

Zygmunt Matkowski, Jerzy Jasieńko, Łukasz Bednarz

# Stalowe ściągi wklejane – technologia przydatna w usztywnianiu murów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych z bogato dekorowanymi fasadami

Stalowe stężenie ściąagowe jest najczęściej spotykanym i stosowanym od dawna sposobem usztywniania murów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych.

Poprawne działanie stężenia stalowego w konstrukcjach zabytkowych uzależnione jest od wprowadzenia i utrzymania odpowiedniej siły w ściągu. Stabilizacja i wzmocnienie konstrukcji wymaga wstępnego naprężenia ściągów. Napięcie prętów stalowych możliwe jest do siły odpowiadającej możliwościom wytrzymałościowym muru na ściskanie oraz uzależniona jest od przyjętego przekroju ściągu. Wprowadzenie odpowiedniej siły naprężającej powinno wywołać w murze taki stan naprężeń wewnętrznych, który skutecznie przeciwstawi się wpływowi działania sił zewnętrznych i zwiększy ogólną sztywność konstrukcji [2]. Niewłaściwe przekazanie siły ze ściągu na mur może powodować powstawanie nowych rys. Wpływ na prawidłową pracę stalowych ściągów mają: sposób zakotwienia, odkształcenia termiczne ściągu i muru oraz pełzanie muru i relaksacja stali [1].

Przed przystąpieniem do wzmacniania zakrzywionych konstrukcji murowych metodami wykorzystującymi ściągi stalowe należy wykonać szereg stosownych badań i obliczeń, których celem jest wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk wzmacnianej konstrukcji murowej. Należy określić:

- wytrzymałość muru na ściskanie,
- strukturę muru i stopień jego niejednorodności,
- moduł sprężystości,
- oszacować zjawiska opóźnione.

Analizując obliczeniowo wzmocnienie konstrukcji murowej ściągami należy rozwiązać następujące zagadnienia:

- oszacowanie parametrów mechanicznych muru,
- przyjęcie określonego rodzaju stali oraz technologii kotwienia i wstępnego sprężania,
- określenie wielkości siły sprężającej z uwzględnieniem strat doraźnych i reologicznych,
- zapewnienie właściwego przeniesienia sił od naprężenia ściągu na mur poprzez odpowiednio ukształtowane i powiązane z konstrukcją murową elementy.

Bezpieczne przenoszenie siły ze ściągu na konstrukcję murową związane jest przede wszystkim z prawidłowym rozmieszczeniem ściągów i odpowiednim przygotowaniem fragmentu muru. Zasadą przy stężeniu istniejących konstrukcji murowych jest przekazanie sił od ściągu na możliwie dużą powierzchnię muru. Związane jest to z niską punktową wytrzymałością muru ceglanego na ściskanie. Istotne jest to zwłaszcza w obiektach zabytkowych, w których mury charakteryzują się często niewielką wytrzymałością i znaczną niejednorodnością.

Klasycznym sposobem zamocowania ściągu stalowego jest zakotwienie go poprzez element dociskowy w murze. Ostatnie lata przyniosły również inne rozwiązanie, kotwienie stalowych ściągów poprzez ich wklejanie. Jest to sposób o tyle interesujący, że pozwala ominąć ograniczenia związane z ingerencją w bogato dekorowaną fasadę obiektu zabytkowego, umożliwia swobodny dostęp do róż-

*Praca dopuszczona do druku po recenzjach*

nych miejsc obiektu od jego wnętrza oraz skrócenie czasu montażu i obniżenie kosztów całego przedsięwzięcia [3].

## Badania doświadczalne

Na podstawie badań przeprowadzonych w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej oraz prób wdrożeniowych na wybranych obiektach zabytkowych (klasztór Cystersów w Lubiążu) można stwierdzić, że wklejane ściągi stalowe są przydatne do wzmacniania i usztywniania murów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych z bogato dekorowanymi fasadami.

W pracy [5] przedstawiono badania doświadczalne połączenia klejowego „mur ceglany – pręt stalowy”, badania uzupełniające kompozycji klejowych oraz porównanie wyników badań doświadczalnych połączeń klejowych „pręt stalowy – mur ceglany” z wybranymi teoriami pracy tych połączeń.

Celem badań było określenie możliwości przenoszenia sił przez pręty stalowe wklejone w mur ceglany oraz rozpoznanie pracy połączenia klejowego tego typu. Starano się ustalić wpływ rodzaju kompozycji klejowej na nośność połączenia.

Użyte kompozycje klejowe:

- kompozycja epoksydowa Epidian 5 – kompozycja E – skład: żywica epoksydowa Epidian 5, utwardzacz Z-1, cement portlandzki 350.

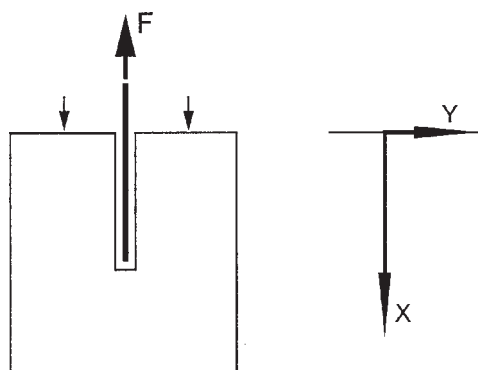
- Ombran EH 20 – kompozycja O

- HIT C50 – kompozycja H

- Cerinol-VM 1 – kompozycja D

Aby zrealizować zaproponowane badania, stworzono stanowisko pomiarowe do wrywania prętów stalowych z muru. Do uzyskania wymaganego poziomu siły wrywającej użyto siłownika hydraulicznego. Kontrolę wielkości siły wyciągającej dokonywano za pomocą siłomierza elektronicznego. Proces obciążenia oraz odczyt wyników kierowany był bezpośrednio przez komputerowy wielopunktowy system pomiarowy sprzężony z siłomierzami, tensometrami elektrooporowymi oraz czujnikami przemieszczeń. Wydłużenie pręta rejestrowane było przez tensometry, naklejone na jego długości, odkształcenie połączenia mur – klej – pręt stalowy oraz siłę wyciągającą mierzyły czujniki indukcyjne. Szczegółowo analizowano odkształcenia w połączeniu, a na ich podstawie obliczono naprężenia normalne w pręcie stalowym oraz naprężenia styczne w spoinie klejowej. Na modelach realizowano próbę rozciągania, różnicując długość zakotwienia (wklejenia)  $l_z$  w celu uzyskania różnych obrazów zniszczenia połączeń.

Wykresy z otrzymanych wyników (rys. 2-10) można podzielić na trzy grupy: wykresy odkształ-



Rys. 1. Schemat badania. Oś „x” pokrywa się z osią kotwionego pręta

cenia pręta stalowego na długości (długość wklejenia tensometrów), naprężeń normalnych w stali i naprężeń stycznych w połączeniu.

Otrzymane wyniki wskazują na dwa różne modele zniszczenia układów pręt stalowy – klej – mur. Pierwszy to pęknięcie stali w miejscu wejścia w mur, a drugi to wyrwanie pręta stalowego z muru.

## Model analityczny

Po analizie wyników badań doświadczalnych i uwzględnieniu warunków brzegowych zaproponowano następujące zależności określające rozkład naprężeń ścinających  $\tau_k(x)$  w spoinie klejowej oraz naprężeń normalnych  $\sigma_s(x)$  w pręcie stalowym:

$$\tau_k(x) = x \frac{d_p^2 E_s R_t \pi}{l_z E_m A_m} \cdot e^{-2^2 \frac{d_p E_s A_s R_t \pi}{l_z E_m A_m F}}$$

$$\sigma_s(x) = \frac{F}{A_s} \cdot e^{-2^2 \frac{d_p E_s A_s R_t \pi}{l_z E_m A_m F}}$$

gdzie:

$A_m$  – współpracująca powierzchnia przekroju,

$A_s$  – powierzchnia przekroju pręta,

$E_m$  – moduł Younga dla muru,

$E_s$  – moduł Younga dla stali,

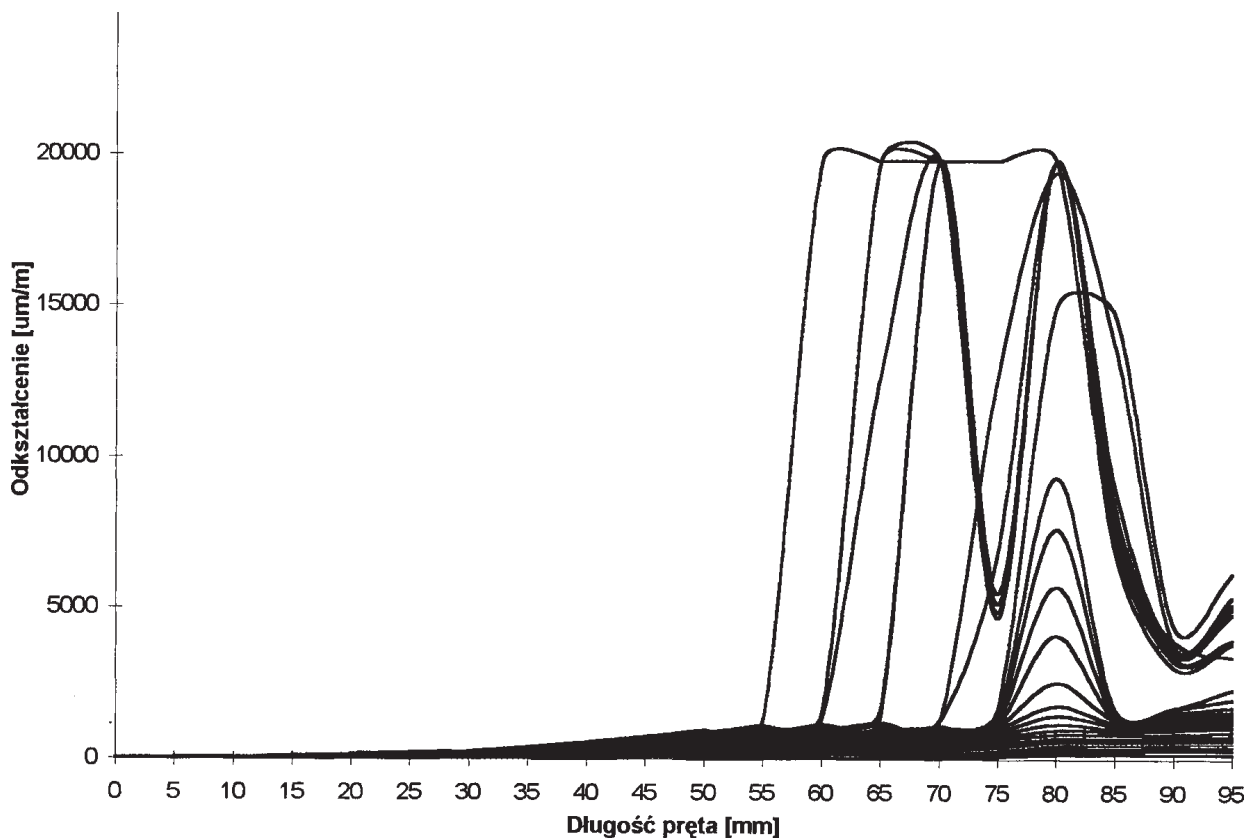
$F$  – siła wrywająca pręt,

$R_t$  – średnia wytrzymałość na ścinanie najsłabszego ogniwa połączenia,

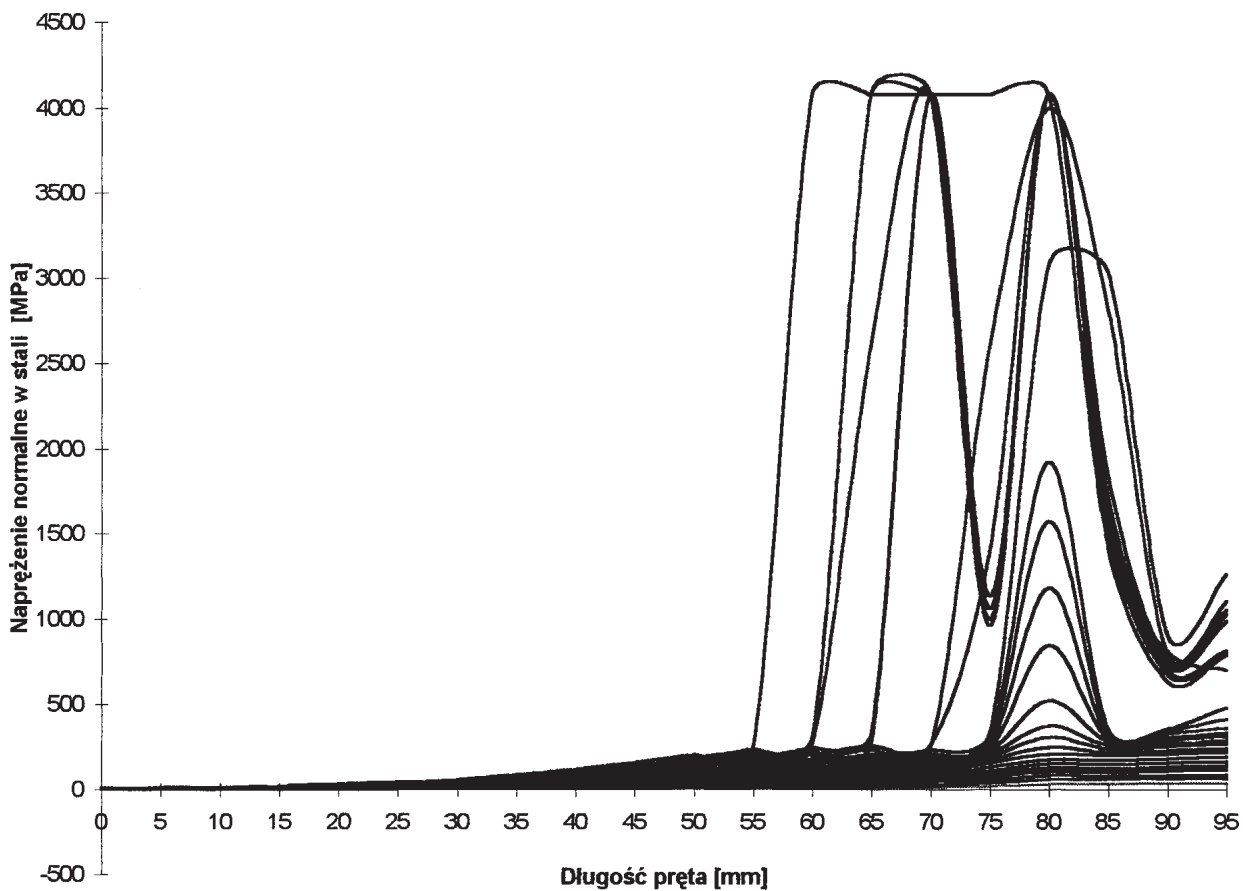
$d_p$  – średnica pręta,

$l_z$  – długość zakotwienia pręta w murze.

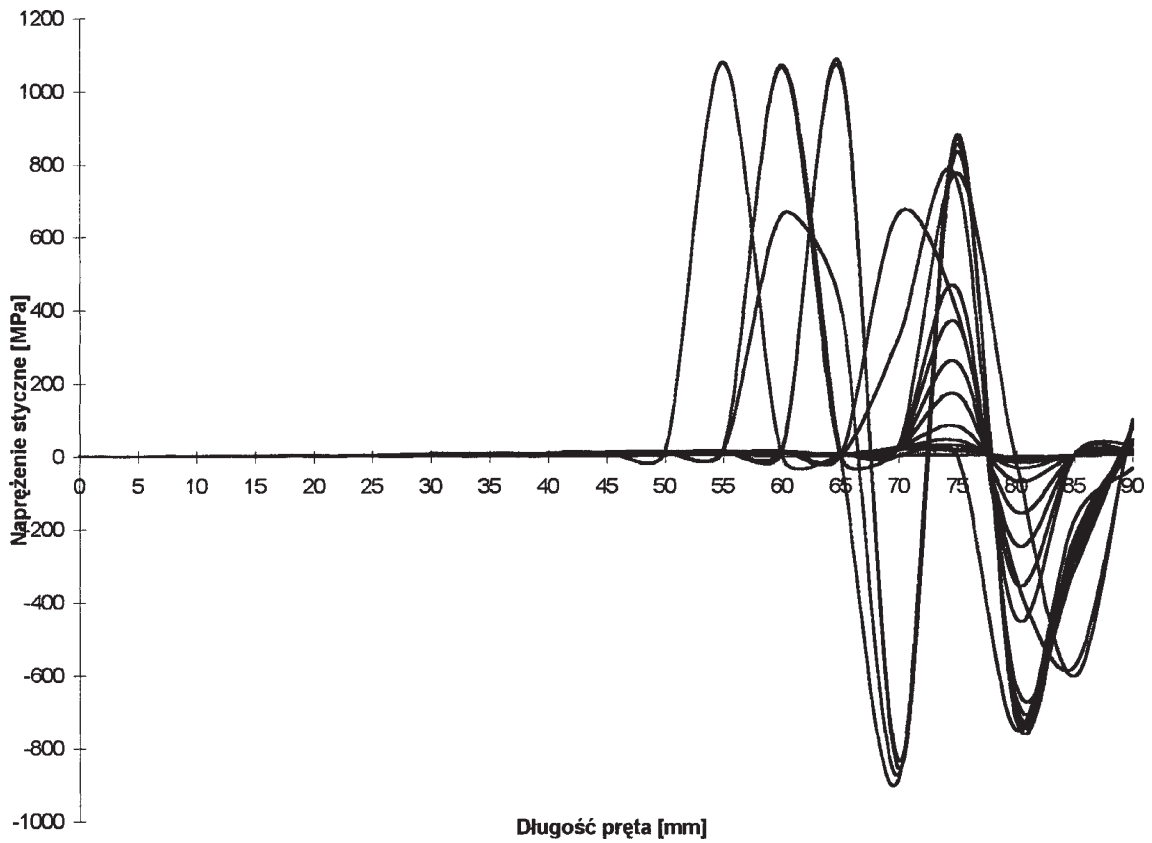
Powyższe wzory na rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_s$  w pręcie stalowym oraz naprężeń ścinających  $\tau_k$  w spoinie potwierdzają przyjęty podział na dwa modele zniszczenia. Pozwalają też na szacunkowe określenie dwóch modeli zniszczenia prób-



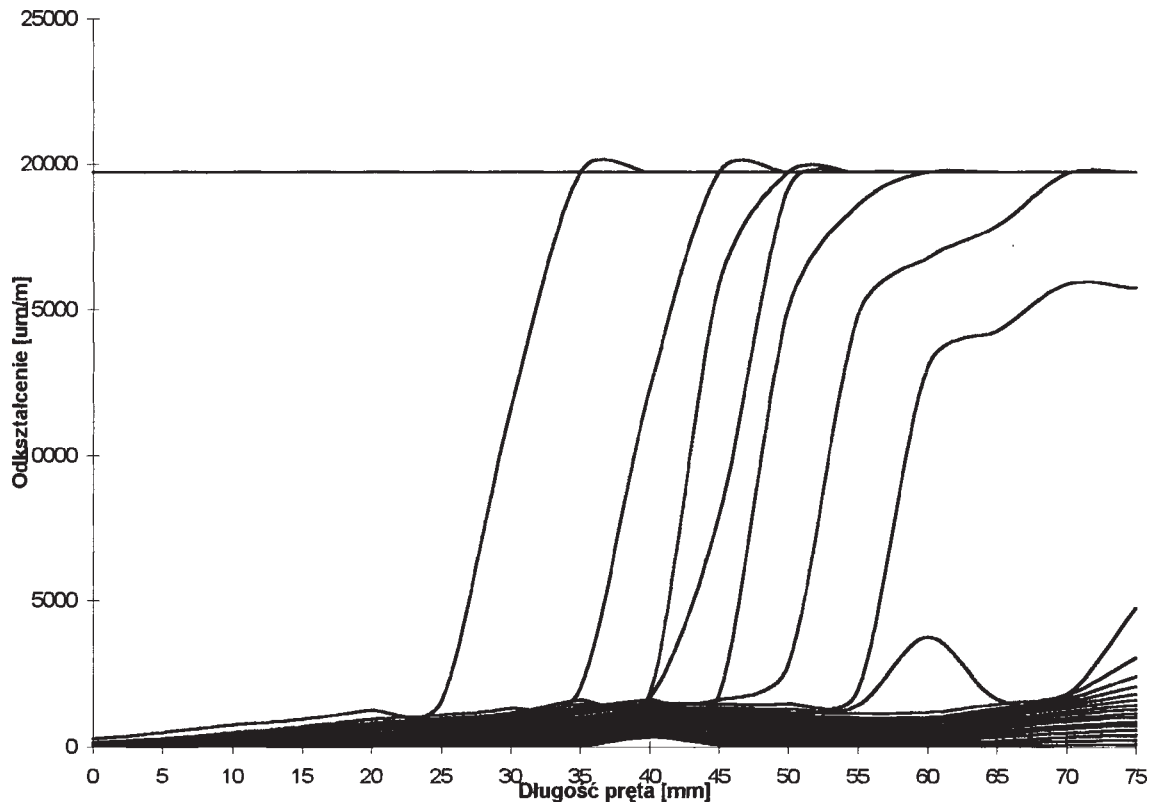
Rys. 2. Rozkład odkształceń w stali, na długości pręta stalowego. Wszystkie poziomy obciążeń. Kompozycja E



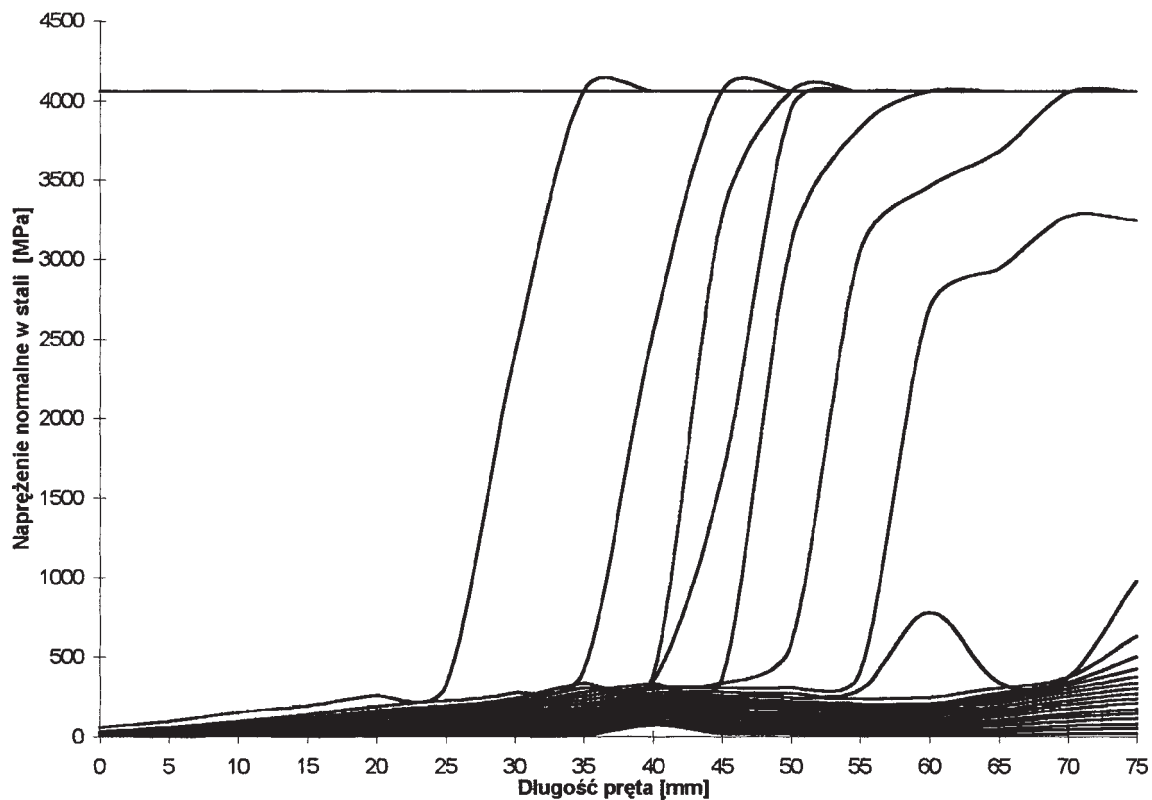
Rys. 3. Rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_s(x)$  w stali. Wszystkie poziomy obciążeń. Kompozycja E



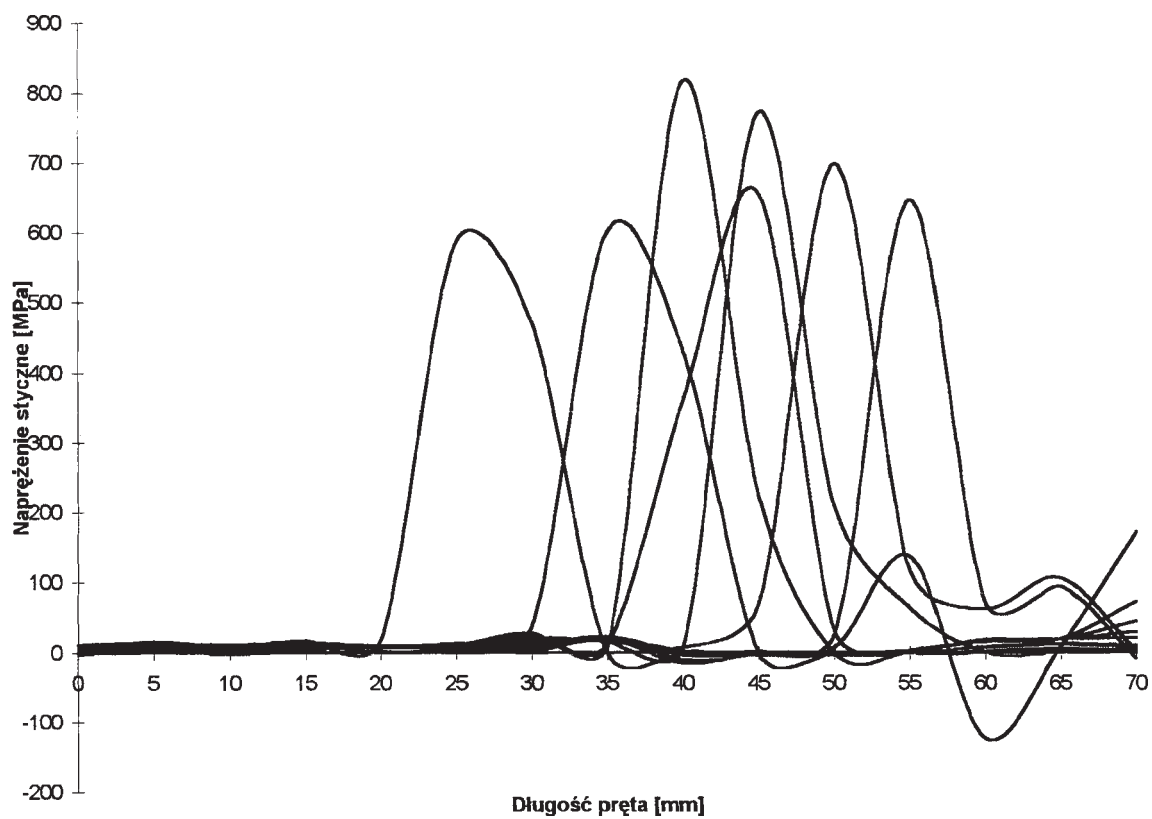
Rys. 4. Rozkład naprężeń stycznych  $\tau_x(x)$  w spoinie klejowej. Wszystkie poziomy obciążen. Kompozycja E



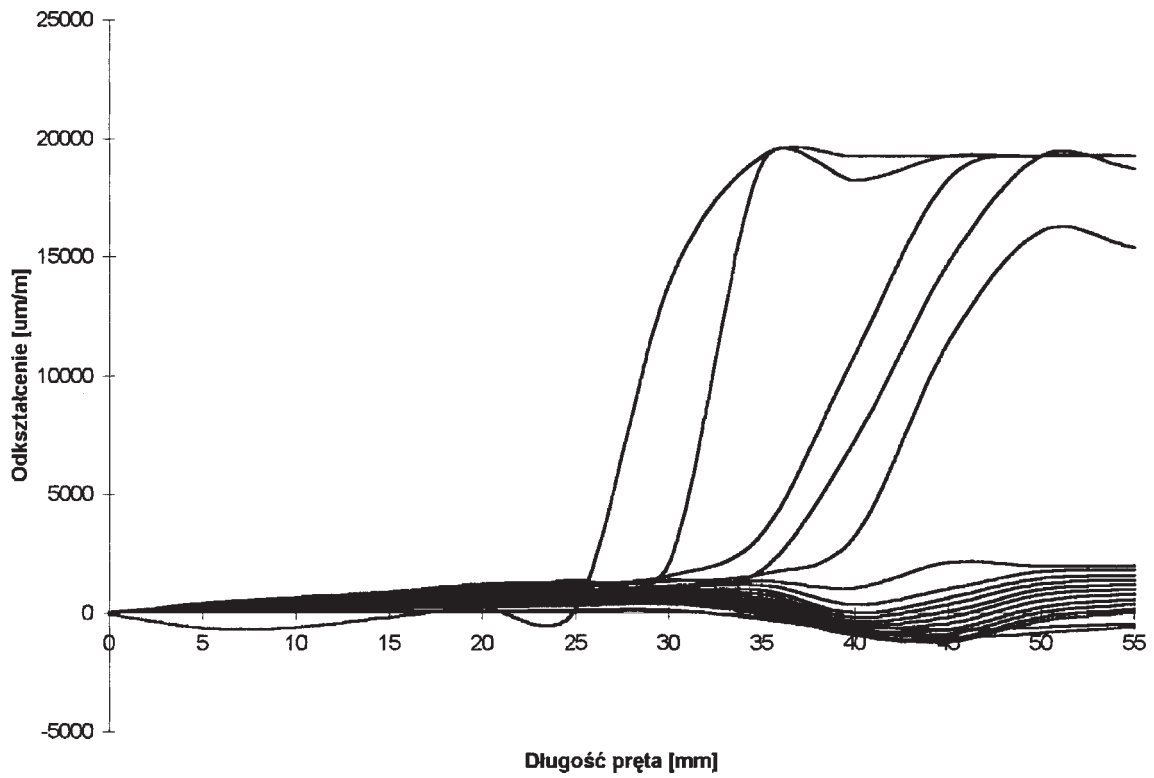
Rys. 5. Rozkład odkształceń w stali, na długości pręta stalowego. Wszystkie poziomy obciążen. Kompozycja D



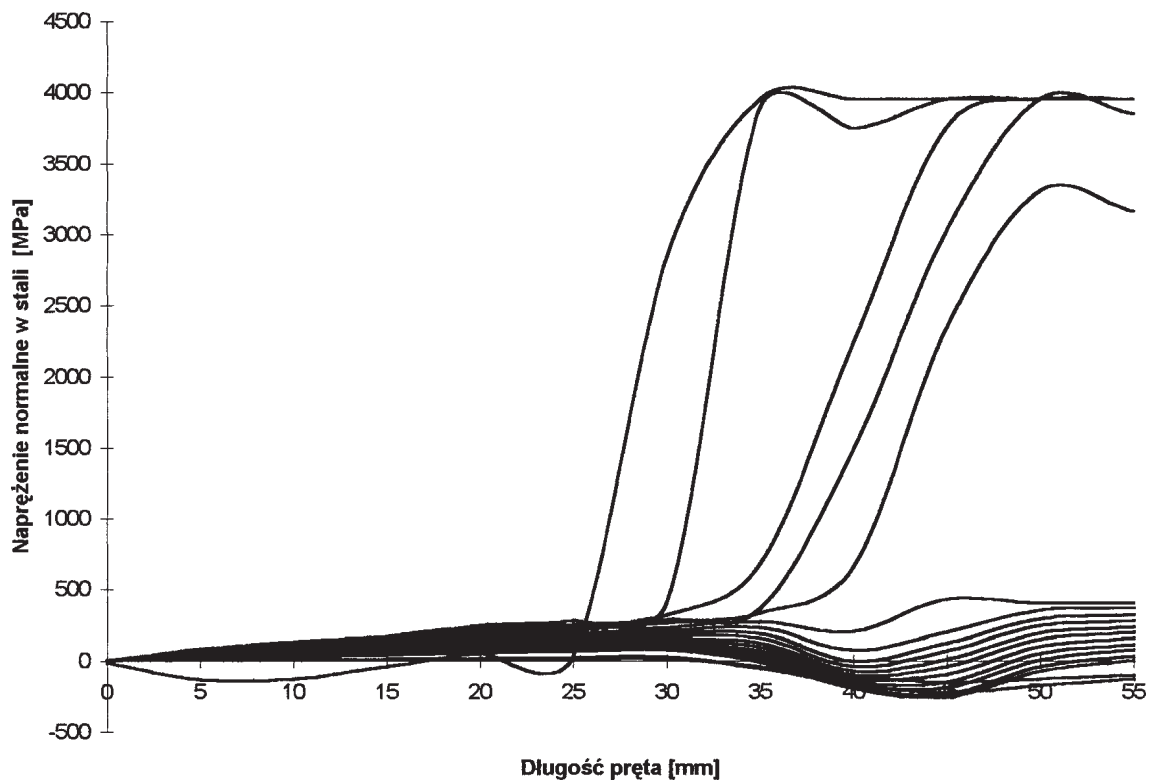
Rys. 6. Rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_s(x)$  w stali. Wszystkie poziomy obciążeni. Kompozycja D



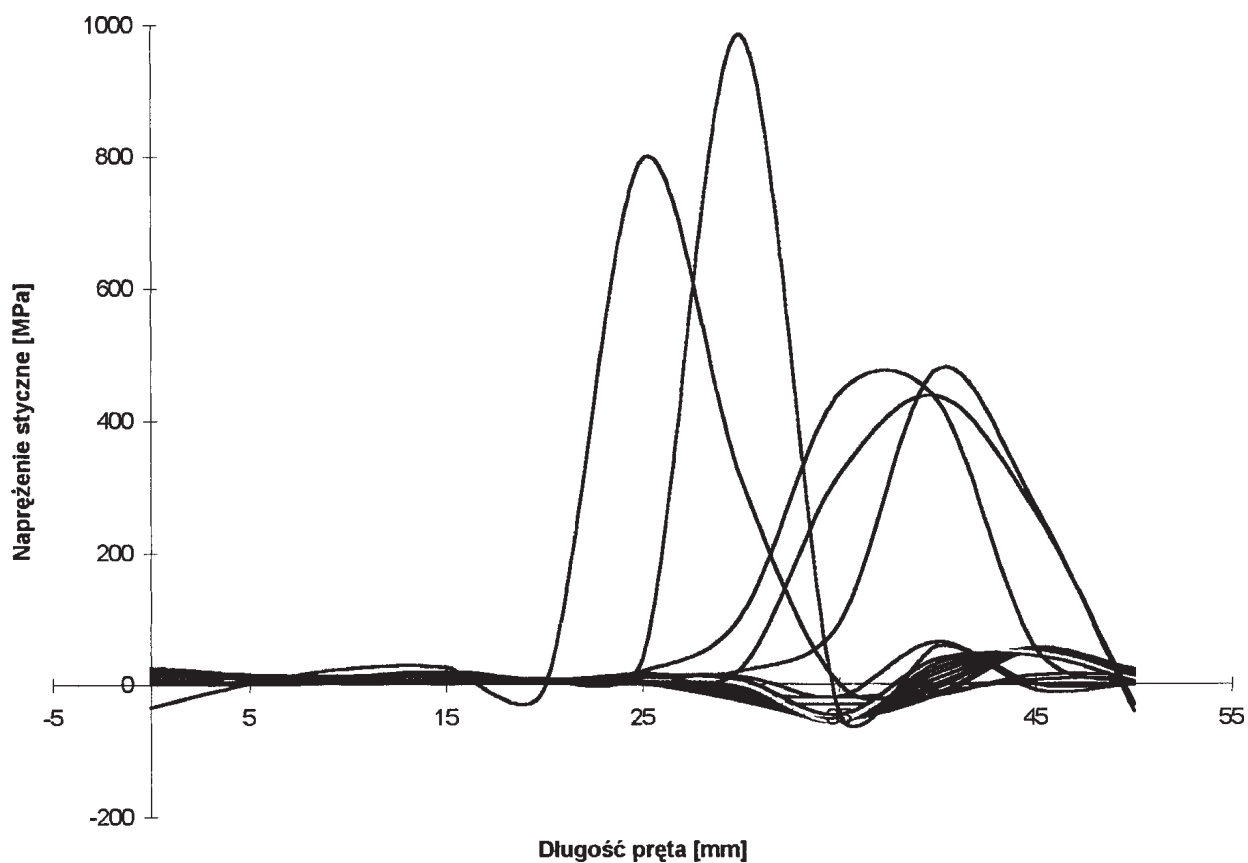
Rys. 7. Rozkład naprężeń stycznych  $\tau_k(x)$  w spoinie klejowej. Wszystkie poziomy obciążeni. Kompozycja D



Rys. 8. Rozkład odkształceń w stali, na długości pręta stalowego. Wszystkie poziomy obciążień. Kompozycja H



Rys. 9. Rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_s(x)$  w stali. Wszystkie poziomy obciążień. Kompozycja H

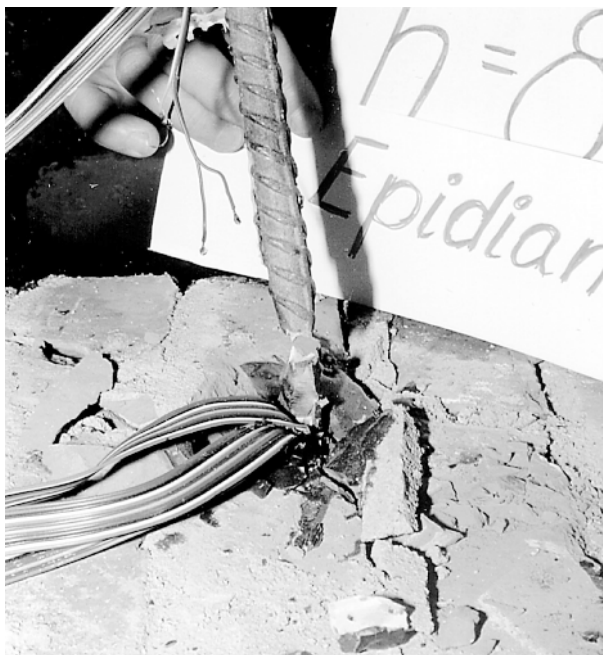


Rys. 10. Rozkład naprężeń stycznych  $\tau_k(x)$  w spoinie klejowej. Wszystkie poziomy obciążień. Kompozycja H



Rys. 11. Zniszczenie układu wklejonego kompozycją H – HIT C50





Rys. 12. Zniszczenie układu wklejonego kompozycją E – Epidian 5

ki w stosunku do wartości siły wrywającej. Możliwe do osiągnięcia modele zniszczenia to:

- wykorzystanie nośności pręta (zerwanie),
- wykorzystanie nośności spoiny klejowej lub nośności na ścinanie muru.

Na podstawie porównania nośności doświadczalnych z teoretycznymi autorzy opracowania zakładają, że w połączeniu klejowym „pręt stalowy – mur ceglany” przy niepełnym wykorzystaniu nośności pręta słuszne jest przyjęcie powierzchni ścinania na styku „spoina klejowa – mur” [5].

Model zaproponowany przez autorów badań zbliża się swoimi wynikami do rzeczywistych rozkładów naprężeń, np. spełnia podstawowy warunek zerowej wartości naprężeń ścinających w spoinie na obciążonym końcu połączenia [4].

### Badania wpływu wilgotności

W ramach programu badawczego przeprowadzono dodatkowe badania na kompozycjach klejowych opartych na żywicach epoksydowych (kompozycji E, kompozycji O i kompozycji H). Celem tych badań było określenie wpływu zawilgocenia na nośność połączenia „stal – cegła”, na podstawie wytrzymałości na odrywanie przy różnych stanach wilgotności cegły. Na wykresach (rys. 13-15) pokazano, że wpływ zawilgocenia próbek na nośność połączenia klejowego „stal – cegła” jest negatywny. Efekt ten jest widoczny we wszystkich badanych próbkach. Spadek wytrzymałości na odrywanie w funkcji wilgotności cegły ma w przybliżeniu charakter liniowy. Przy

wilgotności cegły 15% wytrzymałość połączenia zmniejsza się do ok. 60% wytrzymałości połączenia dla cegły w stanie suchym.

### Podsumowanie

Prezentowane badania potwierdzają spadek wytrzymałości połączenia wykonanego na bazie żywic epoksydowych wraz ze wzrostem zawilgocenia łączonych materiałów. Fakt ten determinuje niemożność stosowania tych żywic w warunkach murów o podwyższonej wilgotności. Kompozycje klejowe z wypełniaczami cementowymi np. kompozycja D w mniejszym stopniu są podatne na tego typu czynniki.

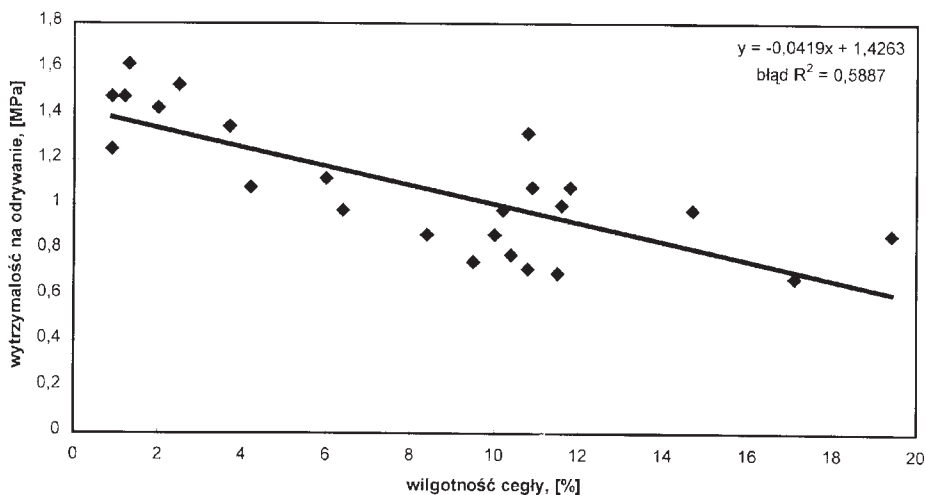
Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły możliwość zastosowania klejowych kompozycji epoksydowych do wklejania ściągów stalowych. Zaproponowana technologia stalowych prętów wklejanych może być przydatna w usztywnianiu murów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych z bogato dekorowanymi fasadami. Z powodzeniem może być wykorzystana również do zespalania spękanych części np. nadproży łukowych (w połączeniu z iniekcją spękań) czy realizacji połączeń pomiędzy wzmacnianą powłoką sklepienia (żebrem) a nową konstrukcją wzmacniającą.

### Bibliografia

1. Minch M., Trochanowski A., *Wybrane zagadnienia wzmocnienia zabytkowego pałacu w Dobrzycy*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy remontowe w budownictwie”, Wrocław – Szklarska Poręba 1996.
2. Małyszko L., Orłowicz R., *Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.
3. Jasięńko J., Minch M., Trochanowski A., *Wybrane problemy badania stalowych ściągów wklejanych w mur na przykładzie budynku klasztoru w Lubiążu*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy remontowe w budownictwie”, Wrocław – Szklarska Poręba 1996.
4. Marek A., *Połączenia klejowe we wzmacnianiu struktur obiektów zabytkowych – analiza optymalnych ekonomicznie rozwiązań*, praca magisterska wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. J. Jasięńki w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.
5. Jasięńko J., *Praca połączenia klejowego: mur ceglany – pręt stalowy w świetle zastosowań od usztywnienia układów ścian konstrukcyjnych budynków murowanych z cegły*, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.

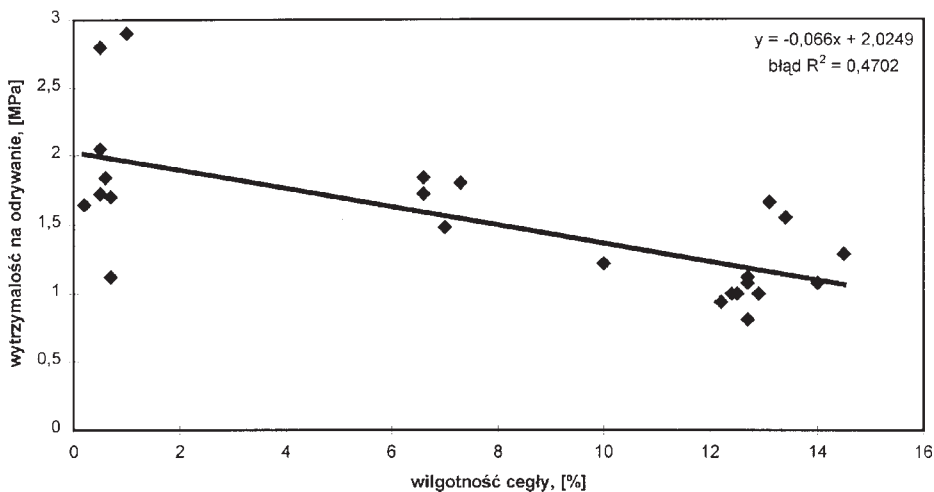


Kompozycja E



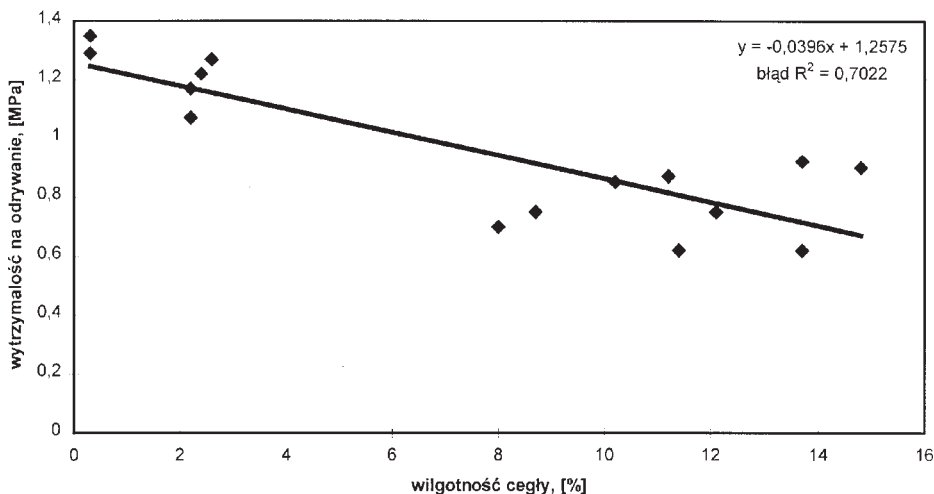
Rys.13. Wytrzymałość na odrywanie połączeń „stal – cegła” wykonanych w stanie powietrzna-suchym w zależności od wilgotności cegły. Kompozycja E.

Kompozycja O



Rys.14. Wytrzymałość na odrywanie połączeń „stal – cegła” wykonanych w stanie powietrzna-suchym w zależności od wilgotności cegły. Kompozycja O.

Kompozycja H



Rys.15. Wytrzymałość na odrywanie połączeń „stal – cegła” wykonanych w stanie powietrzna-suchym w zależności od wilgotności cegły. Kompozycja H.