

Arkadiusz Kwiecień\*

# Polimerowe złącze podatne – innowacyjna metoda naprawy i konserwacji obiektów zabytkowych

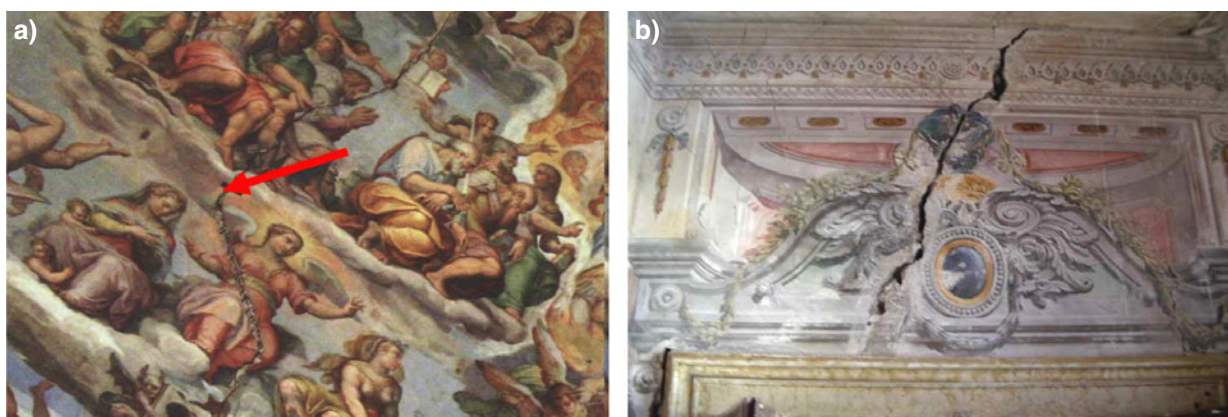
## Polymer flexible joint – innovative method of repair and conservation of heritage objects

### 1. Wprowadzenie

Naprawa pękniętych budynków zabytkowych o konstrukcji murowej jest połączona w wielu przypadkach z konserwacją fresków wykonanych na ścianach i sklepieniach. Wymagają one podłoża, pozwalającego na bezpieczne użytkowanie pod względem estetycznym i mechanicznym. Niestety, uszkodzenia w konstrukcjach murowych powstają najczęściej w wyniku osiadań, oddziaływań dynamicznych, destrukcji materiałowej lub zastosowania niewłaściwych technik naprawy [1], a powstające pęknięcia dewastują dzieła sztuki (rys. 1).

### 1. Introduction

Repair of cracked historical masonries is connected in many cases with conservation of frescos made on walls and vaults. They require of support that allows for safe exploitation from aesthetic and mechanical point of view. Unfortunately, damages in masonry structures appear most often caused by settlement, dynamic action, structural material deterioration or inappropriate retrofitting techniques [1] and appearing cracks devastate works of art (fig. 1).



Rys. 1. Uszkodzenia fresków: (a) pęknięta kopuła katedry Santa Maria del Fiore we Florencji, (b) pęknięta ściana Palazzo del Torso w Udine

Fig. 1. Damages of frescos: (a) the cracked dome of the cathedral Santa Maria del Fiore in Florence, (b) the cracked wall of the Palazzo del Torso in Udine

Gdy pęknięcie podzieli element konstrukcyjny na dwie części, pracują one oddzielnie w nowym stanie naprężenia i statycznej równowagi, będących konsekwencją redystrybucji naprężeń. Pęknięta kon-

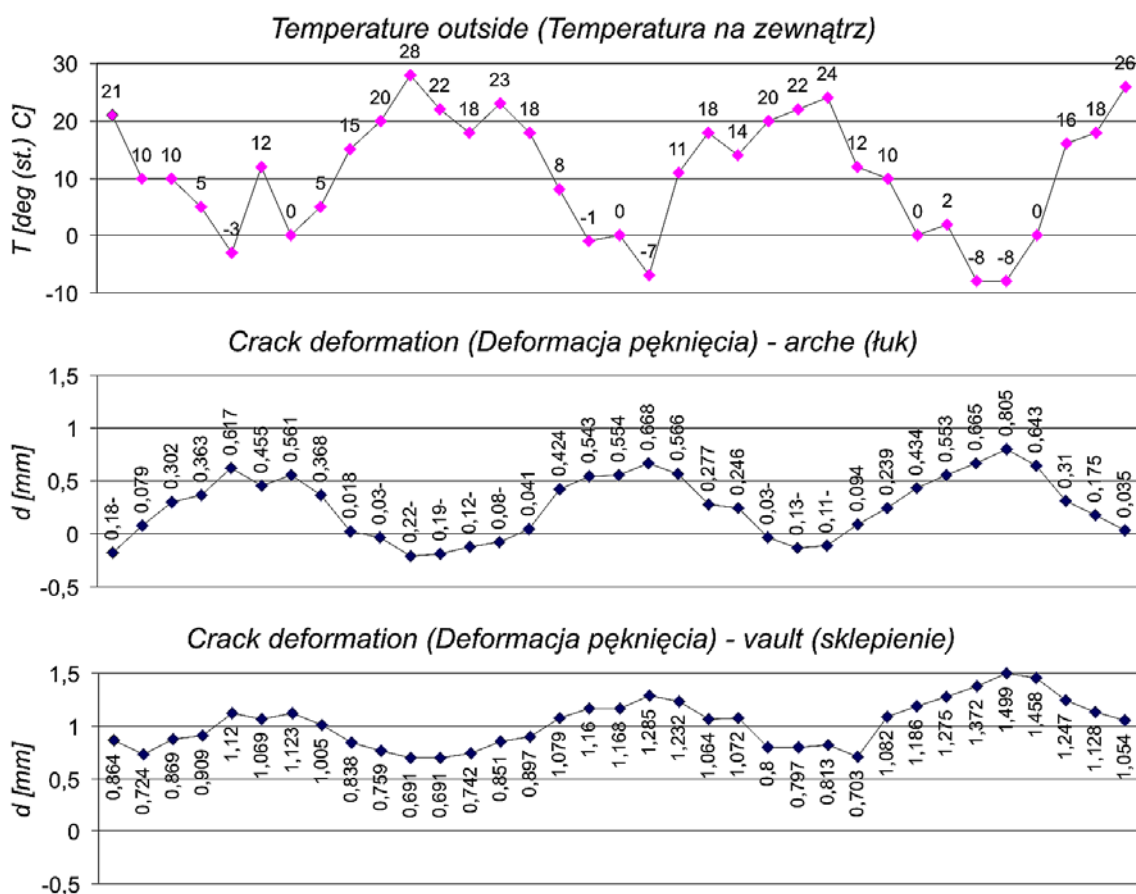
When the crack divides a member into two parts, they work separately in new stress equilibrium and static balance being a consequence of stress redistribution. Such cracked masonry is characterized by

strukcja cechuje się obniżoną odpornością na dodatkowe obciążenia, na które budynek był odporny przed powstaniem uszkodzeń. Rozdzielone pęknięciem części konstrukcyjne mogą się rozsuwać pod wpływem cyklicznie powtarzanych osiadań, zmian temperatury i drgań o niewielkiej intensywności. Takie zachowanie było obserwowane w zabytkowym budynku w Krakowie [2], gdzie rozwartości rys zmieniały się pod wpływem sezonowych fluktuacji temperatury i poziomu wód gruntowych (rys. 2), powiększając rozwartość pęknięcia. Tego rodzaju ruchy wymagają interwencji eliminującej wzajemne przemieszczenia lub ograniczające je do akceptowalnego poziomu.

Podjęwając naprawę, należy zapewnić konstrukcji globalną stabilność przez przywrócenie połączeń pomiędzy rozdzielonymi elementami konstrukcyjnymi. Tradycyjnie w naprawie stosowane są metody usztywniające konstrukcję [3], zwykle uszkadzające tynki. W przypadku obiektów zabytkowych z freskami taki rodzaj naprawy jest nieodpowiedni. Iniekcja pęknięć zaprawami mineralnymi lub epoksydowymi nie zwiększa istotnie odporności [4] (energii zniszczenia) z powodu kruchego zachowania [5] i koncentracji naprężeń [6].

decreased resistance to the action of additional loads, to which the building was resistant prior to damage. Separated parts of the cracked structure can draw apart under cyclic repeated settlements, temperature changes and vibrations of even not very high intensity. This process was observed in a historical masonry building in Cracow [2], where crack widths changed with fluctuation of season temperature and ground water level (fig. 2) permanently increasing crack dimensions. Such movements require interventions that eliminate displacements or limit them up to an acceptable level.

Undertaking repair of a cracked masonry, it is necessary to allow the structure to manifest a satisfactory global stability, by improving the connections between the disrupted masonry elements. Traditionally, stiffening repair methods are used in retrofitting of masonries [3] but they cause usually destruction of finishing plasters. In the case of historical objects, especially covered with frescos, this kind of repair is inadequate. Injecting in cracks of mineral or epoxy grouts do not improve significantly the masonry capacity [4] (damage energy) because of brittleness behaviour [5] and of stress concentration [6].



Rys. 2. Comiesięczne pomiary zmian rozwarcia pęknięć na elementach murowych budynku zabytkowego, wywołane sezonowymi zmianami temperatury i poziomu wód gruntowych [2]

Fig. 2. Monthly measurements (for 2.5 year) of crack width changes at masonry elements in historical building, caused by season fluctuation of temperature and ground water level [2]

## 2. Innowacyjna naprawa przy użyciu polimerowego złącza podatnego

Metoda Złączy Podatnych, jako innowacyjna metoda naprawy wykorzystująca iniekcję polimerową (metoda zarejestrowana w Urzędzie Patentowym pod numerem P-368173), była testowana w laboratorium oraz in situ przez ostatnie lata [5], [7], [8]. Jej skuteczność wynika z wprowadzenia polimerowego złącza naprawczego o większej odporności na rozciąganie i ścinanie oraz odkształcalności i ciągliwości, z których wynika większa zdolność do przenoszenia obciążeń (energii zniszczenia). Odkształcalność złącza podatnego pod obciążeniem zapewnia jednorodny rozkład naprężeń wzdłuż połączenia na całej powierzchni kontaktu, wyrównuje deformacje i tym samym ogranicza rozwój koncentracji naprężeń. Wykorzystywana w złączu podatnym masa poliuretanowa (właściwie dobierana) pracuje z materiałami murowymi z właściwym dopasowaniem cech mechanicznych, wypełniając wymagania stawiane materiałom iniekcyjnym [9]. Właściwości polimeru pm45, budującego złącze podatne w popękanej konstrukcji murewej (rys. 3), zaprezentowano w pracy [7].



Rys. 3. Polimerowe złącze podatne wykonane w pękniętym budynku murowanym z cegieł  
Fig. 3. Polymer flexible joint constructed in a cracked masonry building

Polimer pm45 może być wykorzystywany zwłaszcza w złączach podatnych pracujących w warunkach cyklicznie zmiennych odkształceń. Tego rodzaju warunki występują w Wenecji, gdzie fluktuacje poziomu wody spowodowały uszkodzenia w formie pęknięć. Metody naprawy potrzebne w tym regionie powinna cechować zasada minimum interwencji w konstrukcję zabytkową i zdolność do przeniesienia destrukcyjnych deformacji wywołanych osiadaniami i działaniem temperatury (rys. 2). Przykład uszkodzonego obiektu wymagającego opisanej interwencji, możliwego do naprawy przy użyciu polimerowego złącza podatnego, przedstawiono na rys. 4.

Polimer aplikowany iniekcyjnie (rys. 3) w pęknięcia o odpowiednio przygotowanej powierzchni wewnętrznej łączy elementy murowe, wprowadzając w konstrukcji w trakcie deformacji umiarkowane siły, powstrzymujące dalszą destrukcję. Odkształcalność polimeru zabezpiecza obiekt zabytkowy przeciw powstawaniu nowych uszkodzeń w otoczeniu pierwotnego pęknięcia, co odnotowano w przeszło-

## 2. Innovative repair intervention using of polymer flexible joints

The Flexible Joint Method, as innovative repair method using of polymer injection (this method is registered in the Patent Department with No. P-368173), has been tested in laboratory and in situ tests for last years [5], [7], [8]. Efficiency of the method follows from introducing of the polymer repaired joint of greater tensile and shear resistance, deformability and ductility and thus greater bearing capacity (damage energy). The deformation of the flexible joint under load assures the uniform distribution of stress along the lap joint over the total contact surface, equalises deformation and thus limits development of new stress concentrators. Polyurethane mass used in polymer flexible joints (selected properly) works together with the masonry materials with proper “compatibility” from the mechanical point of view and fulfils requirements set for injecting grouts presented in [9]. Properties of the polymer pm45, using as inject in construction of flexible joints in cracked masonry (fig. 3), were presented in [7].

The use of the polymer pm45 is dedicated to flexible joints working in conditions of cyclically changing deformation. Such conditions occur in cracked masonries in Venice, where fluctuations of water level caused damages in form of cracks. Repair methods needed in this area require of minimum intervention in historical structures and of capacity allowing withstanding influences of destruction deformations caused by settlements and acting of temperature (fig. 2). An example of damaged object requiring of such intervention, possible to repair using of polymer flexible joint, is presented in fig. 4.

The polymer mass applied by injection (fig. 3) in the cracks of specially prepared inner surfaces bonds masonry elements, introducing moderate forces in masonry during deformation process, stopping further destruction. Deformability of polymer protects historical masonry against appearance of new damages in surrounding of primary cracks, what was occurring in the past

ści po naprawach przy użyciu sztywnych i kruchych zapraw mineralnych lub epoksydowych [7], a jest niedopuszczalne w przypadku obiektów zabytkowych pokrytych freskami (rys. 1).

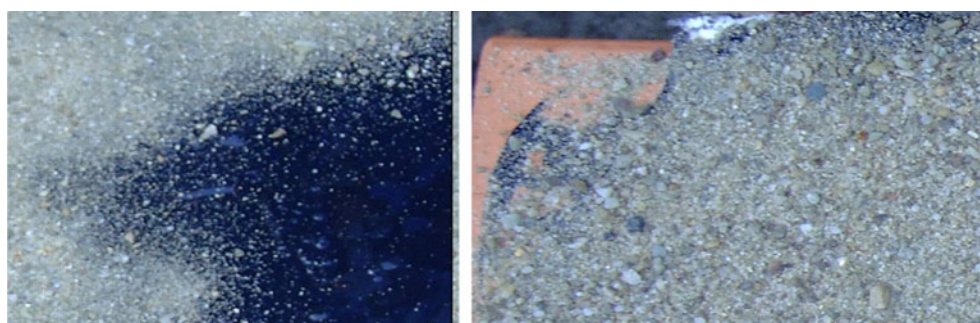
after intervention with stiff and brittle mineral or epoxy grouts [7] and what is not allowed in cases of historical masonries covered with frescos (fig. 1).



Rys. 4. Pęknięty mur w Wenecji, odpowiedni do naprawy polimerowym złączem podatnym  
Fig. 4. Cracked masonry wall in Venice, adequate for injection using of polymer flexible joint

Z punktu widzenia konserwacji wymagane jest pokrycie podatnego złącza podatnego specjalnymi materiałami i/lub farbami, maskującymi miejsce uszkodzenia i przywracającymi pierwotny wygląd zabytkowej powierzchni (rys. 1). W przypadku polimeru, możliwe jest posypanie świeżej powierzchni piaskiem dla zapewnienia przyczepności materiałom konserwatorskim (rys. 5) lub innym materiałem rodzimym, np. okruskami starych cegieł albo kamieni, zapewniając jednakowy wygląd powierzchni. Tak wykończona powierzchnia złącza polimerowego pozwala na nawet znaczącą deformację, rozłożoną jednorodnie na całej powierzchni złącza pokrytego farbami, czyniąc te ruchy niewidocznymi (brak pęknięć).

From the conservation point of view, it is required to cover repaired flexible joint with special materials and/or paintings masking the place of damage and restoring the primary view of historical surface (fig. 1). In the case of polymer it is possible to strew the fresh surface of flexible joint with sand to assure adherence of conservation materials (Fig 5) or with other original materials like gains of old bricks or stones to assure the same surface quality. Such restored surface of polymer joint allows for even significant deformation, distributed uniformly at the whole joint surface covered with paintings, making the movements invisible (cracks not appear).



Rys. 5. Pokrycie polimeru posypką piaskową pod wykończenie konserwatorskie powierzchni  
Fig. 5. Covering of polymer with sand for preparation of masking conservative surface quality

### 3. Porównanie między pracą kruchych (zaprawa) i odkształcalnych (polimer) połączeń

Aby porównać pracę kruchych i odkształcalnych połączeń (zapraw) w prostych testach rozciągania, ściskania i ścinania, przygotowano próbki o niewielkich gabarytach. W testach użyto typowych polskich cegieł pełnych o wymiarach  $65 \times 120 \times 250$  mm ( $h \times b \times l$ ) o wytrzymałości na ściskanie  $f_b = 15$  MPa. Połączenia pomiędzy cegłami wykonano z dwóch rodzajów materiałów, o grubości 10 mm dla każdego z nich. Materiałem kruchym była zaprawa murarska klasy M7 (o wytrzymałości na ściskanie  $f_m = 7.2$  MPa), a materiałem odkształcalnym polimer pm45 (opisany w pracy [7]). Badane próbki pokazano na rys. 6, 7, 8. Wymiary warstw łączących były następujące: testy rozciągania i ściskania – jedna warstwa  $10 \times 120 \times 125$  mm; testy ścinania – dwie warstwy  $10 \times 120 \times 200$  mm. Aplikację polimeru poprzedzono użyciem primera. Próbki obciążano z prędkością przyrostu siły 10 N/s.

W każdym teście badano trzy próbki z zaprawą M'10'1, M'10'2, M'10'3 (przy ściskaniu tylko dwie) i z polimerem pm45'10'1, pm45'10'2, pm45'10'2. Wyniki w formie krzywych siła-przemieszczenie (w podobnej skali), otrzymane podczas rozciągania, ściskania i ścinania pokazano na rys. 6, 7, 8. Takie przedstawienie wyników pozwala porównać pracę cegieł połączonych różnymi zaprawami (cementowo-wapienną i polimerem) i umożliwić inżynierom przewidzenie jak złącze będzie pracowało w rzeczywistej konstrukcji. Porównanie wyników przeprowadzono dla: maksymalnej siły, maksymalnego przemieszczenia odpowiadającego maksymalnej sile, wartości energii zniszczenia (praca potrzebna do zniszczenia próbki) i wartości całkowitej energii (suma energii zniszczenia i energii po zniszczeniu – będącej wskaźnikiem bezpieczeństwa połączenia). W obliczeniach energii z krzywych zastosowano całkowanie numeryczne metodą trapezów. Wyniki otrzymane z wykresów dla rozciągania, ściskania i ścinania zamieszczono w tab. 1, 2, 3. W wyniku testów stwierdzono dobrą przyczepność polimeru pm45 do cegieł – obserwowano kohezyjną postać zniszczenia złącza polimerowego (rys. 6).

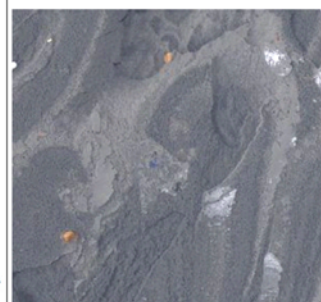
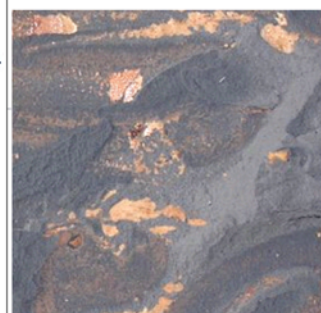
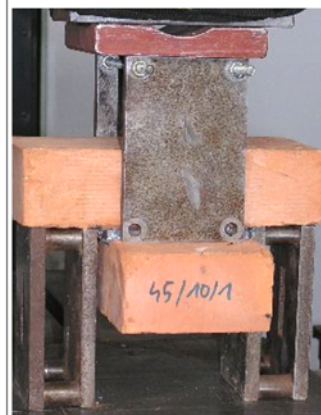
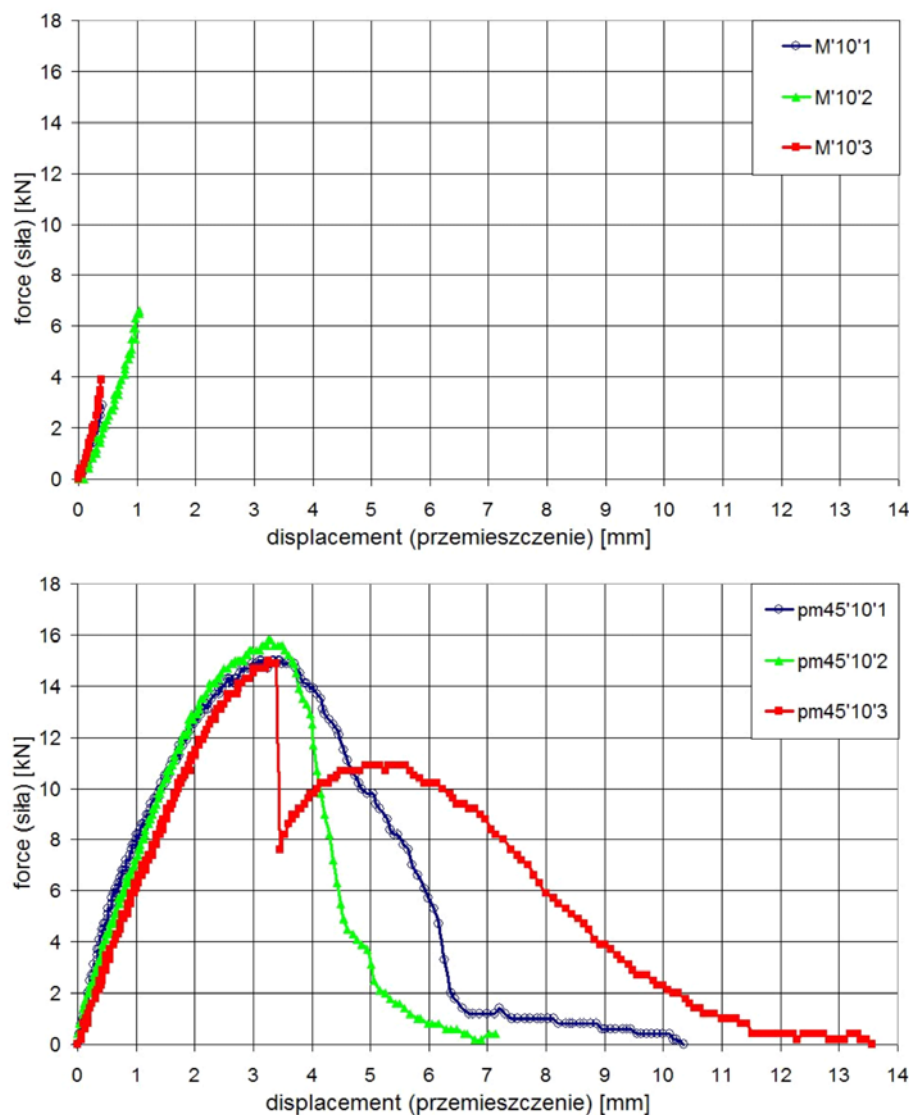
Porównanie wyników rozciągania (rys. 6) wskazuje, że użyty polimer prezentuje znacząco większe wartości średnie charakterystyk niż zaprawa (tab. 1). Są one większe ponad 3 razy w przypadku maksymalnej siły, ponad 5 razy w przypadku maksymalnego przemieszczenia, ponad 8 razy w przypadku energii zniszczenia i ponad 16 razy w przypadku energii całkowitej. Ponadto, sztywność obu złą-

### 3. Comparison between work of brittle (mortar) and deformable (polymer) adhesives

To compare work of brittle and deformable adhesives (grouts) in the simple tension, compression and shear tests, specimens of small dimension were prepared. In the tests the typical Polish solid clay bricks of dimension  $65 \times 120 \times 250$  mm ( $h \times b \times l$ ) were used. The masonry units were characterized with compressive strength  $f_b = 15$  MPa. Joints between brick elements were made of two kinds of materials and of 10 mm joints thickness in each case. As brittle material masonry mortar of strength class M7 (with compressive strength  $f_m = 7.2$  MPa) and as deformable material the polymer pm45 (characterized in [7]) were applied. Tested specimens are presented in fig. 6, 7, 8. Dimensions of adhesive layers were as follows: tension and compression tests – one layer  $10 \times 120 \times 125$  mm; shear tests – two layers  $10 \times 120 \times 200$  mm. In cases of polymer application the special primer was used. Loading of specimens was with force control of speed 10 N/s.

In each test three specimens with mortar M'10'1, M'10'2, M'10'3 (during compression only two) and with polymer pm45'10'1, pm45'10'2, pm45'10'2 were investigated. Results in form of curves force-displacement (in the similar scale), obtained during tension, compression and shear tests, are presented in fig. 6, 7, 8 respectively. Such presentation of results allow comparing work of masonry units joined with different mortars (lime-cement and polymer) and predicting the engineers how the joint will work in real structures. Comparison of the results was carried out for: the maximum carrying force, the maximum displacement corresponding to the maximum carrying force, the value of damage energy (work needed for destruction of specimen) and the value of total energy (the sum of damage energy and post damage energy – being the safety factor of joint). For calculation of energy from the curves, the numerical integration of the trapezoidal rule was applied. Result obtained from diagrams of tension, compression and shear tests are presented in tab. 1, 2, 3 respectively. The tests showed good adhesion to bricks of the pm45 polymer – the cohesion form of damage were observed (fig. 6).

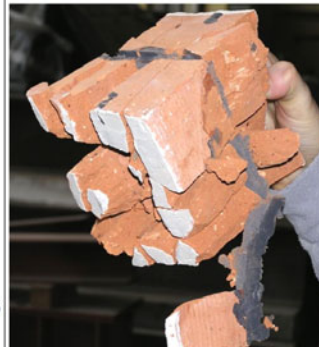
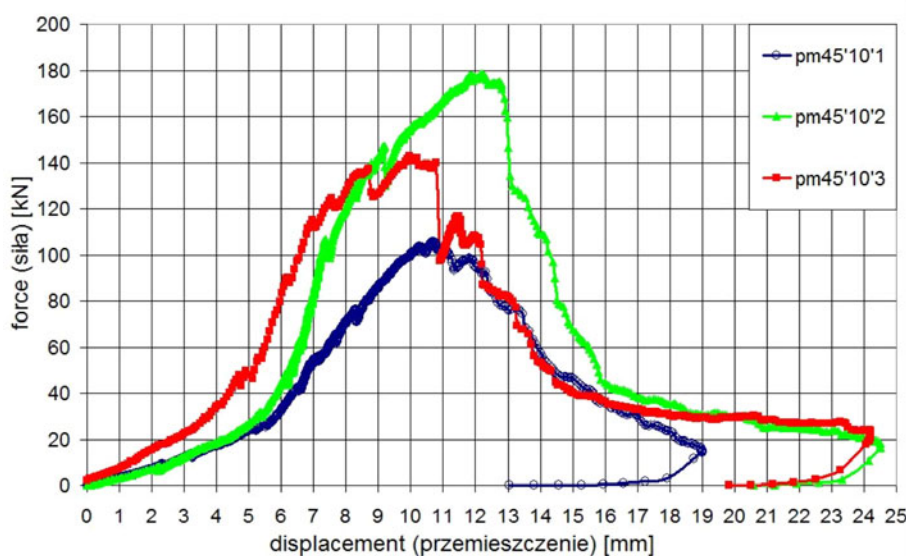
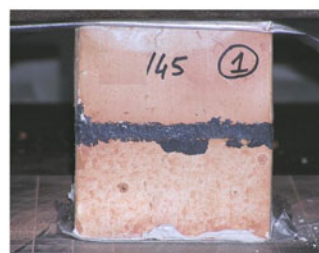
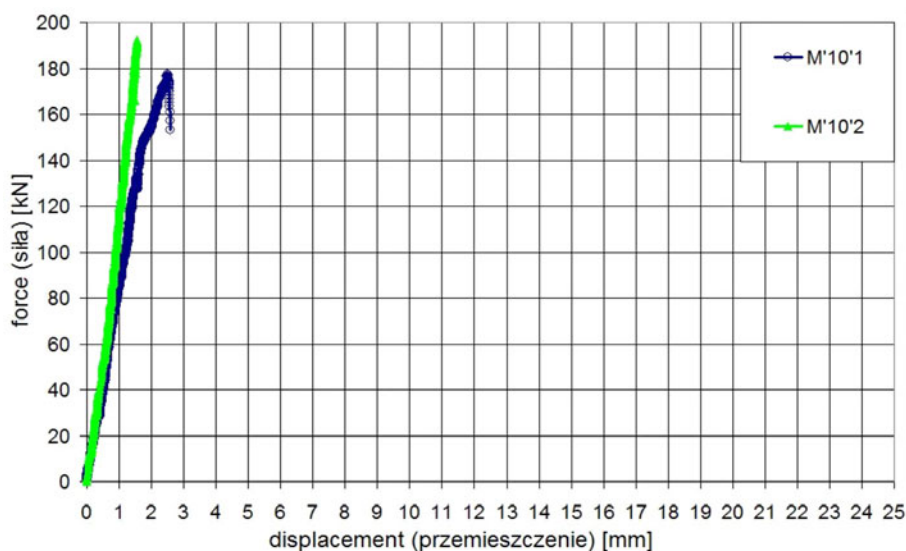
Comparison of tension test results (fig. 6) indicates that the used polymer presents significantly higher mean values of compared characteristics than mortar (tab. 1). They are over 3 times higher in the case of the maximum carrying force, over 5 times higher in the case of the maximum displacement, over 8 times higher in the case of damage energy



Rys. 6. Krzywe siła-przeszyczenie otrzymane podczas rozciągania cegieł połączonych zaprawą (M) i polimerem (pm45) oraz widok testowanej próbki (postać zniszczenia)  
 Fig. 6. Force-displacement curves obtained during tension tests of bricks joined with mortar (M) and with polymer (pm45) and also view of testing specimen (form of damage)

Tab. 1. Porównanie wartości charakterystycznych krzywych siła-przeszyczenie przy rozciąganiu  
 Comparison of characteristic values of the force-displacement curves obtained during tension tests

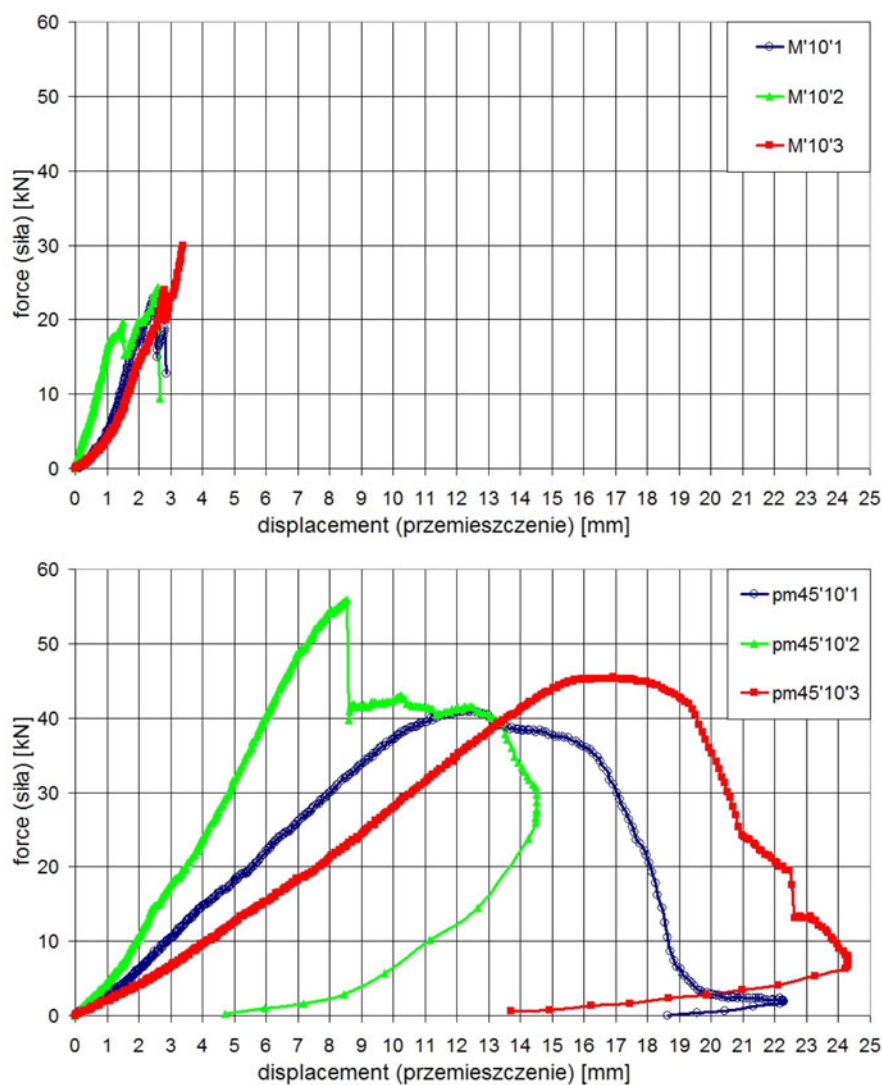
| Rozciąganie<br><i>Tension</i>                             | Cegły połączone zaprawą (M)<br><i>Mortar bonded specimen (M)</i> |        |        | Cegły połączone polimerem (pm)<br><i>Polymer bonded specimen (pm)</i> |           |           |
|---|--|--------|--------|---|-----------|-----------|
|   | M'10'1   | M'10'2 | M'10'3 | pm45'10'1   | pm45'10'2 | pm45'10'3 |
| Max. siła<br><i>Max. force</i><br>[kN]                    | 2.9  | 6.6    | 3.9    | 15.0  | 15.8      | 15.0      |
| Max. przeszycczenie<br><i>Max. displacement</i><br>[mm]   | 0.4  | 1.0    | 0.4    | 3.5   | 3.3       | 3.3       |
| Energia zniszczenia<br><i>Damage energy</i><br>[1J = 1Nm] | 0.5  | 2.8    | 0.6    | 35.6  | 33.3      | 29.1      |
| Całkowita energia<br><i>Total energy</i><br>[1J = 1Nm]    | 0.5  | 2.8    | 0.6    | 64.0  | 48.0      | 78.0      |



Rys. 7. Krzywe siła-przemieszczenie otrzymane podczas ściskania cegieł połączonych zaprawą (M) i polimerem (pm45) oraz widok testowanej próbki (postać zniszczenia)  
 Fig. 7. Force-displacement curves obtained during compression tests of bricks joined with mortar (M) and with polymer (pm45) and also view of testing specimen (form of damage)

Tab. 2. Porównanie wartości charakterystycznych krzywych siła-przemieszczenie przy ściskaniu  
 Comparison of characteristic values of the force-displacement curves obtained during compression tests

| Ściskanie<br>Compression                           | Cegły połączone zaprawą (M)<br>Mortar bonded specimen (M) |        | Cegły połączone polimerem (pm)<br>Polymer bonded specimen (pm) |           |           |
|--|---|--------|--|-----------|-----------|
|  | M'10'1  | M'10'2 | pm45'10'1  | pm45'10'2 | pm45'10'3 |
| Max. siła<br>Max. force<br>[kN]                    | 177.2   | 192.1  | 105.7  | 177.8     | 142.7     |
| Max. przemieszczenie<br>Max. displacement<br>[mm]  | 2.5   | 1.6    | 10.7   | 12.3      | 9.9       |
| Energia zniszczenia<br>Damage energy<br>[1J = 1Nm] | 251   | 139    | 425  | 862       | 644       |
| Całkowita energia<br>Total energy<br>[1J = 1Nm]    | 260   | 139    | 870  | 1555      | 1357      |



Rys. 8. Krzywe siła-przemieszczenie otrzymane podczas ścinania cegieł połączonych zaprawą (M) i polimerem (pm45) oraz widok testowanej próbki (postać zniszczenia)  
 Fig. 8. Force-displacement curves obtained during shear tests of bricks joined with mortar (M) and with polymer (pm45) and also view of testing specimen (form of damage)

Tab. 3. Porównanie wartości charakterystycznych krzywych siła-przemieszczenie przy ścinaniu  
 Comparison of characteristic values of the force-displacement curves obtained during shear tests

| Ścinanie<br>Shear                                  | Cegły połączone zaprawą (M)<br>Mortar bonded specimen (M) |        |        | Cegły połączone polimerem (pm)<br>Polymer bonded specimen (pm) |           |           |
|--|---|--------|--------|--|-----------|-----------|
|  | M'10'1  | M'10'2 | M'10'3 | pm45'10'1  | pm45'10'2 | pm45'10'3 |
| Max. siła<br>Max. force<br>[kN]                    | 22.9  | 24.4   | 29.9   | 41.0   | 55.9      | 45.3      |
| Max. przemieszczenie<br>Max. displacement<br>[mm]  | 2.5   | 2.6    | 3.4    | 12.5   | 8.5       | 17.2      |
| Energia zniszczenia<br>Damage energy<br>[1J = 1Nm] | 22.1  | 37.6   | 38.9   | 282  | 233       | 412       |
| Całkowita energia<br>Total energy<br>[1J = 1Nm]    | 29.0  | 38.6   | 38.9   | 490  | 472       | 612       |



czy przy rozciąganiu jest podobna, co świadczy o kompatybilności mechanicznej porównywanych materiałów. Testy rozciągania potwierdzają, że polimerowe złącze naprawcze jest zdolne do polepszenia w sposób znaczący nośności pękniętej konstrukcji murowej.

Porównanie wyników ściskania (rys. 7) pokazuje, że użyty polimer prezentuje znacząco większe wartości średnie charakterystyk niż zaprawa (tab. 2), z wyjątkiem maksymalnej siły, przy której wartość dla polimeru stanowi 1/3 wartości dla zaprawy. W pozostałych przypadkach charakterystyki polimeru są większe ponad 5 razy w przypadku maksymalnego przemieszczenia, ponad 3 razy w przypadku energii zniszczenia i ponad 3 razy w przypadku energii całkowitej. Test ściskania cegieł połączonych zaprawą pokazał całkowity rozpad próbki po przekroczeniu wytrzymałości granicznej. Z drugiej strony, cegły pozostały razem mocno połączone polimerem pm45 nawet po przekroczeniu wytrzymałości granicznej (fig. 7). Ponadto, sztywność złącza polimerowego przy ściskaniu jest znacząco mniejsza niż zaprawy, co zapewnia redukcję koncentracji naprężeń w konstrukcji murowej i właściwą współpracę.

Porównanie wyników ścinania (rys. 8) wskazuje, że użyty polimer prezentuje znacząco większe wartości średnie charakterystyk niż zaprawa (tab. 3). Są one większe prawie 2 razy w przypadku maksymalnej siły, ponad 4 razy w przypadku maksymalnego przemieszczenia, ponad 9 razy w przypadku energii zniszczenia i ponad 14 razy w przypadku energii całkowitej. Ponadto, sztywność obu złączy przy ścinaniu jest około 2 razy mniejsza niż zaprawy, co zapewnia redukcję koncentracji naprężeń w konstrukcji murowej i właściwą współpracę. Testy ścinania potwierdzają, że złącze polimerowe jest zdolne do polepszenia w sposób znaczący odkształcalności i nośności pękniętej konstrukcji murowej (rys. 8).

#### 4. Podsumowanie

Po wielu dyskusjach prowadzonych na świecie pomiędzy inżynierami reprezentującymi zagadnienia bezpieczeństwa oraz użyteczności i konserwatorami chroniącymi ikoniczną, historyczną oraz materiałową integralność zabytków, zaczyna być przyjmowany consensus. Uważa się, że w niektórych przypadkach naprawa obiektu zabytkowego przy użyciu wyłącznie materiałów oryginalnych prowadzi do destrukcji. W takich przypadkach zabezpieczenie zabytków dla przyszłych pokoleń wymaga zastosowania niewielkich ilości nieoryginalnych i innowacyjnych materiałów, kompatybilnych i niewidocznych (ukrytych).

and over 16 times higher in the case of total energy. Additionally, tensile stiffness of both joints is similar that is evidence of mechanical compatibility of these materials. Tension tests confirm that repair polymer joint is able to improve significantly bearing capacity of cracked masonry.

Comparison of compression test results (fig. 7) shows that the used polymer presents higher mean values of compared characteristics than mortar (tab. 2), except the case of the maximum force, where the value of polymer is about 1/3 of the value of mortar. In the rest cases polymer characteristics are over 5 times higher in the case of the maximum displacement, over 3 times higher in the case of damage energy and over 3 times higher in the case of total energy. Compression test of bricks joined with mortar showed total disintegration of specimens after achievement of ultimate strength. On the other hand, bricks remained strongly joined together with the pm45 polymer even after achievement of ultimate strength (fig. 7). Additionally, compression stiffness of polymer joint is significantly lower than mortars' one, what assure reduction of stress concentrations in masonry and proper co-operation.

Comparison of shear test results (fig. 8) indicates that the used polymer presents also significantly higher mean values of compared characteristics than mortar (tab. 3). They are almost 2 times higher in the case of the maximum carrying force, over 4 times higher in the case of the maximum displacement, over 9 times higher in the case of damage energy and over 14 times higher in the case of total energy. Additionally, shear stiffness of polymer is about 2 times lower than mortars' one that assure reduction of stress concentrations in masonry and proper co-operation. Shear tests confirm that repair polymer joint is able to improve significantly bearing capacity and deformability of cracked masonry (fig. 8).

#### 4. Conclusions

After many discussions around the world between engineers, representing safety and use requirements, and conservators protecting the iconic, historical and material integrity of the monuments, the consensus starts to be found. It is believed that in some cases repair of heritage objects with only original intervention materials can lead to destruction. In such cases, protection of historical structures for the next generations requires using of small amount of non-original and innovative intervention materials that are in compatibility with a monument and are invisible for visitors.

Naprawa pękniętych konstrukcji murowych wymaga precyzyjnego przebadania aspektów statycznej pracy konstrukcji, materiałowych właściwości i przyczyn powstania uszkodzeń. Zasada minimum interwencji w naprawie jest potrzebna zwłaszcza przy zabytkach pokrytych freskami, i tu polimerowe złącza podatne mogą być użyte. Iniekcje polimerowe sklejają rozdzielone części konstrukcji, a specjalne wykończenie powierzchni polimeru przy użyciu piasku i materiałów (technik) konserwatorskich lub innych oryginalnych materiałów jak okruszki starych cegieł lub kamieni pozwala zamaskować miejsce uszkodzenia i przywrócić pierwotny wygląd zabytkowej powierzchni.

Laboratoryjne testy rozciągania, ściskania i ścinania cegieł połączonych zaprawą i polimerem wskazują, że złącze polimerowe jest w stanie polepszyć znacząco nośność i odkształcalność konstrukcji i zapewnić redukcję koncentracji naprężeń oraz właściwą współpracę. Ponadto, powierzchnia złącza polimerowego pokryta techniką konserwatorską rozkłada równomiernie nawet znaczące deformacje, czyniąc te ruchy niewidocznymi.

Repair of cracked historical masonries require of precision investigation in aspects of static work of the structure, material properties and causes of damage appearance. Minimum intervention of repair is needed especially in the case of cracked masonries with frescos, and here polymer flexible joints can be applied. Inject applicable polymers bond disrupted parts of masonry and special finishing of polymer surface using of sand and conservation materials (techniques) or other original materials like gains of old bricks or stones allows masking the place of damage and restoring the primary view of historical surface.

Laboratory tension, compression and shear tests on specimens, made of bricks joined using of lime-cement mortar and the pm45 polymer, indicate that repair polymer joint is able to improve significantly bearing capacity and deformability of cracked masonry and assure reduction of stress concentrations in masonry and also proper co-operation with masonry materials. Although, surface of polymer joint restored with conservation techniques distributes uniformly even significant deformation, making the movements invisible.

## Literatura • References

- [1] Binda L., Cardani G., Saisi A. (2005) A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair. In: *Proc. International RILEM Workshop on Repair for Historic Masonry*, Delft, 2005: 20-34
- [2] Ciesielski R., Ciurej H., Kwiecień A. (2004) Application of CFRP laminates as strengthening of cracked brick arches. In: *Proc. 4<sup>th</sup> International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions.*, Padua, 2004: 1357-1365
- [3] Małyszko L., Orłowicz R. (2000) *Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy*. Olsztyn, WUWM
- [4] Valluzzi M. R. (2005) Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls. In: *Proc. International RILEM Workshop on Repair for Historic Masonry*, Delft, 2005
- [5] Kwiecień A. (2009) Flexible polymers using in repair of cracked masonry walls as a composite material. *Proc. Atti del 3<sup>o</sup> Convegno Nazionale MuRiCo3*, Venice, 2009: 325-332
- [6] Kwiecień A. (2009) Polymer flexible joints – an innovative repair system protecting cracked masonries against stress concentrations. In: *Proc. Protection of Historical Buildings PROHITECH 09 Mazzolani (ed)*, Taylor & Francis Group, Rome, 2009: 1033-1038
- [7] Kwiecień A., Zając B., Jankowski R. (2008) Static and dynamic properties of a flexible joint working in cracked historical masonries. In: *Proc. Structural Analysis of Historical Constructions VI*, Bath, 2008
- [8] Kwiecień A., Zając B. (2008) Praca polimerowego złącza podatnego na przykładzie polowych badań niszczących budynek. In: *Proc. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna, REW-INŻ.' 2008*, Kraków, 2008
- [9] Van Balen K., Papayianni I., Van Hees R., Binda L., Waldum A. (2005) Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Materials and Structures* 38: 781-785

---

\* Politechnika Krakowska, Kraków, Polska  
Cracow University of Technology, Cracow, Poland

## Streszczenie

W artykule została przedstawiona nowa metoda naprawy pękniętych obiektów zabytkowych o konstrukcji murowej. Metoda ta wykorzystuje polimerowe złącza podatne jako łącznik rozdzielonych elementów murowych, przywracając wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie w miejscu pęknięcia i zwiększając zdolność do pochłaniania energii deformacji. Proponowana metoda jest dedykowana do naprawy pęknięć o cyklicznie zmieniającej się szerokości, szczególnie w przypadku uszkodzonych tynków pokrytych freskami. W pracy zaprezentowane zostały wyniki badań laboratoryjnych na próbkach cegieł połączonych polimerem i zaprawą. Porównanie otrzymanych krzywych z testów rozciągania, ścinania i ściskania wskazuje, że złącza polimerowe są w stanie zwiększyć nośność i pojemność energetyczną pękniętych konstrukcji po naprawie.

## Abstract

In the paper a new repair method of cracked historical masonries is presented. The method uses polymer flexible joints as bonding of disrupted masonry elements, restoring tensile and shear strength in place of cracks and increasing deformation energy capacity. The method is proposed for application in places where cyclic fluctuations of crack width occur, especially in plasters with frescos. Experimental results of laboratory tests on brick specimens joined with polymer and mortar are presented. Comparison of curves obtained during tensile, shear and compression tests indicates that polymers joints are able to increase strength and energy capacity of cracked masonries after repair.