

dr inż. Stanisław Jurczakiewicz¹⁾
 ORCID: 0000-0002-1621-9299

Materiały kompozytowe w konserwacji zabytków

Composite materials in conservation of monuments

DOI: 10.15199/33.2021.05.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono kilka przykładów zastosowania materiałów kompozytowych w projektach konserwatorskich zabezpieczeń obiektów historycznych. Zaprezentowane zostały naprawy kolumn, sklepień, murowanych ścian i drewnianych belek za pomocą włókien o dużej wytrzymałości osadzonych w matrycy z żywicy lub zaprawy cementowej. W historycznych elementach konstrukcyjnych występują na ogół podobne zagrożenia i uszkodzenia, ale zawsze konieczne jest zastosowanie indywidualnego rozwiązania projektowego. Wykonanie projektu muszą poprzedzić badania historyczne obiektu oraz szczegółowe pomiary geometrii i odkształceń elementów konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: materiały kompozytowe; wzmacnianie konstrukcji; budynki historyczne.

Abstract. This paper presents a few examples of practical applications of composites designed for structural reinforcement and protection of historical buildings. Repairs of columns, vaults, masonry walls and wooden beams with the use of fibres of high strength in resin or cement matrix are presented. Although the threats and structural damages which occur in most historical buildings tend to be similar, individual design solutions are required in each case. Historical investigation and detailed measurement of geometry and deflections have to be made before choosing the appropriate method of reinforcing the old structure.

Keywords: composite materials; structural reinforcements; historical buildings.

Współczesne materiały kompozytowe zawierające włókna o bardzo dużej wytrzymałości na rozciąganie i dużej odporności chemicznej [3, 8, 9] mają cechy takie, jak lekkość, niewielkie gabaryty i dobra przyczepność do podłoża, dzięki którym są szczególnie przydatne do naprawy konstrukcji budynków historycznych [1, 6, 7]. Systemy FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) z włókien syntetycznych osadzonych w matrycy z modyfikowanej zaprawy cementowej mogą być stosowane na wilgotnych podłożach, charakteryzują się przepuszczalnością pary wodnej i odpornością ogniową taką samą jak odporność podłoża [8]. Tradycyjne naprawy i wzmocnienia budynków polegały na wymianie lub uzupełnianiu zniszczonych elementów w celu odtworzenia oryginalnych przekrojów i ciągłości materiału lub na powiększaniu przekrojów w celu zapewnienia większej nośności i bezpieczeństwa. Konstrukcje murowe były uzupełniane stalowymi kształtownikami lub obręczami, a także dodawano do nich nowe elementy żelbetowe ukrywane w wykutych bruzdach lub w grubości warstw wykończenio-

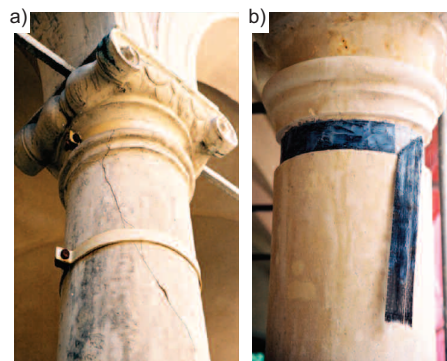
wych [2]. Tego typu działania są trudne w realizacji i wpływają zwykle na statykę i estetykę budynku. Wykazują ponadto małą trwałość i skuteczność wzmocnienia. Ponadto w odniesieniu do obiektów historycznych i zabytkowych są niekorzystne. Natomiast stosując materiały kompozytowe, ograniczamy do minimum ingerencję w cenną substancję zabytkową, a na dodatek zwykle możliwy jest ich demontaż. Dzięki temu ich stosowanie jest zgodne z aktualną doktryną konserwatorską [4].

W artykule przedstawiono kilka przykładów zastosowania nowoczesnych materiałów kompozytowych, które pochodzą z projektów konserwatorskich zabezpieczeń obiektów historycznych.

Przykłady zastosowania

Uszkodzenia, jakim ulegają kamienne i murowane kolumny, powodowane są często przez naprężenia rozciągające poprzeczne względem osi słupów pojawiające się w stanie osiowego ściskania. Stare mury ceglane mają małą wytrzymałość na rozciąganie i po jej przekroczeniu dochodzi do pęknięć. Natomiast w litych elementach kamiennych ujawniają się w takiej sytuacji ukryte wewnętrzne wady materiału. Tradycyjnymi metodami naprawy było instalowanie na kolumnach stalowych obręczy

(fotografia 1a). Stosowano też sprężenie za pomocą drutu o dużej wytrzymałości [2]. Zadaniem tych konstrukcji było przeniesienie niebezpiecznych poziomych sił rozciągających, ale były one widoczne lub ich obudowa zmieniała w dużym stopniu pierwotną formę słupa. Ponadto elementy stalowe łatwo ulegały korozji. **Kamienne kolumny arkad na dziedzińcu pałacu w Baranowie Sandomierskim wzmocniono opaskami z maty z włókna węglowego** (fotografia 1b). Wyeliminowano nieestetyczne stalowe obręcze, a opaski



Fot. 1. Naprawa kamiennych kolumn pałacu w Baranowie Sandomierskim: a) metodą tradycyjną; b) opaskami kompozytowymi ukrytymi w płytkich bruzdach

Photo 1. Repairing stone columns of the castle in Baranów Sandomierski: a) by traditional method; b) with composite bands pasted in shallow furrows

Fot. S. Karczmarczyk

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Architektury; sjurczakiewicz@pk.edu.pl.

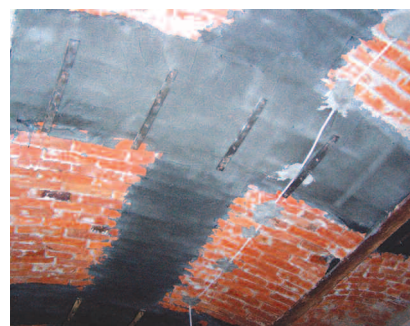
kompozytowe zostały wklejone w płytach bruzdach wyciętych w kamieniu. Miejsca napraw uzupełniono warstwą zaprawy dopasowanej kolorem do barwy kamienia, dzięki czemu stały się całkowicie niewidoczne.

Bezpieczeństwo historycznych sklepień może być zagrożone z powodu pierwotnego, niewłaściwego ich uformowania, które powoduje, że w niektórych przekrojach płaszcza sklepienia pojawiają się duże mimośrodowość i naprężenia rozciągające. Bywa, że dochodzi do deformacji sklepień na skutek poziomych przemieszczeń podpierających je ścian i filarów lub po pojawieniu się dodatkowych obciążeń. Szczególnie niebezpieczne są obciążenia punktowe i niesymetryczne pochodzące z posadzek ułożonych na zasypie gruzowym sklepień stropowych. Pęknięcia świadczą o pojawieniu się w tych przekrojach przegubów i podziale łuku sklepienia na oddzielne elementy. Możliwe jest pojawienie się najwyżej trzech przegubów. Każdy następny prowadzi nieuchronnie do katastrofy (rysunek 1).

Tradycyjną metodą wzmocnienia i zabezpieczenia sklepienia było wykonanie na nim i skotwienie dodatkowej nośnej warstwy betonu zbrojonego (rysunek 2). Z kolei odciążenie sklepienia międzypiętrowego uzyskiwano, wykonując nad nim dodatkowy strop stalo-

wo-żelbetowy. Obie metody skutkują zwiększeniem obciążenia ścian i fundamentów oraz ingerują w historyczną strukturę i dlatego są niechętnie przyjmowane przez nadzór konserwatorski.

Można zapobiec tworzeniu się niebezpiecznych przegubów w łuku sklepienia i zwiększyć jego nośność przez zwiększenie nośności przekroju łuku, który jest na ogół ściskany mimośrodowo, czyli zginany z udziałem siły osiowej. Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie ceglanej struktury sklepienia nie jest możliwe, ale podobny efekt można uzyskać po naklejeniu siatki kompozytowej, o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, po stronie rozciąganej. Uwzględniając wszystkie możliwe kombinacje obciążeń użytkowych posadzki nad sklepieniem, siatki należałoby naklejać na całej dolnej i górnej stronie sklepienia. Takie rozwiązanie wzmocnienia sklepienia odcinkowego było możliwe w zabytkowym **budynku szkoły w Gorlicach** po odsłonięciu jego dolnej i górnej powierzchni (fotografia 2). W ten sposób udało się uniknąć wykonania na sklepieniu zaprojektowanej wcześniej ciężkiej żelbetowej płyty. Widoczne poprzeczne pasy z płaskowników stalowych zabezpieczają dolną siatkę przed jej oderwaniem od podniebienia sklepienia. Są one łączone śrubami na wskroś przez grubość sklepienia. Obecnie dostępne są kompozytowe



Fot. S. Jurczakiewicz

Fot. 2. Widok dolnej powierzchni sklepienia szkoły w Gorlicach. Wzmocnienie sklepienia odcinkowego siatką kompozytową
Photo 2. View of bottom side of vault in school in Gorlice. Reinforcement of segmental barrel vault with composite mesh

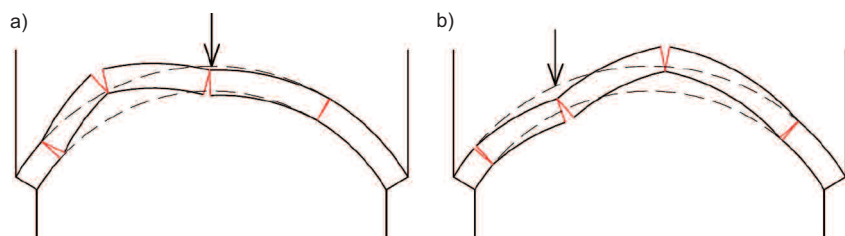
sznury z włókien, które można wykorzystać do tego celu [8]. Zwykle jednak do klejenia siatki dostępna jest tylko jedna strona sklepienia. Może to wynikać z faktu, że nie wszystkie pomieszczenia budynku są remontowane w tym samym okresie lub na podniebieniu sklepienia istnieją polichromie i sztukaterie. Tak było w zabytkowym **Pałacu Królewskim w krakowskim Łobzowie**, gdzie obecnie mieści się Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej. Dopiero po wykonaniu remontu na 1. piętrze przystąpiono do remontu parteru. Siatki zostały więc naklejone poprzecznie do linii pęknięć tylko na dolnej powierzchni sklepień. Mimo upływu 10 lat pęknięcia nie odnowiły się (fotografia 3).



Fot. S. Jurczakiewicz

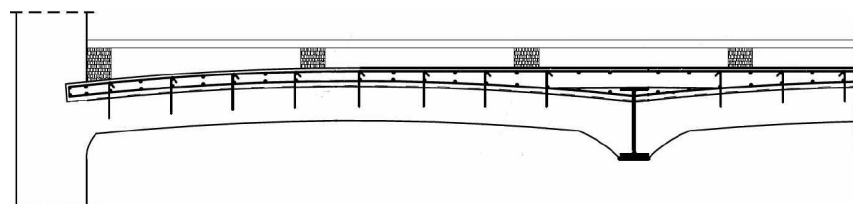
Fot. 3. Sklepienie nad parterem w Pałacu Królewskim w Łobzowie (Kraków) po remoncie i wzmocnieniu siatką kompozytową
Photo 3. Vault over the ground floor of the Royal Palace in Łobzów (Cracow) after renovation and reinforcement with composite mesh

Konstrukcje murowe budynków wymagają stężeń, które mogłyby równoważyć poziome siły rozciągające pochodzące od nierównomiernego osiadania fundamentów lub rozporu od sklepień [7]. W nowych budynkach taką



Rys. 1. Przy ruchomym obciążeniu pęknięcia mogą pojawić się w różnych rejonach zarówno na dolnej (a), jak i górnej (b) powierzchni sklepienia

Fig. 1. When load of vault is movable cracks may occur in different zones of the upper (a) and lower (b) surface



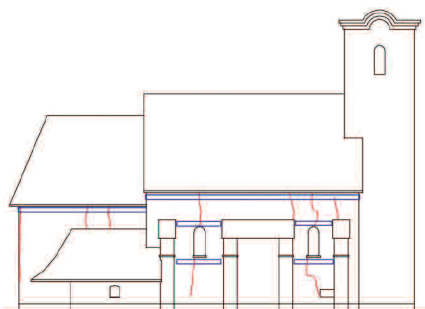
Rys. 2. Szkoła w Gorlicach. Pierwotny projekt wzmocnienia sklepień odcinkowych z wykorzystaniem żelbetowej płyty grubości 7 cm skotwionej ze sklepieniem

Fig. 2. School in Gorlice. Original project of reinforcing the segmental barrel vault with 7 cm thick reinforced concrete slab anchored to the vault

rolę spełniają wieńce stropów żelbetowych. Natomiast drewniane stropy belkowe nie są wystarczającym stężeniem usztywniającym mury budynku. Ta wada konstrukcyjna ujawnia się w postaci pęknięć pasów międzyokiennych. Przed laty oryginalne drewniane stropy belkowe, istniejące w historycznych budynkach, były powszechnie wymieniane w ramach remontów na stalowo-żelbetowe stropy typu WPS, a następnie na stropy zespolone z płytą na blasze trapezowej. Takie konstrukcje zapewniały odpowiednie usztywnienie budynku. Obecnie drewniane stropy są usuwane tylko w ostateczności, tzn. w sytuacji, gdy stare belki są całkowicie zniszczone przez korozję. Drewniane belki mogą być wzmocnione do uzyskania założonej normowej nośności stropów, a wymaganą odporność ogniową można uzyskać przez zastosowanie lekkich warstw materiałów ogniochronnych. W przypadku, gdy pozwalają na to względy konserwatorskie, dotyczące ochrony elementów zdobiących elewacje, wieńce stężające murewaną konstrukcję budynku umieszczane są po stronie zewnętrznej ścian. Dawniej były to stalowe kształowniki ukryte w wykutych poziomych bruzdach [2]. Obecnie jest możliwe wykonanie takich wieńców z pasów siatki kompozytowej naklejonej na zewnętrznej powierzchni ścian i ukrytych w grubości tynku. Nie naruszają one struktury ceglano-muru.

Konstrukcje sklepień i wspierające je wysokie ściany historycznych budynków sakralnych ulegają uszkodzeniu na skutek niedostatecznej sztywności i nośności elementów, których zadaniem jest równoważenie sił rozporu od sklepień. **Barokowy kościół parafialny w Łapszach Wyżnych na Spiszu** został wmurowany z lokalnego kamienia łamanego. Na ścianach i sklepieniu występują liczne pęknięcia z tendencją do narastania, co jest spowodowane złyimi warunkami posadowienia fundamentów, siłami rozporu od sklepienia oraz wibracjami docierającymi od strony ruchliwej drogi wyposażonej w próg zwalniający usytuowany niedaleko od kościoła. Zaprojektowano m.in. otoczenie ścian opaską z siatki kompozytowej z włóknem PBO naklejoną wzdłuż ko-

rony muru oraz scalenie pęknięć za pomocą iniekcji i pasów tej samej siatki klejonych poprzecznie do linii przebiegu pęknięć (rysunek 3).



Rys. 3. Kościół w Łapszach Wyżnych. Zabezpieczenie ścian za pomocą pasów siatki kompozytowej

Fig. 3. Church in Lapse Wyżne. Reinforcement of walls with strips of composite mesh

Podjęmowane były próby wzmocnienia drewnianych belek za pomocą materiałów kompozytowych. W ramach projektu badawczego realizowanego na Politechnice Krakowskiej wykonano nieniszczące badania wytrzymałościowe drewnianych elementów zabytkowych więźb dachowych baraków więziarskich obozu zagłady Auschwitz II – Birkenau [5]. Oryginalne krokwie wymontowane z konstrukcji dachu były traktowane jako zabytkowe. Z tego powodu próby zginania prowadzono nie do zniszczenia, lecz tylko do uzyskania ugięcia belek o wartości $1/150$ rozpiętości $L = 4,00$ m (26,7 mm). W drugiej fazie badań wykonano wzmocnienie belek, wklejając taśmę z włókien węglowych po stronie rozciąganej w wyfrezowanych szczelinach 6×25 mm. Podobne wzmocnienie wykonano na nowej belce porównawczej o przekroju 100×100 mm. Wzmocnienie spowodowało, że stare belki osiągały założone ugięcie dopuszczalne przy sile większej o średnio 5%. Natomiast zniszczenie wzmocnionej belki porównawczej nastąpiło przy ugięciu wynoszącym 175 mm, które znacznie przekraczało normową wartość dopuszczalną. Stwierdzono, że belka uległa zniszczeniu bez oderwania taśmy węglowej od drewna. Skuteczność naprawy elementów drewnianych zależy w dużym stopniu od istniejących uszkodzeń korozyjnych drewna oraz możliwości konserwatorskich uzupełnienia przekrojów dodatkowymi

elementami. Natomiast uzyskany efekt dużego ugięcia w momencie zniszczenia wzmocnionej belki świadczy o istotnym wpływie wzmocnień kompozytowych na bezpieczeństwo konstrukcji drewnianej.

Podsumowanie

Przedstawione przykłady zastosowania systemów kompozytowych w budynkach historycznych potwierdzają ich zgodność z obowiązującą doktryną konserwatorską i skuteczność wykonanych napraw. Wykonanie projektu powinny poprzedzić badania historyczne obiektu oraz szczegółowe pomiary geometrii i odkształceń elementów konstrukcyjnych. Niezbędna jest też ocena czynników mających wpływ na stateczność budynku, przede wszystkim posadowienia i warunków gruntowo-wodnych oraz wyeliminowanie szkodliwych czynników.

Literatura

- [1] Bertolesi Elisa, Milani Gabriele, Ghiassi Bahman. 2019. „Advanced finite element modeling of textile-reinforced mortar strengthened masonry”. *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures. From Theory to Application, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*: 713 – 743. DOI: 10.1016/B978-0-08-102439-3.00020-8.
- [2] Borusiewicz Władysław. 1985. *Konserwacja zabytków budownictwa murewanego*. Warszawa. Arkady. ISBN 83-213-3240-4.
- [3] German Janusz. 2000. „Materiały kompozytowe w budownictwie”. *Kalejdoskop Budowlany*, (6): 14 – 17. Warszawa. PWP.
- [4] Kadłuczka Andrzej. 2018. *Ochrona dziedzictwa architektury i urbanistyki. Doktryny, teoria, praktyka*. Cracow University of Technology. ISBN 978-83-7242-987-2.
- [5] Karczmarczyk Stanisław, Roman Paruch, Stanisław Kańka, Tomasz Tracz. 2016. „Badania nieniszczące i wzmocnianie zabytkowych drewnianych więźb dachowych”. *Materiały Budowlane* 526 (6): 212 – 214. DOI 10.15199/33.2016.06.89.
- [6] Mantegazza Giovanni, Sabina Valentino. 2008. „Instructions for the Planning of Static Consolidation. Interventions through the use of Fibre Reinforced Cementitious Matrix – FRCM”. Direzione Tecnica Ruredil, Milan.
- [7] Valluzzi Maria Rosa, Matteo Salvalaggio, Luca Sbrogiò. 2019. „Repair and conservation of masonry structures”. *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures. From Theory to Application, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*: 201 – 235. DOI 10.1016/B978-0-08-102439-3.00006-3
- [8] www.ruregold.it.
- [9] www.sika.pl.

Przyjęto do druku: 06.04.2021 r.