

ARKADIUSZ KWIECIEN<sup>\*</sup>, BOGUSŁAW ZAJĄC<sup>\*</sup>

## PRACA POLIMEROWEGO ZŁĄCZA PODATNEGO NA PRZYKŁADZIE POŁOWYCH BADAŃ NISZCZĄCYCH BUDYNEK

---

### THE WORK OF THE FLEXIBLE POLYMER JOINT ON THE BASIS OF FIELD RESEARCH CAUSING DAMAGE TO A STRUCTURE

#### Streszczenie

Zaprezentowane zostały wyniki badań statycznych i dynamicznych przeprowadzonych na niewielkim budynku ceglanym. Budynek ten został uszkodzony przy użyciu koparki, a następnie naprawiony z wykorzystaniem Metody Złączy Podatnych, bazującej na złączach polimerowych utworzonych w pęknięciach konstrukcji murowej. Naprawiony budynek został poddany badaniom statycznym i dynamicznym, prowadzącym aż do jego zniszczenia. Otrzymane wyniki wykazały efektywność złączy polimerowych, jako innowacyjnej metody naprawy pękniętych konstrukcji murowych. Przeprowadzone testy potwierdziły, że zastosowanie polimerowych złączy podatnych redukuje koncentracje naprężeń występujące w materiałach kruchych, wzmacniając tym samym uszkodzoną konstrukcję. Zjawisko to jest szczególnie istotne dla murowanych obiektów zabytkowych o słabej konstrukcji. Użycie polimerowych złączy podatnych stanowi alternatywę w odniesieniu do tradycyjnych napraw wykorzystujących sztywne zaprawy.

*Słowa kluczowe: uszkodzenia konstrukcji murowej, metoda naprawy, polimerowe złącze podatne, badania polowe*

#### Abstract

Results of static and dynamic research on a small masonry building were presented. The building was damaged using a caterpillar and next was repaired using the Flexible Joint Method (FJM) which base on polymer joints constructing in cracks of masonry. The repaired building was tested statically and dynamically up to collapse. Obtained results showed good efficiency of the polymer joint as an innovative repair method of cracked historical masonries. Tests confirmed that application of the flexible polymer joints reduces stress concentrations occurring in brittle materials, causing this way strengthening of the damaged structure. It is especially important for historical monuments constructed of poor masonry. The use of the flexible polymer joints is proposed as an alternative to classical stiff repair mortars.

*Key words: Damage of masonry structure, repair method, polymer flexible joint, testing in situ*

---

<sup>\*</sup> Dr inż. – Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

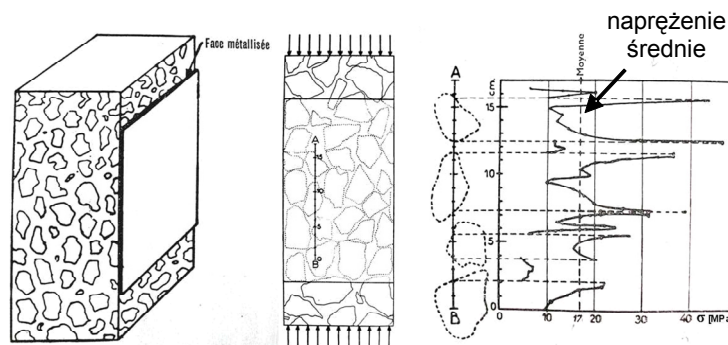
## 1. Wstęp

Rewaloryzacja obiektów zabytkowych związana jest bardzo często z interwencją konstrukcyjną w uszkodzoną substancję budowli. Taka interwencja naprawcza powinna podlegać pewnym regułom, które winny zabezpieczać „autentyczność” zabytku. Zachowanie „autentyczności” pod względem architektoniczno-konstrukcyjnym i materiałowym powinno być brane pod uwagę w możliwie maksymalnym stopniu, jednak do tej pory sposób postępowania z uszkodzonymi obiektami dziedzictwa kulturowego nie jest jednoznacznie określony. W dalszym ciągu dyskutowane są rozmaite podejścia w zastosowaniu różnorodnych metod naprawy, nawet po ustanowieniu przez ICOMOS w 1994 roku dokumentu z Nara [1], zwłaszcza w aspekcie wprowadzania nowych innowacyjnych materiałów. Rozwijane metodologie postępowania obejmują wiele zagadnień, jednak chyba najszerzej dyskutowane są zagadnienia związane z zaprawami naprawczymi, dla których wytyczne zostały zebrane i usystematyzowane w pracy [2].

Dla prawidłowej pracy uszkodzonej budowli zabytkowej istotne są wymagania funkcjonalne zapraw naprawczych. Do najważniejszych należą: zapewnienie żądanej nośności ścian oraz prawidłowego zachowania przy działaniu wpływów sejsmicznych, zabezpieczenie ściany przed penetracją przez wodę do wnętrza budynku i umożliwienie odprowadzenia pary wodnej na zewnątrz, odporność na działanie czynników środowiskowych, znajomość mechanizmów degradacji w celu uniknięcia wprowadzenia ewentualnych szkodliwych efektów, współdziałanie w zakresie zachowania estetyki fasady oraz trwałości funkcjonowania ścian [2]. Do innowacyjnych zapraw naprawczych zaliczane są masy poliuretanowe (PU), których korzystne cechy mechaniczne oraz fizykochemiczne zostały przedstawione w pracach [3,4,5]. Odpowiednio dobrane masy poliuretanowe cechują się elastycznością i odkształcalnością zapewniającą dobrą kompatybilność mechaniczną do większości materiałów murowych oraz szczelnością i trwałością. Przy użyciu odpowiednich technik konserwatorskich możliwe jest zapewnienie faktury oraz koloru wymaganego ze względu na zachowanie „autentycznego” wyglądu obiektu zabytkowego.

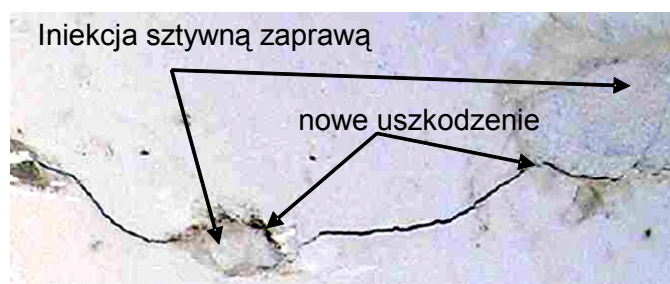
## 2. Redukcja efektu karbu przez zastosowanie podatnej warstwy adhezyjnej

W materiałach kruchych, do których należą elementy składowe murów zabytkowych, obserwuje się występowanie pików koncentracji naprężeń na powierzchni kontaktu ziaren o dużej wytrzymałości oraz w miejscach lokalizacji imperfekcji i nieciągłości materiału. Zjawisko to było obserwowane m. in. w trakcie badań elastooptycznych betonu [6] - rys. 1. Zakładany w klasycznej mechanice równomierny rozkład naprężeń w rzeczywistości nie występuje w materiałach kruchych. Wytrzymałość materiału kruchego utożsamiana jest z graniczną wielkością naprężenia w momencie zniszczenia, stanowiącą uśrednienie występujących pików koncentracji naprężenia. Piki te znacznie wcześniej osiągają lokalnie granicę wytrzymałości materiału na rozciąganie, wywołując powstawanie mikropęknięć i tym samym osłabiając materiał, co objawia się redukcją wielkości modułu sprężystości i nieliniową charakterystyką. Zniszczenie inicjowane jest w momencie gwałtownie postępującego procesu lawinowego łączenia się mikropęknięć w pęknięcie właściwe. Należy zadawać sobie sprawę, że pęknięcie otoczone jest pewną strefą osłabionego mikropęknięciami materiału. Sklejenie takiego pęknięcia materiałem sztywnym o dużej wytrzymałości doprowadzi do ponownej aktywacji efektu karbu i do powstania nowego uszkodzenia tuż obok skleiny (rys. 2) przy mniejszej wartości naprężenia granicznego. Zjawisko to jest związane z degradacją sztywności i wytrzymałości materiału kruchego, która opisywana jest miarą degradacji sztywności w modelu sprężystym z pękaniem [7]. Degradacja sztywności i wytrzymałości materiału obserwowana jest także w połączeniach klejonych przy użyciu sztywnej warstwy adhezyjnej [8].



Rys. 1. Piki koncentracji naprężeń widoczne w badaniu elastooptycznym [4]

Fig. 1. Peaks of the stress concentration visible in the photo-elastic research



Rys. 2. Ponowne uszkodzenie sklepienia ceglanego obok zastosowanej wcześniej iniekcji sztywną zaprawą

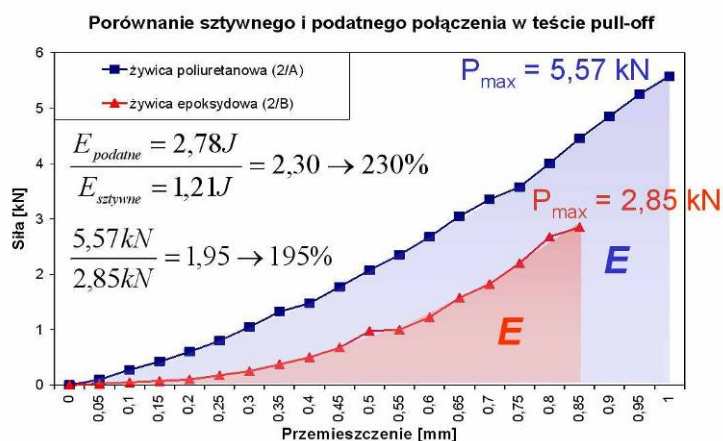
Fig. 2. The repeated crack of the masonry vault, passed right next to earlier repair using of stiff mortar injection

Redukcja pików koncentracji naprężenia w materiale kruchym prowadzi do zwiększenia wytrzymałości materiału kruchego i zachowania jego większej sztywności. Pokazały to badania przeprowadzone na elementach betonowych [9] oraz badania wykonane przy użyciu testu pull-off [8] na elementach ceglanych pobranych ze środka ściany uszkodzonego budynku (brak wpływów środowiskowych na badane próbki). W trakcie badań krążek aluminiowy łączono z ceglami przy użyciu dwóch rodzajów warstwy adhezyjnej. Pierwsza warstwa podatna wykonana była z żywicy poliuretanowej o module Young'a rzędu 0,6 GPa i oznaczona jako A. Druga warstwa sztywna wykonana była z żywicy epoksydowej o module Younga rzędu 3 GPa i oznaczona jako B. Przebadano cztery komplety próbek (cegła-1, cegła-2, cegła-3, cegła-4), gdzie każdy komplet składał się z dwóch prób pull-off wykonanych na tym samym kawałku cegły, ale na obu przeciwległych powierzchniach. Po jednej stronie użyto podatnej warstwy adhezyjnej A, natomiast po drugiej warstwy adhezyjnej B. W badanych próbkach zniszczenie przebiegało zawsze w strukturze cegły i miało kształt czaszy (rys. 3). W każdej badanej parze uzyskano większe naprężenia niszczące oraz większe przemieszczenia dla próbek z podatną warstwą adhezyjną (A). Przykładowe porównanie uzyskanych wyników (dla cegły-2) pokazano na rys. 4.

Rezultaty badania przedstawione na rys. 4 pokazują, że podatna warstwa adhezyjna (2/A) niweluje koncentracje naprężeń i zabezpiecza strefę zniszczenia przed postępującą degradacją, co objawia się większą sztywnością materiału pracującego pod obciążeniem. Z kolei sztywna warstwa adhezyjna (2/B) wprowadza piki naprężenia, które miejscowo degradują strukturę materiału zmniejszając jego sztywność pod obciążeniem. W efekcie końcowym zastosowanie warstwy podatnej prowadzi do uzyskania wyższej wytrzymałości próbki na zerwanie oraz większej ciągliwości niż ma to miejsce przy użyciu warstwy sztywnej. Przedstawione porównanie wskazuje, że materiał kruchy jest w stanie przenieść większe obciążenia rozciągające (odrywające), gdy zostanie zastosowane połączenie podatne. Niweluje ono koncentracje naprężeń i zapobiega (opóźnia) powstawaniu mikropęknięć w strukturze materiału kruchego pod wpływem występujących pików koncentracji naprężenia.



Rys. 3. Próbkę 2/A z podatną i 2/B ze sztywną warstwą adhezyjną przed i po zerwaniu [8]  
 Fig. 3. Specimens 2/A with flexible and 2/B with stiff adhesive layer, before and after damage [8]



Rys. 4. Wynik badania pull-off dla próbki z podatną (2/A) i sztywną (2/B) warstwą adhezyjną [8]  
 Fig. 4. Results of the pull-off test for the flexible (2A) and the stiff (2B) adhesive bond [8]

### 3. Naprawa uszkodzonego budynku ceglanego przy użyciu polimerowego złącza podatnego

Przedmiotem badań niszczących statycznych i dynamicznych był przeznaczony do rozbiórki ceglany budynek stacji trafo (rys. 5), zlokalizowany na terenie bazy wojskowej lotniska w Balicach/k Krakowa. Budynek zbudowany był na planie prostokąta o wymiarach zewnętrznych ścian 4,42×3,07 m i wysokości 2,90 m u podstawy dachu i 3,44 m w kalenicy. Ściany budynku były wykonane z muru ceglanego na zaprawie cementowo-wapiennej o grubości 25 cm i pokryte cienką warstwą tynku. Ściany oparte były na żelbetowej płycie podłogi o grubości 30 cm, którą wykonano na ławach ceglanych zagłębionych w gruncie na 1,6 m. Budynek przekryty był dwuspadowym płytowym stropem żelbetowym.



Rys. 5. Widok badanego budynku stacji trafo w stanie nieuszkodzonym  
 Fig. 5. View of the tested masonry building in undamaged condition



Rys. 6. Widok budynku po pierwotnym uszkodzeniu koparką  
 Fig. 6. View of the tested masonry building after primary damage caused by the caterpillar hit



Rys. 7. Widok uszkodzeń wtórnych powstałych po prostowaniu konstrukcji  
 Fig. 7. Damages of the building after rectification

Na badanym budynku wygenerowano uszkodzenia przy użyciu ciężkiej koparki (ładowarki) przez uderzenie łyżką koparki w tylne górne naroże w poziomie stropu. Ten rodzaj wymuszenia generował skrętną postać drgań (wymagającą najmniejszej energii), powodując powstanie pęknięć w płaszczyźnie ścian. Powstałe uszkodzenia były zbyt duże, aby budynek mógł być poddany badaniom (rys. 6), dlatego zrealizowano nasuwanie odseparowanych części budynku doprowadzając do częściowego zamknięcia powstałych otworów i jednocześnie utworzenia wtórnych pęknięć i rys na konstrukcji (rys. 7). Nowy stan popękanej konstrukcji był na tyle stabilny i bezpieczny, że nadawał się do prowadzenia prac naprawczych. Mapa uszkodzeń powstałych po prostowaniu konstrukcji tworzy obraz, jaki można obserwować na budynkach murowanych po trzęsieniu ziemi. Jednocześnie budynek był na tyle osłabiony, że nawet niewielkie działanie dynamiczne mogło doprowadzić do jego zawalenia. Z punktu widzenia badawczego był to czynnik korzystny.

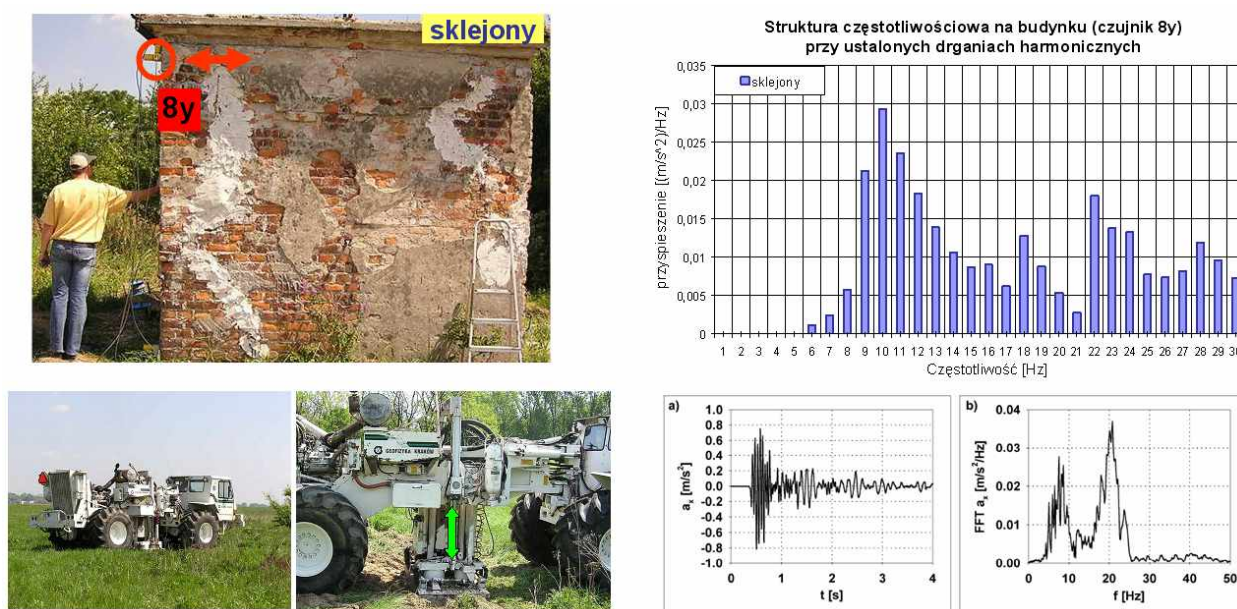
Naprawę budynku wykonano przy użyciu Metody Złączy Podatnych, opisanej w [5]. Czynności naprawcze rozpoczęto od oczyszczenia i zagruntowania pęknięć oraz osadzenia pakerów, a następnie szczeliny zamknięto powierzchniowo warstwą gipsu. Pęknięcia wypełniono masą poliuretanową aplikowaną iniekcją niskociśnieniową. Odkrytki wykonane na sklejonych pęknięciach pokazały, że polimer dobrze wypełnił puste przestrzenie w murze (rys. 8).



Rys. 8. Kolejne etapy naprawy pęknięcia  
 Fig. 8. The sequence of cracks repair

#### 4. Badanie dynamiczne sklejonego polimerem budynku

Sklejony budynek został poddany ustalonym drganiom harmonicznym z zadanymi pojedynczymi częstotliwościami generowanymi w czasie 30 sek. w paśmie 6÷30 Hz. Drgania były wzbudzane na powierzchni terenu w odl. 15 m od budynku przy użyciu Wibrosejsu o masie 20 T (rys. 9). Dla zarejestrowanych na budynku przyspieszeń drgań poziomych (czujnik 8y) wyznaczono strukturę częstotliwościową odpowiedzi dynamicznej i porównano ją ze strukturą częstotliwościową akcelerogramu drgań poziomych zarejestrowanych na powierzchni gruntu na terenie LGOM podczas jednego z najintensywniejszych wstrząsów górniczych o energii wstrząsu  $E = 5 \cdot 10^7$  [J] (rys. 9). Porównanie zamieszczonych charakterystyk dynamicznych pokazuje, że poziom drgań zarejestrowany na testowanym dynamicznie budynku osiągnął wielkość drgań, które doprowadzały do uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynków poddanych wstrząsom na terenie LGOM. Wpływy dynamiczne działające na testowany budynek były bardziej szkodliwe niż te uzyskane z prezentowanego wstrząsu górniczego, gdyż były stacjonarnymi drganiami harmonicznymi, powodującymi większy stopień destrukcji niż niestacjonarne drgania pochodzące od wstrząsu (nieuwzględniające dodatkowo przy pomiarze zjawiska interakcji podłoże-budynek). Szerszy opis przeprowadzonych na budynku badań dynamicznych wraz z porównaniem poziomu odpowiedzi dynamicznej w ujęciu normowym można znaleźć w pracy [10].



Rys. 9. Badanie dynamiczne sklejonego polimerem budynku oraz porównanie struktur częstotliwościowych odpowiedzi dynamicznej budynku przy wymuszeniu harmonicznym i silnego wstrząsu górniczego zarejestrowanego na terenie LGOM

Fig. 9. Dynamic test of polymer bonded masonry and comparison of the building dynamic response in frequency domain caused by harmonic excitation with the frequency spectrum of huge mining shock in LGOM

#### 5. Badanie statyczne sklejonego polimerem budynku

Po zakończeniu badań dynamicznych przeprowadzono roczne obserwacje pracy budynku w różnych warunkach termicznych związanych z sezonową zmianą temperatur. Pomiary przeprowadzono w zakresie temp. powietrza od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+26^{\circ}\text{C}$ . Na budynku zainstalowano (na pęknięciach sklejonym polimerem oraz na zarysowaniach pozostawionych bez naprawy) układ 29 baz pomiarowych tensometrii mechanicznej na kierunkach pionowych i poziomych (o bazie 4 cali i dokładności pomiaru 0,01 mm) - rys. 10. W trakcie badań rejestrowano także temperaturę powietrza w chwili pomiaru i w noc poprzedzającą pomiar.

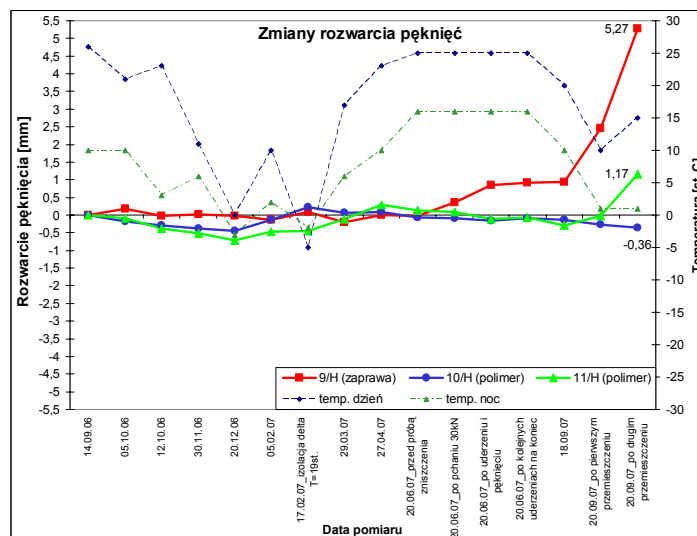


Rys. 10. Bazy tensometrii mechanicznej rozmieszczone na uszkodzeniach budynku

Fig. 10. Distribution of strain gauges on damages of the building

Przy najniższej temperaturze otoczenia wykonano badanie nierównomiernego ogrzewania ścian budynku symulując sytuację, w której budynek jest ogrzewany wewnątrz podczas niskich temperatur otoczenia. W tym celu zaizolowano termicznie i uszczelniono wszystkie otwory na okres zimowy i stale przez tydzień czasu ogrzewano budynek od wewnątrz przy użyciu grzejnika. Tym sposobem uzyskano w lutym 2007 roku gradient temperatury na grubości ściany wynoszący  $\Delta T=19^\circ$ , przy którym dokonano pomiaru.

Dla potrzeb analizy zmian szerokości pęknięć przy użyciu tensometrii mechanicznej wybrano fragment muru z bazami nr 9, 10 i 11, na którym występowało pęknięcie sklejęne polimerem (bazy 10 i 11), przechodzące następnie w nie sklejęne zarysowanie (baza 9) – por. rys. 10. Analiza zmian szerokości pęknięć na kierunku poziomym (H), przedstawiona na rys. 11 wraz ze zmianami temperatury otoczenia, pokazała różnicę w pracy termicznej pęknięcia sklejęnego polimerem i zarysowania. Zmiany termiczne w zakresie temperatur występujących w lecie i zimie oraz nierównomierne ogrzewanie wewnątrz i na zewnątrz budynku (pomiaru do 20.06.2007) pokazują, że złącze polimerowe pozwala na pracę termiczną sklejęnego muru w zakresie nie wpływającym negatywnie na eksploatację konstrukcji. Zarysowanie, w którym występują siły tarcia (baza nr 9), odkształca się znacząco mniej niż złącze polimerowe, generując tym samym koncentracje naprężenia w miejscu pęknięcia, które mogą powodować powstawanie kolejnych uszkodzeń, zwłaszcza pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń.

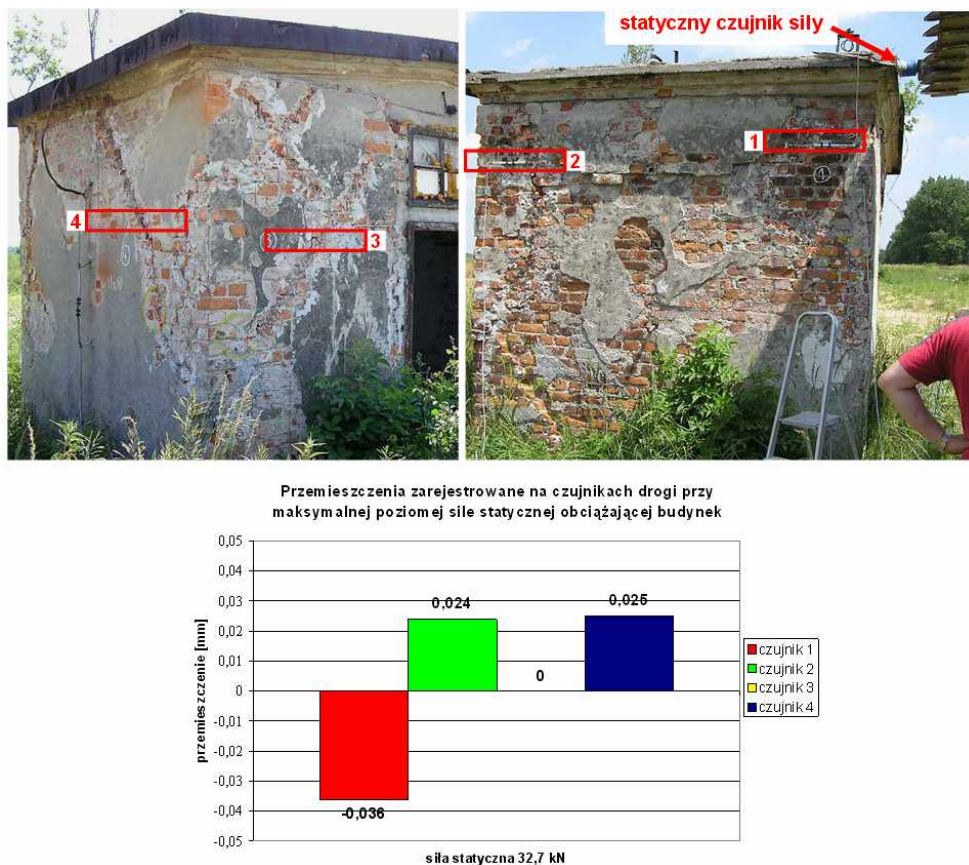


Rys. 11. Wykresy zmian rozwartości pęknięć w punktach 9, 10 i 11 na kierunku poziomym, zarejestrowane pod obciążeniem termicznym i w trakcie badań niszczących

Fig. 11. Diagrams of crack width changes obtained in horizontal direction in points 9, 10, 11, under thermal load and damage load



Przed rozpoczęciem procesu destrukcyjnego na budynku, zostało wykonane badanie obciążenia konstrukcji statyczną siłą poziomą, która przyłożona była w górnym narożu tylnej ściany budynku (w tym samym miejscu, gdzie wygenerowano siłę uszkadzającą budynek). Wymuszenie statyczne realizowane było przy użyciu koparki. W trakcie badań mierzono wielkość generowanej siły przy użyciu statycznego czujnika siły o zakresie do 400 kN oraz mierzono na kierunku poziomym zmianę rozwartości sklejonnych pęknięć w czterech punktach budynku (rys. 12), przy użyciu dynamicznych czujników drogi o bazie 250 mm.



Rys. 12. Lokalizacja na budynku punktu przyłożenia siły i punktów zamocowania czujników drogi oraz zarejestrowane wielkości przemieszczeń przy sile wymuszającej 32,7 kN

Fig. 12. Localization of force action and of LVDT sensors and also displacement values obtained with force of 32.7 kN

Zarejestrowane na czujnikach przemieszczenia były bardzo małe i niewiele przekraczały dokładność czujnika wynoszącą 0,012 mm (rys. 12). Otrzymana na czujniku 1 max. wielkość przemieszczenia odpowiada odkształceniu liniowemu złącza o wartości  $\varepsilon = 0,18\%$ . Przy dopuszczeniu w złączu podatnym odkształceń o takim poziomie (bliskim granicznego dla konstrukcji murowych) zwiększa się zdolność konstrukcji do absorbowania energii wymuszenia w postaci energii sprężystej. Występujące wielkości przemieszczenia są znikomo małe z punktu widzenia stanów granicznych użytkowania, a obliczone w złączu naprężenie (przy założeniu wielkości zidentyfikowanego statycznego modułu złącza  $E = 40 \text{ MPa}$ ) nie przekroczyło 75 kPa.

## 6. Badanie niszczące na obiekcie rzeczywistym

Wyraźne zmiany w szerokości rozwarcia baz pomiarowych widoczne są dopiero przy działaniu obciążeń zewnętrznych (pomiarzy w okresie od 20.06. do 20.09.2007) - rys. 11. Obciążenie siłą statyczną o wartości 32.7 kN spowodowało rozwarcie zarysowania w poziomie (9/H) o 0,37 mm, natomiast w skleinie polimerowej (10/H, 11/H) trwałe zmiany nie wystąpiły.

Stopniowe uszkodzenie sklejonego polimerem budynku generowane było uderzeniami łyżki koparki w naroże budynku jak przy wymuszeniu statycznym - przy braku możliwości pomiaru siły. Silne uderzenia w budynek doprowadziły do otwarcia niesklejonych zarysowań. Zarysowanie w poziomie (9/H) uległo powiększeniu o dalsze 0,50 mm, natomiast na złączach polimerowych (ulegających chwilowemu odkształceniu pod obciążeniem dynamicznym) nie zaobserwowano trwałych zmian.

W ostatnim etapie badań we wrześniu 2007 r. przeprowadzono badania niszczące, aż do kompletnego zawalenia budynku. Po pierwszym bardzo silnym uderzeniu łyżką koparki doszło do przesunięcia stropu żelbetowego i pojawienia się nowych pęknięć na ścianach bocznych budynku (wschodniej i zachodniej). Na ścianie wschodniej, w środku pomiędzy sklejonymi uszkodzeniami, pojawiło się zupełnie nowe pęknięcie o charakterze podobnym do pierwotnego oraz nastąpiło poszerzenie dotychczasowego pęknięcia, jednak bez propagacji niszczącej dzięki zabezpieczeniu drugiego końca szczeliny przez polimer (rys. 13).



Rys. 13. Nowe pęknięcie w środku ściany wschodniej (po lewej) oraz wydłużenie się rysy poniżej bazy nr 9, zabezpieczonej na drugim końcu polimerem (po prawej)

Fig. 13. New appeared cracks in the middle of the east wall (on the left) and elongation of the crack under point no. 7, protected with polymer at the opposite end (on the right)

W obrazie pomiarowym po pierwszym przesunięciu stropu (rys. 11) doszło do powiększenia rozwarcia w poziomie (9/H) o 1,54 mm, gdy w tym samym czasie w złączu polimerowym nie zaobserwowano większych zmian. Po drugim bardzo silnym uderzeniu łyżką koparki doszło do dalszego przesunięcia stropu żelbetowego i powiększenia nowopowstałych pęknięć. Uderzenie to spowodowało powiększenie rozwarcia w poziomie (9/H) o dalsze 2,80 mm (do wielkości końcowej 5,27 mm). Tym razem wystąpiło wyraźne odkształcenie złącza podatnego w poziomie (na bazie 11/H), gdzie przemieszczenie trwałe wzrosło o 1,20 mm. Powyższe zmiany wyraźnie pokazują, że sklejenie polimerem ściany (baza 11/H) zatrzymało propagację uszkodzenia przechodzącego przez bazę 9/V i ograniczyło jego rozwarcie poniżej tej bazy, zapobiegając rozerwaniu ściany (jak miało to miejsce w części środkowej).

W procesie niszczenia na ścianie zachodniej nowe uszkodzenia pojawiły się także po pierwszym przesunięciu stropu. Ich charakter i przebieg był odmienny od pierwotnego (rys. 14). Przykładem skuteczności zastosowanego wzmocnienia może być porównanie mapy pęknięć na tej ścianie przy uszkodzeniu pierwotnym i uszkodzeniu ostatecznym (por. rys. 6 i 15) oraz powiązane polimerem fragmenty muru tuż przed zniszczeniem budynku (rys. 15). Wszystkie pęknięcia sklejonie polimerem mocno związały elementy muru. Powstały wyłącznie nowe pęknięcia o układzie podobnym do pęknięć sklejonych, ale przebiegające w murze dotychczas nieuszkodzonym w pewnej odległości od pęknięć sklejonych. Polimer oprócz wprowadzenia w miejsce pęknięcia większej wytrzymałości na rozciąganie zredukował w otoczeniu złącza podatnego koncentrację naprężeń. Nowe uszkodzenia powstały w materiale kruchym tam, gdzie zanikał wpływ redukcji pików naprężenia przez polimer i stworzyły się warunki dla propagacji uszkodzenia.



Rys. 14. Przebieg nowego pęknięcia na ścianie zachodniej przy nienaruszonej skleinie polimerowej  
 Fig. 14. Trace of the new appeared crack on the west wall with non damaged polymer bond



Rys. 15. Nowe uszkodzenia powstałe w naprawionej konstrukcji murowej, spowodowane przez siłę dynamiczną działającą w poziomie stropu oraz sklejone pęknięcia utrzymujące razem fragmenty ściany  
 Fig. 15. New damages appeared in the repaired masonry, caused by the dynamic force excited at the roof level and the polymer bonded cracks keeping fast together pieces of wall

## 7. Podsumowanie

Statyczne i dynamiczne badania nieniszczące oraz badania niszczące, przeprowadzone na rzeczywistym obiekcie murowym, wykazały skuteczność polimerowych złączy podatnych jako sposobu naprawy i wzmocnienia pękniętych konstrukcji. Polimer wprowadzony iniekcyjnie w odpowiednio przygotowane pęknięcia jest w stanie przywrócić pierwotną nośność silnie uszkodzonej konstrukcji lub nawet spowodować, że naprawiony obiekt będzie w stanie bezpiecznie przenieść większe obciążenia statyczne i dynamiczne. Występujące tu zjawisko wzmocnienia konstrukcji murowej zbudowanej z materiałów kruchych, wynika z właściwości podatnej masy polimerowej, która redukuje piki koncentracji naprężeń. Występowanie koncentracji naprężeń powoduje uszkodzenia mikrostruktury materiałów tworzących mur, co skutkuje osłabieniem nośności materiału oryginalnego. Zjawisko to szczególnie silnie wpływa na redukcję nośności uszkodzonych obiektów zabytkowych, w których do naprawy pęknięć stosowane są sztywne zaprawy iniekcyjne. Alternatywą dla sztywnych iniekcji naprawczych są podatne masy poliuretanowe, których wykorzystanie może otworzyć nowe możliwości w renowacji zabytków.

## Literatura

- [1] NARA Document on Authenticity, Nara Conference on Authenticity in Relation to the World Heritage Convention, held at Nara, Japan 1994.
- [2] Van Balen K., Papayianni I., Van Hees R., Binda L., Waldum A., *Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars*. Materials and Structures 38 (October 2005) p.781-785.
- [3] Sidra I. *New materials for conservation of stone monuments in Latvia. New materials for safeguarding cultural heritage*, ARIADNE 10 Workshop ([www.itam.cas.cz/~arcchip/ariadne\\_10.shtml](http://www.itam.cas.cz/~arcchip/ariadne_10.shtml)) 2002.
- [4] Cognard P., *Technical Characteristics and Testing Methods for Adhesives and Sealants. Adhesives and Sealants Basic Concepts and High Tech Bonding. Vol. 1*, Elsevier 2005.
- [5] Kwiecień A., Kubica J., Zając B., *Pilotażowe badania statyczne wielkogabarytowego modelu pękniętego muru ceglanego sklejonego polimerową masą trwale sprężysto-plastyczną*. VII Konferencja N-T, REW-INŻ'2006, Kraków 2006.
- [6] Dantu, P.I., *Étude des contraintes dans les milieux hétérogènes application au béton*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Publication No. 57-6. Paris 1957.
- [7] Szarliński J., Winnicki A., Podleś K., *Konstrukcje z betonu w płaskich stanach*. Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
- [8] Kwiecień A., Skłodowski M., Sielicki W.P., Zając B., *Podatność złącza jako czynnik redukujący efekt koncentracji naprężeń w połączeniach materiałów kruchych*. I Kongres Mechaniki Polskiej, W-wa 2007.
- [9] Kwiecień A., Zając B., Kuboń P., *Propozycja naprawy pęknięć w budowlach hydrotechnicznych przy użyciu polimerowych złączy podatnych*. XVIII Konf. Naukowa "Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych", Korbielów 2006.
- [10] Kwiecień A., Zając B., Stecz P., Ciurej H., Chełmecki J., *Badania dynamiczne budynku o popękanych ścianach sklejonych polimerową masą trwale sprężysto-plastyczną*. Czasopismo Techniczne z. 2-B/2007. Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków 2007.