

Fot. 1. Wizualizacja Muzeum Sztuki Nowoczesnej - fasada (Źródło: <https://artmuseum.pl/pl/muzeum/nowy-budynek>)



Zastosowanie białego betonu przy wykonaniu Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie

1. Wstęp

W 2014 roku podpisano umowę na wykonanie projektu nowego budynku Muzeum Sztuki Nowoczesnej z amerykańską pracownią architektoniczną Thomas Phifer and Partners. Już na etapie przygotowania koncepcji założono, że cały budynek zostanie wykonany z białego betonu. Po dobrych doświadczeniach pracowni z użyciem białego betonu w Stanach Zjednoczonych nastąpił moment przeniesienia doświadczeń na polski rynek, co nie okazało się łatwe. Receptury białego betonu wykorzystywane w Stanach Zjednoczonych zawierały oprócz białego cementu również żużel. Rozważano, czy takie rozwiązanie jest możliwe do zastosowania w Polsce. Ze względów technologicznych byłoby to korzystne, ponieważ ograniczyłoby skurcz i zmniejszyło maksymalne temperatury w ustroju. W momencie tworzenia dokumentacji jednak żaden z producentów betonu nie używał żużla, więc należałoby wygospodarować dwa silosy na wytwórni (na biały cement i żużel), co stworzyłoby dodatkowy problem lub niepotrzebnie zwiększyłoby koszty betonu. Już samo zastosowanie w przedsięwzięciu białego cementu powodowało, że nie

wszyscy producenci mieszanki betonowej zdecydowali się na ofertowanie. Ostatecznie założono następujące wymagania:

- biały cement CEM I / CEM II/A-LL (100% zawartości cementu w mieszance)
- stosunek w/c dla elewacji 0,40 – 0,44; dla pozostałych elementów w/c nie może przekroczyć 0,5
- proszkowy/płynny biały barwnik tytanowy (zawartość tlenu tytanu w barwniku – minimum 50%; 3-7% zawartości cementu) – dotyczy każdego rodzaju mieszanki
- biały piasek (intencją projektową jest jasnobiała powierzchnia betonu architektonicznego)
- kruszywo: kategoria F1 zgodnie z PN-EN 12620
- kruszywa łamane, nie dopuszcza się stosowania kruszywa żwirowego
- wszystkie kruszywa powinny być białe, ostateczny kolor powinien być ustalony z architektem i konsultantem do spraw betonu architektonicznego na podstawie mockupu
- minimalna zawartość spoiwa: 380 kg.

W celu określenia jakości wykonania posłużono się przykładem katolickiego kościoła w Saint-Jacques-

Fot. 2. Deskowanie z powłoką plastikową przygotowane do montażu



Fot. 3. Elementy próbne





-de-la-Lande we Francji zaprojektowanego przez Álvaro Siza Vieira (z wyłączeniem dzwonnicy), zaś w celu określenia koloru – budynku Fondazione Prada zaprojektowanego przez OMA – Rem Koolhaas, Chris van Duijn, Federico Pompignol.

Jakość betonu doprecyzowano przez określenie kategorii betonu architektonicznego jako BA3 zgodnie z: *Beton architektoniczny. Wytoczne techniczne*.

Szczególną uwagę zwrócono na poszycie deskowania. Ze względu na ograniczenie falowania krawędzi blatów (co jest powszechne w przypadku zastosowania sklejki z powierzchnią z żywicy fenolowej) projekt założył użycie sklejki brzozonej o grubości 21 mm z poszyciem plastikowym. Dodatkową cechą takiego rozwiązania jest uzyskanie powierzchni lekko chropowatej bez potysku, która często występuje przy standardowym rodzaju sklejki.

Po początkowych kłopotach związanych z przetargiem i koniecznością uzyskania dodatkowego finansowania projektu 28 lutego 2019 roku podpisano umowę z firmą Warbud SA, która niezwłocznie przystąpiła do opracowywania mieszanki betonowej spełniającej wymagania specyfikacji.

Proces zatwierdzania materiałów został podzielony na pięć etapów. W pierwszej kolejności wykonawca był zobowiązany do przedstawienia próbek wszystkich materiałów, jakie planuje zastosować do wykonania mieszanki betonowej oraz deskowania. Ocenie podlegała nie tylko jakość, ale również ewentualny wpływ poszczególnych materiałów na kolor betonu. Po wstępnej akceptacji wykonawcą przygotował próbki betonu o wymiarach 60x60x5 cm. Kolejnymi krokami było przygotowanie próbek o wymiarach 200x200x8 cm oraz wykonanie fragmentów konstrukcji (słupa, ściany, stropu). Dopiero wówczas przystąpiono do wykonania mockupów – słupa zewnętrznego, fragmen-



Od lewej:
Fot. 4. Mockup oznaczeń graficznych
Fot. 5. Mockup schodów
Fot. 6. Mockup elementów wewnętrznych – testy środków hydrofobizujących

Fot. 7. Test wpływu środków hydrofobizujących na wygląd elewacji podczas opadów

tów konstrukcji wewnętrznej, elewacji i schodów, próbki oznaczeń graficznych przy użyciu matrycy. Po wykonaniu mockupów przystąpiono do opracowywania technologii uzupełnienia otworów po ściągach (projekt zakładał zlicowanie powierzchni i całkowite ukrycie miejsc po stożkach). Biorąc pod uwagę ilość betonu architektonicznego, a także zdając sobie sprawę, że może dojść do wystą-

Fot. 9. Test patchingu narożnika

Fot. 8. Test patchingu wnęki instalacyjnej





fot. Archiwum autorów

Fot. 10. Porównanie kolorystyki piasków (z lewej biały, z prawej wiślany)

pienia miejscowych wad, rozpoczęto również prace nad opracowaniem technologii napraw wszystkich potencjalnych uszkodzeń.

2. Kruszywo

Analiza dostępności kruszywa na terenie Polski wykazała, że zastosowanie kruszywa grubego stanowi problem ze względu na wysokie wytrzymałości (część elementów wewnętrznych zaprojektowano z klasy C45/55) oraz stopień mrozoodporności F150 dla elewacji. Z tego powodu zrezygnowano z zastosowania np. kruszywa marmurowego, jakie użyto przy wykonaniu wieży Fondazione Prada. Po przeprowadzeniu testów i ocenie wizualnej wykonanych próbek zdecydowano o użyciu gryszy granitowego. Odmienne miała się sytuacja z piaskiem. Ze względu na występowanie na terenie Polski piasku szklarskiego w kilku kopalniach, m.in. Smardzewice i Osiecznica, podjęto decyzję o użyciu mieszanki piasków z tych dwóch wybranych kopalni. Beton wykonany na bazie takiej mieszanki piasków uzyskał zdecydowanie jaśniejszą barwę niż beton na piasku wiślanym, co zostało potwierdzone przez wykonanie elementów próbnymi wykonanych przy użyciu tego materiału do dalszych prac nad mieszanką betonową, w trakcie oględzin przedstawiciele biura architektonicznego, w tym Thomasa Phiëra.

3. Cement

Do testów betonu architektonicznego użyto trzech cementów spełniających wymagania wskazane w specyfikacji (zob. tabela 1).

Po analizie parametrów deklarowanych przez producentów oraz w wyniku rekomendacji firmy CRH zrezygnowano z cementu CEM I 52,5 R Rohoznik ze względu na krótki czas początku wiązania, co mogłoby skutkować problemami związanymi

z czasem transportu i założonym czasem wbudowania.

Biorąc pod uwagę specyfikę konstrukcji (długie odcinki betonowania, mrozoodporność F150 dla elewacji, wbudowywanie w różnych warunkach temperaturowych, w tym przy +30 stopniach) zdecydowano się na przeprowadzenie szeregu testów. Program badawczy przewidywał weryfikację: czasu utrzymania konsystencji przy +30°C, skurcz swobodny, mrozoodporność F100 (badanie wykonano ze względu na zastosowanie nietypowych materiałów i ryzyko nieosiągnięcia F150) i F150. Badanie czasu utrzymania konsystencji przy temperaturze otoczenia i temperaturze mieszanki dochodzących do +30°C wykonywano w Centrum Technologicznym Chryso, jako dostawcy domieszek. Po 120 minutach dla obu cementów nie stwierdzono spadku konsystencji większego niż 30 mm, co było zgodne z założeniami.

Badanie skurczu w warunkach swobody odkształceń metodą Amslera wykonano w Laboratorium Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Badanie było prowadzone zarówno dla obu wskazanych cementów przy zastosowaniu 5% i 7% białego barwnika. Badanie nie wykazało znaczących różnic dla wszystkich przebadanych składów. Wykonane badania mrozoodporności dla wszystkich składów betonu potwierdziły uzyskanie zarówno stopnia F100, jak i F150.

W związku z osiągnięciem zbliżonych parametrów mieszanki i betonu dla obu wytypowanych cementów zdecydowano o przeprowadzeniu oceny kolorystyki próbek przez przedstawiciela biura architektonicznego Thomas Phiëra and Partners. W tym celu wykonano próbki o formacie 60x60x5 cm przy użyciu obu cementów w połączeniu z białymi barwnikami pochodzącymi od trzech różnych producentów przy dozowaniu 5 i 7%. W trakcie oceny architekt nie znał składów poszczególnych próbek. Po weryfikacji składów okazało się, że zostały wskazane próbki zawierające 7% białego barwnika firmy ZWUKSO i ATLAS oraz w obu przypadkach cement CEM II/A-LL 52.5N z cementowni Rohoznik.

4. Barwnik

Dalszy proces weryfikacji składu betonu polegał na wykonaniu mockupów zarówno dla elementów wewnętrznych, jak i elementów zewnętrznych

Fot. 11. Deskowanie stropu zabezpieczone matami



fot. Archiwum autorów

Tab. 1. Parametry białych cementów (źródło: <http://pl.crh-white.com>, <https://www.aalborgwhite.com/products/aalborg-whiter-cem-i-525-r-sr-5-made-denmark>)

Parametry	CEM I 52,5 R Aalborg	CEM I 52,5 R Rohoznik	CEM II/A-LL 52,5 N Rohoznik
Klinkier [%]	95-100	95-100	80-94
Wapień [%]	-	-	6-20
Składniki drugorzędne [%]	0-5	0-5	0-5
SO3 [%]	2,1	2,8	2,8
Odształcenie objętościowe [mm]	1,1	0 – 1,5	0 – 1,5
Wstępne wiązanie [min]	135	>90	>100
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	44,0	>35,0	>32,0
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	72,0	>59,0	>57,0
Stopień białości Ry [%]	93	>84,5	>84,0

(obudowy słupów parteru i elewacji). Mając na uwadze problemy z możliwością oceny kolorystyki przez biuro architektoniczne wynikających z pandemii postanowiono przeprowadzić badanie fotospektrometrem i porównać wyniki CIELAB dla obu barwników. Po analizie wyników stwierdzono, że nieznacznie bardziej pasujące do koncepcji architektonicznej wyniki (barwa z większą zawartością bieli i mniejszą żółtego) uzyskano na betonie wykonanym przy użyciu barwnika ATLAS COLOR SW-080, dlatego podjęto decyzję o jego zastosowaniu przy realizacji projektu.

5. Realizacja

Wykonywanie betonów z białego cementu, a szczególnie betonu białego, wiąże się z szeregiem obustrzeń, jakie należy spełnić, aby uzyskana powierzchnia była biała zarówno po rozszalowaniu, jak i po przeprowadzeniu innych prac. Należało podjąć działania zmierzające do zminimalizowania ryzyka związanego z zabrudzeniem zarówno deskowania do momentu betonowania, jak również wykonanych już elementów.

Dużym problemem okazało się uniknięcie osiadczenia rdzy ze zbrojenia na deskowaniu stropów. Po przeprowadzeniu szeregu prób zdecydowano się na zastosowanie mat układanych na przygotowanym deskowaniu. Maty chroniły deskowanie w trakcie procesu zbrojenia oraz zatrzymywały rdzę spływającą z prętów. Zabezpieczenie było usuwane bezpośrednio przed betonowaniem.

Wykonywanie elementów pionowych wymagało innego podejścia. Wszystkie elementy deskowania były chronione zarówno przed deszczem, jak i intensywnym nasłonecznieniem. Po rozdeskowaniu ściany i słupy były wstępnie zabezpieczane środkiem hydrofobizującym (ostateczne zabezpieczenie zostało przewidziane na etapie prac wykończeniowych), a następnie dolna część elementów została osłonięta płytami. Żeby ograniczyć spływanie rdzy z wystających prętów zbrojeniowych, zabezpieczano je folią.

Oddzielną kwestią było prowadzenie prac w okresie obniżonych temperatur. Pierwsze doświadczenia pokazały, że niska temperatura prowadzi do zwiększenia ilości pęcherzy powietrza na powierzchni betonu. W celu wyeliminowania tego



fot. Archiwum autorów

zjawiska zdecydowano się na wprowadzenie procedury polegającej na osłonięciu całego deskowania i zastosowaniu nagrzewu. Betonowanie rozpoczynano dopiero wtedy, gdy wewnątrz deskowania (na wysokości minimum 1 metra od wierzchu deskowania) odnotowano temperaturę minimum +12°C.

Fot. 12. Strop i belka wykonane z użyciem maty (z lewej) oraz strop bez zabezpieczenia (z prawej)



fot. Archiwum autorów

Fot. 13. Zabezpieczone słupy poziome 0



Fot. 14. Zabezpieczenie zbrojenia nad poziomem 0

fot. Archiwum autorów

Fot. 15. Wizualizacja Muzeum Sztuki Nowoczesnej – główna klatka schodowa (Źródło: <https://artmuseum.pl/pl/muzeum-nowy-budynek>)



foto: Archiwum autorów

Fot. 16. Fragment parteru (zdjęcie z prawej)



foto: Archiwum autorów

6. Podsumowanie

W przypadku nowego budynku Muzeum Sztuki Nowoczesnej proces wykonania białego betonu nie ograniczył się jedynie do zastosowania białego cementu. Założenie uzyskania tak jasnego odcienia bieli, jaki przewidzieli architekci, wiązała się z koniecznością użycia również białego piasku (w trakcie rozpoczynania prac nad projektem nie było w Polsce piasku posiadającego odpowiednie badania) oraz białego barwnika. Tak skomplikowana konstrukcja, o tak dużej zawartości białego betonu (cała elewacja oraz wszystkie widoczne ściany i stropy) jest realizowana po raz pierwszy w Polsce. Z tego względu wydaje się, że to właśnie rodzaj cementu stał się decydującym czynnikiem kierującym wszystkie prace. To rodzaj cementu narzucił szereg działań, począwszy od maksymalnego w/c

przez czas i rodzaj pielęgnacji, aż po wielkość betonowań. Wybór cementu CEM II/A-LL podyktowany był kolorem betonu, jaki udało się uzyskać, jednak w konsekwencji został wybrany cement o mniejszym śladzie węglowym, co w dzisiejszych czasach wydaje się być nie bez znaczenia. Biorąc pod uwagę, że nawet w prefabrykacji można zaobserwować zmianę tendencji do odchodzenia od stosowania cementów czystych portlandzkich na rzecz cementu portlandzkiego mieszanego, to w przypadku żelbetu wybór taki wydaje się być wręcz naturalny.

Krzysztof Kuniczuk
Technologia Betonów Architektonicznych
i Specjalistycznych
Karolina Rułka
Danucem Slovensko a.s.

Fot. 17. Widok konstrukcji zadaszania



foto: Archiwum autorów

Literatura

1. „Sichtbeton. Exposed Concrete“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin 2004, 2008.
2. F. Huber, „Sichtbeton“, Zement + Beton Handels und Werbe GmbH, Österreichische Zement Industrie, Österreichische Betonvereines, Wien 1995.
3. ÖNORM B 2211, „Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten – Werkvertragsnorm“, Austrian Standards plus GmbH, Wien 1998.
4. Christian Hofstadler, „Schularbeiten. Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation“, Gratz 2008.
5. ACI 303R-04, „Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete“, American Concrete Institute, USA 2004.
6. „Visual Concrete – Design and Production“, British Cement Association, GB1998.
7. „Specification and Production of Concrete Surface Finishes“, Cement & Concrete Association of New Zealand, 1989.
8. AS 3610-1995, „Formwork for Concrete“, Standards, Australia 1995.
9. CCAA T57, „Guide to Off-form Concrete Finishes“, Australia 2006.
10. K. Kuniczuk, „Beton architektoniczny. Wytyczne techniczne“, Polski Cement, Kraków 2010.
11. <http://pl.crh-white.com> na dzień 14.06.2021.
12. <https://www.aalborgwhite.com/products/aalborg-whiter-cem-i-525-r-sr-5-made-denmark> na dzień 14.06.2021.
13. K. Rułka, K. Kuniczuk, „Beton architektoniczny z białym cementem – problem czy rozwiązanie?, Dni Betonu 2018.