

ZASTOSOWANIE KOMPOZYTÓW WĘGLOWYCH PODCZAS ODBUDOWY TEATRU ROYAL W CHRISTCHURCH W NOWEJ ZELANDII

Nowozelandzki teatr Isaac Theatre Royal w Christchurch to jeden z najstarszych teatrów regionu i uważany za jeden z najlepszych na półkuli południowej. Samo miasto Christchurch to drugie co do wielkości miasto w Nowej Zelandii, położone na wschodnim wybrzeżu Wyspy Południowej, stolica regionu Canterbury. Isaac Theatre Royal został zbudowany w latach 1906-1908 i był trzecim teatrem o tej nazwie, który został zbudowany przy ulicy Gloucester w centrum Christchurch. Teatr został zaprojektowany przez australijczyków, braci Alfreda i Sidneya Luttrellów, którzy przybyli do Nowej Zelandii w 1902 roku. Jak twierdzi McEwan¹ bracia Luttrell wnieśli znaczący wkład w architekturę Nowej Zelandii zarówno stylistycznie, jak i technologicznie. Większość z ich nowozelandzkich budynków przetrwała do dziś, zapewniając widoczny dowód ich zdolności architektonicznych. Bracia tworząc obiekt użyteczności publicznej w stylu edwardiańskim (charakteryzującym się mniejszą liczbą ozdób w porównaniu z poprzedzającym go stylem wiktoriańskim) odbiegający architekturą od ich pozostałych projektów stworzyli budynek, o ozdobnej fasadzie, stanowiący ważną część miejskiego krajobrazu Christchurch.

KRÓTKA HISTORIA TEATRU ISAAC THEATRE ROYAL

W 1928 r. Isaac Theatre Royal został przebudowany na kino, funkcjonując tak do lat 50. XX w. W następnych latach był ponownie wykorzystywany jako teatr, ale został również areną meczy zapaśniczych, występów muzycznych i operowych. W ten sposób działał od 1972 r., kiedy to poprzez rozwój telewizji obiekt zaczął tracić popularność a nawet groziło mu wyburzenie. Przez kilka lat coraz bardziej niszczał a mieszkańcy Christchurch pomimo podejmowanych prób prawie stracili teatr. W 1979 r. podjęto ponownie wysiłek, aby uratować teatr, tym razem wsparcie pochodziło ze wszystkich stron: lokalnych i regionalnych władz, społeczności miasta, przedsiębiorców itp. Powołana do tego celu fundacja: Theatre Royal Charitable Foundation pozyskała kapitał, dzięki któremu w 1980 r. nieruchomości została zakupiona. W latach 1988-1989 przeprowadzono prace budowlane mające na celu wzmocnienie konstrukcji teatru, szczególnie w zakresie dostosowania do obowiązujących w tamtym okresie wymogów ochrony przed trzęsieniami ziemi. W 1989 r. Isaac Theatre Royal został wpisany do rejestru zabytków Nowej Zelandii².

dr inż. Łukasz Bednarz, Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. Andrzej Koss, Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie
prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko, Politechnika Wrocławska

¹ A.E. McEwan, 1988. From Cottages to „Skyscrapers”. The Architecture of AE & ES Luttrell in Tasmania and New Zealand.

² <http://www.heritage.org.nz/the-list/details/1936>.

SKUTKI TRZĘSIENIA ZIEMI

Położenie Nowej Zelandii w strefie aktywnej sejsmicznie przyczyniło się do tragicznych w skutkach trzęsień ziemi, między innymi w 2010 r. i 2011 r. We wrześniu 2010 r. trzęsienie ziemi o sile ok. 7,1 w skali Richtera, którego epicentrum znajdowało się 40 km od Christchurch doprowadziło do uszkodzenia wielu budynków (również zabytkowych). Było to najsilniejsze zanotowane trzęsienie ziemi w Nowej Zelandii od



Rys. 1. Isaac Theatre Royal podczas odbudowy, kontenery zabezpieczają ulicę Gloucester przed ewentualnymi skutkami zawalenia się elewacji frontowej, 2013 r. [fot. autor]

Fig. 1. Isaac Theater Royal during reconstruction, containers secure Gloucester street against possible consequences of the collapse of the front elevation, 2013 [photo by author]

1931 roku. W lutym 2011 r. doszło do kolejnego trzęsienia ziemi o sile ok. 6,3 w skali Richtera, poprzedzonego tysiącami małych wstrząsów wtórnych po trzęsieniu z 2010 r., którego epicentrum znajdowało się w odległości ok. 10 km od centrum Christchurch. Oba trzęsienia ziemi w Christchurch (a szczególnie to z 2011 r.) miały ogromny wpływ na obiekty dziedzictwa kulturowego, szczególnie budynki z drugiej połowy XIX w. i początku XX w. Znaczne straty w substancji zabytkowej spowodowane były tym, że większość uszkodzonych obiektów to niewzmocnione budynki murowane, wybudowane przed wprowadzeniem współczesnych norm budowlanych uwzględniających ochronę przed trzęsieniami ziemi. Wśród uszkodzonych murowanych,

ceglanych i kamiennych budynków historycznych były m.in.: wieża i nawa główna katedry anglikańskiej, wieże i prezbiterium bazyliki katolickiej, teatr Isaac Theatre Royal (rys. 1), obiekty instytucji edukacyjnych, budynki rządowe, muzea i galerie oraz liczne historyczne domy mieszkalne z fasadami, które nadawały ulicom miasta Christchurch niepowtarzalny charakter.

Pomimo że było już za późno, aby uratować wiele wartościowych historycznych obiektów w Christchurch wnioski, które wyciągnięto, analizując przyczyny i skutki trzęsień ziemi z lat 2010 i 2011 można zastosować do szczegółowej analizy obiektów murowych w całej Nowej Zelandii.

ODBUDOWA TEATRU

Po trzęsieniach ziemi i znaczne bardziej niebezpiecznych wstrząsach wtórnych, które wstrząsnęły miastem w 2010 r. i 2011 r. Rada Miasta Christchurch zobowiązała się do naprawy i odnowienia swoich budynków historycznych. W związku z tym, że Isaac Theatre Royal był jednym z nielicznych zabytkowych budynków w Christchurch, które uległy tylko częściowym uszkodzeniom podczas trzęsień ziemi postanowiono, że jego szybka odbudowa może być dla mieszkańców regionu Canterbury swoistego rodzaju latarnią wyznaczającą kierunek działań. Postanowiono, że Isaac Theatre Royal zostanie przebudowany bardzo gruntownie, łącznie

z historyczną fasadą i wnętrzem^{3,4,5}. Szybko okazało się, że projekt był znacznie bardziej skomplikowany, a złożoności konstrukcji znacznie poważniejsza niż pierwotnie szacowano. Ostatecznie zdecydowano o przebudowie całego teatru w części za elewacją frontową, czyli aż do proscenium. Samą elewację zabezpieczono kontenerami morskimi.

Zgodnie z światowymi nurtami konserwatorskimi i zaleceniami np. ICOMOS planowane interwencje modernizacyjne powinny poprawić nośność konstrukcji, z uwzględnieniem przydatności interwencji naprawczych i wzmacniających, a w szczególności wartości kulturowej obiektu. Wpływ zmian sztywności między elementami i zmian sztywności związanych z różnymi technikami modernizacji czy wzmocnienie interwencyjne powinny poprawić globalne zachowanie, ale nie mogą wpływać na oryginalną bryłę w celu uniknięcia niezgodności zarówno materiałowych, jak i formy w odniesieniu do oryginału.

Zaproponowany przez pochodzącą z Christchurch pracownię architektoniczną Warren and Mahoney zakres prac był znaczny. I tylko dzięki pracom wzmacniającym wykonanym w 2004 r. możliwy do wykonania. Zaproponowany projekt z powodzeniem zintegrował nieliczne obszary, w których uszkodzenia można było naprawić, z nową (ukrytą) konstrukcją ramową i nowymi fundamentami. Budowa stała się jedną z najtrudniejszych inwestycji w zniszczonym przez trzęsienie ziemi



Rys. 2. Połączenie historycznej elewacji z konstrukcją stalową i żelbetową, 2013 r. [fot. autor]

Fig. 2. Combination of the historical façade with steel and reinforced concrete structure, 2013 [photo by author]

centrum Christchurch z całkowitym kosztem w wysokości ok. 40 mln dolarów nowozelandzkich. Prace budowlane i konserwatorskie trwały ponad 18 miesięcy, ale stworzono stabilny, bardzo bezpieczny i funkcjonalny obiekt, łącząc historyczną fasadę i wyposażenie wnętrza (uratowane ze starego teatru) z nowoczesną konstrukcją żelbetową i stalową (rys. 2)⁶.

Odbudowując Isaac Theatre Royal, zadbano również, aby sama atmosfera teatru była wyjątkowa (pięknie odrestaurowana kopuła, kryształowe żyrandole, czerwone pluszowe fotele czy wielkie wejście) i sprawiała, żeby każdy przekraczający próg teatru czuł się traktowany po królewsku. Przywrócono oryginalną (z 1908 r.)

³ C. Forbes, 2018. What has happened to my heritage? Disaster recovery in Christchurch and Kathmandu. National Emergency Response 31(2), 14.

⁴ D. Burden, 2015. A resurgent Christchurch. Australasian Leisure Management (111), 24.

⁵ F. Fuste-Forne, 2017. Building Experiencescapes in Christchurch. Landscape Review 17(1).

⁶ <http://isaactheatroyal.co.nz/our-history/theatre-history>.

kolorystkę wnętrza – badania stratygraficzne wykazały, że wnętrze teatru zostało przemalowane co najmniej cztery razy, co znacznie utrudniło ustalenie oryginalnej kolorystyki.

Nowo przebudowany i odrestaurowany Isaac Theatre Royal oferuje wszechstronność (nadaje się na wiele różnych rodzajów imprez) i jest najważniejszym miejscem sztuki widowiskowej w Christchurch. Spektakularne audytorium może pomieścić prawie 1300 widzów na trzech poziomach. Teatr wyposażono w windę umożliwiającą osobom niepełnosprawnym dostęp do wszystkich 3 poziomów widowni, pełny teatralny system oświetleniowy, cyfrowy sprzęt AV, system przeciwwag oraz nowoczesny podnośnik hydrauliczny, który tworzy opcjonalny ciąg sceniczny. Dodatkowo poza pomieszczeniami zaplecza teatralnego w obiekcie zlokalizowano również dodatkową przestrzeń konferencyjną oraz restauracyjną.

WYKORZYSTANIE MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Obecnie obserwuje się ciągle rosnące zainteresowanie innowacyjnymi technologiami wykorzystywanymi do wzmocnienia i naprawy obiektów historycznych, które uległy częściowej lub znacznej destrukcji. Obecne tendencje we wzmocnianiu historycznych konstrukcji^{7,8,9} zwracają się w kierunku materiałów kompozytowych. Tradycyjne metody wzmocnienia wykorzystujące beton, stal czy drewno powodują znaczny wzrost nośności i sztywności konstrukcji, mogą również przynieść nieodwracalne zmiany estetyki obiektu. W przypadku, gdy konieczne jest podniesienie nośności wzmocnianej konstrukcji, wykorzystuje się materiały kompozytowe. Pojęcie materiał kompozytowy (łac. *compositus* – złożony) oznacza materiał zbudowany, z co najmniej dwóch różnych składników, przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym. Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz: fazy ciągłej, zwanej osnową (matrycą) oraz tzw. fazy rozproszonej, okre zbrojeniem. Wypadkowe własności kompozytu są zależne od własności faz składowych, ich ilości w ogólnej objętości kompozytu, sposobu rozmieszczenia fazy rozproszonej w osnowie, a także cech geometrycznych fazy rozproszonej. W zależności od rodzaju fazy rozproszonej, materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty zbrojone cząstkami, zbrojone dyspersyjnie oraz zbrojone włóknami. Kompozyty zbrojone włóknami, czyli te, które mają największe zastosowanie we wzmocnianiu konstrukcji budowlanych, to kompozyty, w których w charakterze fazy wzmocniającej wykorzystywane są różnego rodzaju włókna. Stanowią one element nośny, natomiast osnowa służy jako spoiwo łączące włókna. Osnowa zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim stopniu uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznym. Mechaniczne właściwości włókien materiałów kompozytowych znacznie przewyższają właściwości materiałów tradycyjnych w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, zginanie, wytrzymałości zmęczeniowej i innych przy najmniejszym ciężarze właściwym. Istotnym wskaźnikiem efektywności włókna są tzw. wytrzymałość właściwa i moduł właściwy (wyróża-

⁷ T.C. Triantafyllou, M.N. Fardis, 1997. Strengthening of historic masonry structures with composite materials. *Materials and Structures* 30(8), 486-496.

⁸ M. R. Valluzzi, C. Modena, G. de Felice, 2014. Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites. *Materials and structures* 47(12), 1971-1985.

⁹ A. Kwiecień, P. Krajewski, Ł. Hojdyś, M. Tekieli, M. Słoński, 2018. Flexible Adhesive in Composite-to-Brick Strengthening – Experimental and Numerical Study. *Polymers* 10(4), 356.

jące się w jednostkach długości), tzn.. odpowiednio stosunek wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości do ciężaru właściwego materiału włókna. Im wartości tych wskaźników są większe, tym włókno jest bardziej efektywne.

Nadrzędnym czynnikiem decydującym o doborze odpowiedniego systemu jest wytrzymałość na rozciąganie. Z tego powodu podstawowe znaczenie praktyczne mają kompozyty włókniste FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer*) o osnowach polimerowych (żywice termoplastyczne i termoutwardzalne) oraz w osnowach mineralnych FRCM (ang. *Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), zbrojonych włóknami węglowymi (C-FRP), bazaltowymi (B-FRP), grafitowymi (G-FRP), szklanymi (A-FRP), borowymi (Boron-FRP), aramidowymi (A-FRP), zylonowymi (PBO-FRP) (PBO – poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazol) oraz stalą (Steel-FRP). Odnaczają się bardzo dobrymi parametrami technicznymi, jednocześnie metody ich wytwarzania są stosunkowo proste, a cena względnie niska. Pod uwagę należy brać nie tylko cenę samego materiału, ale również koszt jego montażu – robociznę. Najistotniejszą zaletą materiałów kompozytowych jest wysoka wartość stosunku wytrzymałości do masy oraz łatwy transport i montaż. Innowacyjne materiały kompozytowe wykazują dużą efektywność przy znacznej redukcji kosztów związanej, między innymi, z uniknięciem zjawisk korozji. Szeroki wachlarz możliwości doboru odpowiedniej formy nowoczesnego kompozytu w postaci: taśm, prętów, lin, mat, siatek czy tkanin umożliwia optymalizowanie podejmowanych decyzji w odniesieniu do konkretnego wymagającego wzmocnienia przypadku.

Materiały typu FRP o osnowach polimerowych w formie mat z włókien węglowych C-FRP (ang. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) zastosowano do wzmocnienia bardzo efektownej kopuły sufitowej Isaac Theatre Royal, ozdobionej płótnem przedstawiającym sceny ze *Snu nocy letniej* Szekspira namalowanym w latach 1906-1908 przez G.C. Post firmy Carrara Ceiling Company z Wellington. Wykonaną głównie z drewna i gipsu kopułę wzmocniono matami C-FRP od strony podniebie-



Rys. 3. Przygotowywanie mat węglowych przed wzmocnieniem kopuły, 2013 r. [fot. autor]

Fig. 3. Preparation of carbon mats before strengthening the dome, 2013 [photo by author]



Rys. 4. Wzmacnianie kopuły matami węglowymi od strony podniebienia, 2013 r. [fot. autor]

Fig. 4. Strengthening the dome with carbon mats from intrados side, 2013 [photo by author]

nia (rys. 3), tworząc stabilną i trwałą podstawę dla naciągu płótna z malowidłem. Prace wzmacniające podniebienie kopuły klejonymi na żywice matami z włókien węglowych C-FRP, (rys. 3-4) montaż za pomocą wciągarki oraz efekt końcowy wzmocnionej i odrestaurowanej kopuły.

W marcu 2014 r. wzmocnioną i odrestaurowaną kopułę podniesiono na wysokość ok. 19 m ponad posadzkę, wykorzystując 16-tonową wciągarkę i stalowe liny z 16 bezprzewodowymi czujnikami tensometrycznymi typu Ron StageMaster firmy Eilon Engineering¹⁰. Cały zamontowany system monitoringu (wykorzystywany również podczas montażu i użytkowania systemów nagłośnienia i oświetlenia na innych światowych scenach teatralnych) przedstawiał w czasie rzeczywistym stan wyężenia lin i równomierność podnoszenia kopuły.

Zaproponowany w tym zadaniu system monitoringu mierzył tylko wielkości pochodzące z naciągu lin nośnych, ale można było rozszerzyć zakres pomiarów o inne pomiary np. odkształcenie geometrii kopuły podczas podnoszenia, jej drgania itp. Ogólnie monitoringiem można nazwać wszystkie techniki i metody mierzące stan zachowania elementów lub całych konstrukcji. Różne klasyfikacje monitoringu korzystają z różnych kryteriów np. celu monitorowania, rodzaju pomiarów (statyczne, dynamiczne), charakteru badań (badania niszczące, quasi-niszczące i nieniszczące) lub czasu monitorowania. Najefektywniejszym wydaje się być połączenie statycznych i dynamicznych pomiarów pracy monitorowanej konstrukcji w jeden hybrydowy system, którego zakres działania obejmuje śledzenie zmian w geometrii (powstających również przez zjawiska opóźnione w czasie) oraz badania nieniszczące materiałów konstrukcyjnych.

PODSUMOWANIE

Niewłaściwe przygotowanie na obciążenia sejsmiczne murowych niezbrojonych budynków w Christchurch przypominało o konieczności modernizacji obiektów zabytkowych w kraju, w którym występują trzęsienia ziemi, takim jak Nowa Zelandia. Sugestie dotyczące odpowiednich zasad i technik wzmacniania powinny być zbierane z doświadczeń zgromadzonych przez naukowców i praktyków z innych narażonych na trzęsienia ziemi obszarów świata, w których występują liczne murowane obiekty o znacznej wartości technicznej, historycznej i kulturowej.

Isaac Theatre Royal w Christchurch jest doskonałym przykładem historycznego obiektu użyteczności publicznej, którego dzieje nie były łatwe. Po tragediach trzęsień ziemi zaangażowanie w odbudowę wielu ludzi, wykorzystanie nowych technologii i materiałów (w tym kompozytów z włókien węglowych (C-FRP)) i dobrych praktyk konserwatorskich doprowadziło do reaktywacji miejsca, które w przyszłości będzie nie tylko bezpieczne i będzie chronić ludzkie życie podczas ewentualnych przyszłych katastrof, ale także będzie ośrodkiem krzewienia kultury, która jest nierozdzielnie związana z tym życiem.

W 2016 r. Isaac Theatre Royal został zwycięzcą nagrody przyznawanej przez Canterbury Heritage Awards w kategorii "Public Realm - Saved and Restored", w uznaniu dla połączonych umiejętności i zaangażowania architektów i inżynierów, konserwatorów i rzemieślników oraz robotników budowlanych, którzy przy-

¹⁰ <https://www.craneloadcells.com/isaac-theatre-royal-nz/applications-items/isaac-theatre-royal-nz>

wrócili ten ostatni w Nowej Zelandii teatr edwardiański do dawnej świetności, za odbudowę i prace konserwatorskie prowadzone w budynku¹¹.

LITERATURA

- [1] D. Burden, 2015. A resurgent Christchurch. *Australasian Leisure Management* (111), 24.
- [2] C. Forbes, 2018. What has happened to my heritage? Disaster recovery in Christchurch and Kathmandu. *National Emergency Response* 31(2), 14.
- [3] F. Fuste-Forne, 2017. Building Experiencescapes in Christchurch. *Landscape Review* 17(1).
- [4] <https://www.craneloadcells.com/isaac-theatre-royal-nz/applications-items/isaac-theatre-royal-nz>.
- [5] <http://www.heritageawards.co.nz/entry/isaac-theatre-royal-2>.
- [6] <http://www.heritage.org.nz/the-list/details/1936>.
- [7] <http://isaactheatreroyal.co.nz/our-history/theatre-history>.
- [8] A. Kwiecień, P. Krajewski, Ł. Hojdys, M. Tekieli, M. Słoński, 2018. Flexible Adhesive in Composite-to-Brick Strengthening – Experimental and Numerical Study. *Polymers* 10(4), 356.
- [9] A. E. McEwan, 1988. From Cottages to 'Skyscrapers': The Architecture of AE & ES Luttrell in Tasmania and New Zealand.
- [10] T. C. Triantafyllou, M. N. Fardis, 1997. Strengthening of historic masonry structures with composite materials. *Materials and Structures* 30(8), 486-496.
- [11] M. R. Valluzzi, C. Modena, G. de Felice, 2014. Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites. *Materials and Structures* 47(12), 1971-1985.

ZASTOSOWANIE KOMPOZYTÓW WĘGLOWYCH PODCZAS ODBUDOWY TEATRU ROYAL W CHRISTCHURCH W NOWEJ ZELANDII

STRESZCZENIE. Nowozelandzki teatr „Isaac Theatre Royal” będący jednym z najważniejszych obiektów miasta Christchurch w latach 2010 i 2011 uległ bardzo poważnym zniszczeniom na skutek trzęsienia ziemi. Audytorium i foyer teatru zostały uznane za nienaprawialne w ich pierwotnej formie, głównie ze względu na niebezpieczeństwo zawalenia. Podczas ponad 3 lat prac budowlanych i renowacyjnych prawie wszystkie elementy obiektu i jego cennego wyposażenia uratowano i wbudowano ponownie. Na szczególną uwagę zwraca fakt użycia kompozytów węglowych C-FRP, wykorzystanych do wzmocnienia kopuły znajdującej się wewnątrz teatru. Podczas odbudowy przebudowano teatr zgodnie z najnowszymi wymogami technicznymi oraz bieżącą praktyką teatralną, przy jednoczesnym zachowaniu wartości kulturowej. W pracy przedstawiono poza historią obiektu, przyczynami i skutkami trzęsienia ziemi również metodologię wykorzystania kompozytów do wzmocnienia konstrukcji budowlanych i ich elementów.

Słowa kluczowe: teatr, trzęsienie ziemi, odbudowa, wzmocnianie, kopuła, kompozyty

¹¹ <http://www.heritageawards.co.nz/entry/isaac-theatre-royal-2>

THE USE OF CARBON COMPOSTES DURING RECONSTRUCTION OF THE ROYAL THEATER IN CHRISTCHURCH IN NEW ZEALAND

SUMMARY. The New Zealand theater "Isaac Theater Royal", which is one of the most important buildings in the city of Christchurch in 2010 and 2011, has been severely damaged by the earthquake. The auditorium and theater foyer were considered irreparable in their original form, mainly due to the insecurity of collapse. During over 3 years of construction and renovation works, almost all elements of the facility and its valuable equipment were saved and rebuilt. Particularly noteworthy is the use of C-FRP carbon composites used to reinforce the dome inside the theater. During the reconstruction the theater was rebuilt in accordance with the latest technical requirements and the current theater practice, while maintaining cultural value. In the article, apart from the history of the object, the causes and effects of the earthquake are also the methodology of using composites to strengthen building structures and their elements.

Key words: theater, earthquake, reconstruction, strengthening, dome, composites