

dr inż. arch. Maria Helenowska-Peschke<sup>1)</sup>

# Szklane powierzchnie architektoniczne o krzywoliniowej charakterystyce – strategię rozkładu paneli

*Curvilinear architectural glass surfaces – strategies for panels arrangements*

DOI: 10.15199/33.2015.05.20

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** Tematem artykułu są strategię racjonalizacji powierzchni krzywoliniowych pod kątem technologii przeszkleń. Aproksymacja powierzchni za pomocą siatki trójkątnej lub czworokątnej i wykorzystanie różnych typów paneli pozwala na znalezienie równowagi między wizualną gładkością powłoki a kosztami jej realizacji.

**Słowa kluczowe:** aproksymacja powierzchni, modelowanie parametryczno-algorytmiczne.

**Abstract.** The paper deals with rationalization strategies for curvilinear glazed surfaces. Approximation of the surface by means of a triangular or quadrilateral grid and the use of different types of panels allows to find a balance between the visual smoothness of the coating and the cost of its realization.

**Keywords:** surface approximation, parametric – algorithmic modeling.

Liczne w setkach metrów kwadratowych krzywoliniowe szklane powierzchnie o funkcji ścian zewnętrznych i/lub zadaszeń stanowią jeden z wyróżniających się elementów nowatorskiej architektury. Ich projektowanie i realizacja stawia duże wyzwania. Kluczowym problemem oprócz zoptymalizowania kształtu powierzchni pod kątem statyki jest jej dyskretyzacja (podział na mniejsze ścianki) w sposób uwzględniający specyfikę paneli szklanych.

## Ograniczenia materiałowe i technologiczne

Obecnie projektanci mają do dyspozycji panele szklane o różnej charakterystyce kształtu: tafle płaskie, panele o krzywiznie pojedynczej oraz podwójnej. Argumentem za wykorzystaniem tafli płaskich są stosunkowo niskie koszty produkcji, a argumentem przeciw efekt fasetowania powierzchni widoczny w nieciągłości odbić (fasetowanie – termin z jubilerstwa, oznacza szlifowanie kamieni szlachetnych lub metali, tak by stworzyć ukośnie ścięte krawędzie). Im panele są mniejsze, tym bardziej dokładna jest aproksymacja geometrii referencyjnej. Zwiększa się jednak wówczas liczba profili, prętów, połączeń (większy koszt struktury nośnej). Płaskie panele można dopasowywać do krzywizny powierzchni podczas montażu za pomocą gięcia na zimno (zarówno przed, jak i po laminowaniu). Pierwszym obiektem, w którym zastosowano tę nowatorską technologię (firmy SEELE GmbH), jest przekrycie

dworca kolejowego TGV w Strasburgu (fotografia 1).



[Fot. L. Kangas]

**Fot. 1. Dworzec szybkiej kolei TGV, Strasburg (proj. RFR, 2007)**

[<https://www.flickr.com/photos/lepitkan/4948415840/>]  
Photo 1. Canopy over the Strasbourg train station (RFR, 2007)

Jednokierunkowe wygięcie szkła (powierzchni walcowej) uzyskuje się przez formowanie maszynowe. Zastosowanie takich paneli pozwala osiągnąć wizualną ciągłość odbić w pojedynczych pasmach (w jednym kierunku) za pomocą dopasowania krzywizny sąsiednich paneli. Budynek fundacji Louis Vuitton w Paryżu (fotografia 2) jest przykładem realizacji, której powłoka składa się z rodziny szklanych paneli jednokrzywiznowych giętych na gorąco, a następnie dodatkowo poddanych gięciu na zimno na miejscu



**Fot. 2. Fundacja Louis Vuitton, Paryż (proj. F. Gehry, 2011)** [[http://en.wikipedia.org/wiki/Louis\\_Vuitton\\_Foundation#/media/File:Fondation\\_Louis-Vuitton.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Vuitton_Foundation#/media/File:Fondation_Louis-Vuitton.JPG)]

Photo 1. Foundation Louis Vuitton, Paris (F. Gehry, 2011)

budowy (w celu jeszcze lepszego dostosowania do lokalnej krzywizny powierzchni).

Panele podwójnie zakrzywione pozwalają uzyskać efekt bezszwowej powierzchni (ciągłość odbić) za cenę bardzo wysokich kosztów produkcji zwłaszcza w przypadku braku regularności krzywizny. Wynika to z konieczności wykonania dużej liczby unikatowych matryc, które następnie służą do formowania szkła na gorąco. Oprócz ceny, wadą paneli podwójnie zakrzywionych są ograniczone możliwości nakładania warstw zmieniających właściwości materiału (przepuszczania promieniowania ciepłego i światła). W praktyce zmierza się zatem do poszukiwania rozwiązania składającego się z jak najmniejszej liczby paneli podwójnie wygiętych bez utraty płynności powierzchni. W przypadku szklanej fasady wieżowca One Blackfriars Road (proj. Ian Simpson Architects, Londyn, w realizacji) ekspert R. Lindemann opracował skrypty w języku Python pozwalającym na dokonanie analizy przebiegu krzywizny powłoki i określenie charakterystyki poszczególnych paneli, opierając się na wymaganiach producenta systemu elewacyjnego. Dzięki temu sporządzono i przekazano kooperantowi dokładną specyfikację ilościową wszystkich trzech typów paneli wymaganych do dalszego szegółowego rozwiązania.

## Panelizacja powierzchni

Procedura panelizacji sprowadza się do przyjęcia sieci krzywych na bazie powierzchni referencyjnej (koncepcji formy) i rozmieszczenia w jej oczkach paneli. Najmniej problematyczna z geometrycznego punktu widzenia jest siatka trójkątna, której węzły automatycznie wyznaczają wierzchoł-

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Architektury; e-mail: mhelen@wp.pl

ki płaskich ścianek (dowolne trzy punkty są zawsze współpłaszczyznowe). Złote Tarasy w Warszawie (Jerde, Arup, 2001) mają zadaszanie o powierzchni 10 240 m<sup>2</sup> składające się z równoramiennych trójkątów prostokątnych o ramionach długości 2,1 m.

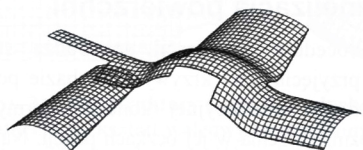
Stosowanie siatek czworobocznych jest bardziej opłacalne, w porównaniu z siatką trójkątną, gdyż wymaga mniej elementów strukturalnych, prostsza jest budowa węzłów, tańsze panele. Jednak nie jest możliwa aproksymacja krzywoliniowej powierzchni za pomocą arbitralnie przyjętej siatki czworobocznej, a następnie zastąpienie oczek płaskimi ściankami. Racjonalizacja siatek czworokątnych staje się prostsza w przypadku powierzchni obrotowych i translacyjnych, tzn. uzyskiwanych przez przesunięcie dowolnej krzywej przestrzennej (tworzącej) wzdłuż innej krzywej (kierownicy). Łączenie różnych powierzchni translacyjnych pozwala na uzyskiwanie złożonych kształtów, czego przykładem jest przeszklone przekrycie rozczłonkowanego w planie dziedzińca Bosch Area (fotografia 3, rysunek).

W przypadku powierzchni swobodnych dobrą jakość odbić zapewnia układ paneli walcowych na siatce podążającej za głównymi liniami krzywizny powierzchni. Zespół badaczy – H. Pottmann oraz eksperci z Evolute i RFR (Pottmann H. Smoothing the lines, ARC, www.geo-



**Fot. 3. Przekrycie dziedzińca Bosch Area Stuttgart (proj. G. Ostertag, 2001)**

[<https://www.pinterest.com/pin/435934438901819041/>]  
Photo 3. Courtyard roof of the former Bosch Area, Stuttgart (G. Ostertag, 2001)



**Model siatki powierzchni translacyjnych nad dziedzińcem Bosch Area**  
Model of grid dome as translational surface

metrie.tuwien.ac.at/ARC/27\_Helmut\_Pottmann\_Brochure\_01.pdf) opracował rozwijalne modele pasmowe powierzchni, modele D-pasmowe, które mogą być traktowane jako semidyskretyzacja podwójnej zakrzywionej powierzchni; tj dyskretyzacji tylko w jednym kierunku, drugi pozostaje zakrzywiony (odbicia są ciągle wzdłuż pasm). Strategia lokalnego dopasowywania paneli do powierzchni polega na obliczeniowym poszukiwaniu promienia najlepiej pasującego walca do każdego oczka siatki (sposób ten nie zapewnia dopasowania do siebie sąsiadujących paneli). Z kolei globalne procedury dopasowania obejmują wszystkie oczka siatki jednocześnie, co czasami daje niepożądane zmiany w ustawieniu/wyrównaniu paneli.

### Struktura nośna

W przypadku płaskich paneli struktura nośna zwykle składa się ze słupków/prętów i węzłów, których układ odpowiada siatce podziałów, np. każdy węzeł trójkątnej struktury warszawskich Złotych Tarasów łączy sześć elementów prętowych i przenosi unikatową kombinację sił osiowych, tnących i momentów gnących z jednej strony na drugą. W efekcie każdy z 2300 węzłów, 7123 elementów prętowych ma unikatową geometrię. W poszukiwaniu równomiernego/eleganckiego rozkładu elementów strukturalnych wykorzystuje się procedury obliczeniowe oparte na algorytmach dynamicznej relaksacji. W projekcie zadaszania dziedzińca British Museum (proj. Foster and Partners, Buro Happold, 2000) specjalnie opracowana przez Ch. Williamsa aplikacja *analo.c* iteracyjnie przemieszcza węzły modelu sieci, minimalizując energię w systemie (naprężenia) aż do chwili, gdy układ osiądzie w stanie równowagi (fotografia 4).

W praktyce projektowej stosuje się również konstrukcje nośne, w których belki i ramy podążają za krzywizną powierzchni, podkreślając jej charakter. Wspomniane już modele pasmowe dyskretyzacji zapewniają, iż strukturalne i obramowujące profile dają się dopasować do brzegów D-pasma, nie ulegając skreśleniu na długości. Badania dowiodły, że korzystny układ elementów konstrukcji uzyskuje się, gdy kierunki sieci odpowiadają kierunkom maksymalnej i minimalnej krzywizny. Wtedy dopasowanie położenia łuków konstrukcyjnych do maksymalnej linii krzywizny skraca i usztywnia drogę przenoszenia obciążeń.

### Narzędzia obliczeniowe

Projektowanie złożonych artefaktów o swobodnej geometrii zwykle odbywa się na bazie modeli parametryczno-algorytmicznych, które budowane są za pomocą technik skryptowych, tzn. algorytmów komputerowych napisanych



**Fot. 4. Zadaszenie dziedzińca British Museum (proj. Foster and Partners, Buro Happold, 2000)**

[Fot. Autorka]  
Photo 4. Great Court Roof of the British Museum in London (Foster and Partners, Buro Happold, 2000)

w jednym z języków programowania (Python, C++, RhinoScript itp.) lub za pomocą graficznego edytora (Generative Components, Grasshopper). Skrypty pozwalają na wbudowanie w cyfrową definicję formy wymagań geometrycznych i ograniczeń produkcyjnych (np. podział na płaskie wielokąty, uwzględnienie elastyczności, powiązanie kształtu z analizami statycznymi itd.). Parametryczno-algorytmiczny model ma strukturę hierarchiczną (od podstawowego poziomu geometrii referencyjnej po detale węzłów), a dzięki asocjacyjności geometrii umożliwia generowanie całej rodziny rozwiązań w przyjętych ramach. Ponadto projektanci mają do dyspozycji wyspecjalizowaną nakładkę Evolute Tool Pro na program Rhinoceros umożliwiającą racjonalizację i tworzenie układu paneli na dowolnej geometrii referencyjnej przy uwzględnieniu wymagań produkcji CNC.

### Podsumowanie

Projektowanie i realizacja form o swobodnej geometrii w technologii przeszkleń jest możliwa dzięki zaawansowanym narzędziom do modelowania i analizowania geometrii, postępowi w technologii gięcia szkła i cyfrowej fabrykacji pozwalającej na uzyskanie wysokiego poziomu złożoności komponentów struktury. Końcowy efekt jest zależny od geometrycznej definicji powłoki, rozbieżności (łuk) i kątów między sąsiednimi panelami, systemów ich mocowania oraz konstrukcji nośnej, która zawsze pozostaje widoczna. Każda kolejna innowacyjna realizacja wymaga zindywidualizowanego podejścia, stawia nowe wyzwania i katalizuje postęp wiedzy geometrycznej. Największe nadzieje wiązane są z rozwojem strategii dyskretyzacji swobodnych powierzchni umożliwiających ich realizację za pomocą paneli o pojedynczej krzywiznie.

Otrzymano 09.01.2015 r.