabricated segments and demonstrated that such elements may be used in areas with moderate seismic activity.

Summary

The article presents the current state of knowledge on the active confinement of reinforced concrete columns using shape memory alloy (SMA). Based on the literature review, it was concluded that this type of strengthening may constitute a promising alternative to currently used solutions. As demonstrated by the reviewed studies, active confinement allows for more effective strengthening of the element than passive solutions, and the use of SMA eliminates many technical difficulties, since it does not require the use of tensioning devices or accessories, but only heating of the material to a specific temperature due to the shape memory effect occurring in it.

Elements strengthened in this manner demonstrated an increase in load-bearing capacity under axial, eccentric, and transverse loading, with simultaneously retaining the ability to sustain deformation even after reaching the peak load. The presented methods also proved effective for strengthening damaged columns, and the repair techniques themselves were characterized by short execution times. In recent years, the Fe-SMA variant has received the greatest attention among civil engineering researchers. However, it is currently several dozen times more expensive than traditional reinforcing steel. Currently, most of the available experimental studies conducted on small, stocky elements with a circular cross-section, a significant part of which was performed on specimens without reinforcement, which does not directly reflect typical columns most found in design practice, and therefore did not always allow for clear conclusions to be drawn. The range of concrete strengths in the tested elements should also be broadened, since it is known that the deformability of concrete decreases with increasing strength.

klicznie zmiennym poprzecznym. W obu programach badawczych skrzepowanie betonu zastosowano w okolicy utwardzania w stopie (słupy były skrzepowane pasywnie CFRP lub aktywnie spiralą Fe-SMA). Oba typy wzmocnienia dawały satysfakcjonujące wyniki przez większość trwania obciążania. Badania ujawniły jednak przewagę skrzepowania aktywnego, dzięki któremu zachowanie elementu dłużej pozostało ciągliwe, a degradacja materiału opóźniona. Raza i in. [40] zastosowali z kolei zbrojenie podłużne i poprzeczne Fe-SMA, które zostało zatopione w warstwie torkretu wykonanej po skuciu otuliny na całej wysokości słupów. W badaniu tym skoncentrowano się na efekcie samocentrowania (z ang. self-centering) i wykazano, że zastosowanie sprężonego gładkiego zbrojenia podłużnego Fe-SMA pozwala osiągnąć mniejsze deformacje plastyczne słupa przy obciążeniu cyklicznym. Podobne kwestie analizowali Vahedi i in. [41], którzy jednak zastosowali pręty Fe-SMA bez przyczepności w środku przekroju słupa i oni również uzyskali niższe deformacje elementów po zakończeniu cyklu obciążania niż te zmierzone dla słupów ze zbrojeniem tradycyjnym. Raza i in. [42] wykorzystali podobną metodę centrowania do wykonania słupa składającego się z segmentów prefabrykowanych wykonanych w technologii druku 3D i wykazali, że zaproponowane przez nich elementy mogą być stosowane w obszarach o średniej aktywności sejsmicznej.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano stan wiedzy dotyczący aktywnego skrzepowania żelbetowych słupów przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu SMA. Na podstawie dokonanego przeglądu literatury stwierdzono, że ten rodzaj wzmocnienia może być obiecującą alternatywą dla obecnie stosowanych. Aktywne skrzepowanie, jak wykazały przedstawione badania, pozwala na uzyskanie efektywniejszego wzmocnienia elementu niż rozwiązanie pasywne, a zastosowanie materiałów SMA umożliwia wyeliminowanie wielu trudności technicznych, gdyż nie wymaga użycia urządzeń czy akcesoriów naciągowych, a jedynie podgrzania materiału do określonej temperatury ze względu na zachodzący w nim efekt pamięci kształtu.

Wzmocnione w ten sposób elementy wykazywały zwiększenie nośności przy obciążeniach osiowych, mimośrodkowych i poprzecznych z jednoczesnym zwiększeniem zdolności do odkształceń nawet po osiągnięciu maksymalnej wartości siły. Prezentowane metody okazały się skuteczne również do wzmacniania uszkodzonych słupów, a same techniki naprawy charakteryzowały się krótkim czasem realizacji. W ostatnich latach największym zainteresowaniem wśród badaczy z dyscypliny inżynieria ładowej cieszy się odmiana Fe-SMA. Jest ona jednak obecnie kilkadziesiąt razy droższa niż tradycyjna stal zbrojeniowa. Obecnie większość dostępnych badań eksperymentalnych dotyczy małych, krępych elementów o przekroju okrągłym, z których znaczna część została wykonana na próbkach bez zbrojenia, co nie ma bezpośredniego odniesienia do słupów najczęściej spotykanych w praktyce projektowej, co nie zawsze pozwalało wyciągnąć jednoznaczne wnioski. Rozszerzyć należałoby również zakres wytrzymałości betonu w badanych elemen-

For this solution to be of practical significance, it would also be necessary to include in future research columns with square and rectangular cross-sections or more members with significant slenderness, which can be expected to reduce the efficiency of this solution. Another important issue is to take into account the long-term behavior of Fe-SMA and possible losses of confining stresses.

There is also a lack of numerical parametric analyses addressing these aspects, which would allow for a deeper understanding of the phenomenon and a systematic identification of the influence of individual factors. Some of the cited publications have already attempted to predict the compressive strength of concrete of SMA-confined columns [15, 30, 36] or to define a concrete model [23, 35]. More advanced numerical analyses using FEM can only be found in [38, 44]. However, these results provide only a limited overview of the problem. Therefore, the topic remains far from being fully explored.

Conclusions

The experimental studies conducted so far on columns actively strengthened with Fe-SMA do not cover all aspects of this issue. In order to move toward developing guidelines that would enable the application of this type of strengthening in engineering practice, it is necessary to identify areas requiring further investigation or expansion. In our opinion, the following issues should be considered particularly in the future:

- the influence of scale, concrete strength, and steel reinforcement ratio on the behavior of actively confined columns;
- the strengthening efficiency in square and rectangular cross sections;
- the strengthening efficiency in slender elements;
- the determination of the optimal method of heating SMA strips and bars (so far, burners, heating cables, heating jackets, resistance heating, infrared radiation have been considered), as well as the effect of nonuniform heating on generated stresses and the impact of heating shape memory alloys on surrounding concrete;
- the effectiveness of anchoring system, considering its reliability, repeatability, and constructability on site;
- the determination of stress loss in the material during activation due to anchorage losses or (possible) installation gaps, as well as stress reduction caused by SMA relaxation and cyclic loading after activation;
- the development of numerical and analytical models representing the behavior SMA-strengthened reinforced concrete columns, taking into account the nonlinear response of shape memory alloys.

Such research efforts would allow the collection of a more comprehensive dataset of results and facilitate the development of the most effective solutions taking into account various technical and, subsequently, economic factors, and, as a consequence, creation a viable alternative to currently used strengthening systems.

Received: 18.10.2024
Revised: 10.06.2025
Published: 21.11.2025

tach, albowiem znany jest fakt, że wraz ze wzrostem wytrzymałości maleje odkształcalność betonu. Aby rozwiązanie to zyskało znaczenie praktyczne, należałoby również uwzględnić słupy o przekrojach kwadratowych i prostokątnych czy więcej elementów o znacznej smukłości, co, należy przypuszczać, ograniczy efektywność tego rozwiązania. Istotną kwestią jest również uwzględnienie długotrwałego zachowania Fe-SMA i ewentualnych strat naprężeń kłępujących.

Brakuje też numerycznych analiz parametrycznych dotyczących wskazanych aspektów, które pozwoliłyby uzyskać szerszy obraz zagadania oraz usystematyzować wpływ poszczególnych czynników. W przytoczonych publikacjach podjęto już próby wyznaczenia wytrzymałości betonu w słupie wzmocnionym SMA [15, 30, 36], czy zdefiniowanie modelu betonu [23, 35]. Bardziej zaawansowane analizy numeryczne z wykorzystaniem MES można znaleźć jedynie w pracach [38, 44]. Wyniki te przedstawiają jednakże ograniczony obraz problemu. Temat jest więc wciąż niewyczerpany.

Wnioski

Przeprowadzone dotychczas badania słupów wzmocnionych aktywnie Fe-SMA nie obejmują wszystkich aspektów tego zagadnienia. Zmierzając w kierunku stworzenia podstaw wytycznych umożliwiających zastosowanie tego typu wzmocnienia w praktyce projektowej, należy zdefiniować obszary, które wymagają pogłębienia czy rozszerzenia analizy. Naszym zdaniem w przyszłości należy rozważyć szczególnie następujące zagadnienia:

- efekt skali, wytrzymałości betonu i stopnia zbrojenia stałego na zachowanie się aktywnie skrepowanych słupów;
- efektywność wzmocnienia w przekrojach kwadratowych i prostokątnych;
- efektywność wzmocnienia w elementach smukłych;
- określenie optymalnego sposobu podgrzewania taśm i prętów SMA (dotychczas rozważano palniki, kable i płaszcze grzejne, ogrzewania oporowe czy promienniki podczerwieni), a także wpływ nierównomiernego ogrzania na uzyskiwane naprężenia oraz wpływ ogrzewania materiałów z pamięcią kształtu na beton;
- efektywność systemu zakotwienia, z uwzględnieniem jego niezawodności, powtarzalności i wykonalności w warunkach budowy;
- określenie strat naprężenia w materiale podczas aktywacji z powodu strat w zakotwieniu, czy ewentualnych luzów montażowych, a także jego redukcji na skutek relaksacji SMA i obciążeń cyklicznych po aktywacji;
- opracowanie modeli numerycznych i analitycznych odwzorowujących zachowanie się żelbetowych słupów wzmocnionych materiałami SMA z uwzględnieniem nieliniowości w pracy stopów z pamięcią kształtu.

Tak zakrojone prace umożliwiłyby zebranie większej bazy wyników i pozwoliłyby na opracowanie najbardziej efektywnych rozwiązań uwzględniających różne aspekty techniczne, a w dalszej kolejności ekonomiczne, a w konsekwencji stworzenie realnej alternatywy dla stosowanych obecnie.

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.10.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.06.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Urban T. Wzmacnianie Konstrukcji Żelbetowych Metodami Tradycyjnymi; 1st ed.; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2015; ISBN 978-83-01-18185-7.
- [2] Trapko T, Musiał M. Strains of Eccentrically Compressed RC Columns Strengthened with CFRP Sheets and Strips. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2010; 4, 6268.
- [3] Trapko T. Nowoczesne Metody Wzmacniania Słupów Żelbetowych z Zastosowaniem Materiałów CFRP. In *Proceedings of the Dni Betonu*; Kraków. 2008.
- [4] Ignatowski P, Kamińska M, Kotynia R. Experimental Research on CFRP Confined RC Members/Badania Doświadczalne Elementów Ściskanych Wzmocnionych Materiałami Kompozytowymi CFRP; 2003.
- [5] Valasaki K, Papakonstantinou CG. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Confined Circular Concrete Columns: An Experimental Overview. *Buildings*. 2023. DOI: 10.3390/buildings13051248.
- [6] Ameli Z, D'Antino T, Carloni C. A New Predictive Model for FRCM-Confined Columns: A Reflection on the Composite Behavior at Peak Stress. *Constr Build Mater*. 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127534.
- [7] Hasan HH, Georgescu P. Concrete Columns Strengthened with Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM). *Mathematical Modelling in Civil Engineering*. 2021. DOI: 10.2478/mcee-2021-0009.
- [8] Drobiec Ł. Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych z wykorzystaniem systemu FRCM. *Materiały Budowlane*. 2023; 7, 56 – 59.
- [9] Saatcioglu M, Asce M, Yalcin C. External Prestressing Concrete Columns for Improved Seismic Shear Resistance. *Journal of Structural Engineering*. 2003. DOI: 10.1061/ASCE0733-94452003129:81057.
- [10] Wang Q, Liu X, Liu Y, Liang X, Lu C. Axial Stress-Strain Behavior of Pre-Stressed CFRP Confined Concrete Columns. *Constr Build Mater*. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138003.
- [11] Ji J, Han T, Dong Z, Zhu H, Wu G, Wei Y, Soh CK. Performance of Concrete Columns Actively Strengthened with Hoop Confinement: A State-of-the-Art Review. *Structures*. 2023; 54, 461–477.
- [12] 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. DOI: 10.1617/14323.
- [13] Lagoudas D, Kumar PK. Introduction to Shape Memory Alloys. In *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*; Lagoudas D. C., Ed.; Springer. 2008; pp. 1–51. ISBN 978-0-387-47684-1.
- [14] Michels J, Shahverdi M, Czaderski C. Flexural Strengthening of Structural Concrete with Iron-Based Shape Memory Alloy Strips. *Structural Concrete*. 2018. DOI: 10.1002/suco.201700120.
- [15] Zerbe L, Vieira D, Belarbi A, Senouci A. Uniaxial Compressive Behavior of Circular Concrete Columns Actively Confined with Fe-SMA Strips. *Eng Struct*. 2022. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.113878.
- [16] 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. *Constr Build Mater*. 2022; doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126628>.
- [17] Cladera A, Weber B, Leinenbach C, Czaderski C, Shahverdi M, Motavalli M. Iron-Based Shape Memory Alloys for Civil Engineering Structures: An Overview. *Constr Build Mater*. 2014; 63, 281 – 293.
- [18] Shahverdi M, Michels J, Czaderski C, Motavalli M. Iron-Based Shape Memory Alloy Strips for Strengthening RC Members: Material Behavior and Characterization. *Constr Build Mater*. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057.
- [19] Rogowski, J.; Kotynia, R. State of the Art in Flexural Prestressing of RC Members with SMA Materials. In *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*; CRC Press. 2023; pp. 1050–1057.
- [20] Choi E, Chung YS, Cho BS, Nam TH. Confining Concrete Cylinders Using Shape Memory Alloy Wires. *European Physical Journal: Special Topics*. 200. DOI: 10.1140/EPJST/E2008-00684-0.
- [21] Suhail R, Amato G, McCrum DP. Active and Passive Confinement of Shape Modified Low Strength Concrete Columns Using SMA and FRP Systems. *Compos Struct*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112649>.
- [22] Hong C, Qian H, Song G. Uniaxial Compressive Behavior of Concrete Columns Confined with Superelastic Shape Memory Alloy Wires. *Materials*. 2020. DOI: 10.3390/ma13051227.
- [23] Xu L, Zhu M, Zhao J, Chen M, Shi M. Axial Stress-Strain Behavior of Shape Memory Alloy Strips Constrained Concrete Columns. *Structures*. 2025. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108225.
- [24] Shin M, Andrawes B. Emergency Repair of Severely Damaged Reinforced Concrete Columns Using Active with Shape Memory Alloys. *Smart Mater Struct*. 2011. DOI: 10.1088/0964-1726/20/6/065018.
- [25] Abdelrahman K. Performance of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Shape Memory Alloy Wires. PhD thesis, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 2017.
- [26] El-Hacha R, Abdelrahman K. Behaviour of Circular SMA-Confined Reinforced Concrete Columns Subjected to Eccentric Loading. *Eng Struct*. 2020; doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110443>.
- [27] Choi E, Yang KT, Tae GH, Nam TH, Chung YS. Seismic Retrofit for RC Columns by NiTi and NiTiNb SMA Wires. *European Symposium on Martensitic Transformations*. 2009. DOI: 10.1051/ESOMAT/200907005.
- [28] Qian H, Wu P, Ren Z, Chen G, Shi, Y. Pseudo-Static Tests of Reinforced Concrete Pier Columns Confined with Pre-Tensioned Superelastic Shape Memory Alloy Wires. *Eng Struct*. 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115680.
- [29] Jung D, Wilcoski J, Andrawes B. Bidirectional Shake Table Testing of RC Columns Retrofitted and Repaired with Shape Memory Alloy Spirals. *Eng Struct*. 2017.12.046. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.046.
- [30] Kamal M, Shoeib AEK, Al Megied MA, Hassan A. Experimental Investigation of Actively Confined RC Columns Using Iron-Based Shape Memory Alloy Spiral Stirrups. *Civil Engineering and Architecture*. 2022. DOI: 10.13189/cea.2022.100714.
- [31] Jeong S, Kim KHE, Lee Y, Yoo D, Hong K, Jung D. Compressive Behavior of Concrete Confined with Iron-Based Shape Memory Alloy Strips. *Earthquake and Structures*. 2022. DOI: 10.12989/eas.2022.23.5.431.
- [32] Han T, Dong Z, Zhu H, Wu G, Zhao X. Compression Behavior of Concrete Columns Combinedly Confined by FRP Externally Wrapped Fe-SMA Strips. *Eng Struct*. 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116754.
- [33] Sarmah M, Dutta A, Deb SK. Axial Stress – Strain Model for Concrete Actively Confined with Fe-SMA Strips. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023, 35.
- [34] Han T, Dong Z, Zhu H, Wu G. Axial Compression Test on Strengthening Concrete Cylinders by Fe-SMA/FRP-HDPE Tube and Rubber Concrete Cladding Layer. *Eng Struct*. 2024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118380.
- [35] Yeon Y, Ji S, Hong K. Uniaxial Compressive Behavior of Concrete Column Actively Confined with Internal Fe-SMA Spirals. *Constr Build Mater*. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135393.
- [36] Han T, Dong Z, Zhu H, Cui C, Zhao O. Compression Performance of FRP Externally Wrapped Fe-SMA Strips Confined Concrete Columns under Large Eccentric Load. *Structures*. 2025. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108554.
- [37] Hong H, Gencturk B, Belarbi A, Vieira, D. Active Confinement of Large-Scale Reinforced Concrete Columns Using Iron-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) Strips. *Journal of Building Engineering*. 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112848.
- [38] Qiang X, Wang K, Tian W, Jiang X. Hybrid Framework for Performance Evaluation of Fe-SMA Confined Concrete Columns: Numerical Simulation and Interpretable Machine Learning Model. *Constr Build Mater*. 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141129.
- [39] Lee T, Jeong S, Woo U, Choi H, Jung D. Experimental Evaluation of Shape Memory Alloy Retrofitting Effect for Circular Concrete Column Using Ultrasonic Pulse Velocity. *Int J Concr Struct Mater*. 2023. DOI: 10.1186/s40069-022-00574-0.
- [40] Raza S, Widmann R, Michels J, Saiid Saiidi M, Motavalli M, Shahverdi M. Self-Centering Technique for Existing Concrete Bridge Columns Using Prestressed Iron-Based Shape Memory Alloy Reinforcement. *Eng Struct*. 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116799.
- [41] Vahedi M, Zolfagharysaravi S, Ebrahimian H, Saiid Saiidi M. Experimental-Analytical Investigation of Accelerated Bridge Construction Concrete Columns with Self-Centering Fe-SMA Bars Subjected to near-Fault Ground Motions. *Eng Struct*. 2024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117127.
- [42] Raza S, Triantafyllidis Z, Anton A, Dillenburg B, Shahverdi M. Seismic Performance of Fe-SMA Prestressed Segmental Bridge Columns with 3D Printed Permanent Concrete Formwork. *Eng Struct*. 2024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117423.
- [43] Jeong S, Kim KHE, Choi H, Ahn J, Jung D. Comparative Evaluation of Flexural Response and Damage Assessment of Concrete Columns Confined with CFRP and Self-Prestressing Iron-Based SMA. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.108228.
- [44] Vieira D, Zerbe L, Belarbi A. Numerical Modeling of Iron-Based SMA Confined Concrete Columns under Axial Compressive Loading. *Eng Struct*. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115185.