

Joanna Hydzik, Piotr Czaja**

NOWE MATERIAŁY W OCHRONIE I KONSERWACJI ZABYTKÓW

1. Wprowadzenie

Obiekty zabytkowe, zarówno te naziemne jak i podziemne, ulegają ciągłej degradacji na skutek naturalnego starzenia się komponentów, szkód budowlanych, zmian warunków terenowych i hydrogeologicznych oraz zmian funkcji obiektu i niekorzystnego wpływu skażonego środowiska. W związku z tym coraz więcej zespołów zabytkowych oraz budynków i budowli wymaga kosztownych i skomplikowanych zabiegów konserwatorskich. Ponadto szczególnego rozwiązania wymaga zapewnienie odpowiednich warunków cieplnych. Na pierwszym miejscu należy postawić zachowanie pierwotnego wystroju i wyglądu, a dopiero na drugim spełnianie warunków cieplnych.

Do podstawowych kategorii wyrobów i systemów naprawczych można zaliczyć materiały stosowane do napraw przywracających integralność i trwałość konstrukcji oraz przywracających geometrię powierzchni lub estetyczny wygląd. Poza tym można wyróżnić materiały do ochrony powierzchni, do iniekcji oraz kotwienia, a także do poprawy warunków cieplnych konstrukcji. W artykule zamieszczone zostały tylko charakterystyki wybranych materiałów nowej generacji. Są to nowoczesne kompozyty betonowe, pianki poliuretanowe o wysokich własnościach cieplnych, a także kompozyty do poprawy statyki i wzmocnień konstrukcji.

2. Nowoczesne kompozyty betonowe

Beton jest to mieszanina cementu, wody, kruszywa drobnego i grubego oraz dodatków mineralnych i domieszek chemicznych.

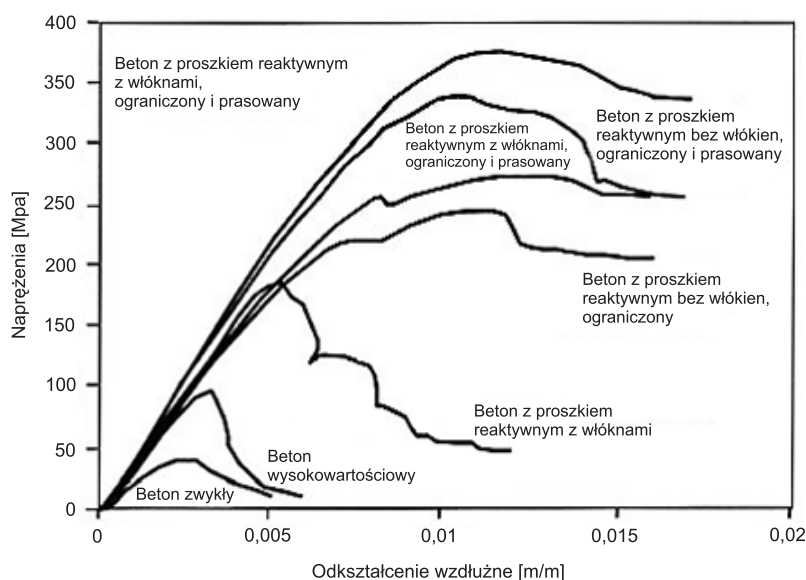
* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Zastosowanie różnorodnych domieszek chemicznych pozwoliło na opracowanie zupełnie nowych typów mieszanek betonowych o niespotykanych dotychczas własnościach, do których można zaliczyć [1, 3, 4, 11]:

- **Betony samozagęszczalne** (SCC — *Self-Compacting Concrete*) są obecnie najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną technologii betonu. Szczególne właściwości tych betonów to przede wszystkim: homogenizacja, prawie całkowite wyprowadzenie powietrza z mieszanki betonowej podczas upłynnienia, zdolność do szczelnego wypełnienia formy oraz dokładnego otulenia zbrojenia. O samozagęszczalności mieszanki betonowej świadczy wysoka płynność wraz z wysoką odpornością na segregację. Dużą płynność mieszanki betonowej można uzyskać przez zwiększenie udziału piasku w stosie okruszowym (punkt piaskowy > 40%), obniżenie wskaźnika wodno-cementowego poniżej 0,5 oraz zastosowaniu mikrowypełniaczy i efektywnych superplastyfikatorów.
- **Betony wysokowartościowe** BWW (*High-Performance Concrete* — HPC) oraz **betony bardzowysokowartościowe** BBWW (*Very High-Performance Concrete* — VHPC) obejmują betony cementowe na kruszywach naturalnych z odpowiednimi dodatkami i domieszkami. Są to betony, które zostały udoskonalone poprzez dodanie niezbędnych dodatków mineralnych w postaci mikrokrzemionki lub popiołów lotnych oraz domieszek chemicznych. Charakteryzują się przede wszystkim dobrą urabialnością świeżej mieszanki betonowej, utrzymywaną co najmniej przez godzinę oraz wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, wynoszącą nie mniej niż 60 MPa. Klasa wytrzymałość BWW zawiera się w granicach 60÷100 MPa, natomiast BBWW 100÷150 MPa. Betony te odznaczają się bardzo szczelną i jednorodną strukturą oraz wysoką trwałością. Trwałość betonu związana jest głównie z ruchem wody i obecnością wilgoci. Zależy ona przede wszystkim od takich cech fizycznych, jak nasiąkliwość, wodoszczelność, mrozoodporność, a także adsorpcja kapilarna.
- **Betony ultrawysokowartościowe** BUWW (*Ultra High-Performance Concrete* — UHPC) mają klasę wytrzymałości powyżej 150 MPa. Jest to grupa najnowocześniejszych kompozytów betonowych, do których można zaliczyć **fibrobetony wysokowartościowe** FBWW (*Fibre-Reinforced High-Performance Concrete* — FRHPC). Betony te charakteryzują się wysoką wytrzymałością i dużą trwałością. Utworzony kompozyt składa się z kruchej matrycy oraz ciągliwego uzbrojenia powstałego z losowo rozproszonych włókien stalowych, polipropylenowych lub węglowych, których podstawowym celem jest kontrolowanie powstawania i propagacji rys. Przedstawicielami tej grupy betonów są również kompozyty SIFCON (*Slurry Infiltrated Fibre Concrete*), których osnowę stanowią siatki stalowe wypełnione mikrowłóknami stalowymi zalane zaczynem o dużej płynności oraz SIMCON (*Slurry Infiltrated Mat Concrete*), których osnowę stanowią maty z cienkich wielokierunkowo ułożonych włókien.
- **Betony z proszków reaktywnych** (*Reactive Powder Concrete* — RPC), których matryca składa się z drobnego piasku, pyłów krzemionkowych i dużej zawartości cementu (około 700 kg/m³). Jako uzbrojenie stosowane są mikrowłókna stalowe o długości 12 mm, a do poprawy mikrostruktury stwardniałego zaczynu prowadzona jest obróbka

cieplno-wilgotnościowa. Wylimitowanie kruszywa grubego i zastąpienie go piaskiem prowadzi do zmniejszenia wielkości mikropęknięć, co z kolei determinuje wzrost wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Na rysunku 1 porównano charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe betonów zwykłych oraz wysokowytrzymałych.

- **Lekkie betony kruszywowe** stosowane są głównie jako materiały izolacyjne lub izolacyjno-konstrukcyjne. Do najistotniejszych właściwości tych betonów należy ich niska gęstość objętościowa (do 2000 kg/m³), co determinuje lepszą izolacyjność termiczną i akustyczną oraz umożliwia obniżenie ciężaru własnego konstrukcji 25÷30%. Właściwości wytrzymałościowe betonów lekkich uwarunkowane są rodzajem zastosowanego kruszywa, którego szeroki wachlarz dostępny jest na rynku. Do najpopularniejszych należy keramzyt ze spiekanych surowców ilastych i pollytag otrzymywany z popiołów lotnych. Zastosowanie materiałów wiążących nowej generacji oraz dodatków i domieszek, sprawia, że możliwe jest uzyskanie betonów lekkich samozagęszczalnych i natryskowych [10], a także o wytrzymałości na ściskanie rzędu nawet 100 MPa [2].

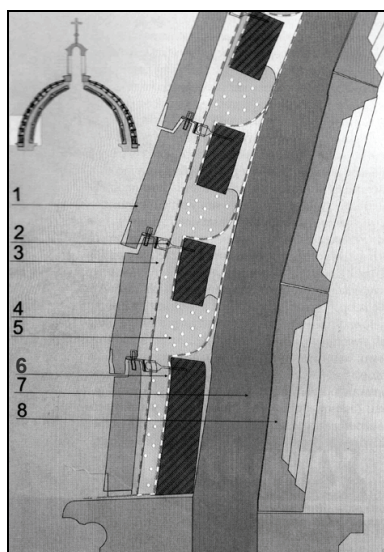


Rys. 1. Porównanie zależności $\sigma - \epsilon$ dla różnych betonów [1]

3. Sztywne pianki poliuretanowe

Poprawa izolacyjności przegród w obiektach zabytkowych, poza zredukowaniem strat energii cieplnej, ma istotne znaczenie dla ograniczania zjawiska kondensacji pary wodnej, szczególnie na sklepieniach pokrytych polichromią. Sposób docieplenia wełną mineralną tylko częściowo rozwiązuje poruszany problem, ponieważ materiał o otwartych porach, ułatwia stały odpływ ciepła i zbieranie się wewnątrz wody kondensacyjnej. Wełna mineral-

na, pokryta nawet folią paroprzepuszczalną nie chroni stropów ani sklepień przed wodą opadową oraz topniejącym się śniegiem. Po kilku nieudanych próbach zastosowania styropianu i wełny mineralnej, użyto sztywną piankę poliuretanową. Rozwiązanie ocieplenia sklepienia kopuły w zabytkowym kościele przedstawia rysunek 2. Projekt ten oprócz bardzo dobrych właściwości termoizolacyjnych, zapewnia pełne wyprowadzenie wilgoci ze sklepień, np. kościołów, jak i rozproszenie kondensującej się pary wodnej w ocieplanych warstwach.



Rys. 2. Zabezpieczenie termiczne i przeciwwilgociowe w kopule kaplicy zabytkowego kościoła [9]:
 1 — płyty z wapienia, 2 — kotew, 3 — szczelina wentylacyjna, 4 — folia paroprzepuszczalna,
 5 — system termoizolacyjny, 6 — hydroizolacja, 7 — płaszcz kopuły, 8 — elementy dekoracyjne

Najważniejszą cechą piankowego materiału termoizolacyjnego jest wartość jego współczynnika przewodzenia ciepła, która jest prawie dwa razy niższa od styropianu czy wełny i może wynosić nawet $\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$. Kolejną istotną wartością jest wysoka paroprzepuszczalność przy prawie zerowej nasiąkliwości. Współczynnik oporu dyfuzyjnego pianki poliuretanowej, który jest bardzo ważny przy „oddychaniu” murów, jest porównywalny ze współczynnikiem zaprawy cementowo-wapiennej bądź betonu żwirowego, a jego wartość jest niższa 4–10 razy od wartości współczynnika dyfuzyjnego płyt styropianowych. Piankę poliuretanową, która jest materiałem samogasnącym (klasa palności B–2) o porach zamkniętych, można nanosić metodą wylewania albo natrysku. Lico takiej izolacji jest na tyle szczelne, że metodą natrysku wykonuje się uszczelnienia, a nawet całe pokrycia dachowe. Na uwagę zasługuje również jej wysoka wytrzymałość mechaniczna przy niskim ciężarze własnym. Gęstość pianki, którą dobiera się w zależności od potrzeb, waha się w granicach $22 \div 100 \text{ kg/m}^3$. Przegrody termiczne wykonane ze sztywnej pianki poliuretanowej cechują się stabilnością wymiarów oraz właściwościami fizykomechanicznymi, zwłaszcza przy braku bezpośredniego wpływu promieniowania słonecznego [9, 8].

4. Taśmy i maty wzmocniane włóknem węglowym

Jedną z metod poprawy statyki i wzmocnienia zabytkowych budowli jest zastosowanie przyklejanego zbrojenia zewnętrznego w postaci taśm, mat lub tkanin z kompozytów włóknistych (FRP — *Fibre Reinforcement Polymer*). W szeroko rozumianym budownictwie stosowane są cztery typy włókien polimerowych różniących się między sobą własnościami. Cechy poszczególnych włókien przedstawione zostały w tabeli 1.

TABELA 1
Właściwości włókien z poszczególnych polimerów [7]

Rodzaje włókien (polimeru)	Moduł sprężystości [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Węglowe	240÷ 640	2500÷4000
Aramidowe	124	3000÷4000
Szklane	65÷70	1700÷3000
Poliestrowe	12÷15	2000÷3000
Stal	210	250÷550

Włókna poliestrowe ze względu na niski moduł sprężystości i wysoką wytrzymałość na rozciąganie znalazły zastosowanie głównie w budownictwie drogowym, przy wzmocnieniu skarp, wykopów i osuwisk. Natomiast włókna aramidowe, charakteryzujące się bardzo wysoką ciągliwością, stosowane są przy wzmocnianiu elementów zagrożonych wybuchami lub skupionymi obciążeniami dynamicznymi (wzmocnienie słupów przy wiaduktach zagrożonych uderzeniami samochodów itp.). Wadą tych ostatnich jest utrudniona obróbka mechaniczna (np. cięcie w poprzek włókien) [5].

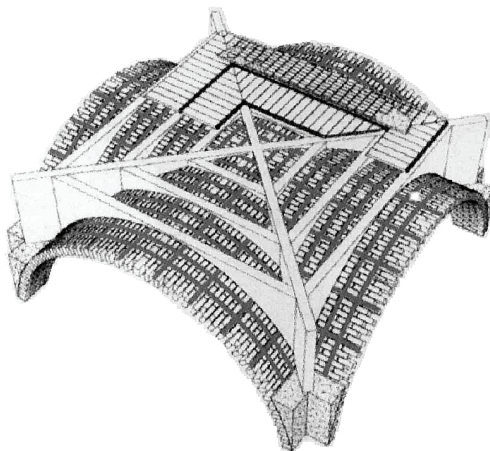
Przy konserwacji obiektów zabytkowych szczególne zastosowanie znalazły systemy oparte na włóknie szklanym (tkaniny) i węglowym (maty i taśmy). Metoda przyklejanych materiałów kompozytowych z omawianych włókien służy do zwiększania nośności konstrukcji betonowych, murowanych, stalowych lub drewnianych (rys. 3 i 4).

Podstawowym zadaniem tkanin z włókna szklanego jest zwiększenie odkształcalności konstrukcji. Dzięki jego niskiemu współczynnikowi sprężystości oraz odpowiedniemu ukształtowaniu samej tkaniny (włókna przeplatają się nawzajem oraz mają kształt falisty) uzyskuje się duże odkształcenia bez gwałtownego narastania sił i naprężeń przekazywanych na podłoże. W związku z tym tkaniny te mogą być stosowane w obiektach zabytkowych, gdzie najczęściej ze względu na niską wytrzymałość podłoża na oderwanie (min 0,2 MPa) nie ma możliwości użycia mat z włókna węglowego (minimalna wytrzymałość na odrywanie 1,0 MPa). Włókna szklane charakteryzują się przeciętnymi właściwościami, zarówno modułu sprężystości, jak i wytrzymałości na rozciąganie. Obecnie stosuje się dwa rodzaje włókien

szklanych, tzw. szkło E nieodporne na działanie środowiska zasadowego (ważne przy wzmacnianiu obiektów murowanych ze spoiną wapienną) oraz szkło AR odporne na działanie środowiska zasadowego. Dodatkową zaletą tkanin jest możliwość różnicowania ilości włókien w poszczególnych kierunkach.



Rys. 3. Zastosowanie materiałów na bazie włókien węglowych do wzmocnień wybranych elementów konstrukcyjnych [6]



Rys. 4. Przykład rozmieszczenia taśm z włókna węglowego w celu wzmocnienia zabytkowego sklepienia [5]

Materiały na bazie włókna węglowego stosowane są wszędzie tam, gdzie zależy na podniesieniu nośności elementu konstrukcyjnego przy jednoczesnym ograniczeniu jego odkształceń. Włókno węglowe cechuje się bardzo dużą odpornością zmęczeniową, odpornością na zjawiska relaksacji, a także bardzo niską rozszerzalnością cieplną, oraz wysoką odpornością chemiczną. Maty i taśmy z włókna węglowego składają się z około 70% włókien węglowych ułożonych w jednym kierunku, resztę natomiast stanowi osnowa epoksydowa.

Stosowane są one przede wszystkim przy wzmacnianiu elementów zginanych. Bardzo ważną rolę przy tego rodzaju włóknach odgrywa odpowiednia nośność podłoża. Jest to związane z możliwością przenoszenia dużych obciążeń, gdyż ich szerokość wynosi zaledwie 20÷140 mm. W przypadku elementów z zabytkowymi detalami zdobniczymi stosowane są specjalne taśmy o szerokości 10 mm i grubości zaledwie 1,2 mm, które umieszczane są w wcześniej naciętej wąskiej szczelinie łatwej do zamaskowania.

Zalety wzmocnienia konstrukcji kompozytami włóknistymi są niewątpliwie widoczne. Do najważniejszych można zaliczyć:

- bardzo mały ciężar — brak dodatkowych obciążeń;
- możliwość dostosowanie kształtu wzmocnienia do naprawianego elementu;
- szybki czas wykonania naprawy;
- bardzo mała grubość warstwy naprawczej — możliwość łatwego zamaskowania;
- możliwość wykonywania prac bez użycia ciężkiego sprzętu;
- możliwość klejenia do wszystkich materiałów budowlanych oraz aplikacji w różnych warunkach;
- odporność na korozję i zjawisko starzenia się.

5. Podsumowanie

Przedstawione materiały i systemy naprawczo-ochronne nie wyczerpują całości bardzo obszernego tematu. Ciągły rozwój inżynierii materiałowej oraz chemii budowlanej sprawia, że na rynku pojawiają się coraz to nowsze produkty, o coraz bardziej doskonałych właściwościach. Zachowanie dobrej współpracy pomiędzy elementem naprawianym a materiałem naprawczym pozwala za pomocą nowoczesnych materiałów przeprowadzić kompleksową renowację, bez zbędnych ingerencji w zabytkowy charakter i wygląd obiektu.

LITERATURA

- [1] *Aitcin P. C.*: Trwały wysokowartościowy beton — sztuka i wiedza. Konferencja „Beton na progu nowego milenium”. Kraków, Polski Cement, 2000
- [2] *Domagala L.*: Problemy projektowania i wykonawstwa betonów lekkich z kruszyw spiekanych. Przegląd Budowlany, nr 12, 2005
- [3] *Giergiczny Z., Malolepszy J., Szwabowska J., Śliwiński J.*: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Opole, Góraźdże Cement, Heidelberg Cement Group, 2002
- [4] *Kaszyńska M.*: BWW: możliwości, cechy, zastosowania. XVII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”, Ustroń, 2002
- [5] *Makarewicz M.*: Zastosowanie wzmacniających kompozytów włóknistych (FRP). Renowacje i Zabytki, nr 4, 2202
- [6] Materiały informacyjne firmy Sika
- [7] Materiały informacyjne firmy S&P Ceveler Reinforcement Company AG
- [8] Materiały informacyjne firmy Termopian
- [9] *Polaczek J.*: Problematyka ocieplenia zabytkowych sklepień. Renowacje i Zabytki, nr 2, 2002
- [10] *Szwabowski J.*: Lekki kruszywowy beton natryskowy. Cement Wapno Beton, nr 1, 1996
- [11] *Westfal L.*: Beton, czyli sztuczny kamień (cz. III). Problemy wyboru materiałów do naprawy betonu. Renowacje i Zabytki, nr 4, 2003