

Paweł PONETA¹
Mostostal Warszawa S.A.

UPRZEMYSŁOWIENIE PROCESU PREFABRYKACJI KOMPOZYTOWYCH ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY DROGOWEJ

STRESZCZENIE

Jednym z największych wyzwań stojących przed inżynierami budownictwa lądowego i wodnego jest projektowanie oraz wykonywanie konstrukcji będących w stanie spełniać wymagania nowoczesnej architektury, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów związanych z ich projektowaniem, realizacją i utrzymaniem. Rozwiązaniem tego problemu mogą być materiały kompozytowe typu FRP. Do niedawna ich zastosowanie w branży budowlanej ograniczało się do wzmacniania istniejących już struktur. W ostatnich latach poczyniono próby wykorzystania ponadprzeciętnych właściwości tych materiałów w całkowicie nowych konstrukcjach, m.in. w elementach infrastruktury drogowej. Rozwojem tych ostatnich, zajmuje się konsorcjum realizujące projekt Trans-IND – projekt badawczy finansowany przez Komisję Europejską (www.trans-ind.eu). Niniejszy referat przedstawia rezultaty osiągnięte na przestrzeni pierwszych dwóch lat funkcjonowania tego czteroletniego projektu.

SŁOWA KLUCZOWE: kompozyty, CFRP, GFRP, żywica epoksydowa

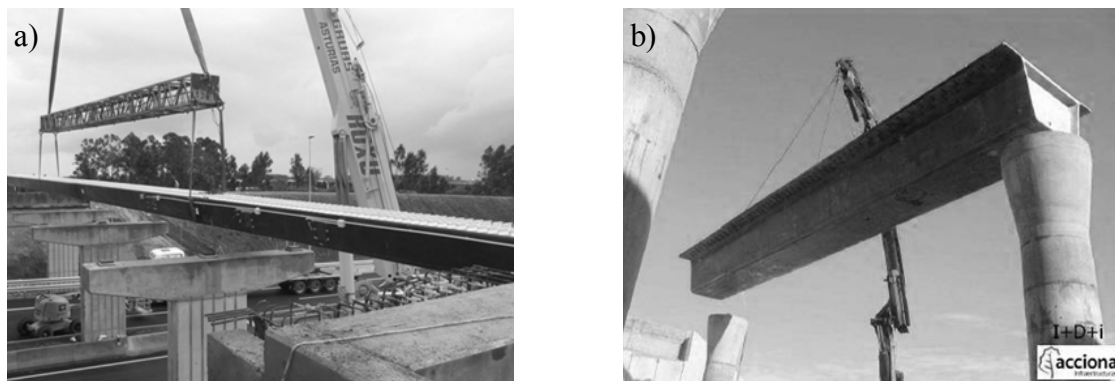
1. WSTĘP

Trans-IND jest czteroletnim projektem badawczym finansowanym przez Komisję Europejską, prowadzonym w ramach siódmego programu ramowego (FP7), którego celem jest opracowanie nowego, uprzemysłowionego procesu budowlanego nakierowanego na projektowanie, realizację i utrzymanie głównych elementów konstrukcji infrastruktury drogowej wykonanych z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej (ang. Fibre Reinforced Polymers - FRP). W obszarze badań konsorcjum realizującego projekt Trans-IND znajdują się zarówno konstrukcje (mosty drogowe, kładki dla pieszych), jak również elementy wyposażenia (m.in. bariery energochłonne oraz akustyczne).

Idea projektu zrodziła się z doświadczeń zdobytych, przez firmę Acciona Infraestructuras (koordynatora technicznego projektu Trans-IND), przy realizacji dwóch wiaduktów autostradowych, zaprojektowanych i wykonanych z materiałów kompozytowych typu FRP. Pierwszym z nich, a zarazem pierwszym tego typu obiektem w Hiszpanii, jest 4-przędowy wiadukt, o długości 46m, wybudowany w 2004 roku, w ciągu Autostrady Kantabryjskiej [1].

¹ p.poneta@mostostal.waw.pl

Konstrukcje wiaduktu stanowią dźwigary główne, wykonane z kompozytu węglowego, połączone ze sobą za pomocą żelbetowej płyty pomostowej (rys.1). W drugim obiekcie, wybudowanym w Madrycie, w ciągu autostrady M-111, zastosowano kompozytowe dźwigary skrzynkowe oraz kompozytowe, tracone deskowanie żelbetowej płyty pomostowej (rys. 1). Ten trzyprzęsłowy wiadukt, o całkowitej długości przęsła wynoszącej 34m powstał w 2008 roku [2].



Rys. 1. a) budowa pierwszego kompozytowego wiaduktu w Hiszpanii (2004); b) montaż kompozytowego przęsła wiaduktu w ciągu autostrady M-111, w Madrycie (2008); źródło: Acciona Infraestructuras.

Efekty uzyskane w wyniku pierwszych doświadczeń potwierdziły możliwość zaprojektowania i wykonania mostu drogowego przy użyciu materiałów kompozytowych typu FRP. Obydwie realizacje opierały się na ręcznej metodzie produkcji głównych elementów wiaduktów (dźwigarów głównych, elementów płyty pomostowej). Do budowy elementów kompozytowych wykorzystano tzw. pre-preg (skrót od ang. pre-impregnated). Jest to wstępnie przesączona tkanina z włókien szklanych lub węglowych, przechowywana, aż do momentu wbudowania, w obniżonej temperaturze (-18°C). Materiał ten układa się w specjalnie przygotowanej formie, gdzie w późniejszym czasie poddawany jest procesowi mechanicznej konsolidacji oraz obróbce termicznej. Rozwiązanie to okazało się być mało konkurencyjnym cenowo w stosunku do tradycyjnych materiałów budowlanych takich jak beton czy stal. Główną tego przyczyną jest pracochłonny, ręczny proces produkcji.

Dzięki skrupulatnej analizie ekonomicznej uwzględniającemu koszt każdej, pojedynczej czynności niezbędnej do realizacji obu obiektów m.in. kosztów siły roboczej, materiałów, energii, transportu, montażu oraz przyszłych kosztów takich jak eksploatacji i konserwacji wywnioskowano, że automatyzacja procesów pozwoliłaby osiągnąć poziom konkurencyjnymi w stosunku do tradycyjnych rozwiązań, a nawet je przewyższyć. Przeprowadzone analizy posłużyły jako baza do opracowania koncepcji projektu Trans-IND: „Uprzemysłowienie procesu budowy infrastruktury transportowej wykonanej z kompozytów polimerowych”. Spodziewane rezultaty projektu pozwolą na wprowadzenie, istotnych dla branży, innowacyjnych rozwiązań w zakresie infrastruktury drogowej, które pozostaną przy tym konkurencyjne cenowo. W niniejszej pracy przedstawiono niektóre wyniki uzyskane po dwóch latach realizacji czteroletniego projektu badawczo-rozwojowego.

2. SKŁAD KONSORCJUM I CELE PROJEKTU

2.1. Konsorcjum projektu

Konsorcjum, które pracuje nad rozwojem projektu zainicjowanego w czerwcu 2009 roku, składa się z 20 parterów, m.in. z uniwersytetów oraz europejskich centrów badawczych, które wspierają przedsiębiorstwa działające w branży materiałów kompozytowych oraz szeroko pojętej inżynierii budowlanej.

Koordinacja projektem została powierzona przedsiębiorstwu Mostostal Warszawa. Pozostali partnerzy to: Acciona Infraestructuras – hiszpański lider w sektorze budownictwa; Umeco Structural Materials – światowy lider w sektorze innowacyjnych materiałów kompozytowych; ASM Centrum Badań i Analiz Rynku – centrum badawcze specjalizujące się w badaniach branży budowlanej; D’Appolonia – włoska spółka inżynierska, aktywna w sektorze badań nad materiałami kompozytowymi; Tecnalia – hiszpańskie centrum badawczo- rozwojowe; Fraunhofer-IPA – jeden z głównych instytutów badawczych w Niemczech; Huntsman Advanced Materials – lider w zakresie produkcji żywic; ITIA-CNR – włoski instytut technologii przemysłowych i automatyzacji; IVW – niemiecki instytut badawczy materiałów kompozytowych; Mikrosam – producent maszyn dla przemysłu kompozytowego; Semantic Systems – spółka high-tech specjalizująca się w rozwiązaniach IT; TNO – największy, holenderski instytut badawczy; Politechnika z Drezna – uczelnia posiadająca doświadczenie w rozwiązaniach bazujących na technologii RFID; Politechnika regionu Marche – specjalizująca się w badaniach nieniszczących; Van Wees – lider w produkcji maszyn włókienniczych; ZRMK – słoweńska spółka inżynierska; Solintel – hiszpańska spółka high-tech specjalizująca się w doradztwie z zakresu inżynierii; Atos Origin – międzynarodowy lider w branży IT.

2.2. Cele projektu

Głównym celem projektu jest uprzemysłowienie procesu produkcji elementów kompozytowych FRP, wykorzystywanych do realizacji konstrukcji inżynierskich infrastruktury drogowej, uwzględniając ich cały cykl życia od opracowania koncepcji poprzez projektowanie, produkcję, logistykę, montaż na placu budowy, konserwację i utrzymanie, aż po rozbiórkę. Jednym z zadań obecnie realizowanych jest opracowanie platformy projektowej, która ma za zadanie integrować i usprawniać cały proces budowy infrastruktury drogowej.

Skupiono się na opracowaniu konstrukcji przęseł kompozytowych o rozpiętości od 10 do 40 m oraz zaprojektowaniu systemów barier energochłonnych i akustycznych. Dodatkowo opracowano technologie produkcji tych elementów. Będą one częścią sporządzanego katalogu rozwiązań projektowych dla infrastruktury drogowej.

Do dalszych celów projektu należy wybudowanie i przetestowanie kompozytowego obiektu mostowego wykorzystującego opracowane technologie oraz opracowanie zaleceń normatywnych w zakresie projektowania tego typu konstrukcji.

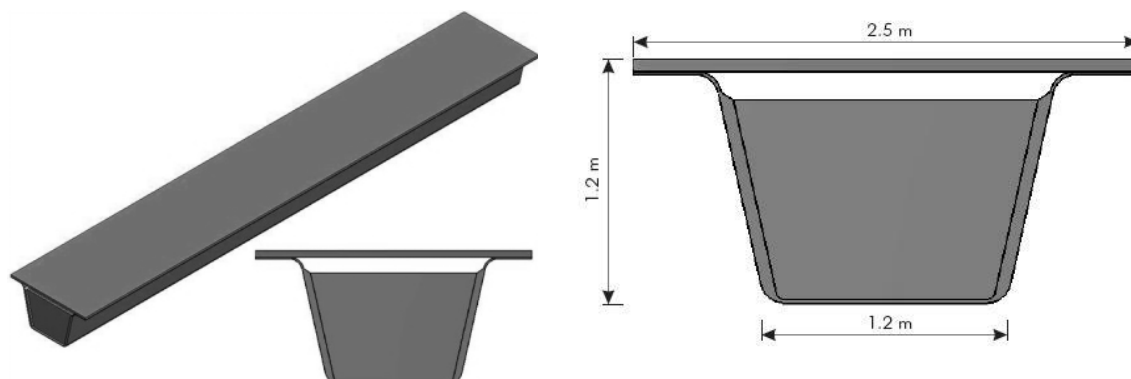
3. KOMPOZYTOWE PRZĘSŁA MOSTOWE

3.1. Dźwigary główne

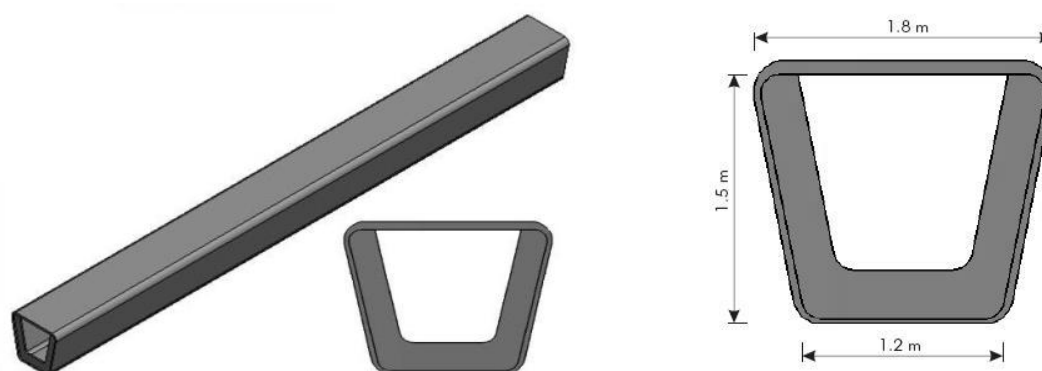
W ramach projektu zaprojektowano trzy różne rozwiązania dla dźwigarów głównych (rys. 2 i 3). Konstrukcja każdego z nich została zoptymalizowana pod kątem jak najlepszego wykorzystania materiałów (włókna węglowego i szklanego oraz żywicy epoksydowej). Analizy przeprowadzono dla różnych rozpiętości oraz klasy obciążeń. W zależności od konkretnego przypadku projektowego możliwe jest zastosowanie również materiałów przekładkowych w postaci pianek PVC.

Uwzględniając kształt zaprojektowanych elementów zaprojektowano i wykonano także specjalne maszyny, które są przeznaczone do automatycznej produkcji dźwigarów. Opracowano technologię łączącą proces ciągłego nawijania (ang. filamen winding) oraz automatycznego układania taśm kompozytowych (ang. automated tape placement). W podobny sposób jest budowany przez firmę Boeing kadłub samolotu 787 Dreamliner. Proces polega na naprzemiennym zautomatyzowanym nawijaniu i układaniu przesyconych żywica epoksydową włókien na obracającej się formie. Możliwe jest także zastosowanie przesyconego wcześniej

materiału (pre-preg), natomiast najbardziej ekonomiczne jest zastosowanie przesykania suchego włókna (tzw. online impregnation). Maszyna sterowana jest programem, który układa włókna zgodnie ze zoptymalizowanym wcześniej projektem. Kolejnym etapem procesu jest wygrzewanie elementu w temperaturze 80°C oraz usunięcie demontowanej formy. Maszyna stworzona, w ramach projektu, do produkcji dźwigarów jest unikatowa na skalę światową i pozwala na produkcję elementów o długości do 40 metrów.



Rys. 2 Koncepcja dźwigara zoptymalizowana dla rozpiętości od 10 do 15 m.



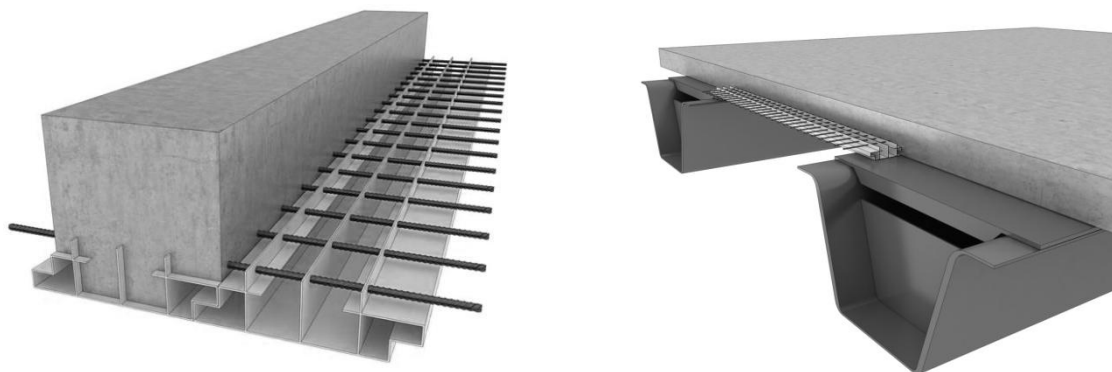
Rys. 3. Koncepcja dźwigara zoptymalizowana dla rozpiętości od 15 do 30 m.

Obecnie prowadzone są testy maszyny oraz badania materiałowe elementów w niej uzyskanych. Uzyskany stopień zbrojenia kompozytów wynosi od 55 do 60% i jest dużo wyższy niż dla elementów wykonanych ręcznie (40%). Ograniczenie zużycia żywicy, przy jednoczesnym zachowaniu przesykania włókien, poprawia pracę kompozytu, zmniejsza jego wagę oraz koszt produkcji i transportu.

3.2. Panele pomostu

Integralną częścią koncepcji kompozytowego przęsła jest płyta pomostowa. Opracowano uniwersalne rozwiązanie tego elementu, pasujące do wszystkich sporządzonych koncepcji dźwigarów głównych. Rozwiązanie to opiera się na połączeniu kompozytu z włókien szklanych o osnowie polimerowej (GFRP) będącego jednocześnie elementem nośnym i deskowanie traconym, z betonem oraz zbrojeniem stalowym (rys. 4).

Część kompozytową pomostu zaprojektowano, w technologii przeciągania (ang. pultrusion), przy uwzględnieniu różnych warunków podparcia oraz sposobów pracy konstrukcji (przęsło, wspornik). Przeanalizowano stan montażowy oraz użytkowy. Do obliczeń przyjęto właściwości kompozytowych materiałów uzyskanych w maszynie pultruzyjnej firmy Acciona Infraestructuras (tab. 1).

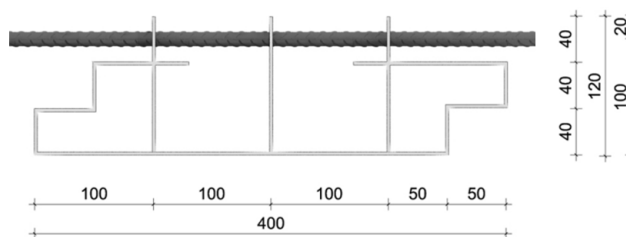


Rys. 4. Koncepcja zintegrowanego pomostu kompozytowego

Tablica 1. Właściwości laminatu GFRP wykonanego przez firmę Acciona Infraestructuras.

Gęstość	2000kg/m ³	
Moduł Younga	$E_x = 26,4$ GPa	$E_y = 10,83$ GPa
Moduł Kirchhoffa	$G_{xy} = 2,515$ GPa	
Współczynnik Poissona	$\nu_{xy} = 0,250$	
Zawartość włókna w przekroju	$V_f = 0,6$	
Wytrzymałość na rozciąganie	$F_{m,x} = 261,3$ MPa	$F_{m,y} = 29,9$ MPa
Wytrzymałość na ściskanie	$F_{c,x} = -276$ MPa	$F_{c,y} = -113,5$ MPa
Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie xy	$S = 44$ MPa	

Zaprojektowano element kompozytowy jako przekrój otwarty – zamknięty zapewniający odpowiednie, pełne zespolenie kompozytu z nadbetonem wykorzystując typu perfbond wykorzystywane w konstrukcjach stalowo – betonowych. Płytę pomostową zaprojektowano dla dźwigarów o maksymalnym rozstawie (w świetle) wynoszącym 3,5m oraz dla wsporników o wysięgu do 1,7m. Aby zapewnić odpowiednie wykorzystanie przekroju zaprojektowano przekroje kompozytowe o różnych grubościach ścianki (od 3 do 6mm). Na poniższym rysunku przedstawiono przykładowe wymiary kompozytowego elementu pomostu.

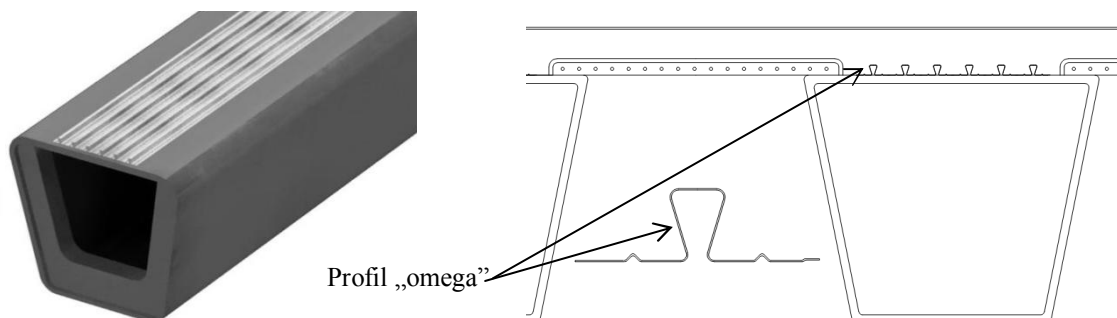


Rys. 5. Przykładowy, kompozytowy element płyty pomostowej

3.3. Połączenia

W ramach projektu Trans-IND stworzono kilka koncepcji połączeń, które w jego dalszej fazie zostaną wykonane i przebadane. Jedną z nich jest hybrydowe połączenie pomiędzy kompozytowym, trapezoidalnym dźwigarem oraz betonową płytą pomostową (rys. 6). Jako elementy łączące zostały zastosowane zarówno łączniki mechaniczne (stalowe elementy w postaci odwróconych profili typu omega, zakotwione w górnej półce belki) jak i odpowiedni klej (na bazie żywicy epoksydowej). Po zamocowaniu profili są przez nie przeprowadzane pręty stalowe (w kierunku równoległym do osi dźwigara) gwarantujące odpowiedni stopień zespolenia pomiędzy belką oraz płytą pomostową. Obecnie (drugi kwartał 2012 roku) prowadzone są analizy

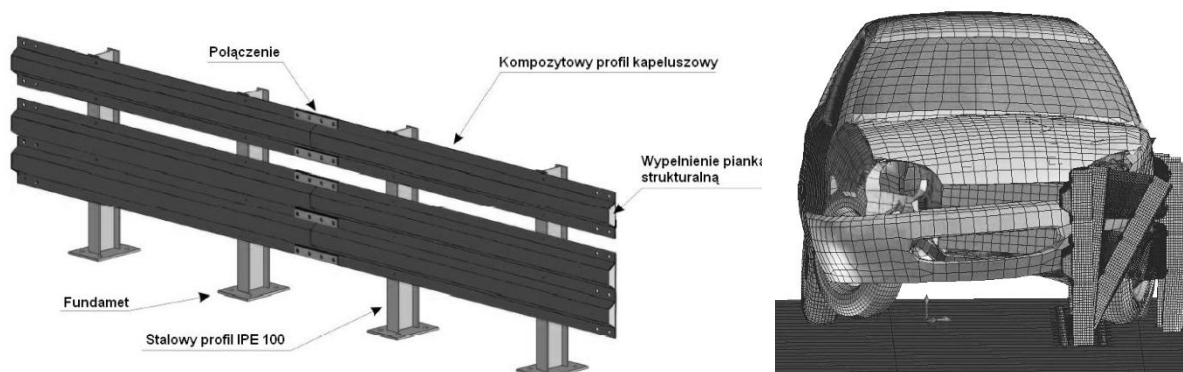
numeryczne mające na celu uszczegółowienie oraz zoptymalizowanie zaproponowanego połączenia.



Rys. 6. Koncepcja zespolenia konstrukcji dźwigara kompozytowego wraz z betonową płytą pomostu

4. KOMPOZYTOWE ELEMENTY BARIER OCHRONNYCH

Projekt wraz z analizą wytrzymałościową kompozytowo-stalowych barier ochronnych został wykonany przez spółkę D'Appolonia (rys. 7). Natomiast w instytucie IVW (Institut für Verbundwerkstoffe) opracowano ich technologię produkcji. Uwzględniono normy w zakresie bezpieczeństwa drogowego (m.in. EN 1317-2.) Do prowadzonych analiz zastosowano oprogramowanie PAM CRASH 2G umożliwiające wykorzystanie nieliniowych modeli zachowywanie się materiałów (zarówno stali i betonu jak i kompozytów FRP) pod obciążeniem dynamicznym jakim jest uderzenie samochodu.

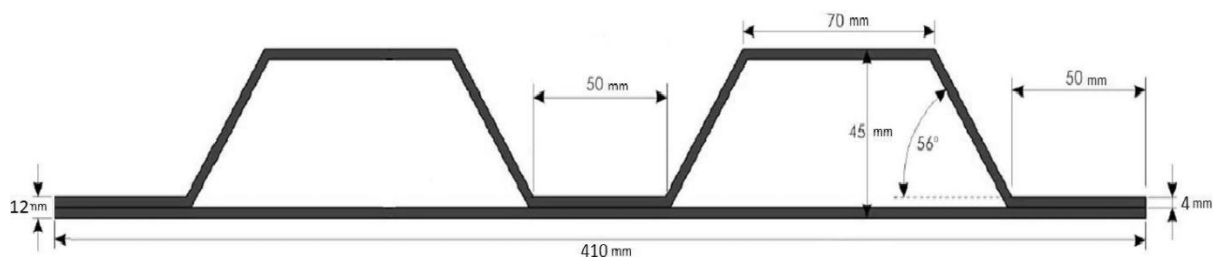


Rys. 7. Projekt koncepcji bariery energochłonnej. Obliczenia wykonane podczas projektowania bariery energochłonnej zgodnie z Normą Europejską EN 1317-2.

Bariery ochronne opracowane w ramach projektu Trans-IND składają się z:

- profili wykonanych z materiałów kompozytowych, rozmieszczonych wzdłużnie (rys. 8),
- wypełnienia w postaci pianki strukturalnej pozwalające na maksymalne pochłonięcie energii podczas zderzenia,
- stalowych łączników oraz profili podtrzymujących elementu rozmieszczone wzdłużnie,
- stalowych płyt łączących profile kompozytowe z fundamentami.

Ciekawym aspektem systemu barier jest metoda produkcji ich składowych elementów kompozytowych. Zamknięty profil kapeluszowy, z rdzeniem w postaci pianki strukturalnej, jest wykonany z kompozytu szklanego termoplastycznego (rys. 8). Tego typu materiały mogą być ze sobą łączone za pomocą spawania, co też jest wykorzystywane w produkcji barier. W zautomatyzowanym procesie spawania (ang. continous compession moulding) profil kapeluszowy wraz z rdzeniem piankowym zostaje zespolony termicznie z płaskim profilem.



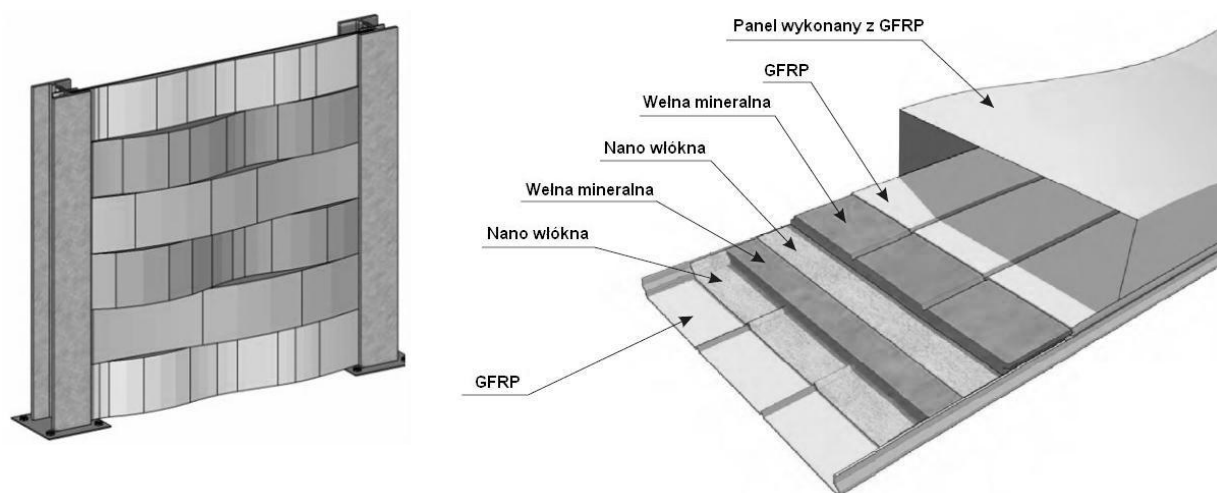
Rys. 8. Przekrój poprzeczny jednego z elementów kompozytowych systemu barier bezpieczeństwa.

Obecnie prowadzone są prace mające na celu weryfikację zarówno założeń projektowych jak i przeprowadzonych analiz teoretycznych. Równolegle są prowadzone prace nad ulepszeniem procesu produkcyjnego.

5. KOMPOZYTOWE PANELE EKRANÓW AKUSTYCZNYCH

W ramach realizowanego projektu firma Solintel z Hiszpanii opracowała trzy rodzaje kompozytowych barier akustycznych. Koncepcje te różnią się od siebie zarówno parametrami akustycznymi jak i walorami architektonicznymi:

- Bariery akustyczne zwykłe – składające się z kompozytowych paneli typu sandwich oraz konstrukcji wsporczej wykonanej z pultruzyjnych profili FRP.
- Bariery akustyczne z roślinnością – konstrukcja wsporcza przystosowane do zasadzenia roślin ozdobnych.
- Bariery akustyczne o zakrzywionych liniach – składające się z paneli typu sandwich wyposażonych w powłokę wykonaną z nano-włókien (rys. 9).



Rys. 9. Koncepcja bariery akustycznej.

Panele akustyczne wykonane są w technologii infuzji (ang. infusion resin). Natomiast jako ich konstrukcję wsporcze przyjęto typowe, dwuteowe profile kompozytowe wykonane metodą pultruzji.

Według dotychczasowych analiz, ocenia się, że większość obecnie wykorzystywane barier akustycznych będzie wymagała napraw w perspektywie 10 lat. Wynika to głównie z korozji oraz degradacji materiałów z jakich są wykonane.

Konsorcjum realizujące projekt Trans-IND próbuje rozwiązać ten problem poprzez stworzenie systemu barier akustycznych stworzonych z dużo bardziej odpornych chemicznie materiałów, jaki są kompozyty włókniste o osnowie polimerowej.

6. PODSUMOWANIE

Po dwóch latach trwania projektu Trans-IND przedstawiono uzyskane w nim, rezultaty odnoszące się do materiałów kompozytowych znajdujących zastosowanie przy konstruowaniu różnego typu elementów infrastruktury drogowej. Partnerzy tworzący konsorcjum, pochodzący z różnych krajów Europy, opracowali nowoczesny design głównych elementów mostowych, zaprojektowanych i wykonanych w całości przy zastosowaniu kompozytów typu FRP. W szczególności, prace konsorcjum koncentrowały się na następujących elementach:

- kompozytowych przęsłach mostowych (dźwigary główne, płyta pomostu),
- połączeniach,
- barierach energochłonnych,
- barierach dźwiękochłonnych (akustycznych).

Głównym celem przeprowadzanych analiz było zoptymalizowanie geometrii, tak aby w pełni wykorzystać konstrukcyjne właściwości materiałów kompozytowych przy jednoczesnym uwzględnieniu aspektów architektonicznych. Szczegóły techniczne odnoszące się do wszystkich opracowanych elementów zostały zamieszczone w katalogu Trans-IND, który jest opublikowany na stronie internetowej projektu (www.trans-ind.eu). Nowy, zindustrializowany system produkcji wypracowany dzięki projektowi, ma ambitny cel zrewolucjonizowania w przyszłości sposobów realizacji obiektów infrastrukturalnych dzięki zastosowaniu innowacyjnego materiału jakim są kompozyty FRP.

Piśmiennictwo:

- [1] Mires, J., Calvo, I., Pineda, L., Botello, F., Gomez, M., Primi, S. oraz Bonilla, J., "Pierwszy most w Hiszpanii zbudowany z polimerów wzmacnianych włóknami węglowymi", FRPRCS-8, Patras, Grecja, 2007, str. 596-597.
- [2] Gutierrez, E., Primi, S., Mires, J.M. and Calvo, I., "Badania konstrukcji mostu drogowego z włókien węglowych: zachowanie quasi-statyczne oraz krótkoterminowe", Journal of Bridge Engineering, 13, 3, 2008, str. 271-281.

INNOVATIVE PROCESSES FOR STRUCTURAL ELEMENTS IN COMPOSITE MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURES

Summary

Nowadays one of the biggest challenges for civil engineers is designing structures that are able to satisfy current architectural requirements and, at the same time, include design, construction and maintenance costs.

The solution lies in the world of composite materials. In the past these materials were indeed used in civil engineering almost only for strengthening existing structures. Over the past decades, structural applications for new constructions have been proposed to expand the application of composite materials. In this context, Trans-IND is a project funded by the European Commission within the Seventh Framework Programme (2007-2013) and led by a Consortium of twenty European partners including research centres, universities and industrial companies.