

Jerzy Jasieńko*, Krzysztof Raszczuk**, Dawid Wójcik***, Witold Misztal***

Zastosowanie cięgien w konserwacji konstrukcyjnej obiektów historycznych

Application of cords in the structural conservation of historic buildings

Słowa kluczowe: cięgna, konserwacja konstrukcyjna, filary ceglane, mury kamienne, pierścienie ceglane

Key words: cords, structural conservation, brick pillars, stone walls, brick rings

1. WPROWADZENIE

Tradycyjne metody wzmocnienia filarów murowych, polegające na stosowaniu obejm stalowych czy żelbetowych, nie w pełni spełniają wymagania stawiane konserwacji konstrukcyjnej, stąd od lat rozwijane są alternatywne metody bazujące na materiałach kompozytowych. Pierwsze próby zastosowania tych tworzyw w odniesieniu do filarów murowych podejmowano na początku XXI wieku i od tego czasu skuteczność krępowania elementów taśmami kompozytowymi została potwierdzona licznymi pracami naukowymi. Rozwiązania te są akceptowalne z punktu widzenia doktryn konserwatorskich, jednak tylko w przypadku, gdy filary są tynkowane, co może ograniczać ich stosowanie w przypadku ekspozowanej warstwy licowej muru. Dlatego poszukuje się metod umożliwiających wzmocnienie konstrukcyjne muru przy zachowaniu jego historycznego wyglądu.

W ramach prac renowacyjnych często zachodzi konieczność wymiany spoin (ang. *repointing*) w warstwie zewnętrznej muru, z uwagi na ich zużycie spowodowane wieloletnim oddziaływaniem czynników atmosferycznych. Może to stanowić okazję do wpro-

1. INTRODUCTION

Traditional methods of strengthening masonry pillars using steel or reinforced concrete rings do not fully meet the requirements of structural conservation, and so alternative methods involving composite materials have been developed over the past years. The first attempts to use composite materials to strengthen masonry pillars were made in the early 21st century. From this time, the effectiveness of using composite strips to hold elements has been confirmed in numerous scientific papers. Such solutions are acceptable from the perspective of conservation doctrine, but only in the case of masonry pillars covered with plaster, which may limit their application where masonry wall surfaces are exposed. In consequence, methods are being sought for enabling structural strengthening of masonry elements while securing their historical visual character.

In renovation work, there is often a need to replace joints (*repointing*) in the external layers of the masonry due to the wear and tear caused by many years of atmospheric impact. This can be an opportunity to introduce into the joint some additional 'reinforce-

* prof. dr hab. inż., Zakład Materiałów Budowlanych, Konstrukcji Drewnianych i Zabytkowych, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska
 ** dr inż., Zakład Materiałów Budowlanych, Konstrukcji Drewnianych i Zabytkowych, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska
 *** mgr inż., Zakład Materiałów Budowlanych, Konstrukcji Drewnianych i Zabytkowych, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

* *prof. dr hab. inż., Division of Building Materials, Timber and Monumental Heritage Structures, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology*
 ** *dr inż., Division of Building Materials, Timber and Monumental Heritage Structures, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology*
 *** *mgr inż., Division of Building Materials, Timber and Monumental Heritage Structures, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology*

Cytowanie / Citation: Jasieńko J., Raszczuk K., Wójcik D., Misztal W. Application of cords in the structural conservation of historic buildings. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2018;53:124-136

Otrzymano / Received: 15.01.2018 • **Zaakceptowano / Accepted:** 26.02.2018

doi:10.17425/WK53CORDS

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

wadzenia w spoiny dodatkowego „zbrojenia”, którego zadaniem jest zwiększenie sztywności i nośności muru. Po wprowadzeniu cięgien w spoiny możliwe jest ich ukrycie pod warstwą zaprawy, a następnie przeprowadzenie estetyzacji zewnętrznej muru. Z uwagi na brak jednoznacznych modeli teoretycznych, umożliwiających ocenę efektywności wzmocnienia w aspekcie zmian sztywności i nośności muru po wzmocnieniu, podstawą do projektowania są między innymi wyniki badań doświadczalnych.

2. WŁAŚCIWOŚCI CIĘGIEN

Zastosowanie cięgien stalowych w budownictwie jest powszechne, czego przykładem mogą być imponujące cięgnowe konstrukcje przekryć, które charakteryzują się bardzo małym zużyciem materiału na jednostkę powierzchni rzutu, będącym konsekwencją stosunkowo niewielkich średnic i wysokiego wykorzystania wytrzymałości materiału na rozciąganie. W przypadku historycznych konstrukcji murowych wytrzymałość na rozciąganie materiału rodzimego jest niemal znikoma, stąd stosowanie cięgien stalowych wydaje się być szczególnie efektywne. Liny mają najczęściej formę splotów, a więc składają się z wielu włókien, spiralnie ułożonych względem rdzenia. Istnieje wiele układów włókien w przekroju poprzecznym cięgna, w celu uzyskania jak najlepszego wypełnienia powierzchni wewnętrznej. Równoległe ułożenie włókien, dla którego uzyskuje się największą sztywność podłużną, stabilizuje się poprzez stosowanie odpowiednich opasek.

W konserwacji konstrukcji murowych wykorzystuje się cięgna o niewielkich średnicach (najczęściej do 5 mm), aby było możliwe ich umieszczenie w spoinach o grubości 10–20 mm. Przykładem cięgien stosowanych przy wzmocnianiu murów są sploty UHTSS (*Ultra High Tensile Strength Steel*), których charakterystyki przedstawiono w tabeli 1. Cięgna osiągają wytrzymałość na rozciąganie bliską 3 GPa, co stanowi wartość zbliżoną do włókien węglowych.

Tab. 1. Charakterystyki mechaniczne cięgien stalowych UHTSS

Typ cięgna	<i>d</i> [mm]	<i>E</i> [GPa]	<i>f_t</i> [MPa]	<i>ε</i> [%]
UHTSS [8]	0,89	214,6	2875	1,85
UHTSS (5 włókien) [9]	0,89	206,0	3070	2,10
UHTSS (3 włókna) [2]	1,02	143,0	2396	1,16
UHTSS (49 włókien) [2]	1,60	73,5	1470	2,00
UHTSS (19 włókien) [2]	3,00	117,0	1211	1,03
UHTSS (49 włókien) [9]	3,00	81,5	1458	1,96

Wśród współczesnych materiałów stosowanych do wzmocniania konstrukcji wyraźną grupę stanowią polimery syntetyczne, takie jak polietylen oraz *p*-fenyleno-2,6-benzobisoksazol (PBO). Pierwszy z nich jest zwykle stosowany w postaci ultrawysokiej masy cząsteczkowej (UHMWP – *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*). Główną zaletą cięgien UHMWP (ryc. 1b) jest odporność na działanie czynników agresywnych, kosztem mniejszej wytrzymałości na rozciąganie niż wytrzymałość stali.

ment’, with the objective of increasing the rigidity and load-bearing capacity of the wall. After introducing the cords into the joints, it is possible to hide them under a layer of mortar and then to carry out aesthetic work on the external wall. Due to the lack of unequivocal theoretical models for assessing strengthening effectiveness in relation to the changes in rigidity and load-bearing capacity of masonry elements which have been reinforced, the experimental research results provide, among others, the basis for design work.

2. CORD PROPERTIES

The use of steel cords is universal in the construction industry, as exemplified by impressive roofing structures based on cords which are characterised by very small use of material per surface area of the layout. This is a consequence of the relatively small diameters of elements involved and utilising to the full the high tensile strength of the material. In the case of historical masonry structures, tensile strength of the original material is practically non-existent, which is why the application of steel cords appears to be especially effective. Most often, cables are in the form of a coil, made up of many fibres, arranged as spirals in relation to the core. There are many arrangements of fibres in the diagonal cross-section of the cord, which are aimed at securing the best cover of the external surface. The parallel arrangement of fibres which provides the highest longitudinal rigidity is stabilised by the use of appropriate bands.

In conservation of masonry structures, cords of a relatively small diameter are used (most often up to 5 mm), so that they can be placed in joints ranging in thickness from 10–20 mm. An example of cords used to strengthen wall structures are UHTSS (*Ultra High Tensile Strength Steel*) coils, the characteristics of which are presented in table 1. The cords attain a tensile strength of nearly 3 GPa, which constitutes a value close to that of carbon fibres.

Tab. 1. Mechanical properties of UHTSS cords

Cord type	<i>d</i> [mm]	<i>E</i> [GPa]	<i>f_t</i> [MPa]	<i>ε</i> [%]
UHTSS [8]	0,89	214,6	2875	1,85
UHTSS (5 fibres) [9]	0,89	206,0	3070	2,10
UHTSS (3 fibres) [2]	1,02	143,0	2396	1,16
UHTSS (49 fibres) [2]	1,60	73,5	1470	2,00
UHTSS (19 fibres) [2]	3,00	117,0	1211	1,03
UHTSS (49 fibres) [9]	3,00	81,5	1458	1,96

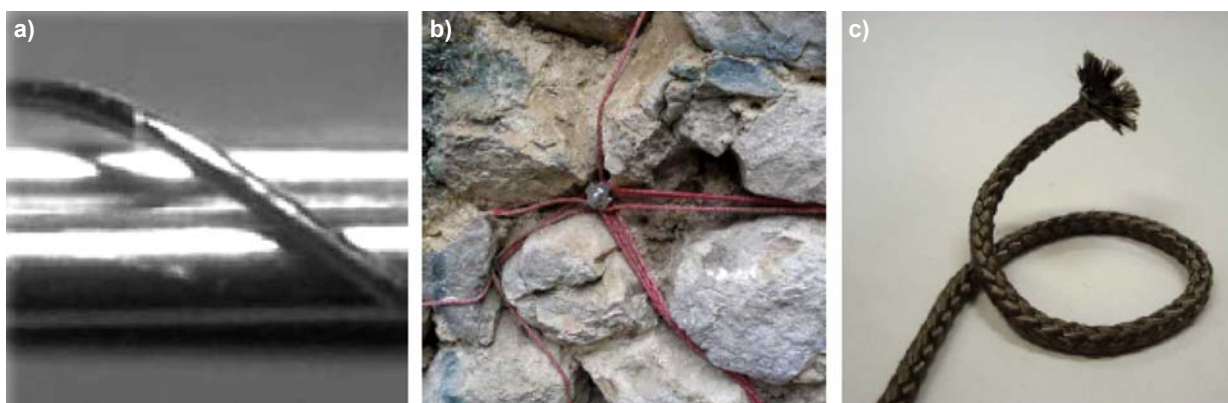
Among the contemporary materials used for strengthening structures, a distinct group is that of synthetic polymers, such as polyethylene and *p*-phenylene-2,6-benzobisoxazole (PBO). The first of these is usually applied in the form of an ultra high molecular weight mass (UHMWP – *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*). The main advantage of UHMWP cords (fig. 1b) is their resistance to aggressive agents, but their tensile strength is lower than the one

W pracach [4] i [8] badano cięgna UHMWP o średnicy 3 mm, które charakteryzowały się wytrzymałością na rozciąganie równą 637 MPa, modułem Younga o wartości 116 GPa oraz odkształceniami granicznymi na poziomie 3–4%. Włókna PBO pierwszy raz zsyntetyzowano na początku lat 80. XX w. Charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie (3570 MPa dla cięgien o średnicy 3 mm [9]) oraz dużym modułem sprężystości podłużnej ($E = 86440$ MPa wg [9]).

Alternatywę dla cięgien stalowych lub polimerowych mogą stanowić liny z włókien bazaltowych (ryc. 1c), uzyskiwane w wyniku topnienia skał bazaltowych w temperaturze 1500–1700°C. Charakterystykę mechaniczną tych cięgien uzyskali m.in. Quagliarini i in. [19] na podstawie prób rozciągania elementów o średnicach 4 mm oraz 5 mm, dla których średnie wytrzymałości wyniosły odpowiednio 251 MPa oraz 338 MPa. W pracy [18] przedstawiono także doświadczenia mające na celu ocenę trwałości lin bazaltowych, polegające na pomiarze zmiany masy cięgien pod wpływem działania wody destylowanej oraz roztworów wodorotlenku sodu (NaOH) i kwasu chlorowodorowego (HCl). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono dobrą odporność cięgien na działanie wody oraz kwasów, a także wskazano na dużą wrażliwość na środowisko zasadowe i związaną z tym konieczność dodatkowej ochrony.

of steel. Papers [4] and [8] describe research in which UHMWP cords of 3 mm diameter were investigated. The cords were characterized by a tensile strength equal to 637 MPa, a Young's modulus of 116 GPa and a maximum deformation value of 3–4%. PBO fibres were first synthesized in the early 1980s. They are characterized by very high tensile strength (3570 MPa for cords of 3 mm diameter [9]) and of a high longitudinal modulus of elasticity ($E = 86440$ MPa according to [9]).

An alternative to steel or polymer cords are potentially basalt-fibre cables (fig. 1c), which are obtained from melting of basalt rocks at temperatures of 1500–1700°C. The mechanical properties of such cords were determined by Quagliarini and others [19] on the basis of tensile testing of elements of 4 mm and 5 mm diameter, for which tensile strength was determined as 251 MPa and 338 MPa respectively. In paper [18], testing was also undertaken of the tensile strength of basalt cables, based on measuring changes in the mass of the cord subjected to impact of distilled water, Sodium Hydroxide (NaOH) solution and hydrochloric acid (HCl). Based on the results obtained, a good resistance of the cord to water and acids was found, indicating also a high sensitivity to the alkaline environment and the essential need to assure additional protection.



Ryc. 1. Cięgno stalowe UHTSS [13] (a), cięgno polimerowe UHMWP [8] (b), cięgno bazaltowe [22] (c)
 Fig. 1. UHTSS cord [13] (a), UHMWP polymer cord [8] (b), basalt cord [22] (c)

3. WZMACNIANIE FILARÓW CEGLANYCH

Propozycję wzmocnienia filarów nietynkowanych poprzez umieszczenie prętów zbrojeniowych o średnicy 6 mm w spoinach wspornych przedstawili Binda i in. [6], a następnie zastosowali tę metodę do naprawy dzwonnicy w katedrze w Monzie. Jurina [1] wykorzystał stalowe cięgna wiotkie do wzmocnienia 6 filarów ceglanych o przekroju ośmiokątnym (wpisanym w okrąg o średnicy 52 cm) i wysokości 120 cm, poprzez umieszczenie w spoinach wspornych po 10 cięgien ze stali nierdzewnej o średnicy 1 mm (ryc. 2a), które następnie ulegają zakryciu przy użyciu zaprawy. Rozwinięciem tej koncepcji są badania wykonane przez zespół: Borri, Castori, Corradi

3. STRENGTHENING BRICK PILLARS

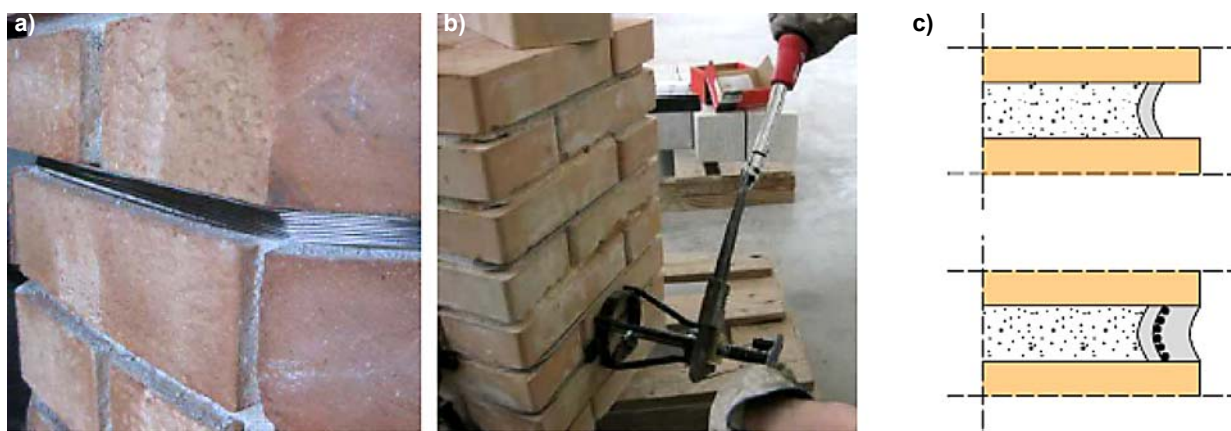
Proposed strengthening of unplastered pillars by placing 6 mm reinforcing rods in bed joints has been presented by Binda et al. [6], who later applied the method to repair the Bell Tower of the cathedral in Mons. Jurina [1] used flexible steel cords to strengthen 6 brick pillars with an octagonal cross-section (inscribed in a circle of 52 cm in diameter) and a height of 120 cm, by placing 10 steel cords of 1 mm diameter into bed joints (fig. 2a), which were subsequently covered by a mortar. This concept was developed further in research undertaken by the team of Borri, Castori and Corradi [2], [3], [4]. In paper [2], two methods

[2], [3], [4]. W pracy [2] analizowano dwie metody wzmocnienia spoin wspornych: aplikację po 6 cięgien ze stali nierdzewnej o średnicy 1,6 mm oraz umieszczanie, a następnie sprężanie po 1 cięgnię (UHTSS) o średnicy 3 mm (ryc. 2b). W kolejnych badaniach ([3], [4]) uwagę skoncentrowano na drugiej z powyższych metod, różnicując metodę sprężania cięgien, liczbę warstw oraz wypełnianie spoin (zaprawą i żywicą).

Pierwszym krokiem przy wykonywaniu omówionego wcześniej wzmocnienia jest odsłonięcie spoin wspornych, w których planowane jest umieszczenie cięgien, na głębokość 10–20 mm. Następnie w spoiny aplikuje się podkład w postaci cienkiej warstwy zaprawy ze zbrojeniem rozproszonym. W przygotowanych spoinach układa się cięgna wiotkie, a w ostatnim kroku nakłada się zewnętrzną warstwę w formie zbrojonej zaprawy lub żywicy epoksydowej (ryc. 2c).

were analysed for strengthening bed joints: application of six stainless steel cords of 1.6 mm in diameter in a joint, and application of one cord (UHTSS) of 3 mm in diameter (fig. 2b) which was subsequently tensed. Further research [3] and [4] focused on the second of the aforementioned two methods, differentiation the method of tensing the cord, the number of layers and materials used for filling in the joints (mortar and resin).

The first step in implementing the strengthening described above is to uncover the bed joints, into which the cords are to be placed, to a depth of 10–20 mm. Next, the base in the form of a thin layer of mortar with dispersed strengthening is put in. The flexible cords are placed into the joints, which have been prepared in this way, and the last step is to apply the external layer of a reinforced mortar or epoxy resin (fig. 2c).



Ryc. 2. Wzmocnienie: a) 10 cięgnami o średnicy 1 mm [1], b) sprężanymi cięgnami o średnicy 3 mm [4], c) schemat aplikacji
Fig. 2. Strengthening: a) using ten cords of 1 mm diameter [1], b) using tensed cords of 3 mm diameter [4], c) application diagram

Różnica odkształcalności poprzecznej zaprawy i elementów murowych w filarach niewzmocnionych prowadzi do występowania trójosiowego ściskania w zaprawie oraz jednoosiowego ściskania i dwuosiowego rozciągania w elementach murowych. Dodatkowo umieszczenie cięgien w spoinach wspornych znacząco zwiększa ten efekt, gdyż powoduje ograniczenie odkształceń zaprawy z uwagi na występowanie sił adhezji na styku zaprawa-element murowy. W efekcie mechanizm zniszczenia polega na przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie w elementach murowych, co potwierdzają badania [2–4]. Efektywność wzmocnienia tą metodą zależy zatem m.in. od rodzaju zaprawy występującej w filarze oraz od proporcji między parametrami mechanicznymi zaprawy i elementów murowych. W badaniach [2] do budowy próbek murowych wykorzystano zaprawę cementowo-wapienną oraz cegły o średnich wytrzymałościach na ściskanie odpowiednio 10,1 MPa oraz 20,99 MPa. Średni przyrost nośności przy wzmocnieniu jedną pętlą cięgien sprężanych o średnicy 3 mm wyniósł 29%, 30%, 12% odpowiednio dla próbek o przekrojach ośmiokątnym, kwadratowym i prostokątnym. W pracach [3–4] zastosowano te same cegły, lecz zmieniono zaprawę na wa-

The difference in the transverse displacement of the mortar and the masonry elements in unstrengthened pillars results in a tri-axial compressive stress in the mortar and uniaxial compressive stress and biaxial tensile stress in the masonry elements. The additional placement of the cords in the bed joints increases this effect significantly, as it limits the strain of the mortar due to the adhesive forces at the mortar-masonry interface. As a result, the failure mode occurs when the tensile strength of the masonry elements is exceeded, which has been confirmed by research [2–4]. Effectiveness of strengthening using this method depends, inter alia, on the type of mortar used in the pillar and on the proportions between the mechanical properties of the mortar and those of the masonry elements. In research [2], a lime-cement mortar and bricks with an average compressive strength of 10.1 MPa and 20.99 MPa respectively, were used to build masonry samples. The average increase in load-bearing capacity when strengthened with one loop of tensed cords of 3 mm in diameter amounted to 29%, 30% and 12% respectively for samples of octagonal, square and rectangular cross-sections. In research [3–4], the same bricks were used, but the mortar was changed for a lime one with an average compressive strength of

pienną o średniej wytrzymałości na ściskanie 5,60 MPa. W tym przypadku uzyskano przyrosty nośności od 45% do 200% względem próbek porównawczych.

Istotnym zagadnieniem wpływającym na efektywność wzmacniania filarów cięgnami jest kształt przekroju poprzecznego elementu wzmacnianego. W przypadku próbek prostokątnych o stosunku boków 2:1 krępowanie przekroju poprzecznego okazuje się mniej efektywne w porównaniu do kształtów zbliżonych do foremnych, a czasami wręcz szkodliwe z punktu widzenia nośności granicznej. Problemem stwarzanym z kształtem przekroju poprzecznego są naroża o kątach prostych, w których docisk cięgna stalowego do zaprawy powoduje lokalną koncentrację naprężeń, negatywnie wpływając na pracę statyczną elementu wzmocnionego. W takich sytuacjach należy wykonywać wyokrąglenia naroży oraz stosować odpowiednie podkładki, aby zniwelować wspomniany efekt. Kształt przekroju poprzecznego okazuje się istotny również w analizach efektywności wzmacniania przy stosowaniu pojedynczych oraz podwójnych pętli stalowych. Wyraźnie korzystniejszy efekt zaobserwowano dla filarów o przekroju kwadratowym, gdzie przyrost nośności wzrósł z 30% (przy jednej pętli) do 53% (przy dwóch pętlach). Dla próbek o przekroju ośmiokątnym zmiana liczby pętli wykazała znikomy wpływ na nośność, natomiast w przypadku elementów o przekroju prostokątnym był on negatywny.

Ważnym aspektem wzmacniania przy użyciu cięgien jest wybór materiału wypełniającego spoiny, gdyż jednym z głównych jego zadań jest ochrona zbrojenia przed czynnikami zewnętrznymi. W badaniach [2] w dwóch próbkach wzmacnianych szeregiem cięgien o średnicy 1,6 mm zastosowano żywicę epoksydową, natomiast w trzech zaprawę mineralną. Porównanie ścieżek równowagi statycznej prowadzi do wniosku, iż stosowanie żywicy korzystniej wpływa na nośność oraz pracę statyczną wzmacnianego elementu.

W pracy [4] przedstawiono także doświadczenia na 3 filarach o przekroju ośmiokątnym (wymiar dwóch cegieł) i wysokości 53 cm, które wzmacniano przy użyciu cięgien wykonanych z polietylenu o ultradużej masie cząsteczkowej (UHMWP). Porównanie otrzymanych wyników z filarami wzmocnionymi linami stalowymi wskazuje na niższą efektywność tej metody, jednak należy zwrócić uwagę na znaczną różnicę w parametrach mechanicznych obu materiałów.

Stosowanie cięgien stalowych do wzmacniania filarów murowych było także przedmiotem badań Fossettigo i Minafó [5], w wyniku których stwierdzono, iż ta technika zwiększa graniczną odkształcalność podłużną filarów wzmocnionych. Ponadto zaobserwowano korzystny wpływ badanej metody na zachowanie statyczne elementu po przekroczeniu maksymalnego naprężenia (*post-peak behaviour*), polegający na zwiększeniu plastyczności w tej fazie, umożliwiające dalsze przenoszenie obciążeń na etapie pokrytycznym. Zwrócono także uwagę na konieczność dalszych badań nad efektem skali, szczegółami połączeń

5.60 MPa. In this situation, increases in load-bearing capability ranged from 45 to 200% when compared to reference samples.

A key issue affecting the effectiveness of strengthening pillars with cords is the shape of the cross-section of the element being strengthened. In the case of rectangular samples with sides in a 2:1 proportion, restraining the transverse cross-section turns out to be less effective when compared to regular shapes, and sometimes detrimental from the point of view of ultimate load-bearing capacity. A problem associated with the shape of the cross-section relates to right-angled corners, where the contact pressure of the steel cord on the mortar causes localised stress concentrations, which negatively affect the static behaviour of the strengthened element. In such situations, it is important to round the corners and apply appropriate washers to dispel the effect referred to above. The shape of the cross-section turns out also to be significant in analysis of strengthening effectiveness when single or double steel loops are applied. A clearly higher effectiveness of strengthening was observed in pillars with a square cross-section, where the observed increase in load-bearing capacity ranged from 30% (in the case of one loop) to 53% (in the case of two loops). For samples with an octagonal cross-section, changes in the number of loops applied had minimal impact on load-bearing capacity, whereas for elements with rectangular cross-sections the impact was negative.

An important aspect of using cords for strengthening relates to the choice of material to be used to fill out the joint, for which one of the main tasks in order to protect the strengthening against external agents. In research [2], epoxy resin was applied in two samples which were strengthened by a series of cords of 1.6 mm, whereas a mineral mortar was applied in three samples. A comparison of the paths to static equilibrium leads to the conclusion that applying resin positively affects the load-bearing capacity and static behaviour of the strengthened element.

In paper [4], experiments were carried out also on 3 pillars with an octagonal cross-section (the size of two bricks) and a height of 53 cm, which were strengthened using cords made from polyethylene of ultra-high molecular mass (UHMWP). Comparison of results obtained to those for pillars strengthened with steel cables, indicates a lower effectiveness of this method – but it is important to note that there is a significant difference in the mechanical parameters of the two materials.

Applying steel cords to strengthen masonry pillars was also the focus of the research undertaken by Fossetti and Minafó [5]. The research concluded that the method increases the ultimate longitudinal strain of the strengthened pillars. Moreover, it was observed that the method positively affects the post-peak static behaviour of the element, which involves increasing the element's ductility in this phase, enabling further transfer of loads at the post-critical stage. Attention was also drawn to the need for further research on the scale effect, details

i aspektami technologicznymi dotyczącymi aplikacji cięgien w spoinach.

Quagliarini i in. [20] zastosowali cięgna bazaltowe do wzmacniania filarów, różnicując przy tym materiał otaczający cięgno w spoinie. Pozytywne rezultaty uzyskano dla wypełnienia żywicą epoksydową (wzrost nośności o 40%), natomiast przy zastosowaniu zaprawy wapiennej nie zaobserwowano wyraźnych korzyści dla pracy statycznej elementu wzmocnionego. Autorzy [20] tłumaczyli różnicę skuteczności oddziaływaniami adhezyjnymi, które są mocniejsze dla matrycy na bazie żywicy.

4. WZMACNIANIE MURÓW O LICU NIEREGULARNYM

Propozycję wzmacniania murów trójwarstwowych przy użyciu cięgien bazaltowych przedstawiono w pracy Quagliarini i in. [25], w której analizowano pracę statyczną ściskanych murów – przed i po wzmocnieniu. Przedstawiona metoda bazuje na umieszczeniu w spoinach cięgien bazaltowych oraz ich przewiązywaniu poprzecznym (ryc. 3a) w celu poprawy współpracy między poszczególnymi warstwami muru, wzrostu nośności, a także ograniczenia odkształceń poprzecznych. W badaniach analizowano cztery mury poddane ściskaniu, z których dwa zostały poddane wzmocnieniu cięgnami bazaltowymi. Mechanizm zniszczenia elementów porównawczych polegał na rozwarstwieniu muru oraz wyboczeniu jednej z warstw zewnętrznych. Zastosowanie wzmocnienia poprawiło współpracę między elementami oraz doprowadziło do przyrostu nośności na ściskanie o 40%. W pracy [22] rozbudowano program badań do 12 elementów, w których połowę modeli badano na ściskanie, a drugą połowę na ścinanie. Część modeli wzmacniano dodatkowo w spoinach pionowych. Wyniki uzyskane w testach ściskania prowadziły do wniosków podobnych do wyników badań prezentowanych w pracy [25], natomiast badania ścinania wskazały na wyraźną różnicę w skuteczności układów wzmocnienia, gdyż wyraźnie pozytywny efekt uzyskano tylko przy umieszczeniu cięgien w spoinach wspornych i pionowych.

Omówione wyżej badania koncentrowały się na pracy statycznej murów warstwowych podczas działania obciążenia w płaszczyźnie muru. Istotnym zagadnieniem w analizie nośności muru jest także jego odpowiedź na działanie obciążeń z płaszczyzny. W pracach [23], [24] badano 5 murów ceglanych, z czego dwa z nich pozostały niewzmocnione, dwa wzmocniono cięgnami w układzie romboidalnym, a jeden w układzie prostokątnym. Następnie elementy obciążono punktową siłą poziomą w połowie wysokości, wywołując zginanie modelu. Ścieżki równowagi statycznej wskazały na liniowo-sprężystą pracę muru niewzmocnionego, aż do kruchego zniszczenia w momencie utraty przyczepności między zaprawą a cegłą. W przypadku próbek wzmocnionych uzyskano przyrost nośności, jednak ze sporym rozrzutem wyników, który prawdopodobnie wynikał z niekontrolowanego, ręcznego sprężenia cięgien podczas

of the joints and technological aspects of applying the cords to joints.

Quagliarini et al. [20] applied basalt cords to strengthen pillars, differentiating also the material which surrounds the cord in the joint. Positive results were obtained for epoxy resin fill (increase in load-bearing capacity of 40%), whereas in the case of lime mortar application, no clear improvement in the static behaviour of the strengthened element were observed. The authors [20] have explained that the difference in effectiveness is associated with adhesive phenomena, which is stronger for a resin-based matrix.

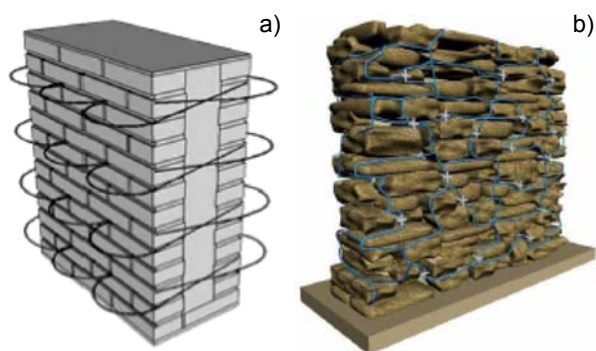
4. STRENGTHENING MASONRY ELEMENTS WITH IRREGULAR SURFACES

A proposal to strengthen three-layered masonry walls using basalt cords has been presented in the research of Quagliarini et al. [25], which analysed the static behaviour of masonry walls under compressive stress before and after strengthening. The method presented is based on placing basalt cords in the joints and tying them transversely (fig. 3a) with the goal of improving interaction between the various layers of the masonry, increasing load-bearing capacity, and limiting transverse strain. In the research, four masonry walls subjected to compressive stress were analysed, of which two had been strengthened using basalt cords. The failure mode of the reference elements involved delamination of the wall and buckling of one of the external layers. Application of the strengthening improved the interaction between the masonry elements and led to an increase in load-bearing capacity under compressive stress by 40%. In the paper [22], the research programme was expanded to include 12 elements, of which half the samples were subjected to compressive stress and the other half to shear stress. Some of the samples were additionally strengthened in their vertical joints. The results obtained from compressive stress testing led to conclusions similar to those reported in paper [25], but the shear stress testing indicated a significant difference in the effectiveness of various strengthening arrangements. A clearly positive result was obtained only when cords were placed in the bed and vertical joints.

The experimental testing discussed above concentrated on the static behaviour of multiple wythe masonry walls subjected to in-plane loading. An important aspect in the analysis of the load-bearing capacity of the wall involves also its reaction to out of plane loading. In papers [23], [24], 5 brick walls were investigated, of which two remained unstrengthened, two were strengthened using cords with a rhomboid arrangement, and one with a rectangular arrangement. The elements were then subjected to horizontal point force half way in its height, inducing bending of the model. Pathways to static equilibrium revealed the linear-elastic behaviour of the unstrengthened wall, right up to its brittle failure in the moment when the adhesiveness between the mortar and the

wzmocnienia. Badania rozbudowano o dwie dodatkowe próbki [14], które potwierdziły przyrost nośności przy zginaniu po wzmocnieniu zaproponowanymi metodami. Ponadto wskazano na potrzebę dalszych badań nad: a) zastosowaniem innych materiałów do wzmocnienia, b) mechanicznym sprężaniem cięgien, c) stosowaniem dodatkowych elementów usprawniających pracę wzmocnienia w narożach. Metodę z powodzeniem zastosowano na obiekcie rzeczywistym, wieży Lossetti w Beura-Cardezza we Włoszech, co przedstawiono w pracy [21].

Interesującą metodę wzmocnienia murów o nieregularnym układzie elementów murowych w licu, w szczególności dzikich, czyli zbudowanych z kamieni o nieregularnym kształcie, zaproponował Borri i in. w pracy [13]. Rozwiązanie polega na wprowadzeniu w spoiny muru cięgien o bardzo małej średnicy i zakotwienie ich za pomocą poprzecznych prętów stalowych (ryc. 3b).



Ryc. 3. Schematy wzmocnienia: a) technika *stitchings* [22], b) technika *reticolatus*

Fig. 3. Strengthening diagrams: a) *stitchings* method [22], b) *reticolatus* method

Liny stalowe, dzięki małym wymiarom, umożliwiającym odginanie, pozwalają na zastosowanie w niemal dowolnym układzie elementów murowych w licu zewnętrznym. Nazwa metody – *reticolatus* – została przyporządkowana ze względu na wizualny, prawie prostokątny (*semi-rectangular*), układ cięgien w spoinach.

Procedura wzmocnienia metodą *reticolatus* jest następująca: w pierwszym kroku usuwana jest zaprawa w spoinach wspornych na głębokość 6–8 cm, otwory są oczyszczane, a następnie wprowadzane jest wzmocnienie, kolejno poprzez rozmieszczenie kotew poprzecznych, pierwsze uzupełnienie spoin, wprowadzenie cięgien i ich napięcie poprzez dokręcenie nakrętek w kotwach, drugie uzupełnienie spoin oraz estetyczne wykończenie powierzchni.

Próby ściskania murów wzmocnianych metodą *reticolatus* przedstawiono w pracy [7] i uzyskano średni przyrost nośności o 116% w stosunku do modelu niewzmocnionego oraz zmianę mechanizmu zniszczenia z kilku wyraźnych pęknięć (dla elementów niewzmocnionych) na układ wielu drobnych zarysowań, świadczących o bardziej równomiernym rozkładzie naprężeń. Ponadto wykonano testy ścinania, w których wykazano, iż średni przyrost nośności na ścinanie muru wzmoc-

brick was lost. In the case of strengthened samples, an increase in load-bearing capacity was achieved, but there was a considerable scatter in terms of measurement results, which most probably arose from an uncontrolled, manual compression of the cords during the installation process. The research was expanded to include two additional samples [14], which confirmed the increase in load-bearing capacity in bending, following strengthening using the proposed methods. Moreover, the need for further research was identified on: a) using other materials for strengthening; b) mechanical compression of cords; c) applying additional elements to increase the effectiveness of strengthening in corners. The method has been applied with positive results in real time to the Lossetti Tower in Beura-Cardezza in Italy, which has been presented in paper [21].

An interesting method for strengthening masonry walls with irregular arrangements of masonry elements on their surface, especially those comprising rubble work, in other words made up of stones with irregular shapes, has been proposed by Borri et al. in [13]. The solution involves introducing cords into the wall joints of very small diameter and anchoring them with the help of transverse steel rods (fig. 3b).

Steel cables, thanks to their small dimensions which enable bending, can be used in almost any arrangement of wall masonry elements on their external surface. The name of the method – *reticolatus* – was adopted because of its visual semi-rectangular manifestation of the arrangement of cords in joints.

The procedure for strengthening using the *reticolatus* method is the following: the first step is to remove the mortar from the bed joints to a depth of 6–8 cm. The openings are cleaned, and then strengthened in turn by: placing transverse anchors, initial filling of the joints, introducing cords and increasing their tension by tightening the caps in the anchors, the second filling of the joints and providing an aesthetic finish to the surface.

Compressive strength tests of walls strengthened with the *reticolatus* method are presented in [7] and



Ryc. 4. Wzmocnienie ściany kamiennej na zamku we Wleniu
Fig. 4. Strengthening the stone wall in the castle in Wien

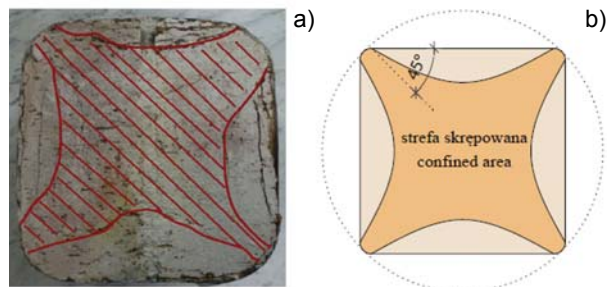
nionego wynosi 117% względem elementów porównawczych. Badania nad stosowaniem metody *reticolatus* opisano także w pracach [15], [16]. Borri i in. w [8] badali nośność muru na ścinanie przy różnych metodach wzmacniania, w wyniku czego sformułowali wniosek, że zastosowanie systemu *reticolatus* może być skuteczniejsze od stosowania materiałów kompozytowych typu FRP. Zaobserwowano także, że zróżnicowanie materiału, z którego wykonane są cięgna (stalowe oraz polietylenowe), prowadziło do podobnej nośności elementów wzmocnionych. Spostrzeżenie to jest konsekwencją mechanizmu zniszczenia, związanego bezpośrednio z przyczepnością między cięgnem a zaprawą, a nie nośnością samych lin.

Podobne badania przeprowadzili Csikai i in. [17]. W badaniach zaproponowano inne kotwy oraz system cięgien, mając na celu skrócenie czasu montażu wzmocnienia. Następnie przeprowadzono doświadczenia, których zadaniem była weryfikacja skuteczności wprowadzonych zmian. Rezultaty wskazały na duży potencjał udoskonaleń, jednocześnie ujawniając konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie, w szczególności nad systemem sprężania sieci lin, rozwojem systemu kotwienia oraz wyborem odpowiedniego typu cięgna.

Modyfikację systemu *reticolatus*, polegającą na hybrydowym połączeniu tego wzmocnienia wraz z zastosowaniem kompozytów GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) przedstawiono w pracy [11]. Podobne doświadczenia, oparte na hybrydowym wzmocnieniu GFRP oraz *reticolatus*, opisali Gattesco i in. [12], a następnie przeprowadzili analizy numeryczne elementów wzmocnionych. Metody analizy murów, wzmacnianych metodą *reticolatus*, przy użyciu MES opisano także w pracy [10].

5. PODEJŚCIE ANALITYCZNE

Liczne badania doświadczalne ukierunkowane na ocenę efektywności wzmacniania filarów murowych przy użyciu materiałów kompozytowych wskazały, iż zniszczeniu elementu na poziomie przekroju poprzecznego towarzyszy charakterystyczny układ pęknięć (ryc. 5a).



Ryc. 5. Model zniszczenia elementu skrepowanego: a) obraz rzeczywisty [5], b) model teoretyczny

Fig. 5. Model of failure of a confined element: a) real time [5], b) theoretical model

Obraz ten sugeruje występowanie dwóch stref w wzmocnionym elemencie: wewnętrznego rdzenia, który jest skrepowany, oraz zewnętrznej części, która ulega

report achieving an average increase in load-bearing capacity of 116% in comparison to the unstrengthened model, along the changes in the failure mechanism from one involving a few clear cracks (for unstrengthened elements) to one with many small cracks, evidencing a much more even distribution of stress. In addition, shear strength tests were carried out, which indicated an average increase in load-bearing capacity of 117% in comparison to control elements. Research on applying the *reticolatus* method has been described in papers [15], [16]. Borri et al. in [8] studied the load-bearing capacity of masonry with respect to shear-stress using different strengthening methods. As a result, they concluded that applying the *reticolatus* method can be more effective than using FRP composite materials. It was also observed that differentiating the material used to make the cords (steel or polyethylene), resulted in similar load-bearing capacities of the strengthened elements. The observation is that this is a consequence of the failure mechanism, which is linked directly to the adhesion relationship between the cord and the mortar, and not to the load-bearing capacity of the cables themselves.

Similar research has been undertaken by Csikai et al. [17]. In this research, a different system of cords anchors was proposed, with the goal of shortening the time needed for the installation of the reinforcement. This was followed by experimental testing with the goal of verifying the effectiveness of the changes introduced. The results obtained indicate a large potential of the proposed improvements, while at the same time making clear the need for undertaking further research in this area, especially with respect to: systems for tensing the cable networks, development of anchor systems and selection of the most appropriate cord type.

A modification of the *reticolatus* method, which involved a hybrid linking of this type of strengthening and the application of GFRP composites (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) has been presented in paper [11]. Similar tests based on hybrid GFRP and *reticolatus* reinforcement have been presented by Gattesco et al. [12], who subsequently completed a numerical analysis of the strengthened elements. Analyses of masonry strengthened using the *reticolatus* method carried out using the FEM have also been presented in paper [10].

5. ANALYTICAL APPROACH

Numerous experimental testing research focusing on assessing the effectiveness of strengthening masonry pillars using composite materials indicate that failure of the element is associated with a characteristic arrangement of cracking in its cross-section (fig. 5a).

This image suggests the existence of two zones in the strengthened element: the internal core, which is confined and the external part, which is subjected to 'splitting off'. This observation is the basis for formulating the analytical interdependencies, which can be used for estimating the load-bearing capacity of the confined

„odłupaniu”. To spostrzeżenie jest podstawą formułowania zależności analitycznych, służących do szacowania nośności elementu skrzepowanego. Model umieszczony we włoskich zaleceniach i wytycznych do przeprowadzania analiz obliczeniowych konstrukcji murowych po wzmocnieniu przy użyciu systemów FRP i FRCM (wydanych przez CNR, [26]), zakłada, że nośność elementu po wzmocnieniu (f_{mcd}) jest równa nośności elementu przed wzmocnieniem (f_{md}), powiększonej o iloczyn bezwymiarowego współczynnika wzmocnienia (k') i efektywnego ciśnienia krępującego przekrój ($f_{1,eff}$).

$$f_{mcd} = f_{md} + k' \cdot f_{1,eff}$$

f_{mcd} – nośność elementu wzmocnionego, [MPa],
 f_{md} – nośność elementu murowego przed wzmocnieniem, [MPa],
 k' – współczynnik wzmocnienia, [-],
 $f_{1,eff}$ – efektywne ciśnienie krępujące przekrój, [MPa].

W wytycznych [26] współczynnik wzmocnienia wyrażono jako funkcję gęstości muru według wzoru

$$k' = \frac{\rho_m}{1000}$$

ρ_m – gęstość muru, [kg/m³].

W kontekście wzmocniania konstrukcji historycznych, oznacza to, że efektywność skrzepowania przekroju poprzecznego jest mniejsza dla zapraw wapiennych o mniejszej gęstości w porównaniu z zaprawami cementowymi (przy zachowaniu tych samych elementów murowych).

Efektywne ciśnienie przyjmuje się jako funkcję kształtu przekroju poprzecznego oraz systemu wzmocnienia, tj.

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1$$

k_{eff} – bezwymiarowy współczynnik określający stosunek objętości części skrzepowanej do objętości całkowitej, [-],
 f_1 – poprzeczne ciśnienie krępujące, [MPa].

Wyznaczanie k_{eff} bazuje na wspomnianej wcześniej obserwacji mechanizmu zniszczenia i zakłada występowanie dwóch stref – skrzepowanej oraz nieskrzepowanej (ryc. 4b), według kształtu (*arch-effect*) założonego na podstawie doświadczeń.

Przy obliczaniu poprzecznego ciśnienia krępującego korzysta się z prawa Hooke’a (stosując moduł Younga materiału wzmocniającego i osiowe odkształcenia przy zniszczeniu elementu wzmocnionego), modyfikowanego współczynnikami intensywności zbrojenia.

Mur wzmocniany metodą *reticolatus* wykazuje w pracy statycznej bardzo dużą analogię do konstrukcji żelbetowych, stąd przy analizie nośności elementów wzmocnionych korzysta się ze zmodyfikowanych zależności z teorii żelbetu. Gdy mur jest ściskany oraz

element. The model used in Italian recommendations and guidelines for undertaking analytical calculations for masonry structures after strengthening using FRP and FRCM systems (published by CNR), assumes that the load-bearing capacity of an element after strengthening (f_{mcd}) is equal to the load-bearing of the element before strengthening (f_{md}), increased by multiples of undimensioned strengthening co-efficient (k') and the effectiveness of compressive stress confining the cross-section ($f_{1,eff}$).

$$f_{mcd} = f_{md} + k' \cdot f_{1,eff}$$

f_{mcd} – load bearing capacity of strengthened element, [MPa],
 f_{md} – load bearing capacity of masonry element before strengthening, [MPa],
 k' – strengthening co-efficient, [-],
 $f_{1,eff}$ – effective compressive stress for confining the cross-section, [MPa].

In the guidelines [CNR] the strengthening co-efficient is expressed as a function of masonry density, according to the following formula

$$k' = \frac{\rho_m}{1000}$$

ρ_m – masonry density, [kg/m³].

In the context of reinforcing historic structures, this means that the confining effectiveness of the cross-section is smaller for limestone mortar with lower density when compared to cement mortars (assuming the same masonry elements are used).

Effective compressive stress is calculated as the function of the shape of the cross-section and the strengthening system, i.e.

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1$$

k_{eff} – undimensioned co-efficient describing the relationship of volume of the confine part to the total volume, [-],
 f_1 – transverse constraining compressive stress, [MPa].

Determining k_{eff} is based on the observations of the failure mechanism discussed earlier and assumes the existence of two zones – constrained and unconstrained (fig. 4b), according to the shape (*arch-effect*) assumed on the basis of experimental testing.

In calculating the transverse constraining compressive stress, the Hooke’s law is used (applying Young’s Modulus of the strengthened material and axial displacement on failure of the strengthened element), modified by co-efficients of the intensity of the reinforcement used.

A masonry element strengthened using the *reticolatus* method demonstrates in its static behaviour a very large analogy to reinforced concrete structures, which is why for the purposes of analysis of the load-bearing capacity of strengthened elements, modified relationships sourced

zginany, należy rozwiązać dwa warunki równowagi przekroju – równania sił oraz momentów zginających. Analogicznie, przy analizie wzmocnionych murów poddanych ścisnaniu i ścinaniu w pracy [9] proponowane są zależności wprost wzorowane na normach dotyczących konstrukcji żelbetowych.

6. BADANIA WŁASNE FILARÓW KAMIENNYCH I PIERŚCIENI CEGLANYCH

W latach 2013–2016 przeprowadzono w laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Wrocławskiej szeroki program badawczy związanych z konstrukcjami historycznymi. Badaniom poddano między innymi trójwarstwowe mury kamienne wzmocnione przy użyciu różnych technik, w tym przy zastosowaniu cięgien stalowych o niewielkiej średnicy (2 mm), w analogii do systemu *reticolatus*. Głównym celem prowadzonych badań było określenie efektywności wzmocnienia murów wybranymi metodami, takimi jak iniekcja wgłęb rumoszu, aplikacja cięgien w spoinach czy łączenie przeciwnych warstw licowych z użyciem pretów wklejanych.

Główne badania prowadzono na 15 modelach murych w skali technicznej ($1,8 \times 1,0 \times 0,4$ m) dla których określano nośność przed i po wzmocnieniu oraz moduł sprężystości podłużnej. Testy niszczące prowadzono w próbie ścisnania ze zginaniem (ryc. 6). Celem badań było również zidentyfikowanie mechanizmów zniszczenia wraz z morfologią rys oraz rozkładem odkształceń. Poziome naprężenia badano przy użyciu urządzenia typu *flat-jack*. Badania wykazały znaczny przyrost nośności modeli wzmocnionych jedno- i dwustronnym systemem cięgien umieszczanych w spoinach wapiennych muru.

Równoległe z badaniami murów prowadzono ocenę efektywności wzmocnień obwodowych pierścieni ceglanych, reprezentujących dolne pasma kopuł historycznych. Długość obwodu każdego z 9 pierścieni wynosiła ok. 10,5 m przy średnicy osiowej 3 m i wymiarach przekroju poprzecznego $25 \times 33,5$ cm. Model R4 wzmocniono przy użyciu lin stalowych o średnicy 5 mm i konstrukcji przekroju poprzecznego T1x19.



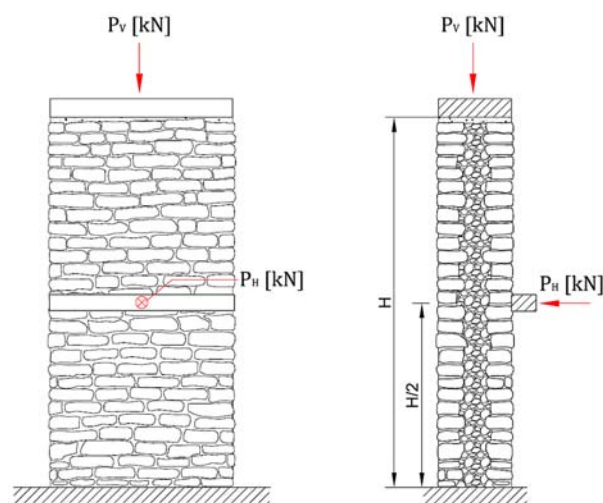
Ryc. 6. Widok modeli kamiennych przed wzmocnieniem
Fig. 6. View of stone models before strengthening

from the theory of reinforced concrete are applied. When the masonry is compressed and bent, it is important to solve two equilibrium conditions for the cross-section – equations of forces and bending moments. By way of analogy, the analyses of the strengthened masonry elements subjected to compression and shear stresses are proposed in paper [9] as relationships directly modelled on the standards relating to reinforced concrete structures.

6. OWN RESEARCH ON STONE COLUMNS AND BRICK RINGS

In the years 2013–2016, a wide-ranging research programme on historical structures was carried out in the laboratory of the Faculty of Building Engineering at Wrocław Technical University. Among other activities, three-layered stone walls strengthened using a variety of methods were the subject of experimental testing. The strengthening methods investigated included the application of steel cords of small diameters (2 mm) as an analogy to the *reticolatus* system. The main objective of the research completed was to determine the effectiveness of masonry strengthening using different methods, such as: injections into the interior rubble, application of cords in joints and joining opposite surface layers using glued rods.

The main experimental testing was carried out on 15 masonry models built to a technical scale ($1.8 \times 1.0 \times 0.4$ m) for which load-bearing capacity and the modulus of longitudinal elasticity were determined before and after strengthening. Destructive testing was carried out for compressive strength in bending (fig. 6). The goal of the research was also to identify the failure mechanisms and the morphology of cracking and displacement distribution. The level of stress was measured using a ‘flat-jack’ appliance. The research demonstrated significant increases in load-bearing capacity for models strengthened with single and double-sided systems of cords placed in the joints of the limestone masonry wall.



Ryc. 7. Schemat statyczny badanych modeli murów trójwarstwowych
Fig. 7. Static behaviour diagram of three-layered masonry models



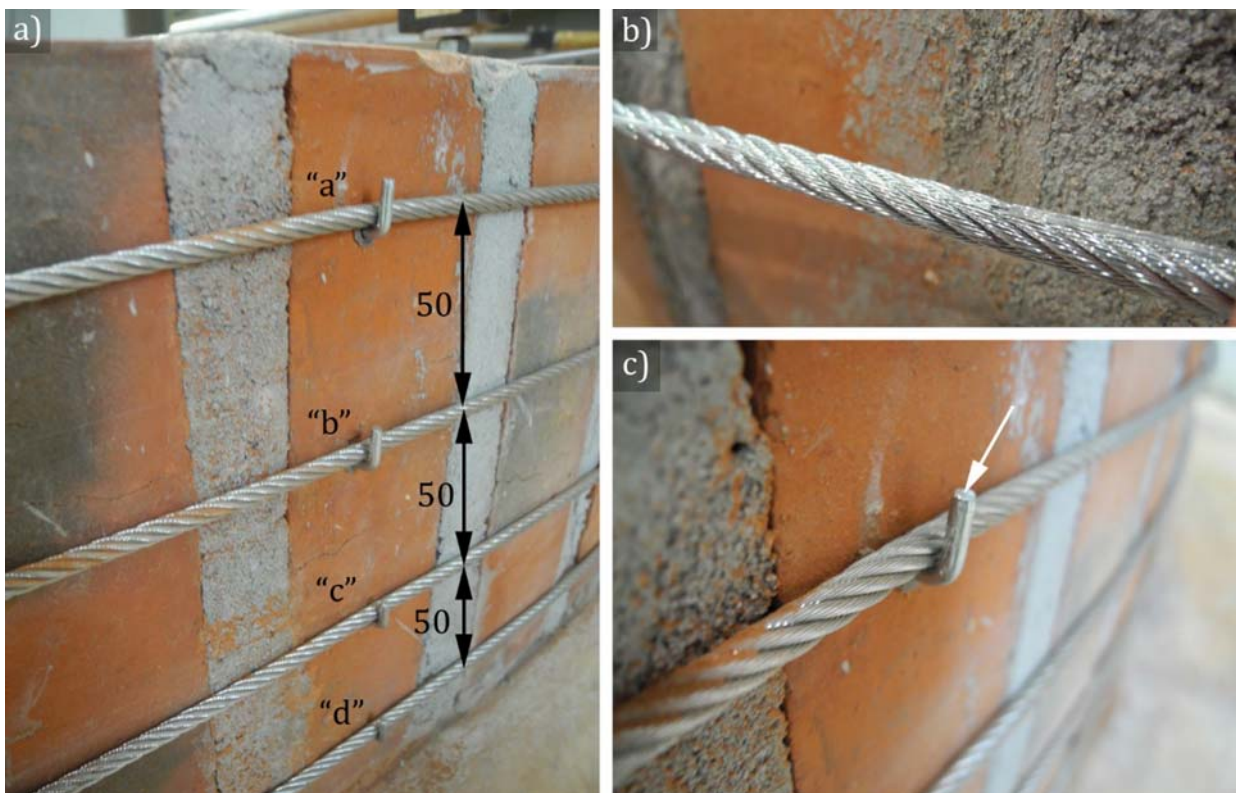
Ryc. 8. Pierścień ceglany wzmocniony obwodowo przy użyciu lin stalowych o średnicy 5 mm

Fig. 8. Brick ring strengthened along its circumference using steel cable of 5 mm diameter

Liny zostały zamocowane w stalowych blokach oporowych, a doprężenie lin nastąpiło na skutek dokręcenia nakrętek. Poziom sprężenia rejestrowano na podstawie zmian odkształceń lin. W badaniach zastosowano między innymi czujniki światłowodowe. Zniszczenie pierścienia nastąpiło na skutek zniszczenia muru, a nie w wyniku

As the testing of the masonry elements was carried out, assessment was also made of the effectiveness of strengthening of brick rings, representing the lower/bottom elements of historical domes. The length of the circumference of each of the nine rings was approx. 10.5 m with an axial diameter of 3 m and a cross-section of 2.5×33.5 cm in dimension. Model R4 was strengthened using steel cables of 5 mm in diameter and cross-section structures T1x19.

The cables were mounted in steel supports, and the cables tensioning was achieved through tightening of caps. The tension level was registered on the basis of changes in the strain of the cables. The research made use of, among other things, optical fibre sensors. The failure of the ring resulted from the failure of the masonry, and not as a result of the cables breaking. The



Ryc. 9. Detal wzmocnienia pierścienia R4: a) rozmieszczenie lin na wysokości pierścienia, b) widok powierzchni liny, c) detal haka trzymającego przebieg liny

Fig. 9. Detail of the strengthening of ring R4: a) arrangement of cables on the ring height; (b) the cable surface; c) detail of the hook tracing the pathway of the cable

zerwania lin. W badaniach wykazano wysoką efektywność wzmocnienia w porównaniu do metod tradycyjnych (np. płaskowniki stalowe) oraz współczesnych (systemy FRP i FRCM). Model R4 uległ zniszczeniu przy sile $F_{\max} = 28$ kN, co stanowiło wartość porównywalną do wyników badań modeli wzmocnionych matą C-FRP (model R5) oraz siatką bazaltową w systemie B-FRCM (model R7). Do celów analizy porównawczej wprowadzono dodatkowy wskaźnik EF uwzględniający stosunek siły niszczącej F_{\max} do sztywności wzmocnienia EA . Przy tak zdefiniowanym wskaźniku można stwierdzić, iż metoda wzmocnienia polegająca na dodaniu splotów

research pointed to high effectiveness of strengthening when compared to traditional methods (e.g. steel flat bars) and more contemporary methods (FRP and FRCM systems). Model R4 was destroyed when a force of $F_{\max} = 28$ kN was attained which is a value comparable to the results of models strengthened using C-FRP mats (model R5) and the basalt netting in the B-FRCM system (model R7). For the purposes of the comparative analysis an additional EF indicator was introduced for taking into account the relationship of the break force F_{\max} to the rigidity of the strengthening EA . With the indicator defined in this way, it is possible to state that

stalowych o średnicy 5 mm do pierścieni ceglanych jest skuteczna w aspekcie przyrostu nośności, jak i zgodna z zasadami konserwatorskimi, w których kładzie się nacisk na minimalizowanie rozmiarów elementów wzmacniających konstrukcje historyczne.

7. WNIOSKI

- 1) Wykorzystanie cięgien wiotkich we wzmacnianiu historycznych konstrukcji ceglanych poprzez ich umieszczanie w spoinach umożliwia osiągnięcie wysokiej efektywności wzmocnienia przy jednoczesnym zadowalającym efekcie estetycznym.
- 2) Modele obliczeniowe stosowane w oszacowaniu efektywności wzmocnienia stale wymagają rozbudowy oraz weryfikacji w badaniach doświadczalnych.
- 3) Kluczowym zagadnieniem we wzmacnianiu filarów murowych oraz ścian przy użyciu cięgien wiotkich jest zapewnienie skutecznego i równomiernego sprężenia cięgien wraz z kontrolą poziomu naciągu.

the strengthening method based on adding steel coils of 5 mm diameter to brick rings is effective in relation to increasing load-bearing capacity, while at the same time being in accordance with the principles of conservation practice, which emphasise minimising the dimensions of strengthening elements in historical structures.

7. CONCLUSIONS

- 1) Using flexible cords for strengthening historical brick structures by placing them in joints enables high strengthening effectiveness, while ensuring a satisfactory aesthetic effect.
- 2) Calculation models for strengthening effectiveness require development and verification against experimental testing.
- 3) The key issue for strengthening masonry pillars and walls using flexible cords is that of assuring effective and uniformly spread tensioning of the cords as well as the ability to control the tension stress levels.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Jurina L. Prove a collasso su colonne cerchiate in muratura. In: IF CRASC'09 Conference, Naples, 2009.
- [2] Borri A., Castori G., Corradi M. Masonry Confinement using Steel Cords. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2013;25(12):1910–1919.
- [3] Borri A., Castori G., Corradi M. Strengthening of fair face masonry columns with steel hooping. *Materials and Structures* 2014;47:2117–2130.
- [4] Borri A., Castori G., Corradi M. Behavior of masonry columns repaired using small diameter cords. *Key Engineering Materials* 2015;624:254–265.
- [5] Fossetti M., Minafo G. Comparative experimental analysis on the compressive behaviour of masonry columns strengthened by FRP, BFRCM or steel wires. *Composites Part B* 2017;112:112–124.
- [6] Binda L., Modena C., Saisi A., Folli R.T., Valluzzi M.R. Bed joints structural repointing of historic masonry structures. In: Proc. 9th Canadian Masonry Symposium Spanning the centuries, Fredericton, New Brunswick, 2001.
- [7] Borri A., Corradi M., Speranzini E., Giannantoni A. Rubble stone masonry strengthened using “reticolatus” system. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2009;26:147–158.
- [8] Borri A., Castori G., Corradi M., Speranzini E. Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests. *Construction and Building Materials* 2011;25:4403–4414.
- [9] Corradi M., Borri A., Castori G., Sisti R. The Reticulatus method for shear strengthening of fair-faced masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2016;14:3547–3571.
- [10] Paradiso M., Galassi S., Borri A., Sinicropi D. “Reticolatus”: An innovative reinforcement for irregular masonry. A numeric model. *Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges* 2013:841–848.
- [11] Borri A., Castori G., Corradi M., Sisti R. Masonry wall panels with GFRP and steel-cord strengthening subjected to cyclic shear: An experimental study. *Construction and Building Materials* 2014;56:63–73.
- [12] Gattesco N., Amadio C., Bedon C. Experimental and numerical study on the shear behavior of stone masonry walls strengthened with GFRP reinforced mortar coating and steel-cord reinforced repointing. *Engineering Structures* 2015;90:143–157.
- [13] Borri A., Corradi M., Speranzini E. Consolidation and reinforcement of stone walls using a reinforced repointing grid. In: Proc. 6th international conference on SAHC, Bath, 2008.
- [14] Quagliarini E., Scalbi A., Monni F., Lenci S. A Novel and Sustainable Application of Basalt Fibers for Strengthening Unreinforced Masonry Walls. *Journal of Natural Fibers* 2017;14:97–111.
- [15] Borri A., Corradi M., Speranzini E., Giannantoni A. Reinforcement of Historic Masonry with High Strength Steel Cords. *Masonry Int.* 2010;23(3):79–90.
- [16] Borri A., Corradi M., Speranzini E., Giannantoni A. A reinforced repointing grid for strengthening historic stone masonry walls. In: Proc. 8th International Masonry Conference, Dresden, 2010.

- [17] Csikai B., Ramos L.F., Basto P., Moreira S., Lourenco P.B. Flexural out-of-plane retrofitting technique for masonry walls in historical constructions. In: Proc. 9th International Conference on SAHC, Mexico City, 2014.
- [18] Quagliarini E., Monni F., Bondioli F., Lenci S. Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering. *Journal of Building Engineering* 2016;5:142–150.
- [19] Quagliarini E., Monni F., Lenci S., Bondioli F. Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution. *Construction and Building Materials* 2012;34:372–380.
- [20] Quagliarini E., Monni F., Greco F., Lenci S. Flexible repointing of historical facing-masonry column-type specimens with basalt fibers: A first insight. *Journal of Cultural Heritage* 2017;24:165–170.
- [21] Monni F., Quagliarini E., Lenci S. Basalt fibre continuous stitchings for strengthening the dry stone masonry of the Lossetti Tower in Beura-Cardezza (Italy). *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture* 2017;3(1):137–148.
- [22] Monni F., Quagliarini E., Lenci S. A basalt ropes: a new product for the rehabilitation of historical masonry. *International Journal of Sustainable Construction* 2014;2(1):61–69.
- [23] Monni F., Quagliarini E., Lenci S. Dry Masonry Strengthening through Basalt Fibre Ropes: Experimental Results against Out-of-Plane Actions. *Key Engineering Materials* 2015;624:584–594.
- [24] Monni F., Quagliarini E., Lenci S., Scalbi A. Strengthening masonry through basalt fibre stitchings: A sustainable and reversible way of practice. In: *Scienza e Beni Culturali*, Bressanone, 2014.
- [25] Quagliarini E., Monni F., Lenci S. Strengthening three-leaf masonry panel with basalt fibre ropes: first experimental data. In: Proc. 5th International Congress on "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Istanbul, 2011.
- [26] CNR-DT 200/2004 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of existing structures. Technical Document No. 200/2004, Italian National Research Council, Rome, 2004.

Streszczenie

W pracy omówiono wybrane zastosowania cięgien w konserwacji konstrukcyjnej obiektów historycznych, zwracając szczególną uwagę na efektywność poszczególnych metod wzmocnienia. Przedstawiono techniki oparte na aplikacji cięgien w spoinach filarów ceglanych oraz murów o licu nieregularnym, które stanowią rozwiązania akceptowalne z punktu widzenia doktryn konserwatorskich. Zwrócono także uwagę na problematykę uwzględniania wzmocnienia w podejściach analitycznych. Przedstawiono również wybrane wyniki badań własnych, przeprowadzonych na modelach kamiennych oraz pierścieniach ceglanych.

Abstract

The paper discusses selected applications of cords in the structural conservation of historic buildings, paying special attention to the effectiveness of individual strengthening methods. Techniques based on application of cords in joints of brick pillars and walls with irregular faces are presented, which are solutions acceptable from the perspective of conservation doctrines. Attention was also paid to the problems of including strengthening in analytical approaches. The paper also presents selected results of own research carried out on stone models and brick rings.