

ARKADIUSZ KWIECIEŃ*

PRACA KOTEW STALOWYCH WKLEJONYCH
W MUR ZABYTKOWY NA SZTYWNYCH I PODATNYCH
WARSTWACH ADHEZYJNYCHWORK OF STEEL ANCHORESS FASTENED
BY STIFF AND FLEXIBLE ADHESIVES

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań in situ na kotwach stalowych różnej długości, mocowanych w murze zabytkowym przy użyciu różnych rodzajów klejów (dwóch epoksydowych i trzech z podatnych polimerów). Wyniki badań zaprezentowano w formie wykresów siła-przemieszczenie z obliczoną energią zniszczenia w każdym przypadku. Zalety i wady sztywnego i podatnego mocowania kotew poddano dyskusji. Przyczyną podjęcia niniejszych badań była awaria zakotwienia taśm CFRP mocowanego na żywicy epoksydowej w budynku zabytkowym.

Słowa kluczowe: kotwy wklejane, złącza podatne, mury zabytkowe

Abstract

There was presented in the paper results of investigation in situ on steel anchors of various lengths, fastened in historical masonry wall by 5 kinds of adhesives. Two of them were epoxy resin and three of them were flexible polymers. Research results were presented in form of force-displacement curves with calculation of damage energy of each tested case. Advantages and disadvantages of stiff and flexible adhesives were discussed. The presented case study of CFRP anchorage system fastened in masonry wall using of epoxy adhesive, examined by failure of a historical building, was the reason for the decision on testing of anchor adhesives.

Keywords: glued anchors, flexible joint, historical masonry

* Dr inż. – Politechnika Krakowska

1. Geneza podjęcia badań

1.1. Typy zakotwień

Kotwy stalowe są szeroko stosowane w budownictwie, zwłaszcza w konstrukcjach betonowych i murowych. W przypadku naprawy pęknięć w budynkach uszkodzonych, kotwy stosuje się najczęściej do zespolenia rozdzielonych pęknięciem fragmentów budynku lub zamocowania na istniejącej konstrukcji nośnej nowych elementów konstrukcyjnych oraz systemów wzmacniających. Najpopularniejsze w użyciu są kotwy mechaniczne, utwierdzone w podłożu przez siły rozporowe, przekazujące na nie siłę rozciągającą poprzez siły tarcia (zamocowanie tarciove) lub przez nacisk klinującego się elementu kotwy (zamocowanie kształtowe). Ten sposób mocowania wprowadza w podłoże wstępne naprężenia rozporowe, mogące doprowadzić do rozerwania słabej substancji murowej występującej w obiektach zabytkowych. Zagrożenie takie występuje zwłaszcza przy płytkim kotwieniu w murze, którego struktura była degradowana przez wieki przez czynniki środowiskowe.

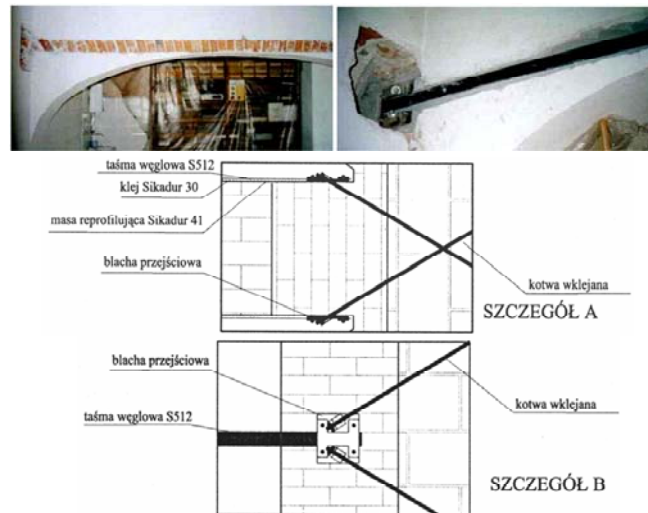
Osobną grupę stanowią kotwy wklejane, gdzie wiązanie adhezyjne powstaje pomiędzy prętem kotwy a ścianką otworu na skutek reakcji chemicznej kleju bez generowania naprężeń wstępnych. Ten sposób mocowania kotew jest dużo bezpieczniejszy dla obiektów zabytkowych. Korzyści z zastosowania kotew wklejanych wynikają także z potencjalnych możliwości sterowania parametrami mechanicznymi kotwienia, zależnymi od długości kotwy, rodzaju zastosowanego kleju i grubości warstwy adhezyjnej. Od tych parametrów zależy rozkład i wielkość naprężeń, jakie są przekazywane z kotwy na zabytkowe konstrukcje murowe. Rozkład naprężeń powinien być w miarę jednorodny, a wielkość naprężeń niższa od wytrzymałości muru. W pracy [1] wykazano, że tego rodzaju pożądane cechy uzyskiwane są przy zastosowaniu klejów o sztywności znacząco niższej (podatne połączenie) niż tradycyjnie stosowane żywice epoksydowe, których niekorzystny wpływ na obiekty zabytkowe był przedstawiany w pracach [2], [3].

1.2. Wyczerpanie nośności zakotwienia wklejanego podczas awarii budynku zabytkowego

Inspiracją do podjęcia badań nad zakotwieniami wklejanymi, instalowanymi w murowych konstrukcjach zabytkowych, było przekroczenie projektowanej nośności stalowych kotew wklejanych kotwiących taśmy CFRP w murze, które miało miejsce podczas awarii w Muzeum Archeologicznym w Krakowie w grudniu 2006 roku. Wzmocnienie to, wykonane w 2002 roku w Skrzydle Zachodnim i opisane szczegółowo w pracach [4] i [5], przenosiło siły rozporowe z łuków i zabezpieczało ściany nośne przed postępującym wcześniej procesem ich rozsuwania. Siły rozporu z taśm CFRP były przenoszone na specjalnie zaprojektowany system stalowych prętów gwintowanych o długości 130 cm, wklejanych w mur na żywicy epoksydowej HIT RE500 (rys. 1). Skuteczność i prawidłowa praca wzmocnienia, także podczas awarii, została potwierdzona pomiarami [6].

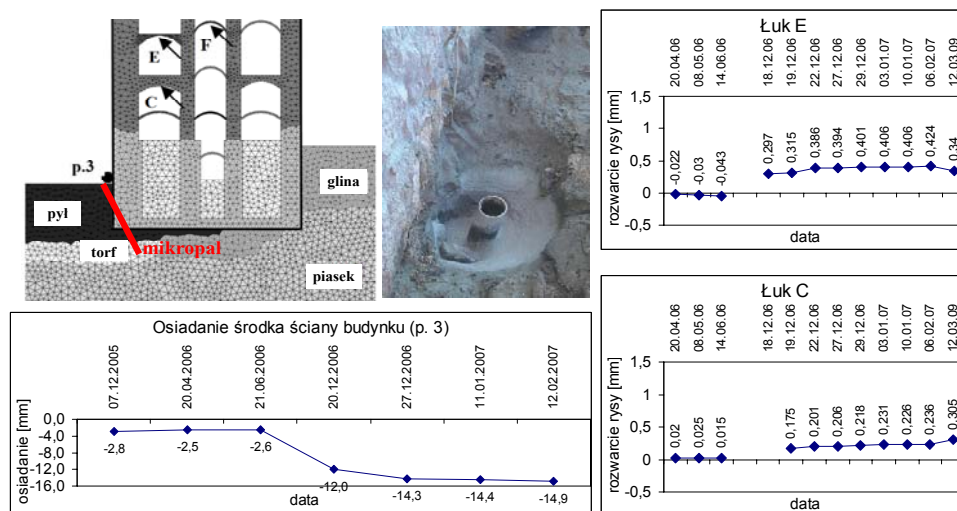
Awaria budynku Muzeum została wywołana pracami wzmacniającymi fundamenty przy użyciu mikropali, które zostały rozpoczęte przed wykonaniem zesztynienia bryły popękane układu nośnego. Prace te spowodowały gwałtowne osiadanie fragmentu budynku (kilkanaście milimetrów w ciągu kilku dni – rys. 2), stając się przyczyną

powstania nowych i znacznego rozwarcia istniejących pęknięć na ścianach i sklepieniach [6] oraz nadmiernego (w stosunku do wartości projektowanych) wyężenia systemu wzmacniającego łuki (rys. 1).



Rys. 1. Mocowanie taśm CFRP w murze przy użyciu kotew wklejanych na żywicy epoksydowej [4]

Fig. 1. Fastening of the CFRP laminates based on anchors glued on epoxy resin



Rys. 2. Wyniki pomiarów zarejestrowanych w trakcie awarii wywołanej wykonywaniem mikropali [6]

Fig. 2. Measurement results obtained during the masonry failure, caused by micropile construction

Przyrost wydłużenia taśm CFRP (rys. 2) pozwolił na obliczenie ich odkształceń i rzeczywistych sił działających na zakotwienie, według znanej z teorii sprężystości formuły (1).

$$E \cdot \varepsilon = \sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Wzmocnienia z taśm CFRP zadziałały w trakcie awarii jak ściągi, zabezpieczając ściany nośne przed katastrofalnym rozsunięciem, których konsekwencją byłoby oberwanie się łuków i podpieranych przez nie sklepień klasztornych. Najsłabszym ogniwem tego „ściągu” było zakotwienie (max siła projektowa odpowiadała 23% nośności taśm CFRP), z tego względu monitorowano wydłużenia taśm (rys. 2), aby znać poziom wyężenia kotew wklejanych, stanowiących o bezpieczeństwie konstrukcji. Zanotowany gwałtowny przyrost rozwarcia rys w miejscach pomiarowych na taśmach wzrósł od wartości praktycznie zerowej (stałej, obserwowanej od chwili wykonania wzmocnienia w 2002 r.) do wartości odpowiadającej sile przekraczającej o 7% wartość siły projektowanej dla zakotwienia (tabela. 1).

Tabela 1

Wielkości sił w zakotwieniu wyznaczone na podstawie wydłużenia taśm CFRP

	Projektowe (październik 1998)	Po awarii (06.02.2007)	Po remoncie (12.03.2009)
Siła w zakotwieniu łuku E [kN]	78 (F_{\max})	82 (107% F_{\max})	67 (86% F_{\max})
Wydłużenie taśm CFRP na łuku E [mm]	0,396 (Δl_{\max})	0,424 (107% Δl_{\max})	0,340 (86% Δl_{\max})
Wydłużenie taśm CFRP na łuku C [mm]	0,396 (Δl_{\max})	0,236 (60% Δl_{\max})	0,305 (77% Δl_{\max})

Taki stan wyężenia był groźny dla pracy zakotwienia i całego budynku, gdyż został osiągnięty graniczny poziom nośności pojedynczych kotew, wyznaczony w obciążeniach próbnych w trakcie projektowania (w 1998 roku – rys. 3) i podczas realizacji (w 2002 roku). Wartości graniczne sił uzyskane w badaniach dla pojedynczej kotwy o długości 130 cm wynosiły tylko 21 kN, stanowiąc wartości zaskakująco niewielkie w stosunku do oczekiwanych dla tak długich prętów kotwiących. Dyskusja tego zagadnienia zostanie przeprowadzona w dalszej części niniejszej pracy.

Przeprowadzone w latach 2007-08 prace remontowe zeszytniające bryłę Skrzydła Zachodniego, polegające na wykonaniu iniekcji cementowych pęknięć oraz wprowadzeniu wieńcy i ściąągów stalowych, obciążały dodatkowo nadwyrężoną już konstrukcję. Spowodowało to przekroczenie nośności granicznej zakotwień w poziomie najwyższej

kondygnacji budynku (łuk E), poślizg kotew redukujący przenoszona siłę, odprężenie taśm CFRP i redukcję ich wydłużenia (rys. 2) do poziomu 86% wartości projektowej (tab. 1).

Efektom utraty nośności zakotwień w poziomie górnej kondygnacji była redystrybucja naprężeń na zakotwienia kondygnacji niższej, zwiększając ich wyężenie z 60% do 77% wartości projektowanej (tab. 1). Dzięki istnieniu dodatkowego systemu „ściąającego” w poziomie niższej kondygnacji, umożliwiającemu redystrybucję naprężeń, konstrukcja mogła dalej bezpiecznie pracować.



Rys. 3. Montaż i obciążenie próbne kotwy wklejanej na żywicy epoksydowej HIT RE500 (1998 r.)

Fig. 3. Montage and proof load of the anchor glued on epoxy resin HIT RE500 (year 1998)

1.3. Wady sztywnych warstw adhezyjnych

Przedstawiony przypadek pokazuje, że zakotwienia wklejane na sztywnych żywicach epoksydowych w obiektach zabytkowych mogą być pozbawione marginesu bezpieczeństwa po przekroczeniu ich nośności granicznej. Zachowanie takich kotew podczas zniszczenia jest z reguły kruche, a ich odkształcalność graniczna jest niewielka (cecha korzystna, gdy potrzebne jest szybkie przejście obciążenia i włączenie się do współpracy już przy niewielkiej deformacji). Taka charakterystyka ogranicza wykorzystanie kotew wklejanych na żywicach epoksydowych w sytuacjach występowania dużych odkształceń (osiadania i wysadziny, duże deformacje pod obciążeniem termicznym) oraz obciążeń dynamicznych (potrzebne zachowanie ciągłości konstrukcji).

W przypadku murowych obiektów zabytkowych o niewielkiej wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych, należy stosować warstwy adhezyjne o parametrach kompatybilnych do konstrukcji murowej [7], zabezpieczając zabytkową substancję przed uszkodzeniem. Sztywne żywice epoksydowe wprowadzają lokalnie w murze bardzo silną koncentrację naprężeń [8], która powoduje szybko miejscową utratę nośności i lawinową (gwałtowną) propagację zniszczenia w materiale kruchym. Podobnie szybko niszczone jest przez koncentrację naprężeń przyczepność adhezyjna kleju do ścianek otworu zwłaszcza, gdy nie są one dość dobrze oczyszczone (przypuszczalna przyczyna niskiej nośności długich kotew).

Z kruchą postacią zniszczenia, towarzyszącą niewielkiej odkształcalności kleju, związany jest brak dużej energii zniszczenia, która występuje w materiałach o dużej odkształcalności (w elastomerach). To właśnie duża energia zniszczenia stanowi o bezpieczeństwie konstrukcji i dlatego rozwiązania posiadające tę cechę powinny być stosowane w naprawie [9].

2. Badanie niszczące zakotwień wykonanych w murze zabytkowym

2.1. Lokalizacja badań

Pozyskanie do badań niszczących fragmentu muru w obiekcie zabytkowym jest niezwykle trudne, gdyż niedopuszczalne jest pogarszanie stanu technicznego i wizualnego budowli historycznych. Jedyną możliwością przeprowadzenia takich badań jest wykorzystanie fragmentów konstrukcji zabytkowej, podlegających wyburzeniu podczas prowadzenia prac remontowo-modernizacyjnych. Taka okazja trafiła się podczas adaptacji podziemi w budynku Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej przy ul. Warszawskiej 24 w Krakowie, gdzie w zabytkowym murze wykonywany był otwór drzwiowy, z czym wiązało się rozebranie jego fragmentu datowanego na drugą połowę XIX w. Przeznaczony do usunięcia fragment muru został wykorzystany do badań niszczących przez autora niniejszego artykułu.

Budynek ten został wybudowany w latach 70. XIX wieku, stanowiąc pierwotnie element III zewnętrznego pierścienia fortyfikacji Twierdzy Kraków. Należał on do największego kompleksu koszarów dla pułku piechoty przy ul. Warszawskiej, nazywanych Koszarami Arcyksięcia Rudolfa (Kronprinz Rudolf Kaserne 13 p.p.). Widok budynku z tamtych czasów przedstawiono na rys. 4 (zdjęcie pochodzi z Atlasu Twierdzy Kraków nr 6 - Koszary Arcyksięcia Rudolfa).



Rys. 4. Widok budynku WIL PK przy ul. Warszawskiej 24 w Krakowie z okresu budowy w latach 70. XIX w.,

(był użytkowany pierwotnie jako Koszary Arcyksięcia Rudolfa – opis w tekście)
– czerwona strzałka przedstawia lokalizację badań w przyziemiu budynku

Fig. 4. The view of the WIL PK building in Cracow, 24 Warszawska street, made during the erection period in the 70th of the 19th century,

(primary uses as the Archduke Rudolf barracks – description in the text) – the red pointer presents the localization of the investigation place in the cellar of the building

2.2. Opis badanego muru

Przeznaczony do wyburzenia jednorodny fragment muru o grub. 0,98 m (rys. 5) wykonany był z cegieł o różnych wymiarach od 6,5×14×28 do 7×15×30 cm produkowanych w XIX w. na terenie Krakowa, których wytrzymałość na ściskanie była nie mniejsza niż 25 MPa (dane z badań cegieł z rozebranego budynku w kampusie PK przy ul. Warszawskiej, pochodzącego z tego samego okresu budowy, co budynek WIL PK). Cegły te były układane na bardzo słabej zaprawie czysto wapiennej o wytrzymałości na ściskanie poniżej 0,5 MPa. Wiązanie cegieł w murze było nieregularne, odbiegające od współczesnej sztuki murarskiej (całe cegły licowe były starannie ułożone i przewiązane, natomiast wewnątrz muru wypełniono połamanymi cegłami z dużą ilością zaprawy). Widok układu cegieł przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Fragment muru zabytkowego przeznaczony do usunięcia (wykorzystany do badań)

Fig. 5. Part of the heritage masonry destined to removing (used in research)



Rys. 6. Widok układu cegieł na licu muru i w jego przekroju po wyburzeniu

Fig. 6. The view of the brick array on the front and the cross-section of the masonry

2.3. Przygotowanie muru i kotew do badań

W badaniach przewidziano kotwy wykonane z gwintowanych prętów stalowych $\phi 10$ o różnej dł.: 20, 30, 40 50, 60 i 80 cm, które były umieszczane w otworach wierconych w murze o $\phi 16$, co dawało grubość warstwy adhezyjnej wynoszącą 2 mm. Jako warstwę adhezyjną zastosowano dwie żywice epoksydowe: HIT RE500 i Sikadur 330 oraz trzy masy poliuretanowe stosowane jako polimerowe złącza podatne [9]: PT, PST i PM. Parametry techniczne zastosowanych klejów zestawiono w tabl. 2. Dla ujednoczenia warunków badania wszystkie otwory były wiercone centralnie w główkach cegieł (wszystkie cegły w licu były ułożone główkami). Dobór średnicy kotew był podyktowany uzyskaniem zniszczenia systemu kotwiącego, uwarunkowanego posiadanym połowym testerem HAT28 do testów pull-out o maksymalnej sile wrywania wynoszącej 30 kN. Zaletą tego testera jest możliwość osiowego obciążania kotwy bez wprowadzania momentów skręcających (zaburzających pomiar poprzez ukręcanie kotew znacznie poniżej ich wytrzymałości na rozciąganie), jak to ma miejsce w przypadku innego dostępnego testera DPG100 o maksymalnej sile 100 kN (rys. 3).

Tabela 2

Wielkości sił w zakotwieniu wyznaczone na podstawie wydłużenia taśm CFRP

	HIT RE500	Sikadur 330	PT	PST	PM
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	51,5	30	21	2,5	1,4
Wytrzymałość na ścinanie [MPa]	-	-	18	1,2	0,85
Moduł sprężystości Young'a [MPa]	5700	4500	600	5	2
Odształcalność graniczna [%]	3,5	0,9	11	100	130

W aplikacji kotew wklejanych bardzo ważne jest właściwe przygotowanie podłoża oraz technologia wykonywania zakotwienia, zwłaszcza w przypadku kotew o dużych długościach. Ze względu na słabą zaprawę w badanym murze, otwory o głęb. powyżej 30 cm musiały być kilkakrotnie udrażniane (ponownie nawiercane – rys. 7) z uwagi na obsypujące się do ich środka kawałki zaprawy, zatykające otwór. Każdy otwór był czyszczony sprężonym powietrzem, które było dostarczane na dno otworu przez rurkę igielitową. Strumień powietrza aplikowany pod wysokim ciśnieniem (8 bar) oczyszczał w sposób mechaniczny ścianki otworów z pyłu i luźnych cząstek. Brak należytego przygotowania powierzchni otworów skutkuje najczęściej zniszczeniem adhezyjnym na granicy mur-klej przy siłach znacząco niższych od projektowanych. Kolejnym ważnym czynnikiem jest zapewnienie jak najlepszej przyczepności kleju do muru, stąd wszystkie otwory pod aplikację polimeru zostały zagruntowane specjalnym preparatem (żywice epoksydowe takiego środka nie potrzebowały ze względu na ich dobre parametry zwilżające powierzchnię muru).



Rys. 7. Wiercenie otworów w murze oraz ich rozmieszczenie na licu ściany

Fig. 7. The drill process and its array on the front of the masonry

Aplikacja klejów odbywała się niskociśnieniowo, zaczynając od dna otworu, a następnie w otworze była umieszczana kotwa stalowa tak, aby nadmiar kleju wypłynął na zewnątrz. Wykonując tego rodzaju aplikacje w murach zabytkowych należy liczyć się z występowaniem pustek wewnątrz muru o nieznannej objętości (często spowodowanych wykruszeniem i wydmuchaniem dużych objętości słabej zaprawy), w które ucieka klej podczas jego wtłaczania.

2.4. Badanie kotew na wrywanie (test pull-out)

Wrywanie kotew wykonano przy użyciu posiadanego atestowanego testera HAT28, który był zaopatrzony w specjalnie wykonany przegub kulowy, zapewniający osiowość przekazania siły na kotwę (rys. 8). Zmiana siły była rejestrowana przy użyciu kamery cyfrowej, nagrywającej obraz manometru wyskalowanego na siłę w kN, o dokładności odczytu 0,5 kN. W trakcie pomiaru siły mierzono także wysuw kotwy względem muru za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczenia Sylvac 0–25 mm o dokładności 0,001 mm, rejestrując odczyt zegara na kamerze cyfrowej symultanicznie z siłą. Kotwy obciążano do max siły 30 kN (zakres pomiarowy testera) lub do momentu utraty przez kotwę nośności (poniżej 30 kN). Symultaniczna rejestracja siły i przemieszczenia pozwoliła przedstawić wyniki pomiarów w formie graficznej (rys. 9, 10). Wykresy siła-przemieszczenie ograniczone są limitem siły (30 kN) lub wielkością przemieszczenia, przy którym kotwa osiągnęła największą nośność.

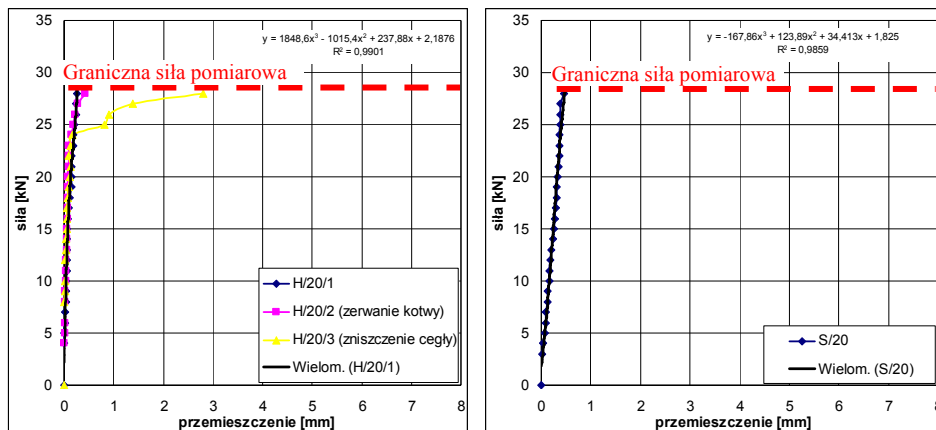
W przypadku kotew osadzonych na żywicy epoksydowej, gwałtownemu zniszczeniu ulegały pręty lub cegły już przy długości zakotwienia 20 cm (osiągając poziom siły bliski 30 kN), albo przenoszona była siła graniczna 30 kN bez zniszczenia. Kotwy osadzone na polimerze PT osiągały wartość graniczną siły bez zniszczenia, natomiast kotwy osadzone na polimerach PST i PM traciły nośność kleju przy siłach niższych od 30 kN (z wyjątkiem kotew o długościach większych od 60 cm).

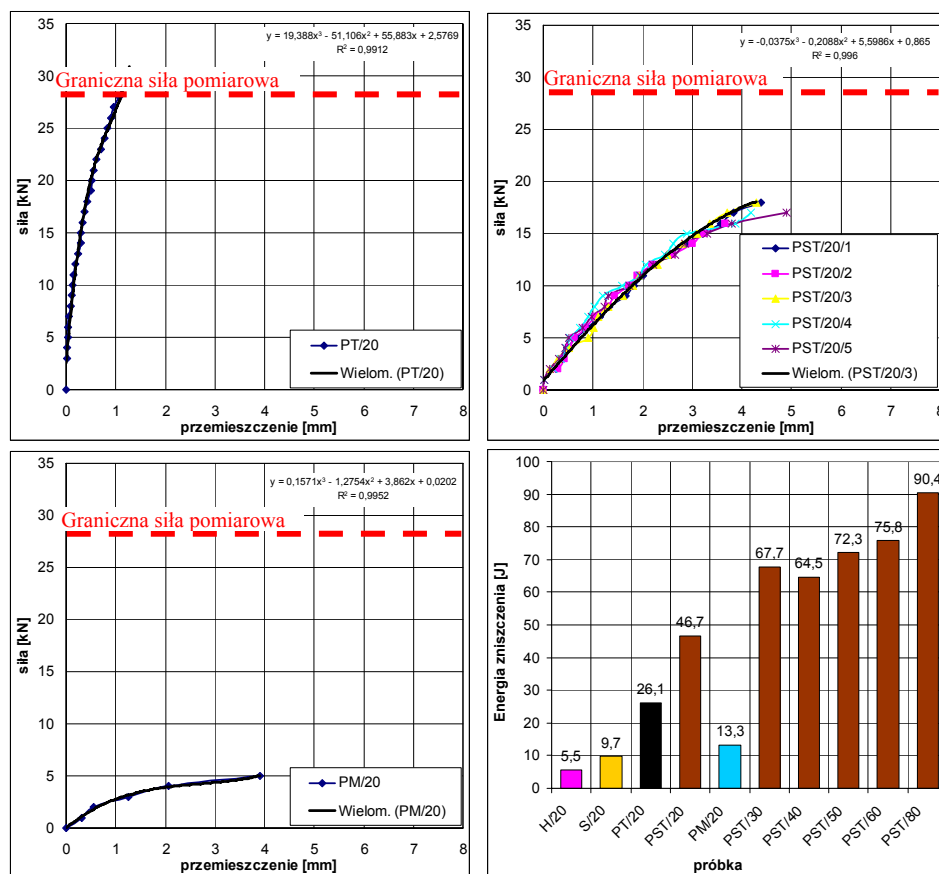


Rys. 8. Wrywanie kotwy stalowej z muru (test pull-out) przy użyciu testera HAT28
 Fig. 8. Pull-out testing of the steel anchor from the masonry using of the HAT28 tester

2.5. Analiza wyników pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach w tej samej skali, umożliwiającą łatwe porównanie. Poszczególne próbki oznaczone są na wykresach symbolami literowymi (H) – HIT RE500, (S) – Sikadur 330, (PT) – polimer PT, (PST) – polimer PST, (PM) – polimer PM oraz symbolem cyfrowym z długością zakotwienia w centymetrach. Tam, gdzie na wykresie występuje więcej krzywych zostały dołożone na końcu numery próby. Przykład oznaczenia: PST/60/5 – polimer PST, kotwa o długości 60 cm, próba nr 5.

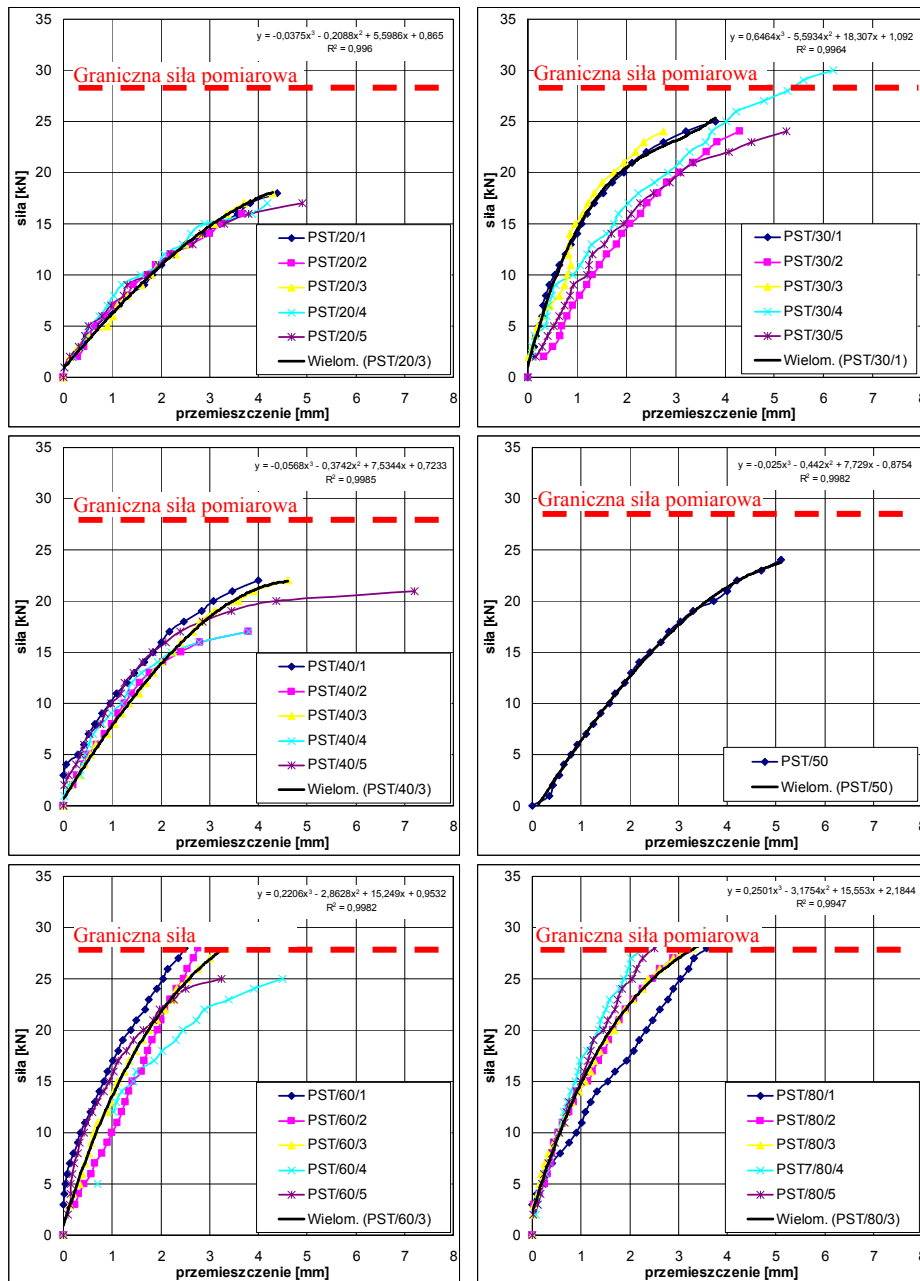




Rys. 9. Wykresy siła-przemieszczenie (z liniami trendu) dla kotew o długości 20 cm osadzonych na żywicach epoksydowych HIT RE500 i Sikadur 330 oraz na polimerach PT, PST, PM, a także diagram porównujący obliczoną energię zniszczenia kotew długości 20 cm mocowanych na różnych klejach oraz kotew różnej długości mocowanych na polimerze PST

Fig. 9. The force-displacement graph (with trend lines) of the anchors of 20 cm length, glued on epoxy resins HIT RE500, Sikadur 330 and on polymers PT, PST, PM and also the comparing diagram of damage energy calculated for anchors (20 cm) glued on various epoxy resins and for anchors of various length glued on polymer PST

Dla wybranych wykresów (reprezentatywnych) wyznaczono linie trendu opisane wielomianem trzeciego stopnia. Równania wraz z wartościami R-kwadrat pokazano na każdym wykresie. Bazując na tych równaniach, obliczono metodą trapezów całki z linii trendu (poła pod krzywymi), obrazujące wielkość energii zniszczenia kotew (liczone do momentu utraty nośności lub osiągnięcia siły granicznej 30 kN), mierzoną w Julach (1J = 1Nm = 1 kNmm).



Rys. 10. Wykresy siła-przemieszczenie (z liniami trendu) dla kotew o długościach 20, 30, 40, 50, 60 i 80 cm mocowanych na polimerze PST

Fig. 10. The force-displacement graph (with trend lines) of the anchors of 20, 30, 40, 50, 60 and 80 cm length, glued on polymer PST

Na rysunku 9 przedstawione zostały wykresy otrzymane dla wszystkich testowanych klejów, ale tylko dla kotew o długości 20 cm, gdyż dla żywic epoksydowych wyłącznie przy tej długości udało się uzyskać miarodajne wyniki (przy większych długościach zakotwienia następowało urywanie kotew lub destrukcja cegły – jak w H/20/2 i H/20/3 na rys. 9). Obliczone dla tych wykresów wielkości energii zniszczenia przedstawiono graficznie na diagramie (rys. 9), wraz z wielkościami energii zniszczenia policzonymi dla kotew o zmiennej długości i warstwie adhezyjnej wykonanej z polimeru PST.

Sztywne żywice epoksydowe nie są w stanie uzyskać wysokich energii zniszczenia (stanowiących o bezpieczeństwie naprawianej konstrukcji murewej), gdyż przy niewielkim odkształceniu generują duże naprężenia silnie skoncentrowane przy licu muru [1], [8]. Czynnikiem ten powoduje lawinowo postępujące w głąb zakotwienia niszczenie struktury muru zabytkowego o niewielkiej nośności, bez względu na długość zastosowanego zakotwienia [4]. Z drugiej strony, zastosowanie sztywnych warstw adhezyjnych umożliwia natychmiastowe włączenie zakotwienia do współpracy (już przy niewielkich odkształceniach), co jest korzystne zwłaszcza w systemach wzmacniających.

Podatne warstwy adhezyjne o większej odkształcalności są w stanie przenieść podobne obciążenia (zależnie od zastosowanego kleju), przy dyssypowaniu większej energii odkształcenia, lecz bez lokalnego generowania szybko narastających dużych naprężeń w słabej konstrukcji zabytkowej. Odpowiednio dobrana podatność zakotwienia zapewnia systemowi wzmacniającemu kompatybilność mechaniczną z konstrukcją zabytkową. Jest to przydatne zwłaszcza tam, gdzie popękana słaba struktura murewa odkształca się pod wpływem działania pól termicznych i zmiennych osiadań [9]. Lokalne przesztywnienie takiej struktury (kotwami na żywicy epoksydowej) może spowodować powstanie w niej uszkodzeń wtórnych.

Wykorzystanie zalet długich kotew wklejanych jest w pełni możliwe przy zastosowaniu podatnych warstw adhezyjnych. Obrazują to wykresy siła-przemieszczenie, pokazane na rys. 10 i diagram energii zniszczenia na rys. 9, które przedstawiono przykładowo dla kotew o różnej długości osadzonych na polimerze PST. Ze wzrostem długości zakotwienia przy podatnej warstwie adhezyjnej rośnie w sposób istotny nośność kotwy i energia zniszczenia. Obserwowane zaburzenia w przyroście nośności kotew i energii zniszczenia dla dł. 40, 50 i 60 cm wynikają ze znacząco gorszej struktury wewnętrznej badanego muru w stosunku do części licowych. W części licowej kotwy współpracują na całej długości z mocną cegłą (kotwy 20 i 30 cm), a w środku muru słaba zaprawa nie jest w stanie przenieść dużych obciążeń. Osiągnięcie cegieł przeciwległego lica muru przez kotwy o dł. 80 cm przekłada się na poprawę ich pracy, lecz ograniczenie w rejestracji siły pomiarowej do 30 kN nie pozwoliło na pełne oszacowanie ich nośności granicznej i całkowitej energii zniszczenia. Porównanie energii zniszczenia na diagramie (rys. 9) pokazuje, że podatne warstwy adhezyjne są w stanie przenieść o około rząd wielkości większą energię deformacji niż sztywne warstwy adhezyjne.

Kotwy mocowane na sztywno przenoszą w sposób natychmiastowy duże obciążenia już przy niewielkim odkształceniu, co jest korzystne zwłaszcza przy wzmacnianiu konstrukcji. Pełne wykorzystanie ich zalet jest możliwe w konstrukcjach betonowych, cechujących się dużą wytrzymałością, natomiast słabe konstrukcje zabytkowe są w stanie wykorzystać tylko niedużą część ich nośności i to w zakresie niewielkich odkształceń.

Dużym mankamentem sztywnych kotew wklejanych w konstrukcjach murewych jest brak rezerwy bezpieczeństwa, spowodowany kruchym zachowaniem.

Wydaje się, że rozwiązaniem tego problemu byłoby zastosowanie hybrydowego systemu kotwienia z polimerową warstwą adhezyjną działającą jak złącze podatne, polegającego na równoczesnym zastosowaniu kotew wklejanych na żywicy epoksydowe i polimerach podatnych. Taki system pozwoliłby przenieść duże obciążenia w sposób natychmiastowy, zabezpieczając jednocześnie konstrukcję przed gwałtowną utratą nośności poprzez włączenie do współpracy kotew podatnych, dyssypujących dużą ilość energii odkształcenia.

3. Wnioski

Kotwy wklejane są najbardziej korzystne do stosowania w murowych konstrukcjach zabytkowych, spośród różnych typów zakotwień, z uwagi na brak naprężeń wstępnych. Przeprowadzone badania wykazały, że kotwy mocowane na żywicach epoksydowych wykazują się znacząco mniejszą energią zniszczenia niż kotwy wklejane na podatnych polimerach. Podatne warstwy adhezyjne umożliwiają lepsze wykorzystanie kotew długich, a ich równoczesna aplikacja ze sztywnym mocowaniem kotew może skutkować większą efektywnością pracy i zwiększeniem bezpieczeństwa zabytkowych konstrukcji murowych.

Literatura

- [1] N e m e s O., L a c h a u d F., M o j t a b i A., *Contribution to the study of cylindrical adhesive joining*, Int. Journal of Adhesion&Adhesives, (2006), s. 474-480.
- [2] B i n d a L., C a r d a n i G., S a i s i A., *A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair*, Proc. International RILEM Workshop on Repair for Historic Masonry, Delft, 2005.
- [3] V a l l u z z i M.R., *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*, Proc. International RILEM Workshop on Repair for Historic Masonry, Delft, 2005.
- [4] C i e s i e l s k i R., K w i e c i e ń A., *Wzmocnienie uszkodzonych łuków ceglanych w zabytkowym budynku muzeum w Krakowie*, Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane'03, Politechnika Szczecińska, Szczecin-Międzyzdroje 2003.
- [5] C i e s i e l s k i R., K w i e c i e ń A., *Zastosowanie taśm z włókien węglowych w uszkodzonym budynku zabytkowym*, Materiały Budowlane 11'2003 (nr 375).
- [6] F l a g a K., K w i e c i e ń A., *Efficiency of CFRP Strengthening of Arches Tested by Failure of Historical Building after the Inappropriate Repair Intervention*, Advanced Materials Research, Vols. 133-134 (2010), Trans Tech Publications, s. 837-842.
- [7] M o d e n a C., *Design approaches of investigations for the safety and conservation of historic buildings*, Proc. 4th International Seminar SAHC'2004, Padwa 2004.
- [8] K w i e c i e ń A., *Polymer flexible joints – an innovative repair system protecting cracked masonries against stress concentrations*, PROHITECH 09, Rzym 2009.
- [9] K w i e c i e ń A., *Polymer flexible joints – innovative method of repair and conservation of heritage objects*, Wiadomości Konserwatorskie 26/2009.

Podziękowanie

Składam podziękowanie firmom HILTI Poland i SIKA Poland za nieodpłatne przekazanie materiałów do badań oraz dr inż. Bogusławowi Zajęcowi za pomoc w zrealizowaniu badań.