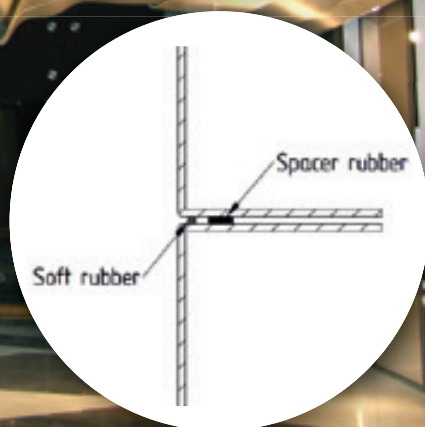
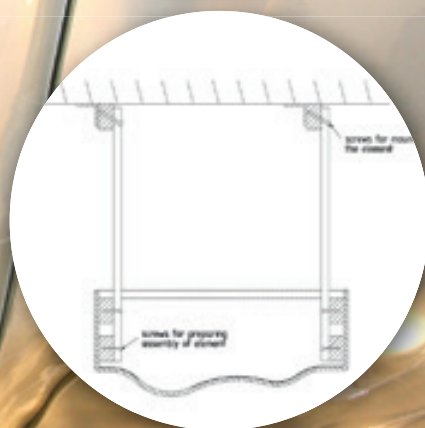
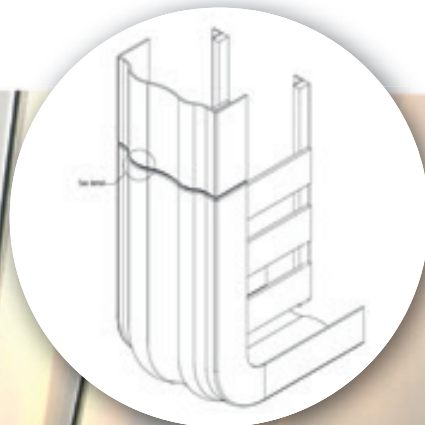
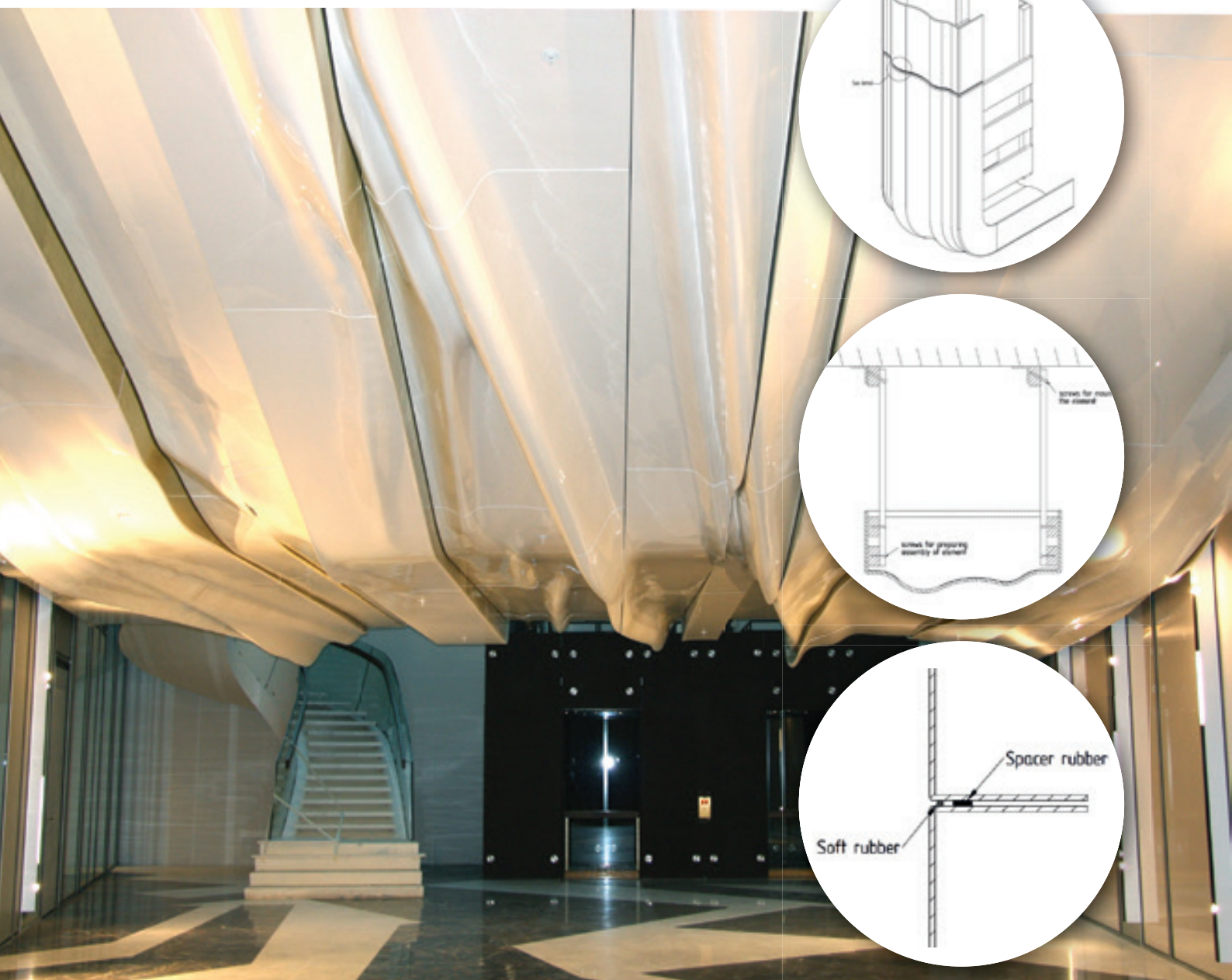




Przewodnik projektowy Konstrukcje A1 (Acrylic One)



Active Composite Technologies (ACT) opracowało kompozyty Acrylic One (A1). Od 20 lat materiał ten jest z powodzeniem stosowany w różnych produktach i aplikacjach. Poza dobrze znanymi zaletami kompozytów (swobodą kształtu, lekkością i wytrzymałością), A1 cechuje się odpornością na ogień i brakiem emisji dymu podczas pożaru. To sprawia, że jest on unikalny dla niektórych aplikacji.

ACT zleciło dr inż. Albertowi ten Busschen, dyrektorowi technicznemu Poly Products, stworzenie niniejszego przewodnika projektowego, aby mieć jasną metodologię projektowania produktów i weryfikować zachowania strukturalne, takie jak wytrzymałość i sztywność. Poly Products ma ponad 10-letnie doświadczenie w stosowaniu A1 w wielu produktach. Ponadto, firma ta posiada rozległą wiedzę na temat projektowania produktu oraz mechaniki, produkcji oraz instalacji kompozytów.

Poniższy raport został wstępnie sprawdzony przez inż. P.A. Joosse, który jest ekspertem w projektowaniu kompozytów i stosowaniu metodologii projektowania zgodnie z Eurokodami. Ponadto, jest on również jednym z autorów recenzowanej niedawno rekomendacji CUR 96 (2017) w zakresie projektowania strukturalnego kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem szklanym. Jesteśmy bardzo wdzięczni inż. P.A. Joosse za jego krytyczną recenzję.

Dr. Ir. Albert ten Busschen
Dyrektor Techniczny Poly Products
Werkendam, 20 December 2018

Tłumaczenie niniejszego przewodnika
z języka angielskiego wykonał:
Jakub Banaś – Alternative School

1. WSTĘP	4
2. APLIKACJE ORAZ ZAKRES	7
3. STRUKTURA LAMINATU ORAZ WYMAGANIA	8
4. WARTOŚCI PROJEKTOWE DLA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH	10
5. DANE PROJEKTOWE ORAZ METODY MONTAŻU	11
6. PROJEKTY REFERENCYJNE	14
7. PODSUMOWANIE METODY PROJEKTOWANIA DEDYKOWANEJ A1	24
8. ZAŁĄCZNIK	25
A. METODA PROJEKTOWANIA ZGODNIE Z EUROKODEM	25
B. PROGRAM TESTOWY ORAZ WYNIKI	27
C. BIBLIOGRAFIA	30



1. WSTĘP

Acrylic One (A1) to żywica dwuskładnikowa. Składa się ona z proszku na bazie siarczanu wapnia (CaSO₄) oraz cieczy na bazie akrylanu. Po zmieszaniu tych składników żywica może być przetwarzana w celu wytworzenia produktów. Żywica bazuje na wodzie i nie emituje lotnych związków organicznych (LZO). Zazwyczaj czas, w którym żywica jest w stanie ciekłym po wymieszaniu składników (żywołność) wynosi 20 minut, jednakże można go wydłużyć, stosując opóźniacz lub skrócić za pomocą przyspieszacza. Do mieszanki można również dodać dodatkowy wypełniacz (na przykład piasek). W stanie ciekłym żywicę można przetwarzać na różne sposoby: odlewać, nakładać na podłoże, natryskiwać oraz laminować wraz ze wzmocnieniem w formie, tworząc cienkościennie produkty o złożonych kształtach oraz niskiej wadze, szczególnie w połączeniu ze wzmocnieniem z włókna szklanego. Ze względu na krótki czas utwardzania, produkcja elementów jest również szybka. To z kolei sprawia, że proces produkcji jest wydajny.

Oprócz zalet A1, polegających na wytwarzaniu złożonych, lekkich produktów w wydajny sposób, bardzo ważną właściwością A1 jest jego zachowanie w reakcji na ogień. Zachowanie to zostało ocenione jako B-s1, d0 zgodnie z europejską normą EN 13501 (raport Efectis z 2006 r.), a nawet A2 - s1, d0, w przypadku gdy związek A1 jest wypełniony w 25% piaskiem (raport Efectis z 2017 r.). Jest to doskonała reakcja na warunki pożaru w porównaniu z produktami kompozytowymi opartymi na tradycyjnych żywicach syntetycznych lub w porównaniu z materiałami drewnopochodnymi.



Audytorium (Mahler, Amsterdam)



Tulipanowe ściany (IGZ, Amsterdam)

Zarówno dobra reakcja na ogień (A2), jak i niska emisja dymu podczas pożaru (s1) są korzystniejsze niż reakcja na podobne warunki, na przykład, laminatów na bazie poliestru. Dzięki temu produkty wykonane z A1 mogą być stosowane w projektach wewnątrz oraz w krytycznych aplikacjach elewacyjnych. Typowymi projektami wewnątrz, które były możliwe przy użyciu A1 pod względem ognioodporności, są „Tulipanowe Ściany” i „Audytorium”. Obydwa projekty zostały zrealizowane przez Poly Products.

Typowymi projektami zewnętrznymi, które były możliwe przy użyciu A1 pod względem ognioodporności, są elementy elewacji dla La Place w Amsterdamie oraz elementy elewacji budynku mieszkalnego w Nijmegen. Projekty te zostały zrealizowane przez Be-Concrete. W przypadku dla La Place w Amsterdamie 35 elementów elewacji zostało wyprodukowanych przy użyciu A1. Wybór A1 był związany z wymaganiami dotyczącymi odporności ogniowej w połączeniu ze swobodą kształtu i niewielką wagą.



Budynek mieszkalny umiejscowiony w Rentmeesterkwartier w Nijmegen musiał zostać odnowiony. Łącznie zainstalowano 1800 m² elementów elewacyjnych spełniających wymagania przeciwpożarowe. Wymogiem była również specjalna tekstura powierzchni. Ponadto, elementy miały mieć maksymalną masę 15 kg / m² i miały być łatwe w montażu. Doprowadziło to do wyboru A1, z którego wyprodukowano panele, które zostały przykręcone bezpośrednio do prowadnic na budynku. Wkręty były powlekane w tym samym kolorze co panel, a wgłębienie w powierzchni w miejscu wkręcenia spowodowało, że śruba była mniej widoczna.



W poniższej tabeli porównano laminaty na bazie A1 i kilku innych materiałów. Materiały te obejmują laminaty wzmocnione szkłem na bazie standardowej żywicy poliestrowej i żywicy poliestrowej o najwyższej możliwej odporności na działanie płomieni (FR), betonu poliestrowego i paneli drewnopochodnych.

Odporność na działanie ognia (EN 13501)	Reakcja na ogień	Dym	Krople
Laminat A1 (standardowy)	B	s1	d0
Laminat A1 (wypełniony w 25% piaskiem)	A2	s1	d0
Laminat poliestrowy (standardowy)	D	s3	d0
Laminat poliestrowy (ognioodporny)	B	s3	d0
PCW (okładziny ściennie)	B	s2	d0
Drewno sklejkowe (600 kg/m ³)	D	s2	d0
Drewno sklejkowe (600 kg/m ³ ognioodporny)	B	s1	d0
OSB (600 kg/m ³)	D	s2	d2
MDF (600 kg/m ³)	D	s2	d0
Płyta wiórowa (600 kg/m ³)	D	s2	d0
Płyta cementowa z wełny drzewnej (1000 kg/m ³)	B	s1	d0
Laminat wysokociśnieniowy (1350 kg/m ³)	D	s2	d0
Laminat wysokociśnieniowy (1350 kg/m ³ , ognioodporny)	B	s1	d0
Panele na bazie minerałów (1100 kg/m ³)	A2	s1	d0
Płyta z wełny mineralnej (100 kg/m ³)	A1	s1	d0
Beton (2400 kg/m ³)	A1	s1	d0



2. APLIKACJE ORAZ ZAKRES

A1 jest kompozytem, który wyróżnia się pod kątem reakcji na ogień. Jednak wydajność mechaniczna i odporność na wilgoć są na znacznie niższym poziomie niż w przypadku kompozytów na bazie poliestru wzmocnianego włóknem szklanym lub żywicy epoksydowej wzmocnionej szkłem. Aby to zilustrować, w tabeli poniższej porównano właściwości laminatu A1 wzmocnionego szkłem z laminatem poliestrowym wzmocnionym matą szklaną(UP) (wartości orientacyjne).

Wydajność mechaniczna	Wytrzymałość na zginanie (MOR*) w MPa	Moduł elastyczności (MOE*) w GPa
Laminat A1 (standardowy)	43	4
Laminat poliestrowy (mata szklana)	120	8
Laminat poliestrowy (tkanina szklana)	400	15
PCW (okładziny ścienne)	80	3
Drewno sklejkowe	40	10
OSB	20	3
MDF	15	2
Płyta wiórowa	15	3
Płyta cementowa z wełny drzewnej (1000 kg/m³)	12	7
Laminat wysokociśnieniowy	70	9
Panele na bazie minerałów (1100 kg/m³)	25	4
Płyta z wełny mineralnej (100 kg/m³)	-	-
Beton (2400 kg/m³)	2	30

*) Określone przez test na zginanie w kierunku z najwyższym stopniem zbrojenia.

Ponadto, kompozyty zbudowane z A1 wykazują znaczną absorpcję wody w warunkach cechujących się wysoką wilgotnością. W takich warunkach wydajność mechaniczna jest dodatkowo zmniejszana, a odkształcanie pęcznienia pod stałym obciążeniem jest przyspieszone. Jednak po ponownym wyschnięciu odzyskuje on oryginalne właściwości mechaniczne. Rozważania te prowadzą do następującego zakresu zastosowania kompozytu zbudowanego z A1:

Względnie suche aplikacje:

- brak stałego kontaktu z wilgocią
- brak stałej wysokiej wilgotności

Unikanie deformacji pęcznienia:

- brak stałego obciążenia

W celu ilościowego określenia terminu "brak stałego kontaktu z wilgocią / wysokiej wilgotności" należy uwzględnić skalę czasową, w której następuje absorpcja wilgoci przez A1. Gdy A1 ma kontakt z wilgocią (na przykład przez zanurzenie) lub z wysoką wilgotnością względną, proces wchłaniania wilgoci trwa od jednego do kilku tygodni, w zależności od grubości produktu A1. Dlatego ekspozycja A1 na wilgoć lub wysoką wilgotność powinna być ograniczona do maksymalnie kilku dni. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, dziedzinę zastosowania kompozytów zbudowanych z A1 można opisać w następujący sposób:

Zastosowania wewnętrzne:

- obszary suche
- (średnia wilgotność względna poniżej 75%)

Zastosowania zewnętrzne:

- aplikacje elewacyjne
- obiekty artystyczne (suche i wentylowane)

W odniesieniu do zastosowań zewnętrznych należy poczynić dodatkowe uwagi. W przypadku zastosowań elewacyjnych produkty A1 nie powinny stykać się bezpośrednio z podłożem, aby uniknąć wchłaniania wilgoci - produkty A1 w elewacji powinny pozostawać w pionowej odległości od podłoża wynoszącej minimalnie 20 mm. Generalnie w przypadku zastosowań zewnętrznych należy unikać poziomych płaszczyzn i miejsc, w których może zbierać się deszcz i śnieg.

W przypadku zastosowań zewnętrznych wytrzymałość A1 została zbadana przez TNO w 2008 r. oraz przez SHR Timber Research w 2016 r. W aplikacjach zewnętrznych zastosowanie specjalnego uszczelnacza dla A1 jest ważne dla utrzymania jakości powierzchni. Jednakże stwierdzono również, że uszczelniacz nie ma wpływu na właściwości strukturalne. Co więcej, możliwe jest zastosowanie powłoki anty-graffiti.

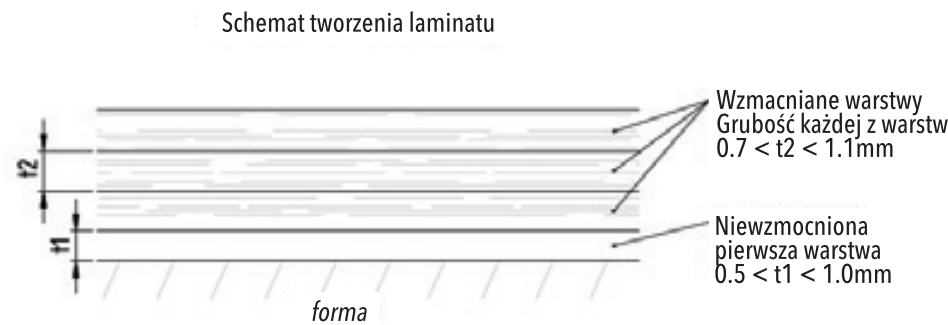
3. STRUKTURA LAMINATU ORAZ WYMAGANIA

Struktury A1 tworzy się poprzez laminowanie wzmocnienia razem z żywicą A1 w formie. W celu uniknięcia suchych plam na powierzchni produktu, laminowanie musi zostać rozpoczęte od niewzmocnianej warstwy żywicy o grubości od 0,5 do 1,5 mm (0,8 do 2,4 kg na m²). Grubość tej warstwy zależy od sposobu nanoszenia i zastosowania dodatków w żywicy, np. piasku.

Po krótkim czasie żelowania takiej warstwy (patrz instrukcje produkcji A1) razem z żywicą nakłada się warstwy wzmacniające. Dla każdej trójosiowej warstwy tkaniny szklanej o gramaturze 160 g / m² potrzebne jest około 1,0 do 1,7 kg żywicy na m². Każda taka

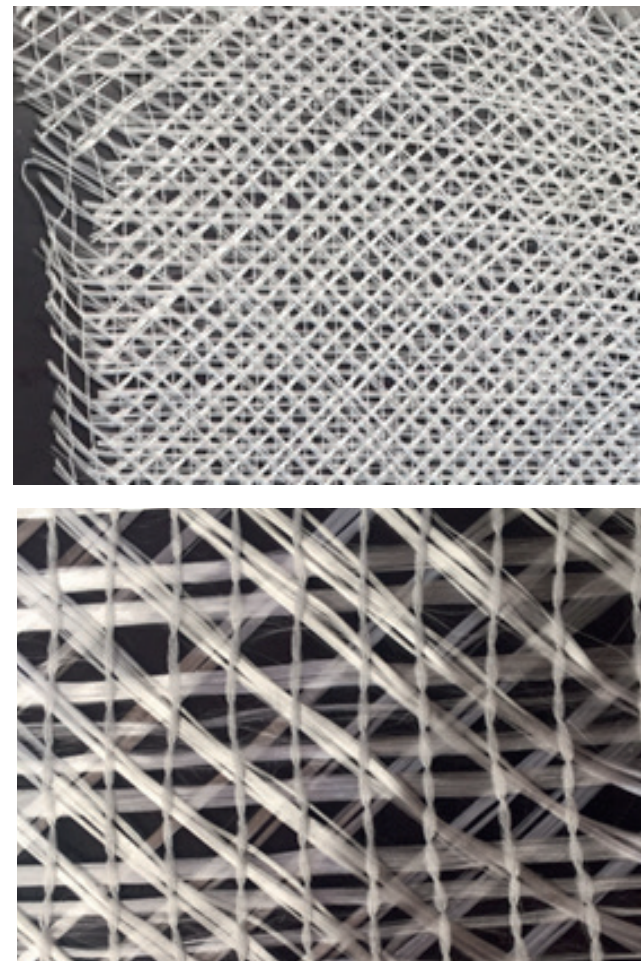
Wzmocnienie trójosiowe ma wiązki szkła w kierunku wążku konstrukcji (zwanego kierunkiem 0°) i pod kątami + 45° i -45° względem kierunku wążku. Nie ma zbrojenia zorientowanego w kierunku osnowy (zwanego kierunkiem 90°).

Jak widać na zdjęciach, wiązki włókien są skierowane w kierunku wążku (kierunek poziomy na zdjęciu, nazywany kierunkiem 0°) oraz w kierunkach + 45° i -45° względem kierunku wążku. Nie ma, natomiast, wiązek skierowanych w kierunku osnowy (pionowy kierunek na zdjęciach, nazywany kierunkiem 90°). Jednakże, ściegi przędzy są w tym kierunku zorientowane.



warstwa będzie miała grubość 0,7 do 1,1 mm. Ogólne instrukcje dla A1 stanowią, że w laminacie należy zastosować co najmniej 2 warstwy wzmacniające. Jednak w przypadku zastosowań konstrukcyjnych A1 (dla których stosuje się niniejszy przewodnik projektowy), należy zastosować co najmniej 3 warstwy zbrojenia. Nie ma maksymalnej ilości warstw wzmacniających. A1 wytwarza pewną ilość ciepła egzotermicznego podczas utwardzania, ale nie w stopniu, który mógłby powodować degradację materiału lub ryzyko pożaru. Maksymalna temperatura egzotermiczna odnotowana podczas utwardzania grubych laminatów wynosiła tylko 50°C. Jednakże, w przypadkach kiedy wymagane są grube laminaty, należy rozważyć zastosowanie materiałów rdzeniowych (na przykład pianki lub drewna).

- Rozpoczęcie od niewzmocnionej warstwy o grubości od 0,5 do 1,5 mm
- Kolejne warstwy wzmacniające w laminacie: minimum 3 warstwy



3. STRUKTURA LAMINATU ORAZ WYMAGANIA

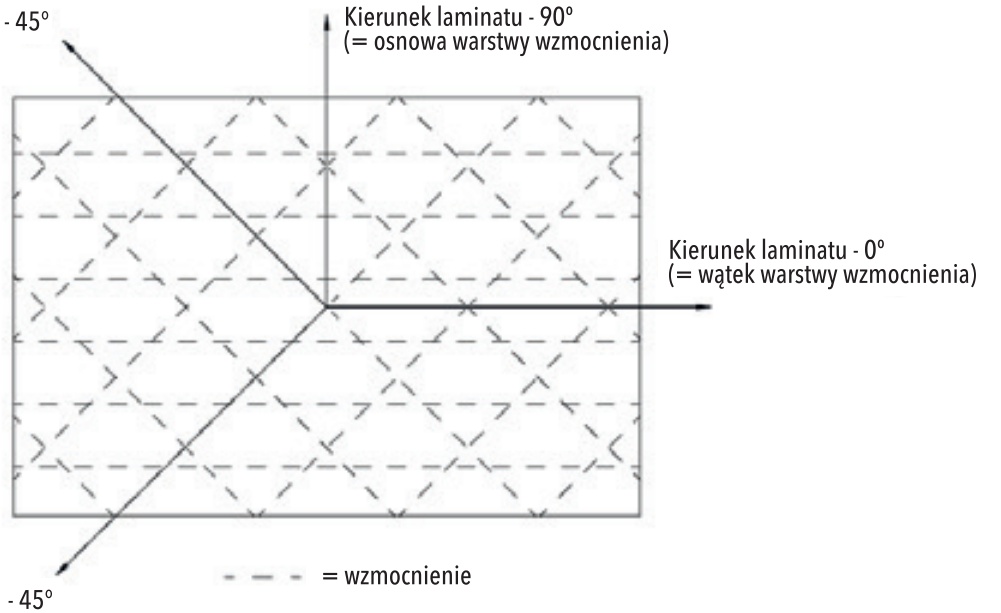
Do określenia właściwości projektowych kompozytów A1 wzmocnionych trójosiowym zbrojeniem ważne jest ustawienie zbrojenia. W przypadku, gdy wszystkie warstwy wzmacniające są ułożone w laminacie w tej samej orientacji, część kierunków będzie wzmocniona włóknami szklanymi, ale wystąpi również kierunek (kierunek 90°), w którym nie ma zorientowanych żadnych wiązek wzmacniających.

Można oczekiwać, że kierunek, w którym nie ma zorientowanych włókien, nie jest tak mocny i sztywny, jak kierunki wzmocnione (kierunki 0°, + 45° i -45°). W zależności od wymagań i możliwości kontroli jakości możliwe są różne podejścia do orientacji warstw zbrojenia:

- Kontrolowana orientacja**
- Wszystkie wzmocnienia są tej samej orientacji
 - Zmienna orientacja wzmocnień
- Niekontrolowana orientacja (losowa orientacja zbrojenia)**

Ten przewodnik projektowy określa właściwości projektowe dla dwóch ekstremalnych przypadków. Właściwości te określono poprzez testowanie laminatów z 5 warstwami wzmacniającymi, w których warstwy są zorientowane w sposób kontrolowany z wszystkimi wzmocnieniami mającymi tę samą orientację. Testy mechaniczne wykonano zarówno na próbkach zorientowanych w kierunku 0° (wzmocnionym), jak i w kierunku 90° (niewzmocnionym).

Wartości projektowe uzyskane w testach w kierunku 0° wykazały najwyższą możliwą wydajność, którą można uzyskać poprzez kontrolowanie orientacji w produkcji, gdzie wszystkie wzmocnienia, są zorientowane w kierunku (i mają ten sam kierunek), w którym działa obciążenie mechaniczne. Wartości projektowe uzyskane w testach w kierunku 90° wykazały najniższą możliwą wydajność i są bezpiecznym poziomem projektowania dla przypadków, w których stosuje się naprzemienne ukierunkowanie zbrojenia lub gdy orientacja jest niekontrolowana (losowa). Poniższy diagram przedstawia schematycznie kierunki zbrojenia w laminacie o kontrolowanej orientacji wzmocnień i zbrojenia o tej samej orientacji.



4. WARTOŚCI PROJEKTOWE DLA WŁAŚCIWOŚCI MECH.

W przypadku konstrukcji ze zbrojonymi produktami kompozytowymi A1 ważne są następujące właściwości laminatu dla obciążenia quasi-statycznego:

- **Właściwości naprężenia w płaszczyźnie (moduł elastyczności i wytrzymałość): w kierunku 0° i 90°**
- **Właściwości zginania (moduł elastyczności i wytrzymałość): w kierunku 0° i 90°**
- **Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie (ILSS) i międzywarstwowa wytrzymałość na rozciąganie (*)**

*) Wytrzymałość międzywarstwowa nie zależy od kierunku wzmocnienia.

Powyższe właściwości zostały przetestowane przez SHR. Wyniki testu opisano w Załączniku B i odnoszą się do raportu testowego SHR o numerze 18.0387. Metoda projektowania umożliwiła wykorzystanie wyników testu do określenia parametrów projektowych. Procedura ta jest opisana w Załączniku A. Podsumowanie parametrów projektowych znajduje się w poniższej tabeli. Obowiązują one dla aplikacji w zakresie opisanym w niniejszym raporcie.

W przypadku możliwych drgań konstrukcji (np. rezonans wywołany wiatrem) zaleca się analizę częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Do tej analizy zaleca się stosowanie zarówno modułu elastyczności na zginanie dla obliczeń sztywności (1363 MPa / 477 MPa), jak i modułu elastyczności na zginanie dla obliczeń stabilności globalnej (901 MPa / 315 MPa).

Wartości projektowe	Właściwość oraz jednostka	Kierunek 0°	Kierunek 90°
Właściwości napięcia w płaszczyźnie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1228	215
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	812	142
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	625	105
	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	29	7
Zginanie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1363	477
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	901	315
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	693	233
	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	11	6
Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie	Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	1.50	
Wytrzymałość poprzeczna	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	0.27	

Szczególny komentarz dotyczy liniowej rozszerzalności cieplnej laminatów A1. Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej tego materiału został określony przez TNO jako 5·10⁻⁶ -/ °C (patrz raport TNO z 2008 r.). Wartość ta jest znacznie niższa niż w przypadku innych materiałów. W rezultacie konieczne są względnie niewielkie rezerwy dotyczące rozszerzania się. W poniższej tabeli podano wartości współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej.

Materiał	Współczynnik rozszerzalności cieplnej (w 10 ⁻⁶ / °C)
Laminat A1	5
Szkło (szkło okienne)	8
Beton	12
Stal	12
Aluminium	23
Laminat poliestrowy (mata szklana)	24
PCW	80
HDPE	200

5. DANE PROJEKTOWE ORAZ METODY MONTAŻU

Przy projektowaniu z użyciem A1 należy zwrócić uwagę na kilka aspektów związanych ze danymi projektowymi, które są opisane poniżej wraz z metodami montażu. Ogranicza się także definicję tego, co uznawane jest za funkcjonalne rozwiązanie w kontekście dobrego projektu. Nie musi to oznaczać, że gdy zalecenia zawarte w tym przewodniku projektowym nie są przestrzegane, projekt nie jest dobry. Treść tego przewodnika, jest w opinii ACS oraz jego autora dobrym sposobem na projektowanie z użyciem wzmocnionych produktów A1.

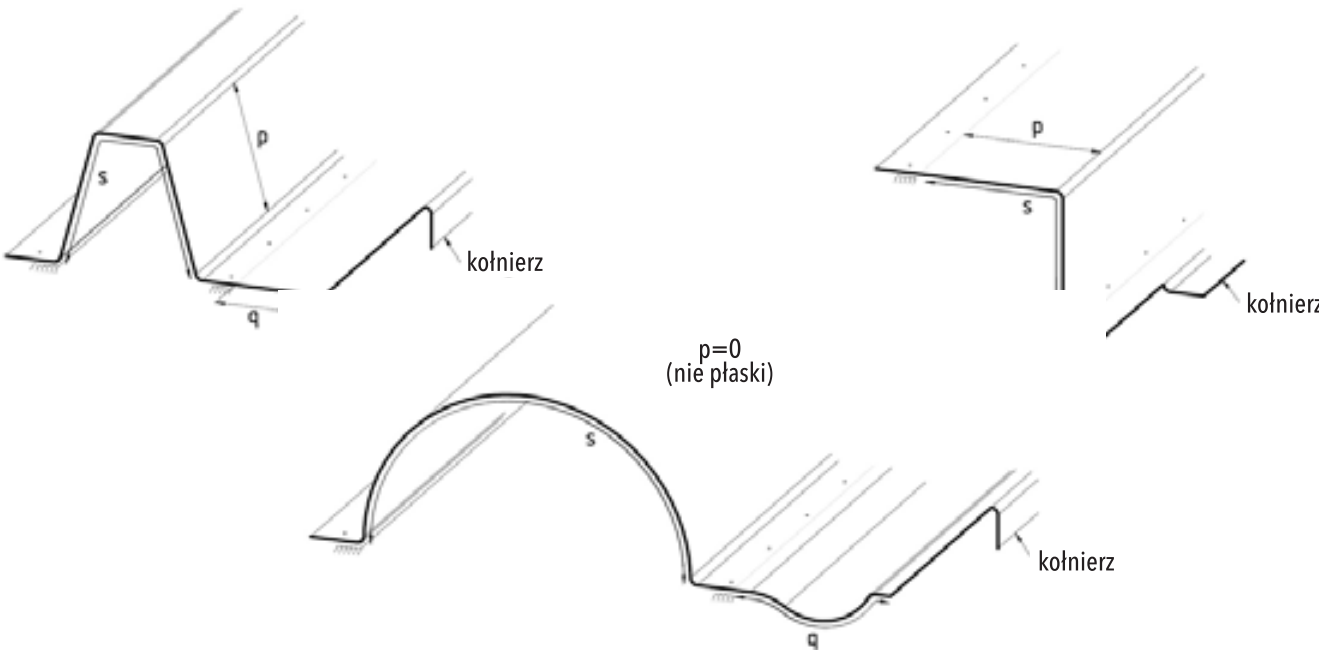
Większość danych projektowych dot. elementów konstrukcyjnych wykonanych z A1, powstało w oparciu o założenie że laminat jest zawsze wzmocniany (trójosiowa tkanina szklana). Ze względu na zastosowanie warstw wzmacniających, promień powierzchni formy powinien być minimalny ($R \geq 5\text{ mm}$). Kiedy promień w produkcie przekroczy minimalną wartość, jedna z zewnętrznych krawędzi produktu będzie niezbrojona (a zatem słaba), lub wewnętrzna krawędź produktu będzie nosiła znamiona źle zatopionego wzmocnienia. Zasadniczo krawędzie produktu powinny mieć promień R:

$R \geq 5\text{ mm}$

Należy zauważyć, że wytwarzanie produktów z A1 z krawędziami o mniejszym promieniu lub nawet o ostrych krawędziach nie jest trudne z punktu widzenia produkcji, ale wydajność strukturalna (wytrzymałość) takich krawędzi może być niska.

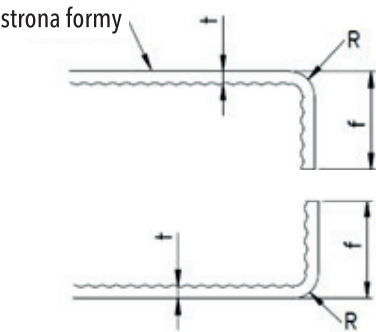
Ponadto, gdy produkty zawierają płaskie części, ich wolne przęsło (p) nie powinno być zbyt duże. Zależy to od grubości laminatu. Co więcej, całkowita odległość między dwoma podporami (s) nie powinna być zbyt duża. W przypadku części, w których podpora występuje tylko z jednej strony, długość wolnego przęsła(q) jest ograniczona. Jednakże zastosowanie dodatkowego kołnierza pozwala na jego zwiększenie. Schematyczne ilustracje na następnej stronie pokazują znaczenie parametrów p, q oraz s. W poniższej tabeli podano maksymalne wartości parametrów w odniesieniu do grubości laminatu. Wartości podano dla trzech grubości, które obejmują zakres grubości często stosowany w przypadku laminatów wykonanych z A1.

Grubość laminatu t (mm)	Maksymalne przęsło płaskiej powierzchni p (mm)	Maksymalna długość wolnego przęsła q (mm)		Maksymalna odległość między podporami s (mm)
		Bez kołnierza	Z kołnierzem	
3	300	100	200	1000
5	400	150	250	1250
7	500	200	300	1500

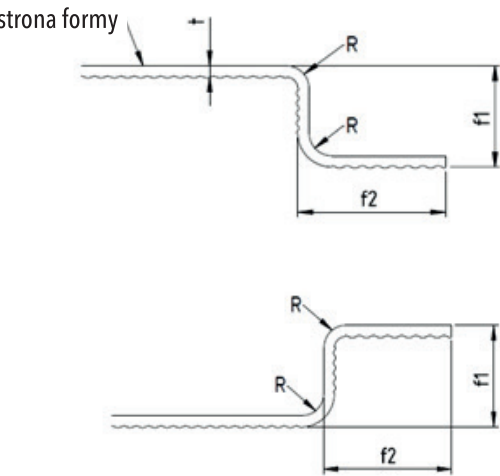


5. DANE PROJEKTOWE ORAZ METODY MONTAŻU

W przypadku kołnierzy minimalna i maksymalna długość zależy od grubości. Ponadto, w przypadku wielu kołnierzy minimalne i maksymalne długości zależą od grubości laminatu. We wszystkich przypadkach minimalny promień naroża od strony formy wynosi 5 mm. Poniższe rysunki i tabele przedstawiają odpowiednie wartości.



Grubość laminatu <i>t</i> (mm)	Długość kołnierza <i>f</i> (mm)		Minimalny promień <i>R</i> (mm)
	Min.	Max.	
3	30	100	5
5	40	150	5
7	50	200	5

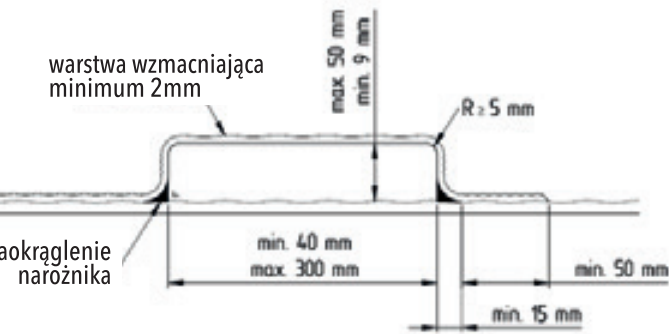
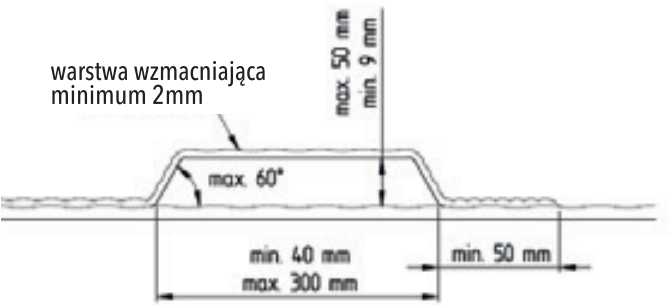


Grubość lam-inatu <i>t</i> (mm)	Długość kołnierza <i>f</i> (mm)		Długość kołnierza <i>f</i> (mm)		Minimalny promień <i>R</i> (mm)
	Min.	Max.	Min.	Max.	
3	30	100	30	100	5
5	40	150	40	150	5
7	50	200	50	200	5

Usztywnienia można stosować podczas procesu ręcznego laminowania, umieszczając profile w laminacie. Profil działa wtedy jako materiał rdzeniowy w tworzeniu miejscowych warstw kanapkowych. Odpowiednimi materiałami, które można stosować jako materiał rdzeniowy do usztywnienia, są sklejka, lite drewno, profile aluminiowe, pianka EPS i pianka PET. W przypadku stosowania materiału rdzeniowego, jego zewnętrzna powierzchnia powinna być wstępnie zwilżona żywicą podczas laminowania w celu zapewnienia dobrej przyczepności do wzmocnionych warstw.

Zaleca się stosowanie materiałów rdzeniowych na bazie drewna tylko dla produktów A1 w zastosowaniach wewnętrznych. Ponadto, gdy jako materiał rdzeniowy stosuje się materiały drewnopochodne, górna strona całej struktury może być również wykorzystywana do łączenia innych części przez wkręcanie.

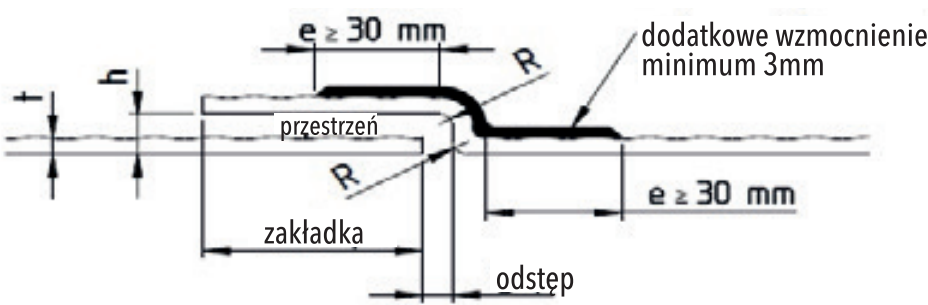
Poniższe zdjęcia przedstawiają metody stosowania profili jako rdzeni w laminacie.



5. DANE PROJEKTOWE ORAZ METODY MONTAŻU

Częstą metodą dopasowania produktu do sąsiedniego elementu jest zastosowanie wpustów. Przestrzeń między wpustem, a sąsiednim elementem może być otwarta (powietrze), aby umożliwić niezakłóconą pracę (rozszerzanie się) elementów. Aczkolwiek, może ona być wykorzystana do sklejania dwóch elementów. Grubość tej przestrzeni powinna

być ograniczona do minimum w przypadku otwartej przestrzeni (powietrza), aby nieregularności powierzchni nie utrudniały swobodnego ruchu. Natomiast w przypadku klejonej przestrzeni, jej grubość powinna być ograniczona do maksimum, aby uniknąć zbyt grubej warstwy kleju.



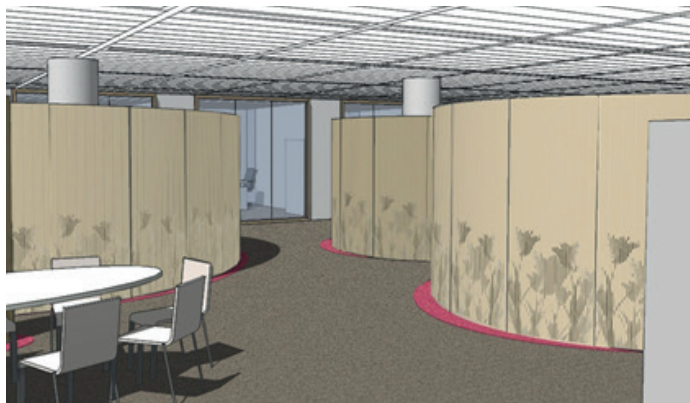
Grubość laminatu <i>t</i> (mm)	Minimalny promień <i>R</i> (mm)	Wymiary przestrzeni (grubość oraz zakładka)			
		Otwarte (powietrze)		Sklejone	
		Minimalne <i>h</i> (mm)	Maksymalna <i>zakładka</i> (mm)	Maksymalne <i>h</i> (mm)	Minimalna <i>zakładka</i> (mm)
3	5	5	30	8	40
5	5	7	30	10	50
7	5	9	30	12	60

6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Tulipanowe panele, Amsterdam

W 2006 roku Fokkema Architects wykonało projekt wewnętrznej zakrzywionej ściany dla nowego biura IGZ (krajowego Inspektatu Ochrony Zdrowia) w Amsterdamie. Poza faktem, iż ściana ma złożony kształt (promień krzywizny zmienia się z miejsca na miejsce), na jej powierzchni miały znajdować się obrazy reliefowe tulipanów. Ze względu na wyżej wymienione wymagania dotyczące kształtu i wykończenia powierzchni, jedynym możliwym materiałem, dzięki któremu wykonanie takiej ściany było możliwe, był kompozyt wzmocniony włóknem.

Ze względu na wymagania dotyczące zachowania



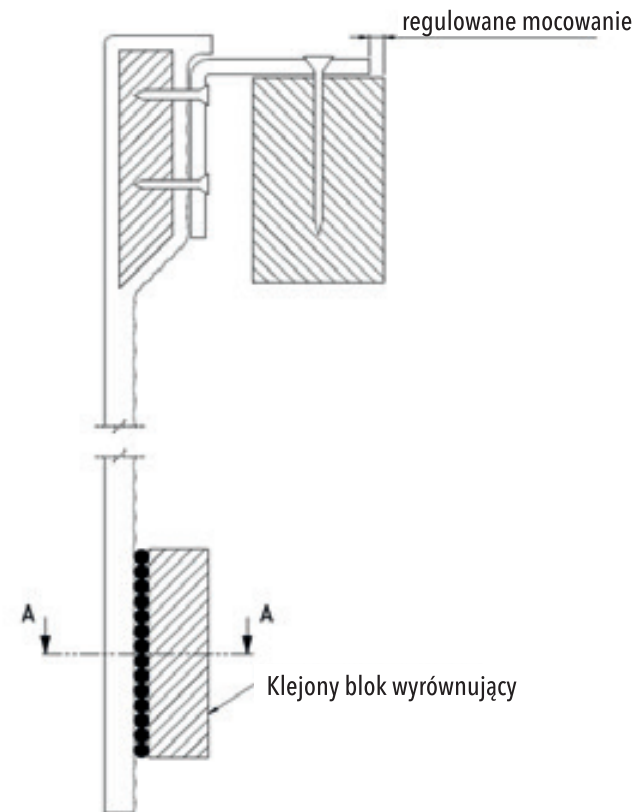
Symulacja zakrzywionych ścian z obrazami tulipanów autorstwa Fokkema

się w warunkach pożaru oraz rozwoju dymu, użycie popularnych żywic syntetycznych do wytwarzania produktów kompozytowych (poliester, żywica epoksydowa) nie było możliwe. Jednakże, A1 mógł z łatwością sprostać wymaganiom dotyczącym ochrony przeciwpożarowej i dymu oraz mógł być laminowany w formie, dzięki czemu możliwe było utworzenie różnych zakrzywień i wykończeń powierzchni.

W 2007 roku Poly Products opracowało metodę realizacji zakrzywionych ścian. Metoda polegała na wykonaniu cylindrycznie ukształtowanych paneli o różnych krzywiznach. Panele te miały być montowane na konstrukcji opartej na drewnie. Ważne było, aby metoda ta pozwalała na łatwy montaż i elastyczność dopasowania, tak aby krawędzie dokładnie pasowały do sąsiednich paneli.

Większość paneli ma szerokość 1200 mm. Przez zastosowanie elastycznej silikonowej warstwy formy z nadrukiem tulipana można było wykonać panele o różnych krzywiznach, umieszczając tę warstwę na zakrzywionej konstrukcji. W ten sposób wykonano panele o promieniu od - 6000 mm (wklęsłe) do + 6000 mm (wypukłe). Aby ułatwić montaż, elementy zostały

wyposażone w dwa lub trzy stalowe kątowniki z tyłu, na górze panelu. Po zawieszeniu tych kątowników na drewnianych strukturach tylnych, dany element można precyzyjnie wyregulować - patrz rysunek poniżej.



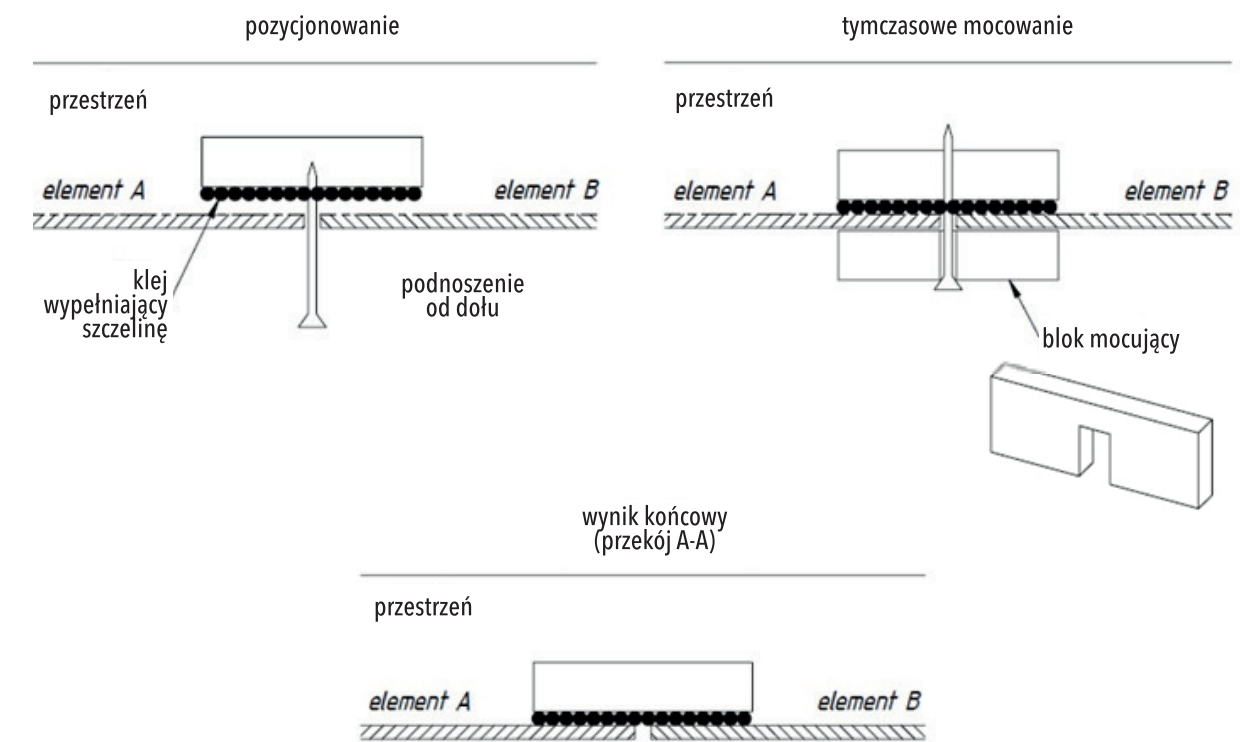
Aby wyrównać połączenie z sąsiednimi elementami w dolnej ich części zastosowano klejony blok wyrównujący.



6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Po ustawieniu i przymocowaniu elementu za pomocą kątowników na górze, od spodu, za pomocą cienkiej, długiej śruby, wsunięto drewniany blok wyrównujący z warstwą kleju wypełniającą szczelinę - patrz rysunek „pozycjonowanie” poniżej. Następnie, wsu-

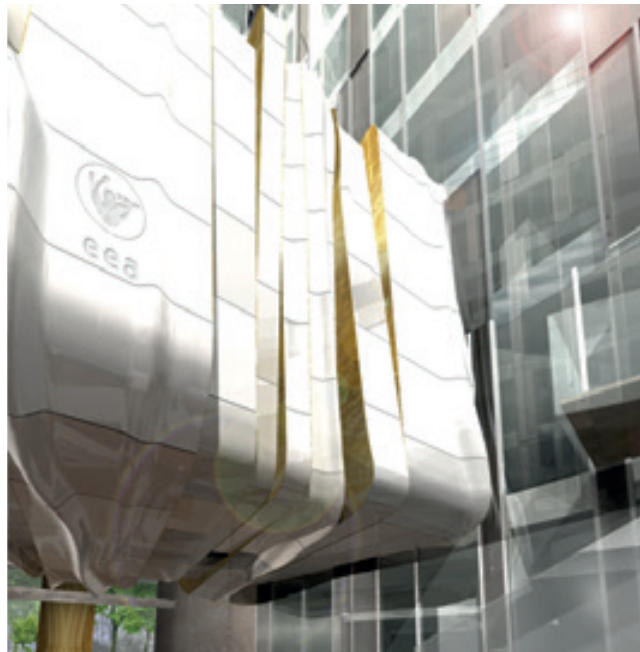
wając tymczasowy blok mocujący pod śrubę, blok wyrównujący mógł być tymczasowo przymocowany, aż klej stwardnieje. Ostatni schemat („efekt końcowy”) pokazuje rezultat po usunięciu śruby i tymczasowego bloku mocującego.



6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Audytorium, Amsterdam

W 2007 roku Erick van Egeraat Architects (EEA) zaprojektowało pokrycie audytorium wewnątrz budynku Mahler, znajdującego się w Amsterdamie. Również w tym przypadku, ze względu na złożony kształt elementów połączony z wymaganiami dotyczącymi zachowania w warunkach pożaru, zastosowanie A1 było oczywiste.

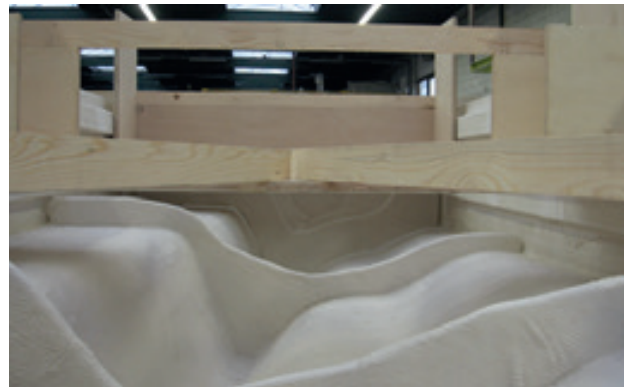


Symulacja zewnętrznej powierzchni audytorium autorstwa EEA

W 2008 roku Poly Products opracowało metodę wytwarzania i montażu takich elementów. Każdy element został zalaminowany za pomocą A1 w formie. W wewnętrzną część elementu, jako belki montażowe, wbudowano paski sklejkowe o grubości 36mm. Jeszcze w formie, do belek przykręcono 18mm paski ze sklejki. Sklejkowe paski, po 6 lub 8 na element i wystające z tyłu elementu, zostały użyte później do montażu elementu w budynku.

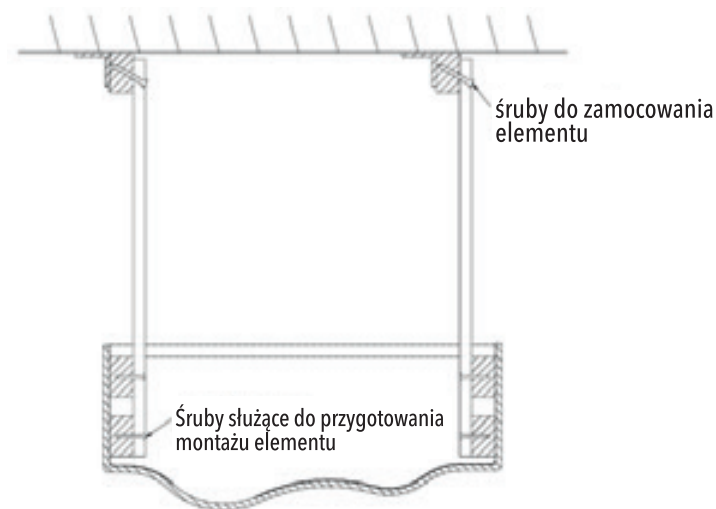


Zalaminowany element wraz z belkami sklejkowymi o grubości 36mm umieszczonymi po bokach



Dalsze utwardzanie laminatu wraz z zamontowanymi belkami sklejkowymi o grubości 18mm

Mocowanie elementu do konstrukcji budynku opiera się na dopasowaniu wystających 18 mm pasków ze sklejki z tyłu elementu do belek drewnianych, które zostały zamontowane na konstrukcji budynku, patrz rysunek poniżej.

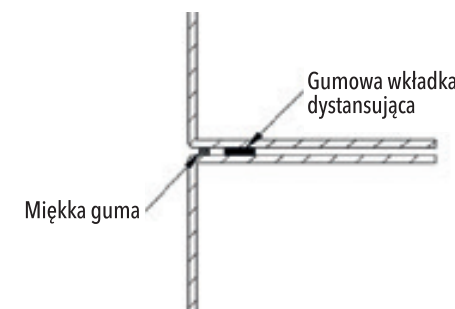
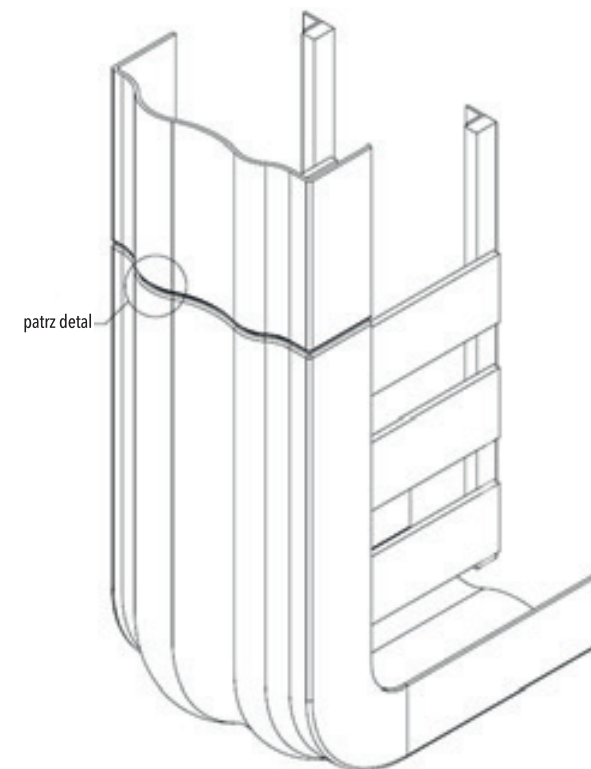


Wystające 18mm belki sklejkowe mają stosunkowo wysoką wytrzymałość i sztywność w pionie, czyli w kierunku, w którym muszą przenosić ciężar elementu. W kierunku poprzecznym paski te cechują się elastycznością, co ułatwia dopasowanie do siebie sąsiadujących elementów.



6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Początkowo projekt zakładał rozwiązanie kwestii luki dylatacyjnej między dwoma zrównanymi ze sobą elementami za pomocą wpustu. Jednakże, wymagałoby to dodatkowych wkładek w każdej formie. Ponadto, poprawne wyrównanie dwóch elementów sprawiałoby trudności. Istniałoby również ryzyko uszkodzenia wpustu podczas montażu, w chwili kiedy wpust miałby być umieszczony w wewnętrznej przestrzeni sąsiadującego elementu. W przypadku połączenia dwóch elementów według poniższego rysunku, problem ten został rozwiązany za pomocą dodatkowego detalu.



Zamiast wpustów, elementy są zakończone płaskimi powierzchniami. Do jednego z elementów przyklejono gumowe wkładki dystansujące, które gwarantują wymaganą odległość dylatacyjną. W pobliżu widocznej krawędzi, w równej odległości od zewnętrznych krawędzi, przymocowano biały, ściśliwy pasek gumowy. Rozwiązanie ilustruje powyższy schemat.

Podczas montażu danego elementu mógł on być delikatnie postawiony na poprzednim elemencie, który był wyposażony w gumowe wkładki dystansujące oraz pasek białej, miękkiej gumy. Patrz zdjęcie poniżej.

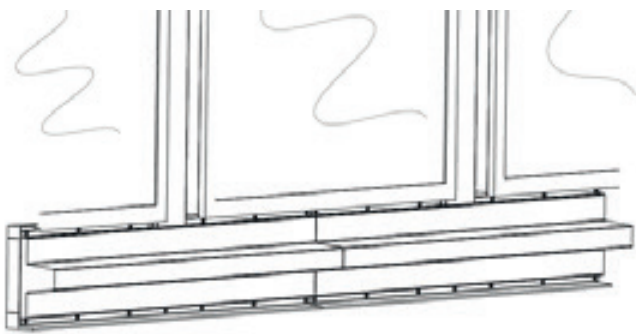


6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Panele elewacyjne, Amsterdam

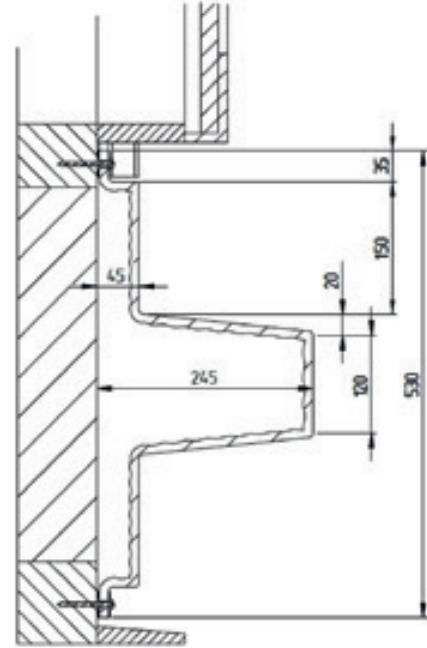
W 2017 r. architekci Rijnboutt zaprojektowali budynek Fletcher Amsterdam Olympic Hotel. Projekt zakładał umieszczenie między oknami elementów fasadowych, które nadawałyby jej betonowy wygląd. Elementy te miały być umieszczone zarówno pionowo jak i poziomo.

Firma budowlana Van Wijnen Lelystad, we współpracy z Poly Products, zbadała możliwość wykorzystania do tego celu cienkościennych profili. Użycie takich profili zapewniało niski ciężar elementów, co ułatwiało proces montażowy oraz redukowało wymagania dotyczące zakotwiczania ich na budynku.



Umieszczenie poziomych elementów na fasadzie

Wyprodukowano różne typy poziomych elementów. Typ, który był najbardziej krytyczny pod kątem obciążenia wiatrem został przedstawiony poniżej. Schemat ilustruje przekrój wyżej wymienionego elementu wraz z odpowiednimi wymiarami.



W przypadku oceny strukturalnej, szczególnie istotne jest określenie sił wiatru. Dla danego profilu zostało to opisane poniżej.

Obciążenie wiatrem na elemencie

Maksymalna wysokość na jakiej montowany jest element to 47 metrów nad poziomem ziemi. Budynek umiejscowiony jest w niezabudowanym środowisku w Amsterdamie. Zgodnie z Eurokodem NEN-EN 1991-4 parametry te określają projektowe ciśnienie wiatru jako:

$$p_d = 1.34 \text{ kPa} = 1340 \text{ Pa} = 1340 \text{ N/m}^2$$

W przypadku ssania wiatru, tak zwany współczynnik ciśnienia zewnętrznej wynosi:

$$\text{Współczynnik ciśnienia zewnętrznej (ssanie wiatru)} = C_{pe} = -1.4$$

Ze względu na fakt, iż obciążenie wiatrem ma dynamiczny charakter, współczynnik obciążenia to:

$$\text{Współczynnik obciążenia} = \gamma F = 1.5$$

Powierzchnia jednego metra profilu to według projektu:

$$\text{Projektowa powierzchnia jednego metra profilu} = A = 0.53 \text{ m}^2$$

6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Biorąc pod uwagę powyższe, projektowa siła, F_d , dla jednego metra profilu może być obliczona jako:

$$F_d = p_d \cdot |C_{pe}| \cdot \gamma F \cdot A = 1340 \cdot 1.4 \cdot 1.5 \cdot 0.53 = 1491 \text{ N}$$

Wytrzymałość połączenia z budynkiem

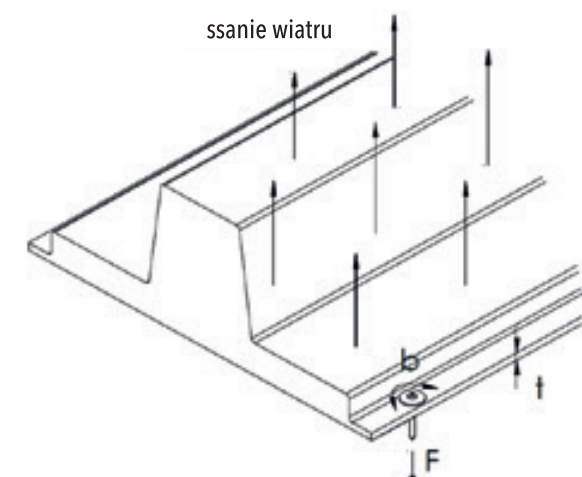
Siła mocowania profilu do budynku jest podyktowana metodą jego montażu. Do tego celu wybrano śruby o średnicy 5mm oraz długości 60mm. Aby rozłożyć obciążenie, zastosowano również podkładki o średnicy 29mm. Zarówno śruba, jak i podkładka widoczne są na zdjęciu poniżej.



Elementy są zamontowane za pomocą tego typu śrub tego typu do świerkowych listw. Przy głębokości skutecznej wkrętu w listwę równą 29mm, odporność na wrywanie wynosi 1821 N (zgodnie z EN 1995 dla konstrukcji drewnianych). Dla powyższej odporności na wrywanie stosuje się współczynnik materiałowy równy $\gamma_M = 2$. Zgodnie z powyższym, projektowa odporność na wrywanie śruby, F_{pull} , wynosi:

$$F_{pull} = 1821 / \gamma_M = 1821 / 2 = 911 \text{ N}$$

Kolejnym aspektem, który należy uwzględnić jest wytrzymałość na przeciąganie śruby oraz podkładki przez kołnierz z A1. Poniższy rysunek ilustruje sposób w jaki śruba oraz podkładka mogą zostać przez niego przeciągnięte.



Międzywarstwowe naprężenie ścinające występuje w laminacie w wyniku działania siły. Powierzchnia pęknięcia, A_f , zależy od długości pęknięcia, $b \approx 75 \text{ mm}$, oraz grubości laminatu, $t = 5 \text{ mm}$. Rozłożenie naprężenia ścinającego w grubości będzie miało charakter paraboliczny i skutkuje poniższą siłą pęknięcia F_f :

$$F_f = 2/3 \cdot \tau_d \cdot A_f = 2/3 \cdot 1.50 \cdot 75 \cdot 5 = 375 \text{ N}$$

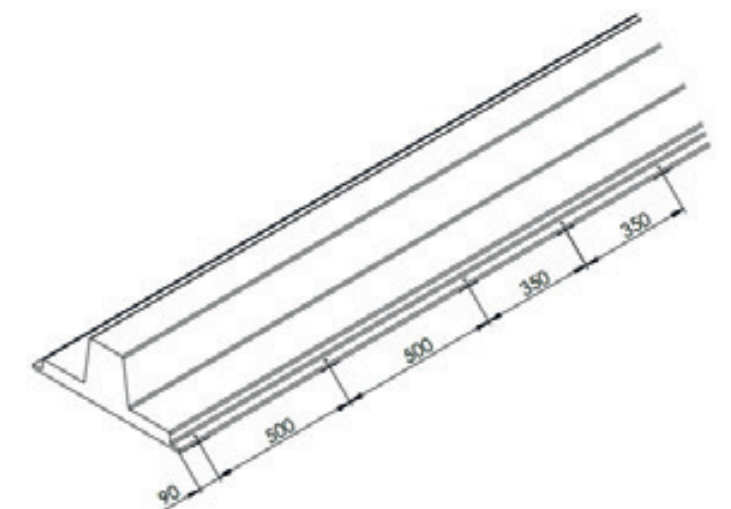
W tym równaniu, projektowa wartość międzywarstwowego naprężenia ścinającego dla A1, τ_d , pochodzi z tabeli na stronie 11. Współczynniki materiałowe zostały już uwzględnione w tym parametrze. Jest zatem jasne, że siła pęknięcia dla przeciągania, F_f , jest krytyczna jeśli chodzi o połączenie między elementem a budynkiem.

Śruby montuje się zawsze w zestawach po dwie, po jednej na każdym z kołnierzy profilu. Porównując projektowe obciążenie z projektową wytrzymałością zestawu dwóch śrub można obliczyć ilość śrub potrzebnych na każdy metr profilu:

$$\text{Ilość zestawów na metr} = F_d / (2 \cdot F_f) = 1491 / (2 \cdot 375) = 1.99$$

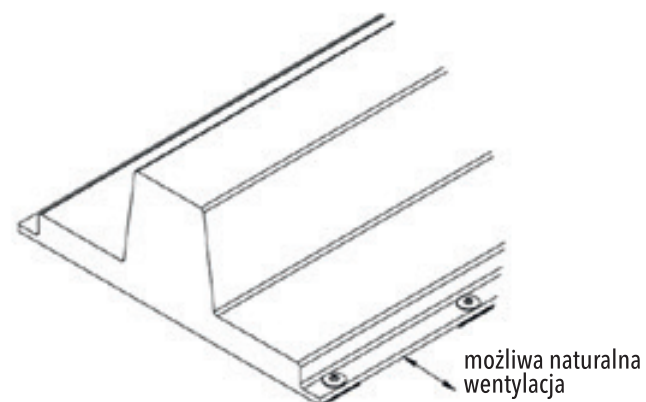
Oznacza to, że jeden zestaw składający się z dwóch śrub jest konieczny na każde $1/1.99 = 0.50$ metra. W związku z tym, śruby powinny być rozlokowane w maksymalnej odległości 500mm od siebie wzdłuż kołnierza.

Według projektu maksymalna odległość między śrubami wynosi 500mm. Ponadto maksymalna odległość śrub od końca profilu wynosi 90mm. Ze względu na fakt, iż długość elementów jest różna, zdarza się, że odległość między dwoma śrubami jest mniejsza niż 500mm. Poniżej przedstawiono typowy schemat rozlokowania śrub.

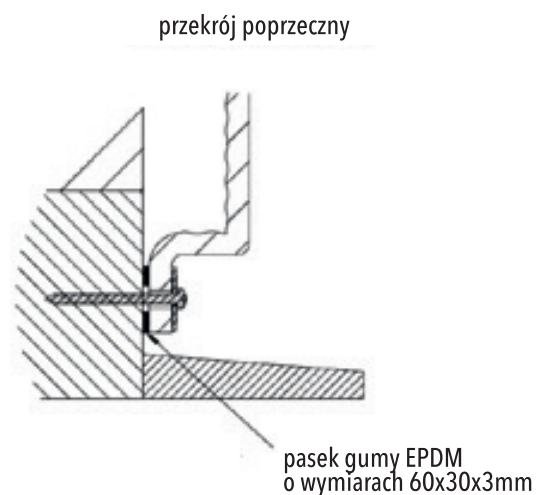


6. PROJEKTY REFERENCYJNE

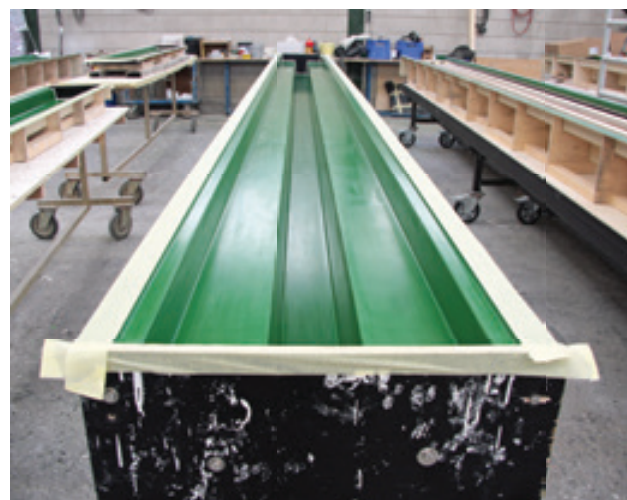
Celem uniknięcia gromadzenia się wilgoci w związku ze skraplaniem się pary, między strukturą budynku a elementem zapewniono przerwę.



Przerwy wentylacyjne tworzy się umieszczając 3mm paski gumy EPDM między elementem a budynkiem podczas montażu.



Elementy wyprodukowano metodą laminacji ręcznej używając poliestrowych form. Elementy zostały usztywnione wszerz za pomocą aluminiowych profili zamontowanych z tyłu elementów. Profili tych używa się też do wydobywania produktu z formy oraz dalszej obsługi oraz transportu.



6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Elementy fasady La Place, Amsterdam

Stara fasada budynku musiała zostać wymieniona, zatem w pierwszej kolejności została ona zeskanowana za pomocą skanowania laserowego 3D. W ten sposób mogła ona zostać odbudowana w tych samych wymiarach i z zachowaniem wszelkich detali. W oparciu o dane ze skanowania powstał trójwymiarowy model razem z wszystkimi, 35-cioma wymaganymi elementami A1.



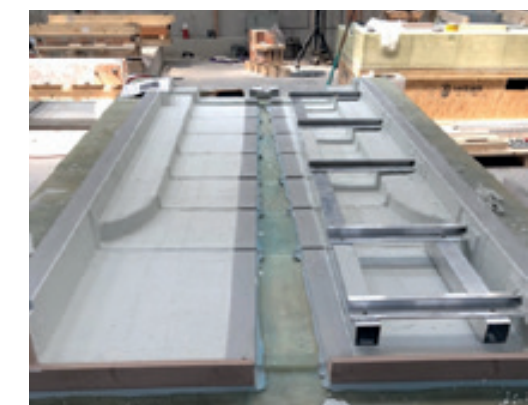
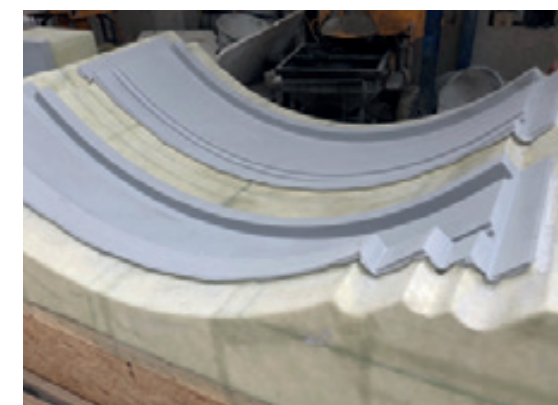
Trójwymiarowy model elementów fasadowych do produkcji

Formy dla każdego z elementów zostały wyprodukowane przez NedCam. Stworzono je z bazy EPS oraz warstwy pasty PU, która została dopasowana do dokładnych wymiarów danego elementu.

Elementy powstały poprzez wypełnienie form za pomocą A1. Produkcja elementów rozpoczęła się od niewzmocnionych warstw żywicy. Później laminacji poddano cztery warstwy trójosiowego wzmocnienia

szklanego o gramaturze 160g/m². Po utwardzeniu, do tylnej części panelu, używając laminatu, przyłączono aluminiową konstrukcję montażową. Razem z wyżej wymienioną konstrukcją, elementy osiągały masę powierzchniową równą 20kg/m².

Ze względu na niską masę elementów, ich montaż był łatwy. W ten sposób powstała fasada La Place w Amsterdamie.



6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Elementy mostu, Amersfoort

W przypadku wiaduktu nad torami kolejowymi w Amersfoort, projekt zakładał, iż boczne elementy konstrukcji będą wykonane z betonu. Jednakże waga takich elementów sięgałaby 900kg dla każdego metra krawędzi mostu. Biorąc pod uwagę fakt, iż całkowita długość wszystkich elementów to 200 metrów, całość konstrukcji ważyłaby 180 ton. Było to nie do zaakceptowania, zatem elementy zostały wykonane z A1, a ich powierzchnia wygląda na betonową. Dzięki wykorzystaniu zintegrowanej konstrukcji montażowej z aluminium, ciężar elementu wykonanego z A1 to tylko 150kg na metr. Rozwiązanie to jest zatem ponad 80% lżejsze od betonowej alternatywy.



W wyniku zastosowania lżejszych elementów wykonanych z A1, uwidoczniły się kolejne zalety tego rozwiązania. Niski ciężar umożliwił znaczne oszczędności w kwestii systemu montażowego. Co więcej, zarówno transport, jak i montaż elementów na moście był znacznie tańszy, a instalacja elementów trwała 50% krócej niż w przypadku zastosowania betonu.

Zdjęcie poniżej przedstawia elementy A1 zalaminowane w formie. Również za pomocą laminatu, oraz bez wyjmowania elementów z form, przymocowano do nich aluminiowe ramy montażowe. W ten sposób ramy mogły być precyzyjnie usytuowane, co było ważne dla montażu całości zestawu na stalowej konstrukcji krawędzi mostu. Drugie zdjęcie poniżej pokazuje sposób w jaki aluminiowa konstrukcja jest połączona z krawędzią mostu.



Element A1 zalaminowany w formie



Aluminiowa konstrukcja przyłączona do stalowej konstrukcji (bez elementu A1)

6. PROJEKTY REFERENCYJNE

Kwestią niezwykle ważną było precyzyjne wyregulowanie stalowej konstrukcji na krawędzi mostu. Dzięki temu aluminiowa struktura mogła być przyłączona bezpośrednio do niej co z kolei skutkowało idealnym dopasowaniem elementów. Zdjęcie poniżej przedstawia proces montowania elementów na krawędzi mostu w Amersfoort.



W efekcie końcowym, krawędź mostu wykonana jest z elementów, które są precyzyjnie wyrównane. Betonowy wygląd został osiągnięty dzięki zastosowaniu A1, który jest 80% lżejszy, niż krawędź mostu wykonana z betonu.



7. PODSUMOWANIE METOD PROJEKTOWANIA DLA A1

Zakres zastosowania

- Względnie suche warunki oraz brak stałego obciążenia
- Maksymalna temperatura aplikacji: 115 °
 - Zastosowania wewnętrzne: obszary o średniej wilgotności względnej (RH) poniżej 75%
 - Zastosowania zewnętrzne: brak stałej wilgoci, brak bezpośredniego kontaktu z ziemią

Laminat A1 ze wzmocnieniem

- Pierwsza warstwa w formie: niewzmocniona, o grubości od 0,5 do 1,0 mm
- Warstwy wzmocnione trójosiowym materiałem szklanym o gramaturze 160g/m²
- Minimum 3 oraz maksymalnie 7 warstw wzmocnienia w laminacie

Kontrolowany układ: możliwość wykorzystania wartości projektowych dla kierunku 0° (dla wzmocnionego kierunku)

Inny układ (naprzemienny, losowy): należy stosować wartości projektowe dla kierunku 90° (można użyć zawsze, w dowolnym kierunku).

Wartości projektowe	Właściwość oraz jednostka	Kierunek 0°	Kierunek 90°
Właściwości napięcia w płaszczyźnie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1228	215
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	812	142
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	625	105
	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	29	7
Zginanie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1363	477
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	901	315
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	693	233
	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	11	6
Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie	Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	1.50	
Wytrzymałość poprzeczna	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	0.27	

Współczynnik liniowego rozszerzania termicznego dla wzmocnionego laminatu A1 wynosi 5·10-6 -/°C.

Szczegóły projektu

- Formowane krawędzie muszą mieć promień R ≥ 5mm
- Należy weryfikować rozpiętość przęśła płaskich powierzchni, wolną długość przęśła oraz niewspieraną długość całkowitą
- Należy weryfikować szczegóły kołnierzy, wpustów oraz wkładek
- Drewnopochodne materiały rdzeniowe mogą być wykorzystywane tylko do produktów A1 w zastosowaniach wewnętrznych.

8. ZAŁĄCZNIK

A. Metoda projektowania zgodnie z eurokodem

Eurokod EN 1990 opisuje ogólnie przyjętą metodę projektowania części konstrukcyjnych. Eurokod EN 1991 zawiera opis obciążeń na potrzeby ewaluacji konstrukcyjnej. Eurokody EN 1992 do EN 1999 zawierają standardowe informacje jedynie dla tradycyjnych materiałów takich jak stal, beton, drewno, aluminium oraz mur. Nie zawierają one informacji dotyczących postępowania z A1. Niemniej jednak, EN 1990 opisuje metodologię określania właściwości materiałów za pomocą testów na potrzeby ewaluacji konstrukcyjnej. W tym celu wykorzystano Aneks D wyżej wymienionego Eurokodu: Aneks D (informacyjny) Projekt wspomagany testami.

W przypadku stosowania oceny właściwości materiału za pomocą wartości charakterystycznej (D7.2) dla danej właściwości X materiału, należy określić wartość projektową X_d za pomocą danych testowych. Odbywa się w to w następujący sposób:

$$X_d = \eta_c \cdot X_{k(n)} / \gamma_m = \eta_c \cdot m_x \cdot \{ 1 - k_n \cdot V_x \} / \gamma_m$$

W powyższej formule, parametry oznaczają kolejno:

X_d = wartość projektowa właściwości X materiału

η_c = współczynnik konwersji

X_{k(n)} = 5% wartości charakterystycznej mierzonych wartości

γ_m = współczynnik materiału

m_x = średnia wartość mierzonych wartości

k_n = współczynnik dla 5% wartości charakterystycznej

V_x = współczynnik zmienności (= s_x / m_x)

s_x = standardowe odchylenie mierzonych wartości

Wartość k_n zależy od ilości przetestowanych próbek. Wartości te są dostępne w Tabeli D1 w w/w normie. Poniższa tabela przedstawia część tych wartości przy założeniu, że współczynnik zmienności (V_x) nie był wcześniej znany.

Ilość testów (n)	5	8	10	16 (*)	20	Nieskończoność
Wartość k _n	2.33	2.00	1.92	1.82	1.76	1.64

*) Wartość kn jest określona przez interpolację liniową między n=10 oraz n=20

Dwa współczynniki wymagają większego wyjaśnienia: współczynnik konwersji, η_c, oraz współczynnik materiału γ_m. Współczynnik konwersji zależy od materiału i uwzględnia wpływ zewnętrzny na materiał: 1) temperaturę, 2) wilgotność, 3) pękanie, 4) zmęczenie materiału

1. Współczynnik konwersji dla temperatury

Współczynnik konwersji dla temperatury, w sposób zwyczajowo przyjęty dla kompozytów, wynosi 1 (brak dodatkowego wpływu) w przypadku gdy projektowa temperatura nie przekracza 40 °C poniżej temperatury zeszklenia (T_g) materiału (patrz również CUR-96). A zatem:

$$\eta_{c,T} = 1 \text{ dla temperatury projektowej } T_d < T_g - 40$$

W przypadku A1, temperatura zeszklenia, T_g, wynosi 155 °C. A1 jest zatem zalecane w aplikacjach gdzie temperatura projektowa nie przekracza 115 °C. W takich przypadkach współczynnik konwersji dla temperatury wynosi 1.

2. Współczynnik konwersji dla wilgotności

Zakres stosowania A1 w aplikacjach konstrukcyjnych jest ograniczony do względnie suchych środowisk. Jednakże, A1 jest podatne na zmiany w wilgotności. Przeprowadzono serię testów celem porównania sprawności mechanicznej laminatów A1 przechowywanych w warunkach 50% RH z laminatami, które były przechowywane w warunkach 86% RH aż do otrzymania równowagi (w obydwu przypadkach zachowano temperaturę pokojową). Wyniki dostępne są w Załączniku B.

W wyniku powyższych testów stwierdzono, że wytrzymałość oraz sztywność A1 jest niższa przy przechowywaniu w warunkach 86 % RH niż przy przechowywaniu w warunkach 50% RH. Jednakże istnieje różnica między wpływem na testowane właściwości dla kierunku 0° oraz 90°. Ocena jest dostępna w Załączniku B, a w jej wyniku określono poniższe współczynniki konwersji dla wilgotności.

$$\eta_{c,M} = 0.75 \text{ Dla właściwości } 0^\circ$$

$$\eta_{c,M} = 0.60 \text{ Dla właściwości } 90^\circ$$

3. Współczynnik konwersji dla pełzania

Zakres stosowania A1 w aplikacjach konstrukcyjnych jest ograniczony do przypadków gdzie nie występuje znaczne, stałe obciążenie. Dopuszczalne obciążenia nie mogą być permanentne, czego przykładem jest obciążenie wiatrem. Należy zatem zweryfikować czy obciążenie spowodowane ciężarem jest nieznaczne. W przypadkach gdzie nie przewiduje się wpływu pełzania, współczynnik konwersji dla pełzania jest równy 1.

$\eta_{c,C} = 1$

4. Współczynnik konwersji dla zmęczenia materiału

W przypadku kompozytów przyjęto, że stosuje się niżej przedstawiony współczynnik konwersji dla obciążeń cyklicznych (zmęczenia) (patrz również CUR-96):

$\eta_{c,F} = 0.9$

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, dla aplikacji gdzie temperatura nie przekracza 115°C, oraz które są względnie suche i gdzie na konstrukcję nie wywiera się znacznego, stałego obciążenia, współczynnik konwersji dla wyżej wymienionych czynników może być obliczony w następujący sposób:

$\eta_c = \eta_{c,T} \cdot \eta_{c,M} \cdot \eta_{c,C} \cdot \eta_{c,F} = 1 \cdot 0.75 \cdot 1 \cdot 0.9 = 0.68$

Dla właściwości kierunku 0° oraz dla właściwości niezależnych od kierunku (międzywarstwowych)

$\eta_c = \eta_{c,T} \cdot \eta_{c,M} \cdot \eta_{c,C} \cdot \eta_{c,F} = 1 \cdot 0.60 \cdot 1 \cdot 0.9 = 0.54$

Dla właściwości kierunku 90°

W podobny sposób określa się współczynnik materiału. Zawiera on część, która uwzględnia możliwe niepewności dotyczące określenia właściwości. Dla ustalenia tej właściwości poprzez testy, ten współczynnik jest równy:

$\gamma_{M1} = 1.15$ (przy określaniu poprzez testy)

W chwili kiedy właściwość określa się na podstawie modeli teoretycznych lub bibliografii, współczynnik byłby równy 1.35 (większa niepewność niż przy testach). Jednakże, nie jest to jednak taki przypadek.

W przypadku zmian w sposobie wytwarzania, zakłada się, że produkt został wykonany za pomocą metody ręcznego laminowania, a także, że produkt jest w pełni utwardzony. Użycie odpowiedniego współczynnika materiału zależy od oczekiwanego współczynnika zmienności. Ze względu na fakt, iż z testów jasno wynika, że współczynnik zmienności jest zwy-

kle większy niż 10%, dla wyższych współczynników zmienności przyjmuje się wartości dostępne w CUR-96. Zatem, dla tej metody wytwarzania, współczynnik wynosi (patrz również CUR-96, Tabela 2.2):

$\gamma_{m2} = 1.0$ Dla sztywności

$\gamma_{m2} = 1.5$ Dla wytrzymałości i ogólnej stabilności (wyboczenia)

$\gamma_{m2} = 2.0$ Dla lokalnej stabilności (marszczenia)

Po połączeniu tych współczynników, współczynnik materiału wynosi:

$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} = 1.15 \cdot 1.0 = 1.15$ (sztywność)

$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} = 1.15 \cdot 1.5 = 1.73$ (wytrzymałość, ogólna stabilność)

$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} = 1.15 \cdot 2.0 = 2.30$ (lokalna stabilność)

Biorąc pod uwagę powyższe parametry oraz dane z serii testów z ilości n testów (z wartością towarzyszącą dla k_n), równanie dla właściwości projektowej to:

$$X_d = \frac{(\eta_c / \gamma_m) \cdot X_{k(n)}}{(\eta_c / \gamma_m) \cdot m_x \cdot \{1 - k_n \cdot V_x\}}$$

Ze względu na fakt, że współczynnik konwersji jest zależny od kierunku rozważanej właściwości (0° oraz 90°) oraz że współczynnik materiału zależy od rozważanej analizy mechanicznej (sztywność, wytrzymałość, ogólna i lokalna stabilność), pierwsza tabela dotyczy współczynnika (η_c / γ_m).

Współczynnik (η_c / γ_m)	0° oraz międzywarstwowy	90 °
Sztywność	0.59	0.47
Wytrzymałość oraz ogólna stabilność	0.39	0.31
Lokalna stabilność	0.30	0.23

Metoda projektowa została specjalnie opracowana dla następujących właściwości laminatu produktu ze wzmocnionego kompozytu A1:

- Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu w płaszczyźnie (moduł elastyczności oraz wytrzymałość): w kierunkach 0° oraz 90°
- Właściwości zginania (moduł elastyczności oraz wytrzymałość) w kierunkach 0° oraz 90°
- Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie (ILSS)

- międzywarstwowa wytrzymałość na rozciąganie (*)

*) Wytrzymałość międzywarstwowa nie zależy od kierunku wzmocnienia.

Powyższe właściwości zostały przetestowane na w pełni utwardzonych laminatach (przynajmniej siedem dni po produkcji, przechowywanych w suchym i wentylowanym pomieszczeniu). Przed testami próbki były kondycjonowane do warunków laboratoryjnych (23 °C oraz 50 % RH). Wyniki testów opisano w Załączniku B. Właściwości opierają się na testowaniu serii próbek, gdzie ich ilość (n) zależy od rodzaju testu. Poniższa tabela przedstawia podsumowanie wyników testów. Podano zarówno wartość średnią (m_x), jak i współczynnik zmienności (V_x). Za pomocą metody projektowej, wyniki testów służą określeniu parametrów projektowych, których podsumowanie dostępne jest w tabeli poniżej. W przypadku modułu elastyczności w rozciąganiu można było wykonać jedynie 7 pomiarów, w wyniku czego stosuje się w tym przypadku $k_n=2.08$ (*).

B. Program testowy oraz wyniki

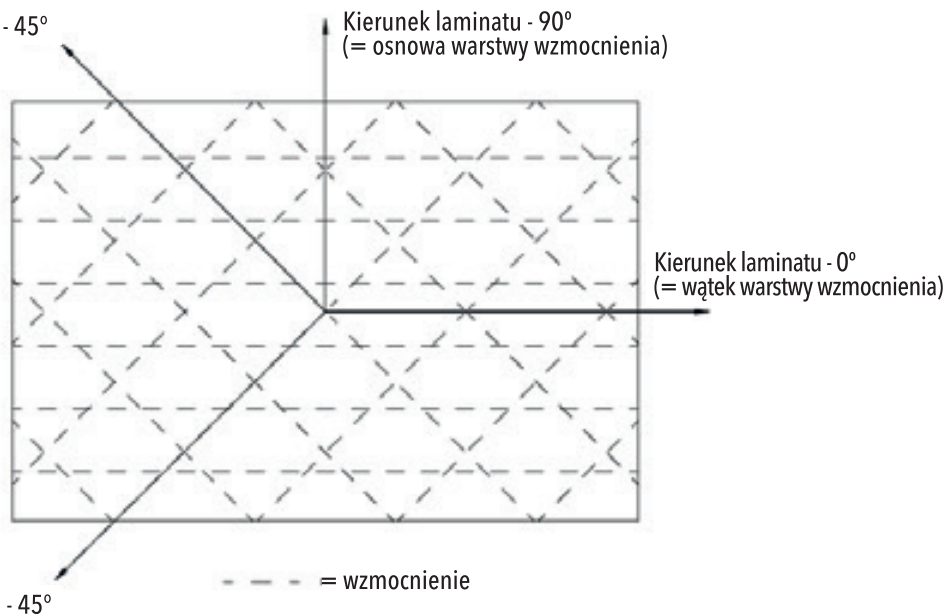
Określenia sprawności mechanicznej paneli z laminatu kompozytowego A1 dokonano przy pomocy ręcznego laminowania wzmocnienia z włókna szklanego mieszanką A1:

Wzmocnienie z włókna szklanego: Włókno Trójosiowe 300, 160g/m²
Mieszanka A1: Płyn A1 oraz Proszek A1 (w proporcjach 1:2 wagowo)

Panele z laminatu zostały wykonane bez warstwy żelkotowej (niewzmocnionej warstwy żywicy) oraz bez użycia dodatków. Zostały one wyprodukowane w płaskiej i gładkiej formie. Wszelkie wzmocnienia zostały zastosowane w tym samym kierunku:

Test (AM)	Właściwość oraz jednostka	Kierunek 0° m_x / V_x (%)	Kierunek 90° m_x / V_x (%)
Właściwości mechaniczne przy rozciąganiu w płaszczyźnie (n=8)	Moduł elastyczności (MPa)	2312 / 5.3	550 (*) / 8.2
	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	57 / 6.4	18 / 6.0
Zginanie (n=16)	Moduł elastyczności (MPa)	3726 / 21.3	2984 / 35.5
	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	43 / 17.6	32 / 22.7
Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie (N=16)	Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	4.5 / 8.2	
Rozciąganie poprzeczne (n=20)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	0.8 / 7.4	

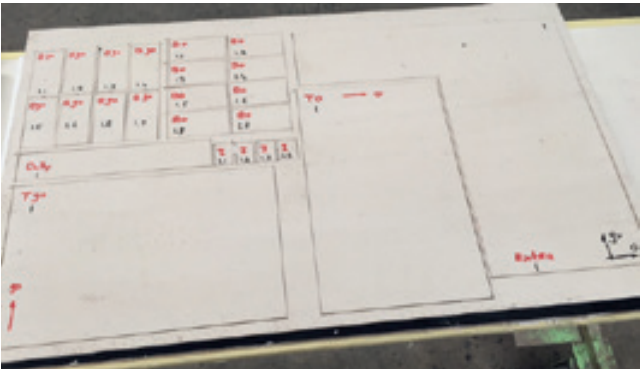
Wartości projektowe	Właściwość oraz jednostka	Kierunek 0°	Kierunek 90°
Właściwości napięcia w płaszczyźnie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1228	215 (*)
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	812	142 (*)
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	625	105 (*)
	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	29	7
Zginanie	Moduł elastyczności, sztywność (MPa)	1363	477
	Moduł elastyczności, stab. glob. (MPa)	901	315
	Moduł elastyczności, stab. lok. (MPa)	693	233
	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	11	6
Międzywarstwowa wytrzymałość na ścinanie	Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	1.50	
Wytrzymałość poprzeczna	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	0.27	



W ramach przygotowawczego programu testowego przetestowano różne grubości laminatu, jednakże stwierdzono, że jego grubość nie ma znacznego wpływu na właściwości mechaniczne. Dlatego też, dla ich określenia na potrzeby tego przewodnika projektowego, test laminatów został wykonany dla 5 warstw wzmocnienia. Jak nadmieniono w rozdziale dot. struktury laminatu, laminaty powstały za pomocą ręcznego laminowania, rozpoczynając od niewzmocnionej warstwy A1 o grubości od 0.5 do 1.0mm, po której aplikowane były warstwy wzmocnione.

W ten sposób, za pomocą laminacji ręcznej, wykonano 4 laminaty na płaskiej płycie o wymiarach 600x1000mm. Po utwardzeniu, utworzone płyty były składowane w sposób umożliwiający wentylację obydwu stron celem odparowania wilgoci z laminatu.

Próbki do testów wycięto używając metody cięcia wodą pod ciśnieniem. Patrz zdjęcie próbek wyciętych z jednej z płyt.



Poniżej znajduje się opis rodzajów testów wraz z podsumowaniem wyników. Raport szczegółowy dotyczący testów i ich wyników jest dostępny dzięki SHR (raport 18.0387).

Kondycjonowanie

Wszystkie próbki były kondycjonowane przez 1 miesiąc w placówce SHR Research. Połowa próbek została dostosowana do standardowych warunków laboratoryjnych (23 °C, 50% RH), a pozostała część do względnie warunków wilgotnych (20 °C, 86% RH).

Testy rozciągłości

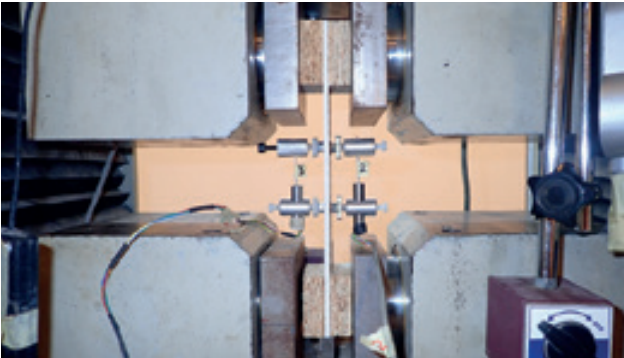
Próby rozciągłości zostały wykonane zgodnie z normą ISO 527-4 poprzez testy na paskach o wymiarach 50 x 250mm. W celu zaciśnięcia pasków, do ich końców przymocowano wypustki. Testowanie odbywało się z prędkością 1mm/min aż do pęknięcia. Przetestowano serię n=8 próbek, zarówno w kierunku 0°, jak i 90° oraz pod kątem kondycjonowania dwiema metodami. Wyniki dostępne są w tabeli poniżej.

(n=8 na serię)	Wytrzymałość		Moduł elastyczności	
	Wartość średnia (MPa)	V.C. (%)	Wartość średnia (MPa)	V.C. (%)
23 °C, 50% RH				
Kierunek 0°	56.54	6.4	2312	5.3
Kierunek 90°	18.13	6.0	550 (*)	8.2
20 °C, 86% RH				
Kierunek 0°	47.36	4.5	2138	9.0
Kierunek 90°	13.24	4.9	473	6.8

*) Dla tej serii testów można było wykonać tylko 7 pomiarów dla modułu elastyczności

Procent spadku właściwości wynikający z porównania próbek kondycjonowanych do wysokiego poziomu wilgotności z próbkami kondycjonowanymi do standardowego jej poziomu jest przedstawiony w poniższej tabeli.

Właściwość w wilgotnych warunkach	Test	Strata w porównaniu do standardowych warunków
Wytrzymałość	0°	16 %
	90°	27 %
Moduł elastyczności	0°	8 %
	90°	14 %



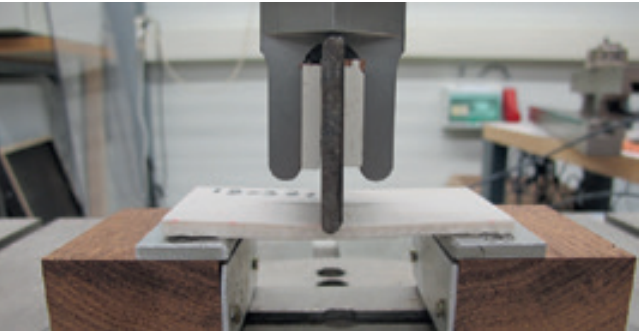
Testy zginania

Próby zginania zostały przeprowadzone zgodnie z normą ISO 14125. Testy zginania w trzech punktach wykonano za pomocą pasków o wymiarach 50 x 100mm oraz podpory o długości 64mm. Wyniki są dostępne w tabeli poniżej:

(n=16 na serię)	Wytrzymałość		Moduł elastyczności	
	Wartość średnia (MPa)	V.C. (%)	Wartość średnia (MPa)	V.C. (%)
23 °C, 50% RH				
Kierunek 0°	43.05	17.6	3726	21.3
Kierunek 90°	31.97	22.7	2984	35.5
20 °C, 86% RH				
Kierunek 0°	33.92	15.9	2705	24.8
Kierunek 90°	20.67	22.4	1700	20.2

Procent spadku właściwości wynikający z porównania próbek kondycjonowanych do wysokiego poziomu wilgotności z próbkami kondycjonowanymi do standardowego jej poziomu jest przedstawiony w poniższej tabeli.

Właściwość w wilgotnych warunkach	Test	Strata w porównaniu do standardowych warunków
Wytrzymałość	0°	21 %
	90°	35 %
Moduł elastyczności	0°	27 %
	90°	43 %



Generalizacja wpływu wilgotności

Biorąc pod uwagę analizę wpływu wilgotności zarówno na testy rozciągłości, jak i na testy zginania, wyciągnięto następujące wnioski.

Spadek właściwości związany z wyższą wilgotnością jest większy dla kierunku 90° niż w przypadku kierunku 0°. Co więcej, ma ona większy wpływ na

właściwości przy zginaniu, niż na właściwości przy rozciąganiu.

Wyniki są zgeneralizowane ze względu na poniższe, pragmatyczne podejście.

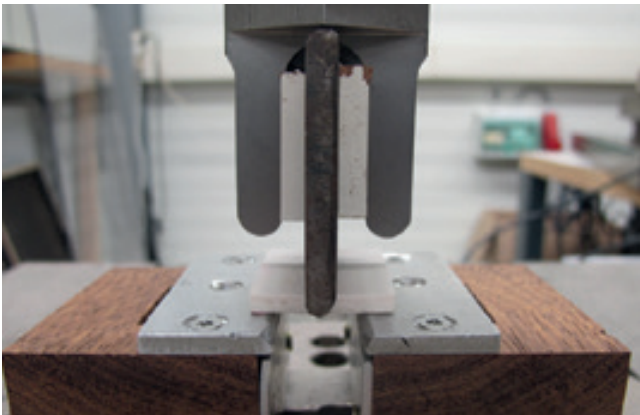
Spadek wytrzymałości oraz sztywności w kierunku 0° wynosi 25% przy przechodzeniu ze stanu standardowego do względnie wilgotnego. W wyniku tego współczynnik konwersji η_{cM} wynosi 0.75 dla właściwości kierunku 0° (75% retencji).

Spadek wytrzymałości oraz sztywności w kierunku 90° wynosi 40% przy przechodzeniu ze stanu standardowego do względnie wilgotnego. W wyniku tego współczynnik konwersji η_{cM} wynosi 0.60 dla właściwości kierunku 90° (60% retencji).

Testy ścinania międzywarstwowego

Próby ścinania międzywarstwowego zostały wykonane zgodnie z normą ISO 14130. Testy na zginanie w trzech punktach przeprowadzono używając pasków o wymiarach 30 x 40mm oraz krótkiej podpory o długości 20mm. Wykorzystano tylko próbki kondycjonowane do warunków laboratoryjnych i ustawionych w kierunku 90°. Wyniki znajdują się w poniższej tabeli.

(n = 16)	Wytrzymałość (ILSS)	
	Średnia wartość (MPa)	V.C. (%)
23 °C, 50% RH		
Kierunek 90°	4.53	8.2

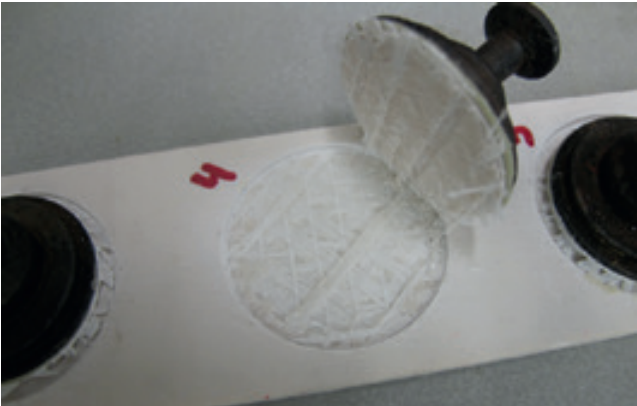


8. ZAŁĄCZNIK

Testy rozciągania międzywarstwowe ('test odrywania')

Testy rozciągania międzywarstwowego zostały przeprowadzone zgodnie z tak zwanym 'testem odrywania'. Został on wykonany na czterech paskach o wymiarach 50 x 300mm, do których przyklejono pięć metalowych cylindrów. Do testów wykorzystano tylko próbki kondycjonowane do warunków laboratoryjnych i ustawionych w kierunku 90°. Wyniki znajdują się w poniższej tabeli:

(n = 20)	Wytrzymałość (napężenie międzywarstwowe)	
	Średnia wartość (MPa)	V.C. (%)
23 °C , 50% RH		
Kierunek 90°	0.81	7.4



C. Bibliografia

Eurocode – Basis of structural design
EN 1990: 2001/A1:2005

Eurocode – Actions on structures
EN 1991: 2002-2006

CUR 96 Recommendation 'Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische toepassingen.
Second edition 2017, CROW, CRW AA96: 2017

Outdoor Durability of Acrylic One
TNO-rapport MT-RAP-2008-02326-v2/rie (2008)

Classification to Reaction to Fire Performance in Accordance with EN 13501
Efectis-report: 2006-CVB-R0565 (2006)

Duurzaamheid van Acrylic One gevelbekleding
SHR-rapport 15.0175-1 (2016)

Classification of Reaction to Fire Performance in Accordance with EN 13501-1: 2007+A1:2009
Efectis report: 2017-Efectis-R000322 (2017)

Mechanical properties of Acrylic One laminates
SHR report 18.0387 (2018)



Informacje w tej instrukcji obsługi są uważane za dokładne. Użytkownik powinien zweryfikować czy produkt jest odpowiedni dla wybranej przez siebie aplikacji. W razie wątpliwości należy przeprowadzić testy w celu upewnienia się, czy produkt jest odpowiedni.

acrylicone.pl

ul. Michałkowicka 47, 41-100 | Siemianowice Śl., **Polska**

T: (32) 229 01 07 | **M:** +48 660 432 134

E-mail: kontakt@acrylicone.pl | **W:** www.acrylicone.pl



Nijverheidsweg 15A | 3251 LP Stellendam | **The Netherlands**

T: +31-187-663006 | **M:** +31-6-51612714

E-mail: info@activecomposite.com | **W:** www.activecomposite.com