

ARCHITECTURE

ARCHITEKTURA

ANNA JÓZWIK

PhD Eng.

Warsaw University of Technology

Faculty of Architecture

e-mail: anna.jozwik@pw.edu.pl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3252-5357>

THE USE OF STRUCTURAL GLASS IN SHAPING GLAZED FACADES

ZASTOSOWANIE SZKŁA KONSTRUKCYJNEGO W KSZTAŁTOWANIU PRZESZKLONYCH ELEWACJI

ABSTRACT

Glass is a significant material in shaping contemporary architecture. Its main feature is transparency, which is related to the possibility of letting daylight into building interiors. Glass facades mark the almost invisible border between the interior and exterior space, which is a source of endless design inspiration. This situation is facilitated by the development of technology and knowledge on glass as a structural material.

The article aims to identify and analyse the possibility to apply structural glass in glazed facades. The paper analyses the technological and structural aspects of glass. The conducted analyses were based on the following methods: logical argumentation, comparative method, and case study. The analysis of selected architectural implementations provided a major contribution to the work results. Based on this, the typology and characteristics of design solutions were established for glass facades in which structural glass is used. The search for solutions aimed at shaping all-glass self-supporting structures was assumed as the main criterion of the indicated typology. It has been established that shaping all-glass self-supporting structures is achievable with the use of frameless systems, glass fins, folded plate glass systems, or facades with bent glass. By designing self-supporting systems, the elimination or reduction of support systems of other materials can be achieved. Thus, the use of structural glass in these structures allows for uniform material solutions. These solutions not only focus on technological and structural aspects but also have a significant impact on the architectural creation of the facade.

Keywords: structural glass, glass facades, frameless glass systems, glass fins, glass folded plate systems, bent glass

STRESZCZENIE

Szkoło jest znaczącym materiałem w kształtowaniu współczesnej architektury. Główną jego cechą pozostaje transparentność, co wiąże się z możliwością przepuszczania światła dziennego do wnętrza budynku. Szklane elewacje wyznaczają zanikającą granicę między wnętrzem a przestrzenią zewnętrzną, co jest źródłem inspiracji projektowych. Sprzyja temu również rozwój technologii i wiedzy dotyczącej właściwości szkła jako materiału konstrukcyjnego.

Celem artykułu jest rozpoznanie i przeanalizowanie możliwości stosowania szkła konstrukcyjnego w przeszklonych elewacjach. W pracy przeanalizowano aspekty technologiczne i konstrukcyjne szkła. Analizy wykonano w oparciu o metodę logicznej argumentacji, metodę porównawczą oraz studium przypadku. Duży wpływ na wyniki pracy miała analiza wybranych realizacji architektonicznych. Na tej podstawie ustalono typologię i charakterystykę rozwiązań projektowych szklanych fasad z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego. Głównym kryterium wskazanej typologii było poszukiwanie rozwiązań, w których dąży się do kształtowania całoszklanych samonośnych struktur. Ustalono, że jest to możliwe przy zastosowaniu systemów bezramowych, szklanych żeber, systemów tarczownicowych czy szkła giętego. Projektowanie systemów samonośnych pozwala wyeliminować lub ograniczyć systemy wsporcze z innych materiałów. Dzięki użyciu szkła konstrukcyjnego możliwe jest zatem uzyskanie jednorodnych materiałowo rozwiązań. Rozwiązania te nie tylko koncentrują się na aspektach technologicznych i konstrukcyjnych, ale mają także wpływ na architektoniczną kreację elewacji.

Słowa kluczowe: szklane elewacje, szkło konstrukcyjne, szklane systemy bezramowe, szklane żebra, szklane systemy tarczownicowe, szkło gięte



1. INTRODUCTION

Currently, glass has become a building material that features a wide range of applications. In various buildings, increasingly technologically advanced design solutions with the use of glass are noticeable. Nevertheless, transparency is the feature owing to which glass is considered not only as a typical building material but, above all, as a contemporary architectural component (Inamura, 2017). This situation is also favoured by the cultural and semantic layer (Cybula and Żołnierczuk, 2015, p. 20), which strongly implies design ideas. Therefore, glass was used as a key material in various recognized architectural works, such as the Pyramid in the Louvre (by Ieoh Ming Pei, 1989), the headquarters of the Cartier Foundation in Paris (by Jean Nouvel, 1994), the glass pavilion at the Toledo Art Museum (by SANAA, 2006), entrance to the Apple store on Fifth Avenue in New York (by Bohlin Cywinski Jackson, 2006, 2011), the office and administration building in Zamora (by Alberto Campo Baeza, 2012).

Glass in many buildings is primarily identified with facades, not only due to admitting into the building but especially for its creative role in architecture (Wala, 2012, p. 57). The transparency, translucency, and reflectivity of glass serve these purposes (Wala, 2012, pp. 58–78; Brzezicki, 2019a; 2012b; Rogińska-Niesłuchowska, 2017). In addition, with the development of glass technology, the range of design options for facades increases. Although fragile by nature, glass is increasingly often identified and considered as a structural material. As a result of its use, it is now possible to design all-glass structures, whereas support systems using aluminium, steel or timber are eliminated. The use of structural glass contributes to advanced engineering solutions with which the qualities of glass as a transparent material are emphasized. However, the implementation of design concepts and shaping the expression of contemporary architecture remains the overriding activity.

Aim of the work

The main objective of this study was to identify and analyse the possibility of using structural glass in the design of glazed facades. The recent progress in technology development for glass pane production and modification contributes to creating new products used in contemporary architecture, including glass facades. Therefore, a typology of design solutions for glazed facades with the use of structural glass was proposed for further analysis. The aim is to determine the characteristic of all-glass solutions for self-supporting

structures (Wurm, 2007). In addition, the analysis of the state of the art on the properties of structural glass and its use in selected projects will provide a better understanding of glazed facade design. The assumptions adopted may be expressed as the following relation: Design (D) + Research (R) = Useful Knowledge (K) (Ángel and Batista, 2021, p. 21).

Scope of the work

The scope of the work comprises structural and technological aspects of the use of glass in facades. The increasing body of knowledge on glass's strength and mechanical properties contributes to searching for new design solutions. To a large extent, these solutions apply to the building envelope. Therefore, this paper addresses the issue of designing glass facades with the use of structural glass.

The conducted research covers the period of about the last fifteen years. During this period, glass technology and its use as a structural material in glazed facades was significantly developed.

Methods of the work

The study presented was conducted in several stages. Initially, the main research problem was defined, together with the premises on which it was to be undertaken. For this purpose, an analysis of the state of the art, as well as development and implementation studies, was performed. The analysis and criticism of the available literature and project documentation provided the key element at this stage (Niezabitowska, 2014, p. 154). In the following stage, research methods and techniques were defined. The research analysis was performed with the application of logical argumentation, the comparative method, and the case study method. The case study method was particularly important to the study due to its explanatory and descriptive nature (Niezabitowska, 2014, p. 222). By selecting objects with similar design solutions, it was possible to determine the general characteristics of a given solution and to create a typology of glazed facades with the application of structural glass. At the final research stage, the results were documented and conclusions were formulated.

Literature review

This study investigated glass, and for this reason, its scope is quite extensive and multithreaded. Undoubtedly, the origin of the use of glass in architecture (Wala, 2012) should be sought in the material's transparency. Transparency, rather than being only a physical feature, has broad connotations in the field of architectural theory (Rowe and Slutzky, 1997; Inamura, 2017; Ishida, 2020; Kang and Park, 2021;

Rosales, 2023). The concept of transparency has been reinterpreted with the development of advanced glass technologies, including structural glass. This resulted in the introduction of the term ‘engineered transparency’ (Nicklisch, 2008; Rapport, 2009; Schneider and Weller, 2010; Pariafsai, 2016; Inamura, 2017; Jóźwik, 2021).

In the use of glass as a structural material, its strength and mechanical properties are crucial. The nature of its operation and behaviour in a post-critical state are also analysed, as safety needs to be ensured (Delincé et al., 2008; Haldimann, Luible and Overend, 2008; Kozłowski, 2019a; Kozłowski et al., 2019b; Respondek, 2019; Jóźwik, 2022a).

In the context of the paper’s subject, studies on glass facades offer a considerable body of knowledge (Celadyn, 2004; Wurm, 2007; Patterson, 2011; Tymkiewicz, 2014; Brzezicki, 2018a; 2018b; Brzezicki, 2019a; Brzezicki, 2021a; 2021b; Herzog, Krippner and Lang, 2021). Particularly noteworthy studies include the ones that discuss the subject of detailed material and design solutions applicable to advanced facade solutions, such as oversized glass panes (Laufs and Nefedov, 2016; Bedon, Amadio, 2018; Rubel, 2021), glass fins (Sanches 2013; Brzezicki, 2019b; de Krom et al., 2020; Bedon, 2021), glass folded plate systems (Carvalho and Crus, 2014; Eekhout, Weber, 2014; Lenk, 2022), bent glass (Nijsee, 2009; Nijsee and Wenting, 2014; Neugebauer, 2014; Doulkari, 2014; Datsiou, 2017; Fildhuth, Schieber and Oppe, 2018).

The research conducted within the design and implementation process, the so-called ‘research through design’, is quite significant to the issue of this study (Ángel and Batista, 2021, pp. 15–16). Using this method allows for the verification of design assumptions and makes it possible to introduce improvements to the initially adopted models and prototypes. At this stage of the design process, analyses are conducted both numerically and tested under laboratory and workshop conditions (Doulkari, 2014; Feirabend, Eckardt and Benning, 2014; Lenk, 2016; Lenk, 2022; Blandini and Grasmug, 2018; Teich, 2019; Teich, Bauchinger, 2020; de Krom et al., 2021; Veer, de Krom and Nijsee, 2021).

2. CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL GLASS USED IN GLASS FACADE

The glass used in facades is manufactured and modified for specific uses and technical requirements in building envelopes. First of all, the spectrophotometric properties of glass are applied to obtain products characterized by specific features, including visible

light transmission, protection against sunlight, reflectivity or anti-reflectivity (Sacht et al., 2021; Kosmala, Kuśnierz and Kozłowski, 2022, p. 28). Insulating glass units (IGUs) with low-emissivity glass that ensure thermal insulation are also produced (Aguilar-Santana et al., 2020). Depending on the usability and technical requirements, other types of glass can also be used, such as sound-insulating glass, safety glass and burglar-proof glass. In terms of strength, light curtain walls, to which group glass facades belong, are being considered (EN 13830, 2020) for:

- 1) wind load resistance,
- 2) snow load resistance,
- 3) internal or external impact resistance,
- 4) resistance to live horizontal loads,
- 5) resistance to seismic shocks,
- 6) thermal shock resistance,
- 7) resistance to its own dead load,
- 8) fire resistance.

For this reason, the glass used in facades is structurally verified. The glass plate is most commonly calculated due to the out-of-plane loads as the wind (Gwóźdź, Woźniczka, 2020) or based on soft-body impact (Kozłowski, 2019a; Kozłowski, 2021) (Ill. 1a). Climatic loads in insulating glass units (IGUs) are also considered (Buddenberg, Hof and Oechsner, 2016; Respondek, 2018). Only in particular cases is the role of a wall transferring vertical forces, i.e., one that works statically in compression, analysed (DuBois, 2007; Mocibob, 2008; Kozłowski, 2011). In this case, the in-plane loads of the glass pane are considered (Ill. 1b).

Strength properties of glass

When glass is applied as a structural material, its mechanical and strength properties need to be considered. Glass is characterized by high compressive strength; however, for design purposes, the tensile strength at bending is determined, which for annealed float glass equals 45 MPa (Kozłowski, 2019a; Jóźwik, 2022a). In order to increase its strength and thermal resistance, glass is subjected to thermal treatment. Glass is reheated to the softening temperature and then cooled down; as a result, thermally toughened glass with a strength of 120 MPa is obtained. If prolonged cooling is applied, heat-strengthened glass, whose strength is 70 MPa, is produced. Together with the thermal treatment process of glass, the character of the cracks in the glass after it is broken in the event of damage also changes, which affects the safety of users, as well as the strength of the glass upon its destruction (Kozłowski et al., 2019b; Jóźwik, 2022a). In case of breakage, annealed float glass is characterized by large glass fragments with

sharp edges. A network of cracks with small shards is characteristic of thermally toughened glass, which is why it is classified as safety glass (Kosmala, Kuśnierz and Kozłowski, 2022, p. 46). The intermediate state in terms of the shard size in the crack network is characteristic of heat-strengthened glass.

Laminated glass

Structural glass is characterized by fragility compared to other materials applied in load-bearing elements. This results in the possibility of its sudden destruction. For this reason, laminated glass, consisting of a minimum of two glass panes bonded by an adhesive interlayer, is used in the structural solution. By laminating the glass panes, safety glass is obtained, which means that the adhesive layer keeps the glass shards.

Depending on the purpose of the glass, PVB polyvinyl butyral film or EVA film based on ethylene vinyl acetate copolymer is applied as an adhesive interlayer (Kosmala, Kuśnierz, Kozłowski, 2022, pp. 81–83), usually 1.52 mm in thickness. A stiffer PVB film or SentryGlas ionomer variant may be used for more structurally demanding applications. Particularly, the ionomer is characterized by improved parameters related to its use in load-bearing elements. SentryGlas is characterized by higher tensile strength and has five times higher tear strength (Jóźwik, 2022a). Thanks to the strength properties of SentryGlas ionomer, it is possible to achieve a lower thickness of laminated glass in structural elements, thus reducing its weight, which is beneficial for its application in facade elements.

3. TYPOLOGY OF GLASS FACADES WITH THE USE OF STRUCTURAL GLASS

Glass panels are the basic elements of the facade. Their dimensions result from the divisions within the glazed plane surface proposed in the architectural project. The manufacturer's standard glass panel size is 3,210 × 6,000 mm. The development in glass sheet production technology makes it possible to obtain increasingly greater dimensions of a glass pane. Currently, it is possible to produce a glass pane whose dimensions amount to 3,600 × 20,000 mm (Sedak, 2023). Such oversized glass panes offer the possibility to design larger facade divisions, which affects the building's architectural expression. Larger divisions of glazed surfaces lead to a reduction in the number of connecting elements. In this way, a more uniform material perception of the transparent facade is obtained.

The glass used in building envelopes is selected with regard to various technical and

usability requirements. In addition to aesthetic reasons, the glazed facade serves as a shield that affects the thermal comfort inside the building. Most commonly, spectrophotometrically selected glass is placed inside insulating glass units (IGUs) (Respondek, 2018), which consist of two or three glass panes with a spacer frame, sealing compounds and water vapour adsorbents. These glazings can use single or laminated glass because of their structural role (Ill. 2).

Facade systems with the use of structural glass

For the sake of further analysis, the typology of glass facades with the use of structural glass was proposed. It was decided that the main criterion was to search for self-supporting all-glass solutions where support elements of materials, such as aluminium, steel, or sometimes wood, are eliminated or limited. In such cases, the role of glass as a structural material becomes crucial, especially in facades with higher heights. Such assumptions led to distinguishing the following glass facade typology (Ill. 3):

- frameless glass facades,
- facades with glass fins,
- glass folded plate facades,
- facades with bent glass.

Frameless glass facade systems

In frameless glass facade systems, the glass panes are linearly supported at the top and bottom edges. This is a new solution; it is being further developed, especially in cases in which large-sized glass panes are used. Supports like metal brackets fixed in the structural elements support the glass panes. Alternatively, aluminium or steel U-channel profiles are used, as well as formed supports using steel angle profiles placed on both sides (Bedon and Amadio, 2018). The use of linear glazing support at the top and bottom edges makes it possible to eliminate aluminium profiles at the vertical connection line. The gaps between the panes are then implemented with the use of non-structural butt sealant joints (Weller et al., 2009, pp. 58–59) (Ill. 3a).

Given the structural works of glass elements in frameless systems, in addition to bending out-of-plane glass, it accounts for buckling as the response of compression in-plane (Bedon and Amadio, 2018). Therefore, glazing of greater thickness, such as laminated glass, is most often used to achieve greater rigidity of the glass panel.

Frameless systems in glass facades expand the design possibilities of contemporary architectural buildings. A materially uniform glazing surface is achieved externally and internally without an

aluminium frame. In this way, the effect of dematerialization of the glass walls can be achieved (Dworzak-Żak, 2010; Kang, Park, 2021).

Facades with glass fins

With higher heights of the facades, support systems are designed as steel profile structures or cable systems (Patterson, 2011). Their role is to transfer the wind load. In order to achieve a uniform material solution effect, glass fins set perpendicular to the plane of the facade are also used (Brzezicki, 2019b). The spacing of the glass fins is usually from 1.5 m to a maximum of 3 m. This dimension is harmonized with the width of the glass panes in the facade. The fins are made of laminated glass, usually two or three layers of heat-strengthened or thermally toughened glass. The ratio of the fin depth to its height s/H is $1/20 \div 1/30$ (Ill. 3b).

Glass fins can be designed as one-piece or multi-piece, i.e., with single pieces joined by special stainless-steel plates and bolted together (Sanches, 2013; Gere, 2014). In the case of multi-piece fins, the glazing is point-supported using stainless steel fittings like a spider, rotula (Bedon and Santarsiero, 2018) or clamp (Laufs and Nefedov, 2016).

However, with the development of glass technology, it is possible to produce one-piece fins with increasing lengths. Then, the panes are supported linearly with the use of structural silicone (Liang, Lancaster, Izzuddin, 2016) without the need to use stainless steel components. Structural silicones have excellent properties in metal-to-glass but also in glass-to-glass joints. They are usually characterized by a low modulus of elasticity, high elongation at break and good adhesion. Their function is to transfer loads in a uniform manner. At the same time, they can compensate for large differences in deformation due to wind load and temperature differences (Drass and Krauss, 2021).

Glass fins used in facades can be characterized by length and associated slenderness. In addition, the dimensions of their cross-section have significant disproportions, i.e., one of the dimensions is significantly larger. For these reasons, the critical moment for lateral-torsional buckling (LTB) is determined in their design (Luble and Schäfer, 2016; Santo, Mattei and Bedon, 2016; Bedon, 2021a, 2021b).

Glass folded plate facades

Folded plate glass systems are used in structural solutions, e.g., in reinforced concrete structures (Muljadinata, Darmawan, 2016). They are characterized by greater rigidity and make it possible to reduce the thickness of the structural element.

Therefore, such structures are the source of inspiration for similar solutions made of glass (Wurm, 2007, pp. 156–158; Carvalho and Crus, 2014; Eekhout and Weber, 2014).

The formation of folded plate glass systems is made possible by the modular angled arrangement of at least two glass panels (Ill. 3c). The repeatable module obtained in this way can be used in facades shaped in a straight or curvilinear line, which creates a characteristic arrangement called ‘serrated’ or ‘zig-zag’ (Brzezicki, 2018b). By forming folded arrangements in the glazed facade, the rigidity of the facade is increased, which is beneficial in terms of the effect of wind loads. This makes it possible to achieve a self-supporting structure without the necessity of applying supporting elements.

Due to the spatial conditions that result from the angular positioning of the glass panels, an important design issue is the shaping of connections in the corners of the plate girder systems. Research and development work in this scope aimed at reducing aluminium framing is ongoing. Proposed solutions include connections using structural silicone (Lenk, 2022) or perforated steel sheet laminated into the glass sheet (Carvalho and Crus, 2014).

The glazed folded plate system is one of the ways to facade composition, which creates its dynamic character compared to flat planar surfaces (Brzezicki, 2018a). The geometry of these layouts determines the perceptual phenomena both outside and inside the building. Light is reflected from glass surfaces set at an angle to each other. At the same time, there is a mutual reflection of these surfaces. On the other hand, the visual effect is also created as the view from inside the building (Brzezicki, 2018b).

Facades with bent glass

The bent glass displays some analogy to the glass folded plate systems in the facades. Currently, technologies are being rapidly developed that offer the possibility of geometrically modifying glass panes. Hot and cold bending methods are used to curve the glass (Neugebauer, 2014; Datsiou, 2017). Thus, obtaining glass with various shapes and curvature degrees is possible (Hohenstein, 2019). Gaussian curvature can be helpful in classifying the form of bent glass, according to which single and double-curved surfaces are distinguished (Datsiou, 2017, p. 40). In the case of facades, bent glass with a single curvature will be most commonly applied. Such curvature is characteristic of all developed forms created by uniaxial flat surface bending. The glass bending process

can be used for both single and laminated glass. Insulating glass units (IGUs) with curved geometry are also produced. Through technological advances, larger and larger bent glass components are possible. The largest size of such glass is currently $3,600 \times 18,000$ mm (Nortglass, 2023).

Bent glass with corrugated (Nijse, 2009), cylindrical (Teich, 2019) or faceted shapes (Sanchez-Gil, 2019) is increasingly used in facades because of the spatial effects. Given the bent surfaces, self-supporting facade elements can be designed. The own dead load of the glass is being carried using its compressive strength properties. At the same time, the curved plane becomes much more rigid, which effectively counteracts wind loads. It has been proven by research that for corrugated bent glass, the ratio of the height of the 'wave' to the span of the element s/H (Ill. 3d) should equal $1/20$ (Nijse, 2009), which ratio be compared to that in the design of glass fins.

4. ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS FOR GLASS FACADES WITH STRUCTURAL GLASS ON SELECTED EXAMP

Tirpitz Museum in Blåvand (Denmark), 2017, Bjarke Ingels Group

A bunker from the Second World War was the inspiration for the establishment of the Tirpitz Museum in Blåvand. The building was expanded in 2017. According to the adopted design concept, the new part of the museum was intended to create an additional exhibition space that would be accessible from a common central courtyard. Four thematically diverse rooms were created as part of this building development. The entire design concept of expansion is deeply integrated into the local landscape. The new exhibition spaces have been placed in the underground part of the embankment. This layout is accentuated by slits in the area that lead to the courtyard and, at the same time, illuminate the interior. In addition, the building's character is highlighted by the materials used for its construction. The main construction material was exposed raw concrete, broken compositionally by large glazing in walls. These glazed facades were composed along the pedestrian thoroughfares that run along the slits in the embankment and around the courtyard. In order to bring out the legibility of the composition of the forefront, a frameless system with oversized glass panes was implemented (Ill. 4a, 4b). The maximum size of the glass sheets equals $2,600 \times 6,200$ mm. The glass panels were fixed on

both sides — at the top and bottom edges by metal consoles. In the vertical line of their contact, butt joints were made with silicone sealant. The insulating glass units (IGUs) with laminated glass placed on the side of the exhibition spaces were used to glaze the facade. In frameless solutions, the main structural element is the glass panel working in bending due to wind load but is also susceptible to buckling due to unsupported vertical edges (Bedon and Amadio, 2018).

Edgar N. Putman Pavilion at the Michener Art Museum in Doylestown (United States), 2012, Kieran Timberlake Architects

The Michener Art Museum is located in the buildings previously belonging to Bucks County Prison in Pennsylvania, established in 1884. Nearly a century later, the existing buildings were converted into a new museum, whose aim is to preserve and display the arts and heritage of Bucks County. In 2012, a glass pavilion named after Edgar N. Putman was erected. Its design assumes space for special events and celebrations, as well as for commercial conferences or wedding ceremonies.

The glass facades designed in a frameless system are the pavilion's characteristic feature (Ill. 5). By using transparent walls, it was possible to expose the old stone wall of the former prison. A glass panel with dimensions of $1,682 \times 7,011$ mm is the main element of the glass facades. Insulating glass units (IGUs) were used for the glazing, with three-layer laminated glass on the outside and laminated glass consisting of two layers on the inside. The total thickness of the glass panel equals 70 mm, whereas its weight reaches 1.5 tons. The glazing layout and the insulating glass units (IGUs) thickness are designed to provide adequate rigidity in the frameless system.

Apple Store on Orchard Road in Singapore (Singapore), 2017, Foster + Partners

Apple retail stores are known for the spectacular structural glass solutions applied in them. This is demonstrated by, for example, the store entrance pavilion in the form of a glass cube on Fifth Avenue in New York (Ishida, 2020, pp. 124–126; Józwiak, 2022b). Many other Apple stores feature the design of facades with glass fins as structural elements. One such building is located in the Knightsbridge building complex on Orchard Road in Singapore (Ill. 6). In the facade, glass with a reduced content of iron oxides was used, thereby eliminating the characteristic green shade of typical float glass. By doing so, the neutral shop window case was obtained, which

allows the internal and external to interpenetrate (Krajewska, 2019). This effect is enhanced by the greenery in the shop and on the street.

The facade is 14 m in height and 36.5 m in width. Due to its height and the associated necessity for stiffening, a system of one-piece glass fins was used at a spacing of 3.1 m. The glass fins are designed of five plies of 12 mm heat-strengthened glass, bonded by SentryGlas ionomer layers of 1.52 mm thickness. Their depth is 600 mm, which is an s/H (depth to height) ratio of 1/30 (Ill. 3b).

The glass fins support the glass panels using structural silicone joints. Given the size of the glass, which equals 3,100 × 14,000 mm, greater rigidity was required. For this reason, insulating glass units (IGUs) made of two laminated glass panes were used. Each glass panel comprises two layers of 12 mm thick heat-strengthened glass, bonded with 1.52 mm thick SentryGlass ionomer.

The University Co-Creation Centre in Delft (Netherlands), 2021, Mecanoo

Glass fins are becoming increasingly common in facades because of the possibility of achieving all-glass structures. Such a solution was also implemented in the glass pavilion of the University Co-Creation Centre in Delft (Ill. 7a). Its floor plan measures 22.5 × 13.5 m, and its height is 6 m. This facility was erected as a venue for events within The Green Village program, upon which innovation and co-creation activities are undertaken for a sustainable future.

The glass pavilion is an example of an innovative solution for the load-bearing structure.

The steel roof structure is supported only by glass fins spaced every 1.5 m (Ill. 7b), which transfer vertical forces from the roof in addition to wind loads. The glass fins, with a height of 5,200 mm and a depth of 300 mm, are designed of laminated glass consisting of three plies of 12 mm thickness heat-strengthened glass, bonded with double layers (2 × 0.76 mm) of SentryGlas ionomer. The layout of the fins is stabilized by glass panels to achieve spatial rigidity. The triple-glazed insulating glass units (IGUs) were used for glazing the facade due to the requirements for heat loss protection.

The insulating glass units (IGUs) were connected with the glass fins using structural silicone. This was beneficial due to their role as stabilizing elements and the associated force transfer. The initial design variant of this connection assumed that the fin would be embedded in the chamber between the panes, located from the inside of the facade. However, this solution has proved insufficient and

required increasing the depth of the silicone sealant. Thus, finally, the fin was inserted deeper, i.e., into the second chamber between the panes, located from the outside of the facade (Ill. 7c).

The fins in this design act as columns, so they were analysed as elements working in bending due to lateral wind loads (Luibler and Schärer, 2016; Santo, Mattei and Bedon, 2016; Bedon, 2021a; 2021b) and in compression in response to vertical forces (Aiello et al., 2011; Amadio and Bedon, 2011; Huang et al., 2022). Finally, the glass fins were verified using numerical analyses and full-scale laboratory tests (de Krom et al., 2021; Veer, de Krom, Nijssen, 2021).

Coal Drops Yard Shopping and Cultural Center, London (UK), 2018, Heatherwick Studio

The Coal Drops Yard, a shopping and cultural centre in London, emerged due to the redevelopment and extension of two formerly Victorian industrial buildings originally intended as coal depots. In the new design, an overhang was added to link the two wings of the complex (Ill. 8a). The geometry of the roof over the link, as well as the shape of its floor structure, are determined by curvilinear lines. Together with the curvilinear contour line of the overhanging link, a glass facade with a serrated layout of glass panes was formed (Ill. 8b).

The facade was designed as a glass folded plate system to achieve a self-supporting structure. The glass panels were set at an angle, so they stiffened each other (Bateman et al., 2019). The insulating glass units (IGUs) with a laminated glass of 2,000 mm wide and a maximum height of 7,200 mm were used, which interacts with the smaller width glass panes (Ill. 8c). Their connections at the corners were designed using structural silicone with internal aluminium inserts. The solution proved advantageous, as it offered a possibility to stress compensation (Toffolon, 2019). Silicone joints in the vertical line transmit longitudinal and shear forces as well as ensure the airtightness of the facade (Bateman et al., 2019; Lenk, 2022).

Castle Lane residential building in London (UK), 2018, Michel da Costa Gonçalves (DROO) and Nathalie Rozencwajg (NAME)

As mentioned in Chapter 3, bent glass can be used as an element of a self-supporting structure. At the same time, a variety of shapes obtained in the glass bending process offer greater possibilities for contemporary architectural design. A residential building in the Westminster borough is a good example of this approach. This part of London is

subject to strict conservation protection. Therefore, the project of the new buildings required a series of analyses concerning the historical place-based context. One such analysis concerned the surrounding buildings and examined the form of the bow windows. Based on the research, a contemporary reinterpretation of the bow window, which has become a characteristic element in the building on Castle Lane (Name Architecture, 2023), was established. Its contemporary form has been determined by a soft curve line extending slightly beyond the building's edge (Ill. 9a).

The bow windows are part of the facade composition but also offer better daylight access to the apartment. For this reason, each flat was designed with this type of window. The flat and curved insulating glass units (IGUs) with single-chamber were used for glazing (Ill. 9b). These panels consist of two panes of glass connected by spacers, creating airtight chambers between them. As a result of external loads, such as wind pressure, the outer pane of glass is bent. The volume of the space between the panes of glass therefore decreases, and the pressure inside the insulating glass units (IGUs) increases. This increase in pressure in the chamber is maintained as a load on the outer and inner pane. For this reason, climatic loads are important in the design of insulating glass units (IGUs). In addition to the wind load, atmospheric pressure and temperature are also considered (Buddenberg, Hof, Oechsner, 2016; Respondek, 2018). The structural behaviour of bent IGUs differs from flat panels in terms of stress distribution, location of the maximum deflection, propensity for buckling, and equalization of glazing cavities (Schuler, 2013; Nizich et al., 2019).

MAS Museum in Antwerp (Belgium), 2010, arch. Neutelings Riedijk Architecten

The MAS Museum is located in the area of an old marina and presents collections of local culture, art, city history, and heritage, which are closely related to the port. The building, 60 m in height, is shaped like a tower in which individual stories are intended for exhibition functions. They lead spirally upwards, at the same time offering a view of the surrounding area. The external and internal surfaces in the form of walls, floors, and ceilings were covered with large panels of hand-cut red Indian sandstone. The building's facade is divided by glass strips, which reach a double height of 11 m at the corners (Ill. 10a) (Nijsee, 2009). The corrugated-shaped bent glass was chosen for glazing large openings (Ill. 10b). This solution eliminated aluminium profiles typical for curtain walls.

During the museum's construction, the production capacity of hot bending glass was limited to 6 m in dimension. Therefore, the S-shaped glazing used then is 1,800 mm wide and 5,500 mm high, while the height of the 'wave' reaches a size of $s = 2 \times 300$ mm. These panes were designed from tempered glass with a thickness of 12 mm (Nijsee and Wenting, 2014).

In terms of design, the facade corners proved to be the most difficult parts. The double height of the glazing required a connection between bent panes. This design problem was solved by using bent steel plates on both sides, whose shape was adapted to corrugated glass. These plates are connected to a round tubular steel beam, whose role is to carry the wind loads at the middle of the height of the corners (Nijsee, 2009). In the remaining strips of glazing, the facade is self-supporting.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

When using glass, aspects of architectural and structural design can be combined. This is due to the diversity of its properties as a building material. On the one hand, glass is transparent, even fading, reflective, and sometimes serves as a mirror. Above all, this material admits light into the building interior, as well as allows light illumination after dark. On the other hand, although characterized by its fragility, it can be used in load-bearing elements. Its structural properties are also used in the design of glass facades. This creates new opportunities for building design. For this reason, the problem of designing glazed facades with the use of structural glass was addressed in the work.

Based on the analyses conducted in this study, a typology of facade systems was proposed. The main reason was the search for solutions to obtain all-glass structures. The solutions resulted in facades of varying heights, in which support structures using materials other than glass have been eliminated or reduced. All-glass facades can be achieved using frameless systems, glass fins, folded plate glass systems and bent glass. In addition to structural and technological aspects, these solutions are characterized by varying spatial designs and the compositional design of the glass facades.

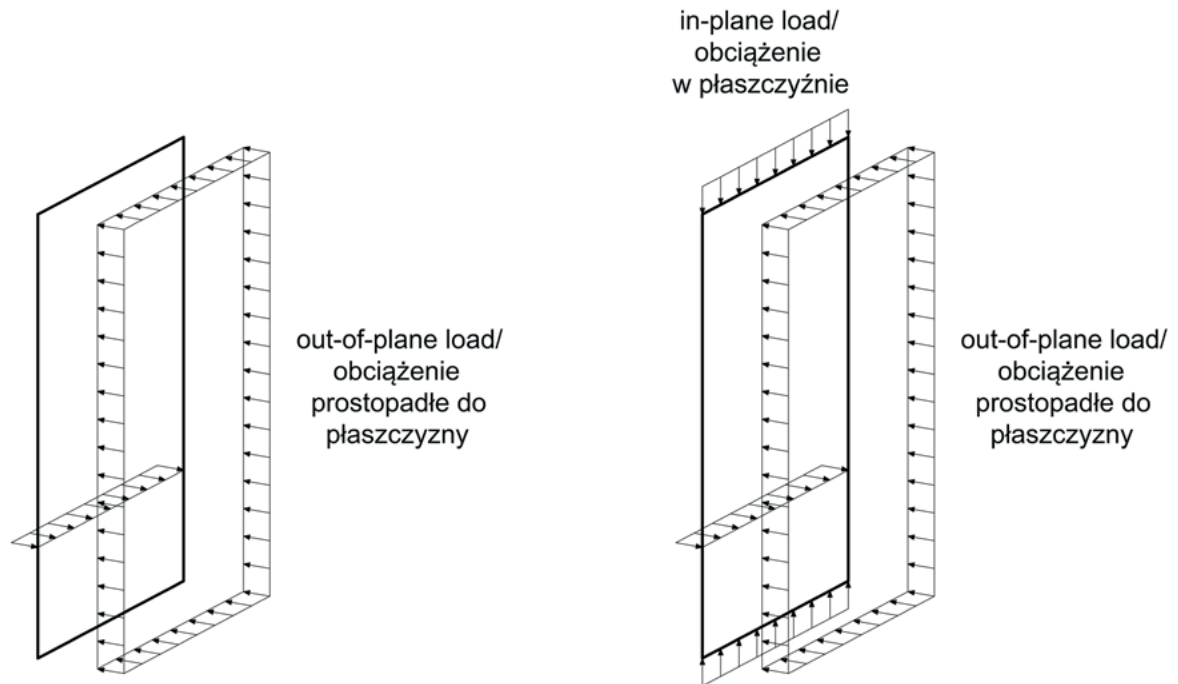
The increasing size of glass panes makes it possible to design larger glazing divisions, which enhances the transparency effect. Smooth surfaces are then achieved both on the outside of the building and when creating the view from the inside. The development of frameless systems facilitates such solutions.

In the case of the greater facade heights, the design of their stiffeners is required. In order to achieve all-glass structures, glass fins can be used. In particular, fins designed in a one-piece are characterized by their high aesthetic value. Their length is due to the technological possibilities of manufacturing and laminating flat glass, which nowadays reaches dimensions of up to 20 m. The use of one-piece fins makes it possible to eliminate glazing connections and supports made by stainless steel fittings. In this way is obtained a uniform material solution.

In addition to glazed facades with flat planes, they can be shaped as spatial forms. The serrated

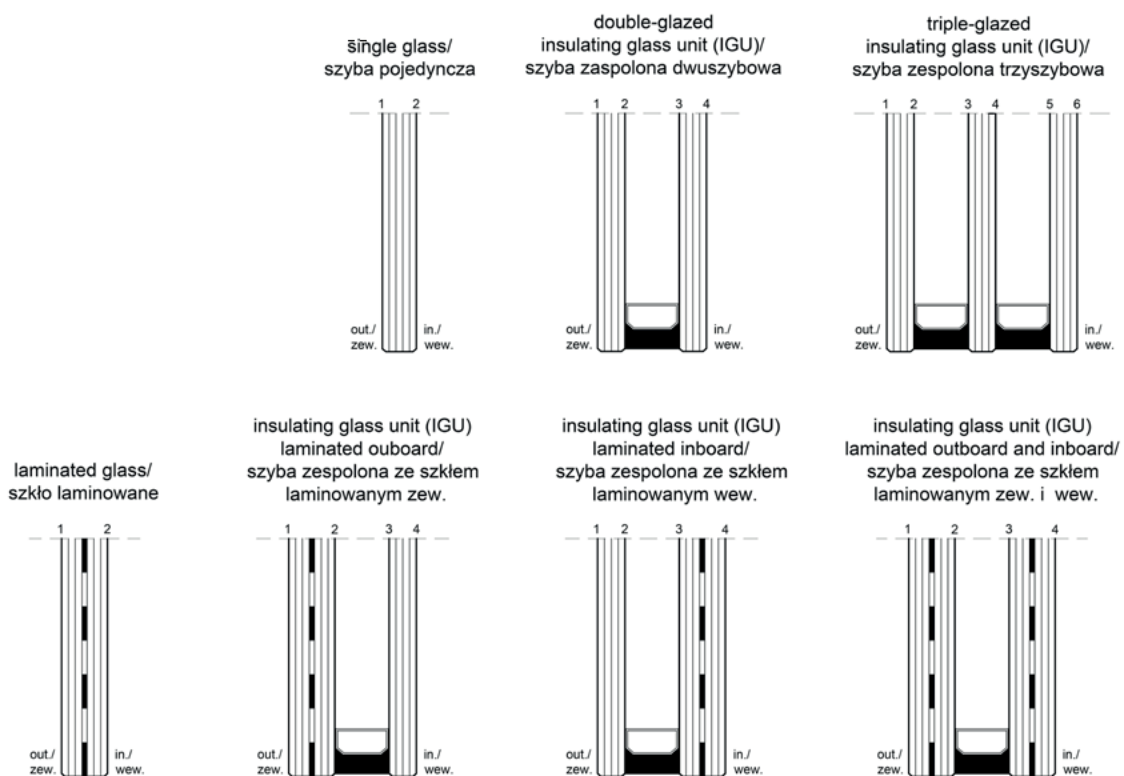
layouts of glass panes in folded plate systems create particular compositional effects. In a similar way, bent glass of various forms and curves can be used. The folding or bending of the plane, in both folded plate and bent glass systems, increases its stiffness, favouring the development of all-glass self-supporting systems.

Structural glass solutions are new and still being developed, so further research is desirable to fully explore their design methods. The use of structural glass in facades broadens the possibilities of shaping them, which contributes to the implementation of design concepts in which maximum transparency is sought.



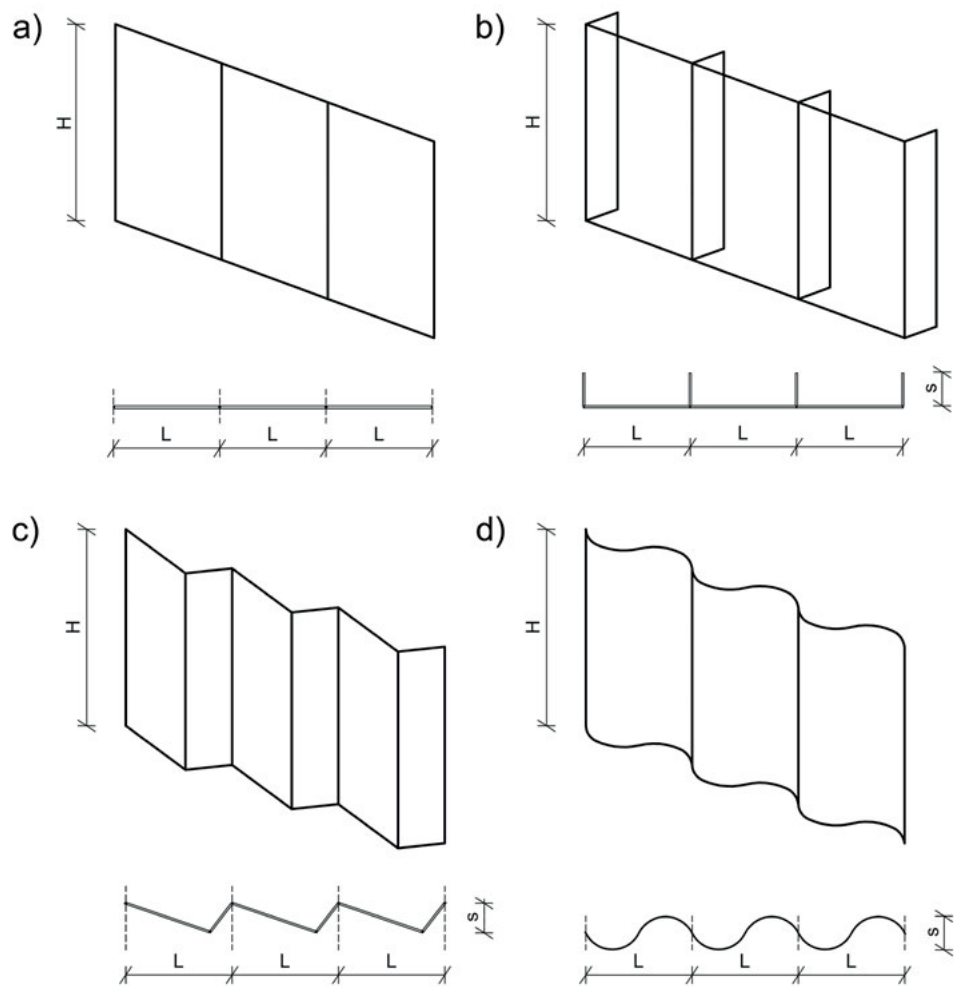
Ill. 1. Load schemes for the glass panes used in glass facades: a) out-of-plane load, b) out-of-plane and in-plane loads. Source: original work.

Il. 1. Schematy obciążeń w przypadku szyb stosowanych w szklanych elewacjach: a) obciążenie prostopadłe do płaszczyzny, b) obciążenie prostopadłe oraz w płaszczyźnie szyby. Źródło: opracowanie własne.



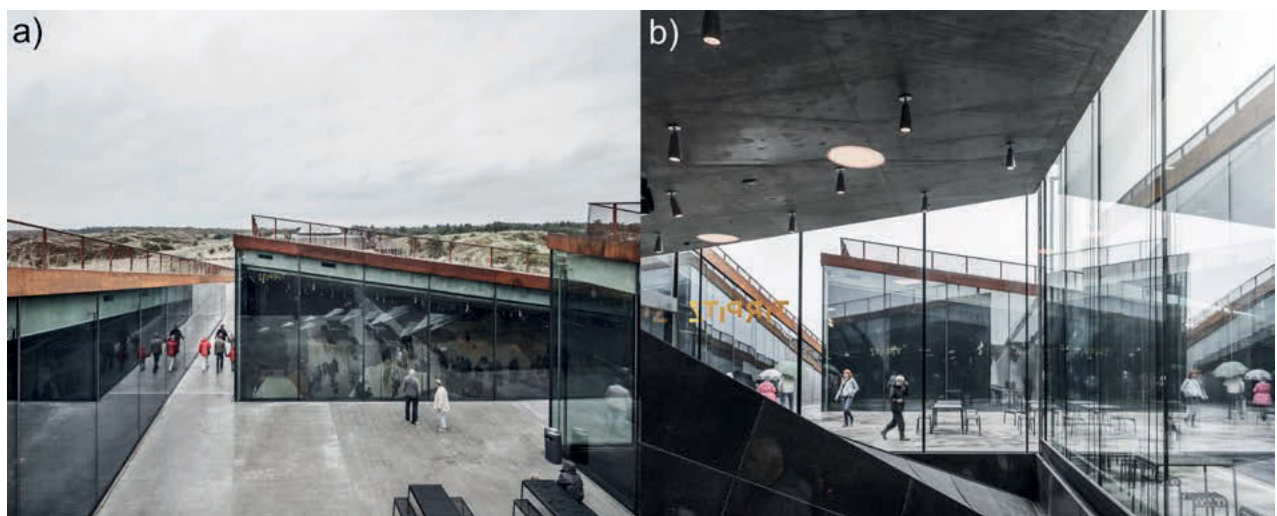
Ill. 2. Glass panes layouts used in glass facades. Source: original work.

Il. 2. Układy szyb stosowane w szklanych elewacjach. Źródło: opracowanie własne.



III. 3. Glass facades with structural glass: a) frameless system, b) facades with glass fins, c) glass folded plate system, d) facades with bent glass. Source: original work.

II. 3. Szklane elewacje z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego: a) system bezramowy, b) elewacje ze szklanymi żebrami, c) system tarczownicowy, d) elewacje ze szkłem giętym. Źródło: opracowanie własne.



III. 4. Tirpitz Museum in w Blåvand: a) glass facade — view from the outside, b) glass facade — view from the inside. Photos by © Rasmus Hjortshøj/Tirpitz Museum, 2017.

II. 4. Muzeum Tirpitz w Blåvand: a) szklana elewacja — widok na zewnątrz, b) szklana elewacja — widok z wewnątrz. Fot. © Rasmus Hjortshøj/Tirpitz Museum, 2017.



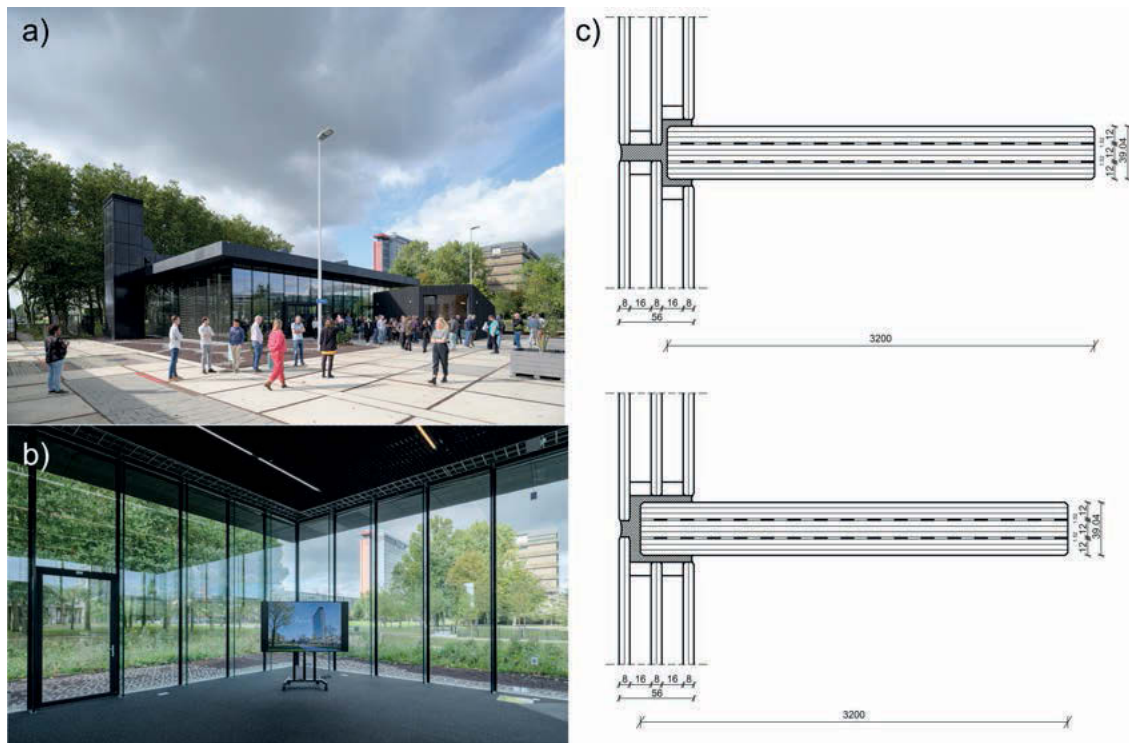
Ill. 5. Edgar N. Putman Event Pavilion in Doylestown. Photo by © Michael Moran/OTTO, 2012.

Il. 5. Pawilon im. Edgara N. Putmana w Doylestown. Fot. © Michael Moran/OTTO, 2012.



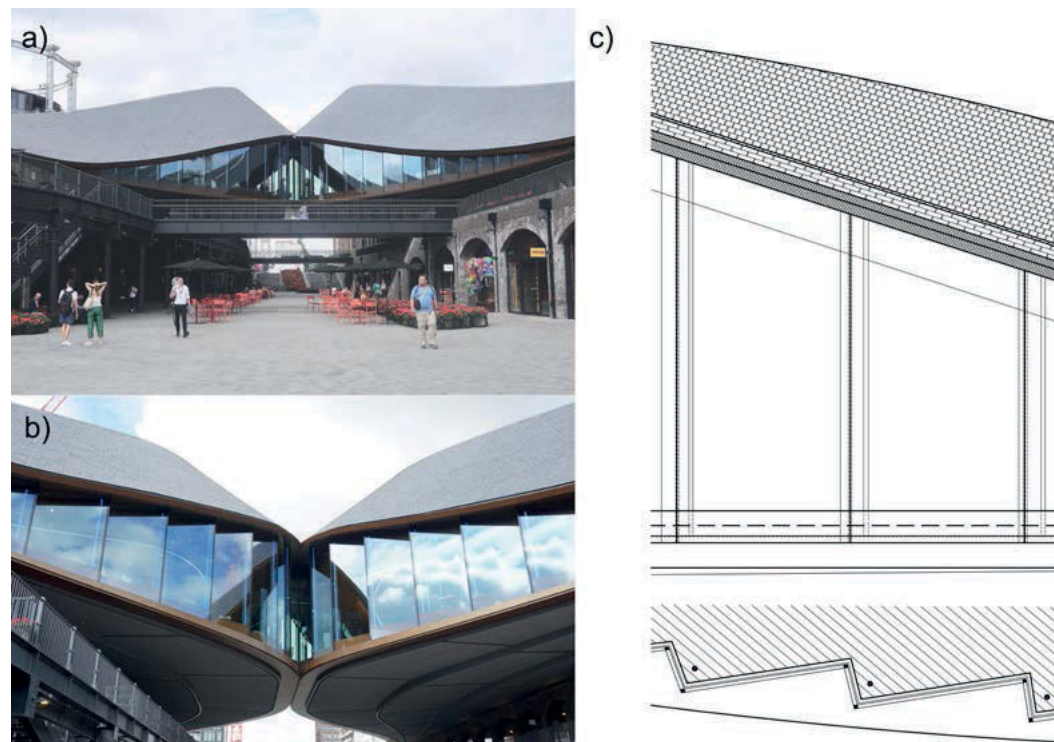
Ill. 6. Apple Store on Orchard Road in Singapore. Photo by © Apple, 2017.

Il. 6. Salon sprzedaży Apple przy Orchard Road w Singapurze. Fot. © Apple, 2017.



III. 7. Co-Creation Centre in Delft: a) glass pavilion, b) facade with glass fins — view from inside, c) connection of glass fins with triple-glazed insulating glass units (IGUs). Photos by © Ossip Architectuurfotografie, 2021. Source: original work based on (de Krom et al., 2020).

II. 7. Centrum współtworzenia Co-Creation Centre w Delft: a) szklany pawilon, b) elewacja ze szklanymi żebrami — widok z wnętrza, c) połączenie szklanego żebra z szybami zespolonymi trzyszybowymi. Fot. © Ossip Architectuurfotografie, 2021. Źródło: opracowanie własne na podstawie (de Krom i in., 2020).



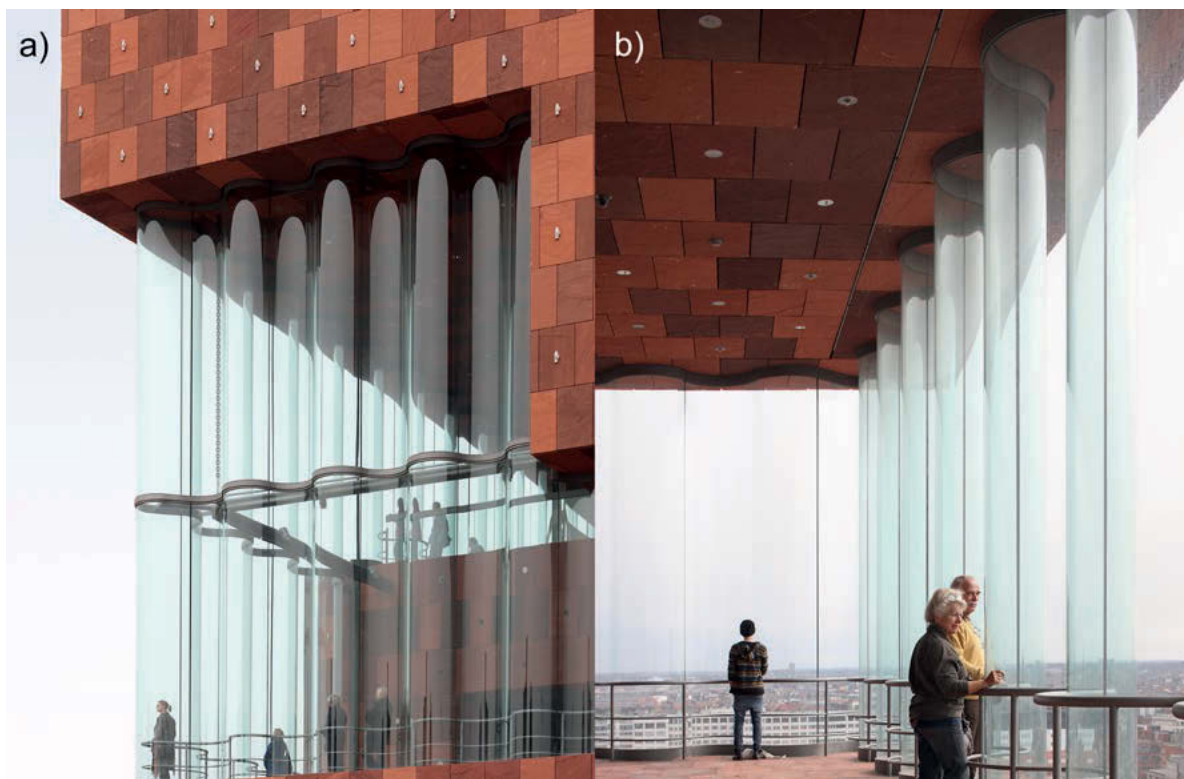
III. 8. Commercial and cultural centre Coal Drops Yard in London: a) glass link, b) glass folded plate facade, c) glazing layout of the folded plate facade. Photo by the author 2019. Drawing: Original work based on the architect's drawings.

II. 8. Centrum handlowo-kulturalne Coal Drops Yard w Londynie: a) szklany łącznik, b) szklana elewacja tarczownicowa, c) układ szyb w elewacji tarczownicowej. Fot. A. Józwick, 2019. Źródło: opracowanie własne na podstawie rysunków architekta.



III. 9. Residential building on Castle Lane in London: a) bent glass in facade, b) bow windows. Photos by A. Józwick, 2019.

II. 9. Budynek mieszkalny przy Castle Lane w Londynie: a) szkło gięte w elewacji, b) okna wykuszowe. Fot. A. Józwick, 2019.



III. 10. MAS Museum in Antwerp: a) double height building corner; b) corrugated bent glass. Photos by © Filip Dujardin/MAS Museum, 2009.

II. 10. Muzeum MAS w Antwerpii: a) narożnik budynku o podwójnej wysokości; b) szkło gięte o falistym kształcie. Fot. © Filip Dujardin/MAS Museum, 2009.

1. WPROWADZENIE

Obecnie szkło stało się materiałem budowlanym o szerokim zakresie zastosowań. W wielu budynkach są zauważalne coraz bardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania projektowe z jego użyciem. Transparentność szkła sprawia, że jest rozpatrywane nie tylko jako typowy materiał budowlany, ale przede wszystkim tworzący współczesną architekturę (Inamura, 2017). Sprzyja temu również warstwa kulturowa i semantyczna (Cybula, Żołnierczuk, 2015, s. 20), silnie implikując idee projektowe. Dlatego też szkło było kluczowym materiałem w wielu uznanych dziełach architektonicznych, jak na przykład: Piramida w Luwrze (arch. Ieoh Ming Pei, 1989), siedziba Fundacji Cartiera w Paryżu (arch. Jean Nouvel, 1994), szklany pawilon w Muzeum Sztuki w Toledo (arch. SANAA, 2006), salon sprzedaży Apple przy Piątej Alei w Nowym Jorku (arch. Bohlin Cywinski Jackson, 2006, 2011), budynek biurowo-administracyjny w Zamorze (arch. Alberto Campo Baeza, 2012).

Szkło w wielu budynkach jest utożsamiane przede wszystkim z elewacjami, nie tylko ze względu na przepuszczanie światła do wnętrza, ale również na kreatywną rolę w architekturze (Wala, 2012, s. 57). Służy temu transparentność, przeświecalność czy refleksyjność przeszklonych powierzchni (Wala, 2012, s. 58–78; Brzezicki, 2019a; Brzezicki, 2021b; Rogińska-Niesłuchowska, 2017). Dodatkowo wraz z rozwojem technologii szkła zwiększa się zakres możliwości projektowania elewacji. Szkło, choć z natury kruche, jest coraz częściej wskazywane i rozpatrywane jako materiał konstrukcyjny. Dzięki temu można kształtować całoszklane struktury, eliminując konieczność zastosowania konstrukcji wsporczych z użyciem aluminium, stali czy drewna. Stosowanie szkła konstrukcyjnego przyczynia się do zaawansowanych pod kątem inżynierskim rozwiązań, które uwydatniają jego walory jako materiału transparentnego. Nadrzędnym celem pozostaje urzeczywistnianie idei projektowych i kształtowanie wyrazu współczesnej architektury.

Cel pracy

Głównym celem artykułu jest rozpoznanie i przeanalizowanie możliwości stosowania szkła konstrukcyjnego w projektowaniu przeszklonych elewacji. Postęp w rozwoju technologii produkcji i modyfikacji tafli szklanych przyczynia się do powstawania nowych produktów. Zwiększa się tym zakres możliwości kształtowania współczesnej

architektury, w tym szklanych elewacji. Z tych względów do przeprowadzenia dalszych analiz zaproponowano typologię rozwiązań projektowych elewacji z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego. Jej celem jest ustalenie charakterystyki rozwiązań całoszklanych struktur samonośnych (Wurm, 2007). Ponadto analiza stanu wiedzy dotycząca właściwości szkła konstrukcyjnego oraz jego stosowania w wybranych realizacjach pozwoli na lepsze zrozumienie sposobu projektowania przeszklonych elewacji. Przyjęte założenia pracy wpisują się w zależność wyrażoną jako: Projektowanie (P) + Badania (B) = Użyteczna Wiedza (W) (Ángel, Batista, 2021, s. 21).

Zakres pracy

Zakres problemowy pracy obejmuje aspekty konstrukcyjne i technologiczne zastosowania szkła w elewacjach. Rozwój wiedzy dotyczący wytrzymałości i właściwości mechanicznych szkła przyczynia się do poszukiwania nowych rozwiązań projektowych, które w szerokim zakresie dotyczą obudowy budynku. Stąd niniejsza praca dotyczy problematyki projektowania szklanych elewacji z użyciem szkła konstrukcyjnego. W pracy analizie poddano elewacje kształtowane jako całoszklane struktury samonośne.

Zakres czasowy prowadzonych badań obejmuje okres około piętnastu ostatnich lat. W tym okresie nastąpił znaczący rozwój technologii szkła oraz jego stosowania jako materiału konstrukcyjnego w przeszklonych elewacjach.

Metody pracy

Badania związane z pracą przeprowadzono w kilku etapach. Na początku określono główny problem badawczy wraz z przesłankami do jego podjęcia. W tym celu wykonano analizę aktualnych badań naukowych i rozwojowo-wdrożeniowych. Kluczowym elementem była analiza i krytyka dostępnej literatury oraz dokumentacji projektowych (Niezabitowska, 2014, s. 154). W dalszym etapie określono metody i techniki badawcze. Analizy badawcze przeprowadzono z zastosowaniem metody logicznej argumentacji, metody porównawczej oraz studium przypadku. Szczególną rolę odegrała tu metoda studium przypadku ze względu na wyjaśniający i opisowy charakter (Niezabitowska, 2014, s. 222). Na podstawie wytypowanych obiektów o podobnych rozwiązaniach projektowych możliwe było ustalenie typologii przeszklonych elewacji z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego wraz z charakterystyką danego rozwiązania. W końcowym etapie badań opracowano wyniki i wnioski końcowe.

Przegląd literatury

Problematyka pracy dotyczy szkła i z tego powodu jej zakres jest szeroki i wielowątkowy. Niewątpliwie u źródeł stosowania szkła w architekturze (Wala, 2012) leży transparentność materiału, co jest nie tylko cechą fizyczną, a przede wszystkim ma szerokie konotacje w zakresie teorii architektury (Rowe, Slutzky, 1997; Inamura, 2017; Ishida, 2020; Kang, Park, 2021; Rosales, 2023). Pojęcie transparentności zostało na nowo zinterpretowane wraz z rozwojem zaawansowanych technologii szkła, w tym szkła konstrukcyjnego, czego efektem jest wprowadzenie określenia „transparentnej inżynierii” (ang. *engineered transparency*) (Nicklisch, 2008; Rapport, 2009; Schneider, Weller, 2010; Pariafsai, 2016; Inamura, 2017; Józwik, 2021).

W stosowaniu szkła jako materiału konstrukcyjnego istotne są jego właściwości wytrzymałościowe i mechaniczne. Analizowany jest również charakter jego pracy oraz zachowanie w stanie pokrytym ze względu na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa (Delincé i in., 2008; Haldimann, Luible, Overend, 2008; Kozłowski, 2019a; Kozłowski i in., 2019b; Respondek, 2019; Józwik, 2022a).

W kontekście tematyki pracy znaczącą wiedzę wnoszą opracowania dotyczące szklanych elewacji (Celadyn, 2004; Wurm, 2007; Patterson, 2011; Tymkiewicz, 2014; Brzezicki, 2018a; Brzezicki, 2018b; Brzezicki, 2019a; Brzezicki, 2021a; Brzezicki 2021b; Herzog, Krippner, Lang, 2021). Na szczególną uwagę zasługują pozycje poruszające tematykę szczegółowych rozwiązań materiałowych i projektowych, stosowanych w zaawansowanych rozwiązaniach elewacyjnych, takich jak: ponadwymiarowe szyby (Laufs, Nefedov, 2016; Bedon, Amadio, 2018; Rubel, 2021), szklane żebra (Sanches, 2013; Brzezicki, 2019b; de Krom i in., 2020; Bedon, 2021a, Bedon, 2021b), szkło w układach tarczownicowych (Carvalho, Crus, 2014; Eekhout, Weber, 2014; Lenk, 2022), szkło gięte (Nijsee, 2009; Nijsee, Wenting, 2014; Doulkari, 2014; Datsiou, 2017; Fildhuth, Schieber, Oppe, 2018).

Istotne dla problematyki tej pracy są również badania prowadzone w ramach procesu projektowego i realizacyjnego, tak zwane badania poprzez projektowanie (Ángel, Batista, 2021, s. 15–16). Ich zastosowanie pozwala na weryfikację założeń projektowych i wprowadzenie ulepszeń do wstępnie przyjętych modeli i prototypów. Na tym etapie procesu projektowego są prowadzone zarówno analizy numerycznie, jak i badania w warunkach laboratoryjnych i warsztatowych (Doulkari, 2014; Feirabend, Eckardt, Benning, 2014; Lenk, 2016; Lenk, 2022; Blandini, Grasmug, 2018; Teich, 2019; Teich, Bauchinger, 2020; de Krom i in., 2021; Veer, de Krom, Nijse, 2021).

2. CHARAKTERYSTYKA SZKŁA KONSTRUKCYJNEGO STOSOWANEGO W SZKLANYCH ELEWACJACH

Szkło stosowane w elewacjach jest produkowane i modyfikowane pod kątem spełnienia określonych wymagań użytkowych i technicznych. Przede wszystkim wykorzystuje się właściwości spektrofotometryczne szkła w celu uzyskania produktów charakteryzujących się określonymi cechami, takimi jak: przepuszczalność światła widzialnego, ochrona przed nasłonecznieniem, refleksyjność lub antyrefleksyjność (Sacht i in., 2021; Kosmala, Kuśnier, Kozłowski, 2022, s. 28). Wytwarzane są również szyby zespolone ze szkłem niskoemisyjnym, które zapewniają ochronę termiczną wewnątrz budynku (Aguilar-Santana i in., 2020). W zależności od stawianych wymagań użytkowych i technicznych można także zastosować inne rodzaje szkła, jak na przykład: szkło izolujące akustycznie, szkło bezpieczne czy szkło antywłamaniowe.

Pod względem wytrzymałościowym lekkie ściany osłonowe, do których zalicza się szklane elewacje, podlegają takim wymaganiom (EN 13830, 2020) jak:

- 1) odporność na obciążenie wiatrem;
- 2) odporność na obciążenia śniegiem;
- 3) odporność na uderzenie wewnętrzne lub zewnętrzne;
- 4) odporność na obciążenia poziome;
- 5) odporność na wstrząsy sejsmiczne;
- 6) odporność na szok termiczny;
- 7) zdolność przenoszenia ciężaru własnego;
- 8) odporność ogniowa.

Z tego też względu szkło stosowane w elewacjach jest weryfikowane konstrukcyjnie. Obliczeniom statycznym najczęściej podlega płyta szklana ze względu na obciążenia przyłożone prostopadłe do powierzchni, takie jak wiatr (Gwóźdź, Woźniczka, 2020) czy uderzenie ciałem miękkim (Kozłowski, 2019a; Kozłowski, 2021) (il. 1a). Uwzględnia się również obciążenia klimatyczne w szybach zespolonych (Buddenberg, Hof, Oechsner, 2016; Respondek, 2018). Tylko w szczególnych przypadkach analizowana jest rola ściany przenoszącej siły pionowe, czyli statycznie pracującej na ściskanie (DuBois, 2007; Mocibob, 2008; Kozłowski, 2011). Wtedy uwzględnia się również obciążenia w płaszczyźnie tafli szklanej (il. 1b).

Właściwości wytrzymałościowe szkła

Przy zastosowaniu szkła jako materiału konstrukcyjnego istotne są jego właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe. Szkło charakteryzuje się dużą

wytrzymałością na ściskanie, jednak dla celów projektowych określa się wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, która dla szkła odprężonego float wynosi 45 [MPa] (Kozłowski, 2019a; Józwik, 2022a). W celu zwiększenia jego wytrzymałości i odporności termicznej szkło jest poddawane modyfikacji. W wyniku ponownego podgrzania do temperatury mięknięcia, a następnie przez schładzanie otrzymuje się szkło hartowane o wytrzymałości 120 [MPa]. Przy wydłużonym w czasie schładzaniu jest uzyskiwane szkło wzmacniane termicznie o wytrzymałości 70 [MPa]. Wraz z procesem obróbki termicznej zmianie ulega również charakter spękań szkła po jego rozbiciu, co ma wpływ na bezpieczeństwo użytkowników, jak również na wytrzymałość szkła po jego zniszczeniu (Kozłowski i in., 2019b; Józwik, 2022a). W przypadku pęknięcia szkła odprężone float charakteryzuje się dużymi odłamkami o ostrych krawędziach. Cechą charakterystyczną dla szkła hartowanego jest natomiast siatka spękań o małych odłamkach, przez co jest klasyfikowane jako szkło bezpieczne (Kosmala, Kuśnierz, Kozłowski, 2022, s. 46). Pośredni stan pod względem wielkości odłamków w siatce spękań występuje w szkłe wzmacnianym termicznie.

Szkło laminowane

Szkło konstrukcyjne, w porównaniu do innych materiałów stosowanych w elementach nośnych, cechuje kruchość. Skutkuje to możliwością jego nagłego zniszczenia. Z tego też względu w rozwiązaniach konstrukcyjnych jest stosowane szkło laminowane, złożone z minimum dwóch tafli szklanych złączonych za pomocą warstwy klejącej. Przez laminowanie tafli szklanych uzyskuje się szkło bezpieczne, co oznacza, że warstwa klejąca utrzymuje odłamki szkła w przypadku pęknięcia tafli szklanej.

W zależności od przeznaczenia szkła jako warstwę klejącą stosuje się folię poliwinylbutyralową PVB lub folię EVA na bazie kopolimeru etylenu z octanem winylu (Kosmala, Kuśnierz, Kozłowski, 2022, s. 81–83), przeważnie o grubości 1,52 mm. W przypadku bardziej wymagających zastosowań może być użyty sztywniejszy wariant folii PVB lub jonomer SentryGlas. Zwłaszcza jonomer charakteryzuje się lepszymi parametrami z uwagi na zastosowanie w elementach konstrukcyjnych. Ten rodzaj warstwy cechuje się większą wytrzymałością na rozciąganie i pięciokrotnie większą wytrzymałością na rozrywanie (Józwik, 2022a). Dzięki właściwościom wytrzymałościowym jonomeru SentryGlas można uzyskać mniejszą grubość szkła laminowanego w elementach konstrukcyjnych, a przez to zmniejszyć jego ciężar, co jest korzystne dla elementów elewacyjnych.

3. TYPOLOGIA SZKLANYCH ELEWACJI Z ZASTOSOWANIEM SZKŁA KONSTRUKCYJNEGO

Podstawowym elementem elewacji są panele szklane. Ich wymiar wynika z zaproponowanych w projekcie podziałów przeszklonych płaszczyzn. Standardowy wymiar tafli szklanej wynosi 3210 × 6000 mm. Rozwój technologii szkła umożliwia obecnie wytwarzanie coraz większych szyb, tj. ich największy wymiar wynosi 3600 × 20000 mm (Sedak, 2023). Możliwość otrzymywania ponadwymiarowych tafli szklanych sprzyja projektowaniu większych podziałów elewacji, co ma wpływ na wyraz architektoniczny budynku. Wraz z większymi podziałami przeszklonych powierzchni zmniejsza się liczbę elementów potrzebnych do mocowania, łączenia i uszczelniania szyb. Uzyskuje się w ten sposób jednolity materiałowo odbiór transparentnej elewacji.

Szkło stosowane w obudowach budynków jest dobierane ze względu na wymagania techniczne i użytkowe. Przeszklona elewacja, oprócz względów estetycznych, pełni funkcję przegrody, a przez to ma wpływ na kształtowanie komfortu wewnętrznego w budynkach. Szkło, najczęściej dobrane pod kątem właściwości spektrofotometrycznych, jest umieszczane w izolującej termicznie szybie zespolonej (Respondek, 2018), która składa się z dwóch lub trzech tafli szklanych zespalanych przy użyciu ramki dystansowej, mas uszczelniających i substancji adsorbujących parę wodną. W szybach tych może być użyte szkło pojedyncze lub laminowane, weryfikowane ze względu na jego konstrukcyjną rolę (il. 2).

Typologia szklanych elewacji z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego

W celu przeprowadzenia dalszych analiz zaproponowano typologię szklanych elewacji z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego. Jako główne kryterium przyjęto poszukiwanie rozwiązań, w których eliminuje się lub ogranicza do minimum elementy wsporcze z użyciem materiałów takich jak aluminium, stal czy — czasami — drewno. W ten sposób dąży się do uzyskania samonośnych rozwiązań całoszklanych. Wtedy rola szkła jako materiału konstrukcyjnego staje się kluczowa, szczególnie w elewacjach o większych wysokościach. Postawione tak założenia pozwoliły na wyodrębnienie następujących systemów elewacyjnych (il. 3):

- systemy bezramowe,
- ze szklanymi żebrami,
- układy tarczownicowe,
- elewacje ze szkłem giętym.

Bezramowe systemy elewacyjne

W bezramowych systemach elewacyjnych szyby są mocowane liniowo na górnej i dolnej krawędzi. Jest to nowe rozwiązanie i dalej rozwijane, szczególnie w przypadku zastosowania szyb o dużych wymiarach. Do ich podparcia służą podpory w postaci metalowych konsoli mocowanych w elementach konstrukcyjnych budynku. Alternatywnie są stosowane aluminiowe lub stalowe profile o kształcie litery U, a także podpory kształtowane z użyciem obustronnie zamocowanych kątowników stalowych (Bedon, Amadio, 2018). Zastosowanie liniowego podparcia szyb na górnej i dolnej krawędzi umożliwia wyeliminowanie profili aluminiowych w linii pionowej. Łączenie szyb jest wtedy wykonywane za pomocą spoin doczołowych z silikonu uszczelniającego (Weller i in., 2009, s. 58–59) (il. 3a).

Pod względem konstrukcyjnym w systemach bezramowych, oprócz zginania w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni szkła, uwzględniane jest wyboczenie ze względu na ściskanie w płaszczyźnie tafli szklanej (Bedon, Amadio, 2018). Z tych przyczyn stosuje się szyby o większej grubości, na przykład ze szkłem laminowanym, aby uzyskać większą sztywność panelu szklanego.

Systemy bezramowe w szklanych elewacjach poszerzają możliwości projektowania współczesnych obiektów architektonicznych. Bez aluminiowego obramowania uzyskuje się jednolitą materiałowo powierzchnię przeszklenia zarówno z zewnątrz, jak i wewnątrz. W ten sposób możliwy jest do osiągnięcia efekt dematerializacji szklanej ściany (Dworzak-Żak, 2010; Kang, Park, 2021).

Elewacje ze szklanymi żebrami

Przy większych wysokościach elewacji projektowane są systemy wsporcze w postaci konstrukcji z profili stalowych lub systemów ciągnowych (Patterson, 2011), których zadaniem jest przenoszenie obciążenia wiatrem. W celu uzyskania jednolitego rozwiązania materiałowego coraz częściej stosuje się szklane żebra ustawiane prostopadle do płaszczyzny elewacji (Brzezicki, 2019b). Rozstaw szklanych żeber wynosi od 1,5 m do maksymalnie 3 m. Wymiar ten jest skoordynowany z szerokością szyby w elewacji. Żebra są wykonywane ze szkła laminowanego, najczęściej z dwóch lub trzech warstw szkła wzmocnianego termicznie, lub hartowanego. Stosunek głębokości żebra do jego długości s/H wynosi $1/20 \div 1/30$ (il. 3b).

Szklane żebra mogą być projektowane jako jednosegmentowe lub wielosegmentowe, tj. z pojedynczych segmentów łączonych spe-

cialnymi płytami ze stali nierdzewnej oraz skręcanych śrubami (Sanches, 2013; Gere, 2014). W przypadku żeber wielosegmentowych szyby są podpierane punktowo za pomocą łączników ze stali nierdzewnej typu spider, rotula (Bedon, Santarsiero, 2018) bądź klamry zaciskowej (Laufs, Nefedov, 2016). Wraz z rozwojem technologii szkła jest możliwe wytwarzanie jednosegmentowych żeber o coraz większych długościach. Wtedy szyby najczęściej są podpierane liniowo z użyciem silikonu konstrukcyjnego (Liang, Lancaster, Izzuddin, 2016) bez konieczności użycia elementów łączących ze stali nierdzewnej. Silikony konstrukcyjne wykazują się dobrymi właściwościami w połączeniach typu metal-szkło, ale także szkło-szkło. Przeważnie charakteryzują się niską wartością modułu sprężystości, wysokim wydłużeniem przy zerwaniu i dobrą przyczepnością. Ich działanie polega na przeniesieniu obciążeń w sposób jednorodny. Zarazem mogą kompensować duże różnice odkształceń spowodowanych obciążeniem wiatrem i różnicami temperatur (Drass, Krauss, 2021).

Ze względu na długość szklanych żeber istotnym zagadnieniem jest ich smukłość. Dodatkowo wymiary ich przekroju poprzecznego charakteryzują się znacznymi dysproporcjami, tj. jeden z wymiarów jest znacznie większy. Z tych względów przy ich projektowaniu uwzględnia się moment krytyczny przy giętno-skrętnym wyboczeniu (Luible, Schärer, 2016; Santo, Mattei, Bedon, 2016; Bedon, 2021a; Bedon 2021b).

Układy tarczownicowe w elewacjach

Układy tarczownicowe są stosowane w rozwiązaniach konstrukcyjnych, na przykład w konstrukcjach żelbetowych (Muljadinata, Darmawan, 2016). Konstrukcje te charakteryzują się większą sztywnością, co skutkuje mniejszą grubością elementu konstrukcyjnego, dlatego też stanowią źródło inspiracji do poszukiwania podobnych rozwiązań z użyciem szkła (Wurm, 2007, s. 156–158; Carvalho, Crus, 2014; Eekhout, Weber, 2014).

Formowanie układów tarczownicowych z użyciem szkła jest możliwe przez modułowe ustawienie pod kątem co najmniej dwóch paneli szklanych (il. 3c). Uzyskany tak powtarzalny moduł może być użyty w elewacjach kształtowanych w linii prostej lub krzywoliniowej, które w rzucie tworzą charakterystyczny układ nazywany „ząbkowanym” lub „zygzakowatym” (Brzezicki, 2018b). Przez formowanie „zagięć” w przeszkłonej elewacji zwiększa się jej sztywność, co jest korzystne ze względu na działanie obciążenia wiatrem. Daje to możliwość uzyskania

konstrukcji samonośnej bez konieczności stosowania elementów wsporczych.

Ze względu na uwarunkowania przestrzenne, które wynikają z ustawienia pod kątem paneli szklanych, istotnym zagadnieniem projektowym jest kształtowanie połączeń w narożnikach w układach tarczownicowych. Prowadzone badania i prace rozwojowe w tym zakresie są ukierunkowane na ograniczenie obramowań aluminiowych. Proponowane rozwiązania dotyczą między innymi połączeń z użyciem silikonu konstrukcyjnego (Lenk, 2022) czy perforowanej stalowej blachy laminowanej w tafli szklanej (Carvalho, Crus, 2014).

Przeszkłone układy tarczownicowe stanowią jeden ze sposobów kompozycji elewacji (Brzezicki, 2018a), tworząc jej dynamiczny charakter w porównaniu do płaskich płaszczyzn. Geometria tych układów determinuje również zjawiska percepcyjne zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz budynku. Światło jest odbijane od szklanych powierzchni ustawionych względem siebie pod kątem, jednocześnie następuje wzajemne odbicie tych powierzchni. Z drugiej strony efekt wizualny kształtowany jest również jako widok z wnętrza budynku (Brzezicki, 2018b).

Elewacje ze szkłem giętym

Pewną analogię do układów tarczownicowych w elewacjach wykazują rozwiązania z zastosowaniem szkła giętego. Obecnie bardzo dynamicznie są rozwijane technologie pozwalające na modyfikację kształtu tafli szklanych. Do zakrzywiania szkła stosuje się metodę gięcia na gorąco lub na zimno (Neugebauer, 2014; Datsiou, 2017). Dzięki temu można uzyskać szkło o różnych kształtach i stopniu zakrzywienia (Hohenstein, 2019). W klasyfikacji kształtu szkła giętego może być pomocna krzywizna Gaussa, zgodnie z którą wyróżnia się powierzchnie jedno- i dwukrzywiznowe (Datsiou, 2017, s. 40). W przypadku elewacji najczęściej jest stosowane szkło o pojedynczej krzywiznie, charakterystycznej dla wszystkich rozwijanych form powstających poprzez jednoosiowe zaginanie płaskiej powierzchni.

Procesowi gięcia szkła są poddawane zarówno pojedyncze tafle szkła, jak i szkło laminowane. Wytwarzane są również szyby zespolone o zakrzywionej geometrii. Dzięki postępowi technologicznemu w produkcji szkła giętego istnieje możliwość uzyskania coraz większych elementów. Największy wymiar szkła giętego wynosi obecnie 3600×18000 mm (Nortglass, 2023).

Szkło gięte o pofalowanych (Nijse, 2009), cylindrycznych (Teich, 2019) czy fasetowych kształtach (Sanchez-Gil, 2019), coraz częściej jest stosowane

w elewacjach ze względu na uzyskiwane efekty przestrzenne. Przez zagięcie płaszczyzny istnieje możliwość kształtowania samonośnych elewacji. Ciężar własny szkła jest przenoszony z wykorzystaniem jego właściwości wytrzymałościowych na ściskanie, natomiast zagięta płaszczyzna staje się znacznie sztywniejsza, przez co skutecznie przeciwdziała obciążeniom wiatru. Na podstawie badań udowodniono, że dla szkła giętego o falistym kształcie stosunek wysokości „fali” do wysokości elementu s/H (il. 3d) powinien wynosić $1/20$ (Nijse, 2009), co można porównać do proporcji stosowanych w szklanych żebkach.

4. ANALIZA ROZWIĄZAŃ PROJEKTOWYCH SZKLANYCH ELEWACJI Z ZASTOSOWANIEM SZKŁA KONSTRUKCYJNEGO NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH

Muzeum Tirpitz w Blåvand (Dania), 2017, arch. Bjarke Ingels Group

Inspiracją do założenia Muzeum Tirpitz w Blåvand był bunkier pochodzący z okresu II wojny światowej. Obiekt ten został rozbudowany w 2017 roku. Zgodnie z koncepcją projektową, w nowej części muzeum powstała dodatkowa przestrzeń ekspozycyjna, dostępna ze wspólnego, centralnego dziedzińca. W ramach tej zabudowy zostały stworzone cztery zróżnicowane tematycznie sale muzealne. Całe założenie silnie wkomponowano w miejscowy krajobraz, w związku z czym przestrzenie ekspozycyjne zostały umiejscowione w części podziemnej nasypu. Układ ten akcentują rozcięcia w terenie, które prowadzą do dziedzińca i zarazem doświetlają wnętrza. Dodatkowo charakter zabudowy podkreślają zastosowane materiały. Głównym materiałem konstrukcyjnym jest eksponowany surowy beton, przełamany kompozycyjnie dużymi przeszkleniami. Szklane elewacje zostały wkomponowane wzdłuż pieszych traktów komunikacyjnych, prowadzonych w linii nacięć w nasypie oraz wokół dziedzińca. Aby wydobyć czytelność kompozycji, zaprojektowano system bezramowy z ponadwymiarowymi szybami (il. 4a, 4b). Maksymalny ich wymiar wynosi 2600×6200 mm. Panele szklane zostały zamocowane dwustronnie — na górnej i dolnej krawędzi za pomocą metalowych konsoli. W linii pionowej ich styku wykonano spoiny doczołowe z silikonu uszczelniającego. Do przeszklenia elewacji zastosowano szyby zespolone ze szkłem laminowanym umieszczonym od strony przestrzeni ekspozycyjnych. W rozwiązaniach bezramowych głównym elementem konstrukcyjnym jest płyta szklana pracująca na zginanie w wyniku

oddziaływań obciążenia wiatru, ale także podatna na wyboczenie na skutek niepodpartych, pionowych krawędzi (Bedon, Amadio, 2018).

Pawilon im. Edgara N. Putmana w Muzeum Sztuki Michenera w Doylestown (Stany Zjednoczone), 2012, arch. Kieran Timberlake Architects

Muzeum Sztuki Michenera znajduje się w budynkach po byłym więzieniu hrabstwa Bucks, założonym w 1884 roku. Prawie sto lat później istniejące budynki zostały adaptowane na potrzeby muzeum, które powstało w celu zachowania i ekspozycji sztuki oraz dziedzictwa kulturowego regionu hrabstwa Bucks, w stanie Pensylwania. W 2012 roku wzniesiono szklany pawilon im. Edgara N. Putmana. Został on zaprojektowany z przestrzenią służącą do realizacji specjalnych wydarzeń i uroczystości, jak również z przeznaczeniem na komercyjne konferencje czy ceremonie weselne.

Cechą charakterystyczną pawilonu są przeszklone elewacje zaprojektowane w systemie bezramowym (il. 5). Dzięki transparentnym ścianom wyeksponowano stary kamienny mur po byłym więzieniu. Głównym elementem elewacji jest panel szklany o wymiarach 1682 × 7011 mm. Do przeszklania zastosowano szyby zespolone, w których od zewnątrz umieszczono trójwarstwową szybę laminowaną, a od wewnątrz szybę laminowaną złożoną z dwóch warstw. Całkowita grubość panelu szklanego wynosi 70 mm, a jego ciężar sięga 1,5 tony. Układ przeszkleń i grubość szyby zespolonej ma na celu zapewnianie odpowiedniej sztywności w systemie bezramowym.

Salon sprzedaży Apple przy Orchard Road w Singapurze (Singapur), 2017, arch. Foster + Partner

Salony sprzedaży firmy Apple są znane ze spektakularnych rozwiązań z użyciem szkła konstrukcyjnego. Jako przykład można wskazać pawilon wejściowy w formie szklanego sześcianu, zlokalizowany przy Piątej Alei w Nowym Jorku (arch. Bohlin Cywinski Jackson, 2006, 2011) (Ishida, 2020, s. 124–126; Jóźwik, 2022b). W wielu innych salonach sprzedaży firmy Apple zastosowano szkło konstrukcyjne w elewacjach ze szklanymi żebrowaniami (O’Callaghan, 2016). Jeden z takich salonów znajduje się w kompleksie budynków Knightsbridge przy Orchard Road w Singapurze (il. 6). W elewacji użyto szkła o obniżonej zawartości tlenków żelaza, przez co wyeliminowano charakterystyczny zielony odcień typowy dla szkła float. Dzięki temu uzyskano transparentną witrynę

o neutralnym zabarwieniu, która umożliwia przenikanie się przestrzeni wewnętrznej i zewnętrznej (Krajewska, 2019). Efekt ten jest potęgowany przez zielenią znajdującą się zarówno w sklepie, jak i w strefie ulicy.

Przeszklona elewacja w salonie Apple przy Orchard Road ma wysokość 14 m, a jej szerokość wynosi 36,5 m. Ze względu na wysokość transparentnej ściany, a przez to konieczność jej usztywnienia, zastosowano układ jednosegmentowych szklanych żeber, których rozstaw wynosi 3,1 m. Żebra zostały zaprojektowane z pięciu warstw szkła wzmocnianego termicznie grubości 12 mm, łączonych przy użyciu warstw jonomeru SentryGlas grubości 1,52 mm. Ich głębokość wynosi 600 mm, co stanowi proporcję s/H równą 1/30 (il. 3b).

Szklane żebra podpierają panele szklane za pomocą połączeń z użyciem silikonu konstrukcyjnego. Ze względu na wymiar szyb, wynoszący 3100 × 14000 mm, konieczne było zwiększenie ich sztywności. Z tego względu zastosowano szyby zespolone złożone z dwóch tafli ze szkła laminowanego. Każda tafla szklana składa się z dwóch warstw szkła wzmocnianego termicznie o grubości 12 mm, łączonych za pomocą jonomeru SentryGlass o grubości 1,52 mm.

Centrum współtworzenia Co-Creation Centre w Delft (Holandia), 2021, arch. Mecanoo

Szklane żebra coraz powszechniej znajdują zastosowanie w elewacjach ze względu na możliwość uzyskania całoszklanych struktur. Zastosowano je również w szklanym pawilonie uniwersyteckiego centrum Co-Creation Centre w Delft (il. 7a). Jego rzut ma wymiary 22,5 × 13,5 m, a wysokość wynosi 6 m. Obiekt ten został wzniesiony jako miejsce do organizacji wydarzeń w ramach The Green Village, gdzie podejmowane są działania ukierunkowane na innowacje i współtworzenie na rzecz zrównoważonej przyszłości.

Szklany pawilon stanowi przykład innowacyjnego rozwiązania w zakresie ustroju nośnego. Stalowa konstrukcja dachu jest podparta wyłącznie na rozstawionych co 1,5 m szklanych żebrowaniach (il. 7b), które oprócz obciążeń wiatrem przenoszą siły pionowe z dachu. Szklane żebra, o wysokość 5200 mm i głębokość 300 mm, zostały zaprojektowane ze szkła laminowanego z trzech warstw szkła wzmocnianego termicznie o grubości 12 mm, łączonych podwójnymi warstwami (2 x 0,76 mm) jonomeru SentryGlas. Ich układ jest stabilizowany przez szklane panele elewacyjne. Ma to na celu uzyskanie sztywności przestrzennej. Do przeszklania elewacji zastosowano potrójne

szyby zespolone, co wynika z wymagań w zakresie ochrony przed stratami ciepła.

Szyby zespolone zostały połączone ze szklanymi żebrami za pomocą silikonu konstrukcyjnego. Było to korzystne ze względu na ich rolę jako elementów usztywniających i związane z tym przeniesienie sił. W początkowym wariantcie założono, że żebro zostanie osadzone w komorze międzyszybowej od wewnętrznej strony fasady. Zaproponowane rozwiązanie wymagało jednak powiększenia długości spoiny silikonowej. Ostatecznie żebro zostało wsunięte głębiej, tj. w drugą komorę międzyszybową (il. 7c), usytuowaną od zewnętrznej strony fasady (de Krom i in., 2021).

Żebra w tym projekcie pełnią rolę słupów, dlatego były analizowane jako elementy pracujące na zginanie wskutek poziomych obciążeń wiatrem (Luible, Schärer, 2016; Santo, Mattei, Bedon, 2016; Bedon, 2021a; Bedon 2021b) oraz na ściskanie w odpowiedzi na działanie sił pionowych (Aiello i in., 2011; Amadio, Bedon, 2011; Huang i in., 2022). Ostatecznie weryfikacja szklanych żeber została wykonana z wykorzystaniem analiz numerycznych oraz pełnoskalowych badań laboratoryjnych (de Krom i in., 2021; Veer, de Krom i Nijssse, 2021).

Centrum handlowo-kulturalne Coal Drops Yard w Londynie (Wielka Brytania), 2018, arch. Heatherwick Studio

Centrum handlowo-kulturalne Coal Drops Yard powstało w wyniku przebudowy i rozbudowy dwóch przemysłowych budynków z epoki wiktoriańskiej, pierwotnie przeznaczonych na składy węgla. W nowym projekcie dodano nadwieszenie, które połączyło dwa skrzydła kompleksu (il. 8a). Geometrię dachu nad łącznikiem, jak i kształt jego stropu, wyznaczają linie krzywoliniowe. Wraz z krzywoliniową linią obrysu nadwieszzonego łącznika ukształtowano szklaną elewację o „ząbkowanym” układzie tafli szklanych (il. 8b).

Elewacja została zaprojektowana jako układ tarczownicowy, dzięki czemu można było uzyskać konstrukcję samonośną. Panele szklane ustawiono względem siebie pod kątem, przez co usztywniają się nawzajem (Bateman i in., 2019). Zastosowano układ szyb zespolonych ze szkłem laminowanym, o szerokości 2000 mm i maksymalnej wysokości 7200 mm, które współpracują z szybami o mniejszej szerokości (il. 8c). Do ich połączenia w narożnikach użyto silikonu konstrukcyjnego z wewnętrznymi wkładkami aluminiowymi. Takie rozwiązanie okazało się korzystne ze względu na możliwość kompensacji naprężeń

(Toffolon, 2019). Silikonowe spoiny w linii pionowej przenoszą siły podłużne i ścinające, jak również zapewniają szczelność elewacji (Bateman i in., 2019; Lenk, 2022).

Budynek mieszkalny Castle Lane w Londynie (Wielka Brytania), 2018, arch. Michel da Costa Gonçalves (DROO) i arch. Nathalie Rozencwajg (NAME)

Jak wspomniano w rozdziale trzecim, szkło gięte może być wykorzystane jako element struktury samonośnej. Zarazem różnorodność kształtów używanych w procesie gięcia szkła poszerza możliwości kształtowania współczesnej architektury. Dobrym przykładem jest tu budynek mieszkalny zlokalizowany w gminie Westminster. Jest to część Londynu objęta ścisłą ochroną konserwatorską, dlatego projekt nowej zabudowy wymagał przeprowadzenia szeregu analiz historycznego kontekstu miejsca. Jedną z nich dotyczyła okolicznej zabudowy i zbadania form wykuszów okiennych. Na podstawie przeprowadzonych analiz ustalono współczesną reinterpretację okna wykuszowego, które jest charakterystycznym elementem w budynku przy Castle Lane (Name Architecture, 2023). Jego nowy kształt został wyznaczony przez miękką linię krzywizny, lekko wychodzącą poza obrys budynku (il. 9a).

Okna wykuszowe są elementem kompozycji elewacji, ale także zapewniają lepszą dostępność światła dziennego do mieszkania. Z tego względu w każdym z mieszkań zaprojektowano taki typ okna. Do jego przeszklenia użyto jednokomorowych szyb zespolonych — płaskich i giętych (il. 9b).

Szyby zespolone składają się z dwóch tafli szklanych, połączonych ramkami dystansowymi, dzięki czemu tworzą szczelne komory międzyszybowe. W wyniku działania obciążenia zewnętrznego, na przykład parcia wiatru, wyginana jest zewnętrzna tafla szkła. Zmniejsza się więc objętość przestrzeni międzyszybowej, a ciśnienie wewnątrz szyby zespolonej wzrasta. Ten wzrost ciśnienia w komorze międzyszybowej jest traktowany jako obciążenie tafli zewnętrznej i wewnętrznej. Z tego względu w projektowaniu szyb zespolonych istotne są obciążenia klimatyczne. Oprócz obciążenia wiatrem uwzględnia się także ciśnienie atmosferyczne i temperaturę (Buddenberg, Hof, Oechsner, 2016; Respondek, 2018). Konstrukcyjne zachowanie giętych szyb zespolonych różni się w stosunku do płaskich paneli pod względem: rozkładu naprężeń, lokalizacji maksymalnych wartości ugięcia, podatności na wyboczenie, wyrównywania przestrzeni międzyszybowych (Schuler, 2013; Nizich i in., 2019).

Muzeum MAS w Antwerpii (Belgia), 2010, arch. Neutelings Riedijk Architecten

Muzeum Mas zostało zlokalizowane na terenie starej przystani w Antwerpii. Obiekt o funkcji muzealnej został zaprojektowany z przeznaczeniem do prezentacji zbiorów lokalnej kultury, sztuki, historii miasta oraz dziedzictwa związanego z portem. Budynek o wysokości 60 m ma formę wieży. Kondygnacje przeznaczone na funkcje wystawiennicze prowadzą spiralnie do góry i zarazem oferują widok na okolicę. Powierzchnie zewnętrzne i wewnętrzne budynku, w postaci ścian, podłóg i sufitów, zostały pokryte dużymi panelami z ręcznie ciętego czerwonego indyjskiego piaskowca. Elewację muzeum przedzielono szklanymi pasami, które w narożnikach (il. 10a) osiągają podwójną wysokość wynoszącą 11 m (Nijse, 2009). Do przeszkleń dużych otworów elewacyjnych wybrano szkło gięte o falistym kształcie (il. 10b), dzięki czemu wyeliminowano konieczność stosowania typowych dla ścian kurtynowych profili aluminiowych. W czasie budowy muzeum możliwości produkcyjne szkła giętego na gorąco były ograniczone wymiarem do 6 m. Zastosowane wówczas szyby o kształcie litery S mają szerokość 1800 mm i wysokość 5500 mm, natomiast wysokość „fali” sięga wymiaru 2×300 mm. Szyby te zostały zaprojektowane ze szkła hartowanego o grubości 12 mm (Nijsee, Wenting, 2014).

Dużym problemem projektowym było przeszklenie narożników elewacji. Podwojona wysokość przeszkleń wymagała bowiem połączenia szyb giętych w poziomie. Problem ten rozwiązano przez zastosowanie obustronnie giętych blach stalowych, kształtem dopasowanych do falistego szkła. Blachy te zostały połączone ze stalową belką o przekroju rurowym okrągłym, która przenosi obciążenia wiatrem w połowie wysokości narożników (Nijsee, 2009). W pozostałych pasmach przeszklona elewacja jest samonośna.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przy stosowaniu szkła mogą być łączone ze sobą aspekty projektowania architektonicznego i konstrukcyjnego. Wynika to z różnorodności jego cech jako materiału budowlanego. Z jednej strony jest przezroczyste, wręcz zanikające, refleksyjne, czasami lustrzane, ale przede wszystkim przepuszcza światło do wnętrza budynku, jak również umożliwia iluminację świetlną po zmroku. Z drugiej strony, choć cechuje je kruchość, to obecnie może być stosowane w elementach nośnych. Jego właściwości konstrukcyjne są również wykorzystywane w projektowaniu

szklanych elewacji. Stwarza to nowe możliwości kształtowania obiektów architektonicznych. Z tego względu w pracy podjęto problematykę projektowania przeszklonych elewacji z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz zaproponowano typologię systemów elewacyjnych. W jej opracowaniu główną przesłanką było poszukiwanie całoszklanych rozwiązań. W rezultacie wskazano elewacje o zróżnicowanych wysokościach, w których wyeliminowano lub ograniczono konstrukcje wsporcze z użyciem innych materiałów niż szkło. Całoszklane elewacje można uzyskać poprzez zastosowanie systemów bezramowych, szklanych żeber, układów tarczownicowych oraz szkła giętego. Oprócz aspektów konstrukcyjnych i technologicznych rozwiązania te charakteryzują się różnym sposobem ich kształtowania przestrzennego oraz układem kompozycyjnym.

Coraz większe wymiary tafli szklanych umożliwiają projektowanie większych podziałów przeszkleń, co ma wpływ na wzmocnienie efektu transparentności. Uzyskuje się wtedy gładkie płaszczyzny zarówno na zewnątrz budynku, jak i przy kształtowaniu widoku z jego wnętrza. Takim rozwiązaniom sprzyja rozwój systemów bezramowych.

Przy większych wysokościach elewacji najczęściej jest wymagane ich usztywnienie. W celu uzyskania całoszklanych struktur mogą być wtedy stosowane rozwiązania ze szklanymi żebrami. Szczególnie żebra projektowane jako jednosegmentowe charakteryzują się wysokimi walorami estetycznymi. Ich długość wynika z możliwości technologicznych wytwarzania i laminowania szkła płaskiego, które obecnie osiąga wymiary do 20 m. Stosowanie żeber jednosegmentowych umożliwia wyeliminowanie połączeń i podparć szyb z użyciem łączników ze stali nierdzewnej, dzięki czemu uzyskuje się rozwiązania jednolite materiałowo.

Oprócz przeszklonych elewacji o płaskich płaszczyznach istnieje również możliwość ich kształtowania jako form przestrzennych. Szczególne efekty kompozycyjne stwarzają układy tarczownicowe. W podobny sposób można się posłużyć szkłem giętym o różnych formach i krzywiznach. Zagięcie płaszczyzny, zarówno w układach tarczownicowych, jak i w rozwiązaniach ze szkłem giętym, zwiększa ich sztywność, co sprzyja rozwojowi całoszklanych systemów samonośnych.

Rozwiązania z zastosowaniem szkła konstrukcyjnego są nowe i nadal rozwijane, dlatego wskazane jest prowadzenie dalszych badań, które pozwolą w pełni rozpoznać metody ich projektowania. Sto-

sowanie szkła konstrukcyjnego w elewacjach poszerza możliwości ich kształtowania, czym przyczynia się do urzeczywistnienia koncepcji projektowych, w których dąży się do uzyskania maksymalnej transparentności.

REFERENCES

- Aguilar-Santana, J.L. et al. (2020), 'Review on Window-glazing Technologies and Future Prospects', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15, pp. 112–120. Available at: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz032> (accessed: 20.02.2023).
- Aiello, S. et al. (2011), 'Compressive Behaviour of Laminated Structural Glass Members', *Engineering Structures*, 33(12), pp. 3402–3408. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.004> (accessed: 15.03.2023).
- Amadio, C., Bedon, Ch. (2011), 'Buckling of Laminated Glass Elements in Compression', *Journal of Structural Engineering*, 137(8), pp. 803–810.
- Ángel, M., Batista, H. (2021), *The Ontology of Design Research*, 1st ed., New York/Oxon: Routledge.
- Bateman, S. et al. (2019), 'A Victorian Heritage Site Adapted for 21st-century London', *Arup Journal*, 2, pp. 4–13.
- Bedon, Ch., Amadio, C. (2018), 'Buckling Analysis and Design Proposal for 2-Side Supported Double Insulated Glass Units (IGUs) in Compression', *Engineering Structures*, 168, pp. 23–34. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.055> (accessed: 10.03.2023).
- Bedon, Ch., Santarsiero, M. (2018), 'Transparency in Structural Glass Systems Via Mechanical, Adhesive, and Laminated Connections — Existing Research and Developments', *Advanced Engineering Materials*, 20, 1700815. Available at: <https://doi.org/10.1002/adem.201700815> (accessed: 5.07.2023).
- Bedon, Ch. (2021a), 'Lateral-torsional Buckling (LTB) Method for the Design of Glass Fins with Continuous Lateral Restraints at the Tensioned Edge', *Composite Structures*, 266(113790). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113790> (accessed: 10.03.2023).
- Bedon, Ch. (2021b), 'Simplified Lateral Torsional Buckling (LTB) Analysis of Glass Fins with Continuous Lateral Restraints at the Tensioned Edge', *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(6667373). Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/6667373> (accessed: 12.07.2023).
- Blandini, L., Grasmug, W. (2018), 'Search for Dematerialized Building Envelopes — the Role of Glass and Steel', *Steel Construction*, 11(2), pp. 140–145.
- Bott, D. (2020), 'Slumped IGUs with Large Airspaces: Engineering Challenges and Solutions', *Glass Structures & Engineering*, 5, pp. 287–299. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40940-020-00126-6> (accessed: 25.02.2023).
- Brzezicki, M. (2018a), 'Studies on Glass Facades Morphologies' [in:] Weller, B., Schneider, J. (eds.) *Engineered Transparency 2018. Glass in Architecture and Structural Engineering*, 1st ed., Berlin: Ernst & Sohn, pp. 113–120.
- Brzezicki, M. (2018b), 'Morphology of Serrated Glass Facades. Repetitive and Non-repetitive Serration. Single and Double Serrated Facades', *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 4, pp. 7–20. Available at: <https://doi.org/10.21307/acee-2018-050> (accessed: 10.03.2023).
- Brzezicki, M. (2019a), 'The Architectural Design of Light-permeable Facades — a Summary of Recent Trends and Observations', *Technical Transactions. Architecture and Urban Planning*, 12, pp. 5–13. Available at: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.19.120.11445> (accessed: 1.03.2023).
- Brzezicki, M. (2019b), 'Glass Fins — A Structural and Aesthetical Application in Glass Facades', *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 603(022040). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/603/2/022040/pdf> (accessed: 15.09.2022).
- Brzezicki, M. (2021a), 'Disturbance of Transparency in the Architecture of Contemporary Glass Facades. Part 1', *Architectus*, 1(66), pp. 77–84. Available at: <https://doi.org/10.37190/arc210109> (accessed: 1.03.2023).
- Brzezicki, M. (2021b), 'Disturbance of Transparency in the Architecture of Contemporary Glass Facades. Part 2', *Architectus*, 2(66), pp. 67–76. Available at: <https://doi.org/10.37190/arc210207> (accessed: 1.03.2023).
- Buddenberg, S., Hof, P., Oechsner, M. (2016), 'Climate Loads in Insulating Glass Units: Comparison of Theory and Experimental Results', *Glass Structural & Engineering*, 1, pp. 301–313. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40940-016-0028-z> (accessed: 10.03.2023).
- Carvalho, P.L., Crus, P.J.S. (2014), 'The Design, Testing and Construction of a Folded Reinforced Glass' [in:] Louter, Ch. et al. (eds.) *Challenging Glass & COST Action TU0905 Final Conference*, Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 227–234.
- Celadyn, W. (2004), *Przegrody przeszklone w architekturze energooszczędnej*, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Cybulka, B., Żołnierczuk, M. (2015), *Język kultury szklanej architektury*, Warszawa: Fundacja im. Stefana Kuryłowicza.
- Datsiou, K.C. (2017), *Design and Performance of Cold Bent Glass*, Doctoral thesis, University of Cambridge. Available at: <https://doi.org/10.17863/CAM.15628> (accessed: 10.02.2023).
- Delincé, D. et al. (2008), 'Post-breakage Behaviour of Laminated Glass in Structural Applications', *Challenging Glass 2008 — Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/416260> (accessed: 15.03.2023).
- Doukari, K. (2014), 'The Transparent Facade of the Future — Maximizing Transparency with Self-supporting Glass Facade' [in:] Louter, Ch. et al. (eds.) *Challenging Glass & COST Action TU0905 Final Conference*, Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 97–104.
- Drass, M., Kraus, M.A. (2021), 'Adé ETAG 002 — A Eurocode-compliant Design Concept for Silicone Adhesive Joints' [in:] Lotuer, Ch. et al. (eds.) *Engineered Transparency 2021. Glass in Architecture and Structural Engineering*, 1st ed., Berlin: Ernst & Sohn, pp. 263–289.

- DuBois, M. (2007), 'Glass Bearing Walls — A Case Study' [in:] *Glass Performance Days 2007*, Tampere, Finland, conference proceedings.
- Dworzak-Żak, E. (2010), 'Dematerializacja Architektury' / 'Dematerialization of the Architecture', *Czasopismo. Techniczne. Architektura / Technical Transactions / Architecture*, 107, 7–A/2, pp. 61–64.
- Eekhout, M., Weber, L. (2014), 'Form-stabilized Glass Facades for Erasmus Medical Center — Rotterdam' [in:] Louter, Ch. et al. (eds.) *Challenging Glass & COST Action TU0905 Final Conference*, Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 593–600.
- EN 13830:2015+A1:2020 *Curtain Walling — Product Standard*.
- Feirabend, S., Eckardt, P., Benning, M. (2014), 'The Broad — Highly Sophisticated Glass Facade Behind a GFRC' [in:] Louter, Ch. et al. (eds.) *Challenging Glass & COST Action TU0905 Final Conference*, Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 171–175.
- Fildhuth, T., Schieber, R., Oppe, M. (2018), 'Design and Construction with Curved Glass' [in:] Weller, B., Schneider, J. (eds.) *Engineered Transparency 2018. Glass in Architecture and Structural Engineering*, 1st ed., Berlin: Ernst & Sohn, pp. 369–381.
- Gere, T. (2014), 'Analysis of Glass Fin Moment Connection for the Building KAFD 1.14' [in:] Louter, Ch. et al. (eds.) *Challenging Glass & COST Action TU0905 Final Conference*, Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 601–610.
- Gwóźdź, M., Woźniczka, P. (2020), 'New Static Analysis Methods for Plates Made of Monolithic and Laminated Glass', *Archives of Civil Engineering*, 66(4), pp. 593–609. Available at: https://ace.il.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2021/01/34_ACE-00114poprawiony-ok_B5.pdf (accessed: 25.02.2023).
- Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008), *Structural Use of Glass*, Zürich: IABSE.
- Herzog, T., Krippner, R., Lang, W. (2021), *Facade Construction Manual*, 3rd ed., Munich: Detail.
- Hohenstein, H. (2019), 'Curved and 3D Glass. The New Hype in Top End Architecture — an Examination of Latest Product Developments and Projects' [in:] GPD Glass Performance Days 2019, Tampere, Finland, June 26–28, conference proceedings, pp. 2–6.
- Huang, X. et al. (2022), 'Investigation on Buckling Behavior of Laminated Glass Columns with Elastic Lateral Restraint under Axial Compression', *Composite Structures*, 279(114810). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114810> (accessed: 15.03.2023).
- Inamura, Ch. (2017), *Towards a New Transparency: High Fidelity Additive Manufacturing of Transparent Glass Structures across Scales*, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/112536> (accessed at: 02.03.2023).
- Ishida, A. (2020), *Blurred Transparencies in Contemporary Glass Architecture. Material, Culture and Technology*, 1st ed., New York/Oxon: Routledge.
- Jóźwik, A. (2021), 'Szkló konstrukcyjne w architekturze — badania naukowe i doświadczenia dydaktyczne' [in:] Solarek, K. (ed.) *Synergia twórczości, nauki i twórczości w doświadczeniach Warszawskiej Szkoły Architektury i Urbanistyki początku XXI wieku*, 1st ed., Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Jóźwik, A. (2022a), 'Introduction to Structural Design of Glass According to Current European Standards', *Archives of Civil Engineering*, 68(2), pp. 147–170. Available at: <https://ace.il.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2022/08/art08.pdf> (accessed: 10.02.2023).
- Jóźwik, A. (2022b), 'Application of Glass Structures in Architectural Shaping of All-Glass Pavilions, Extensions, and Links', *Buildings*, 12(8):1254, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12081254>, (accessed: 10.02.2023).
- Kang, E., Park, E.J. (2021), 'Phenomenological Transparency Through Depth of "Inside/Outside" for a Sustainable Architectural Environment', *Sustainability*, 13(16):9046. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13169046> (accessed: 15.02.2023).
- Kosmala, M., Kuśnierz, A., Kozłowski, M. (2022) *Szkló Budowlane*, 1st ed., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kozłowski, M. (2011), 'Szklane ściany nośne', *Świat Szkła*. Available at: <https://www.swiat-szkla.pl/aktualnosc/198-wydanie-01-2011/4108-szklane-sciany-nosne.html> (accessed: 10.03.2023).
- Kozłowski, M. (2019a), *Balustrady szklane. Analizy doświadczalne i obliczeniowe, podstawy projektowania*, 1st ed., Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Kozłowski, M. et al. (2019b) 'Glass in Structural Applications', *e-Zbornik*, 9 (18), pp. 47–55. Available at: <https://hrcak.srce.hr/230955> (accessed: 05.03.2023).
- Kozłowski, M. (2021), 'Numerical Evaluation of Slender Glass Panel with Complex Geometry Subjected to Static Load and Soft-body Impact', *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3), pp. 959–966. Available at: <https://doi.org/10.3311/PPci.18165> (accessed: 10.03.2023).
- Krajewska, J. (2019), 'Szklana fasada jako witryna i ściana. Relacja wnętrza z zewnątrz' [in:] *Wnętrze — zewnątrz. Przestrzeń wspólna*, vol. 1. Available at: https://www.atutoficyna.pl/uploads/images/42/Szklana_fasada_jako_witryna_i_sciana.pdf (accessed: 25.02.2023).
- de Krom, D. et al. (2020), 'Facade Becomes Structure' [in:] Belis, J., Bos, F., Louter, Ch. (eds.) *Challenging Glass 7 — Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Available at: <https://doi.org/10.7480/cgc.7.4545> (accessed: 01.03.2023).
- Laufs, W., Nefedov, A. (2016), 'Jumbo-Size Glazing Engineered — Recent Projects in New York City', *Conference: GlassConGlobal*, Boston, USA. Available at: https://www.researchgate.net/publication/305084316_Jumbo-Size_Glazing_Engineered_-_Recent_Projects_in_New_York_City (accessed: 05.03.2023).
- Lenk, P. (2016), 'Designing with Structural Glass' [in:] Belis, J., Bos, F., Louter, Ch. (eds.) *Challenging Glass 5 — Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Available at: <https://doi.org/10.7480/cgc.5.2228> (accessed: 03.03.2023).
- Lenk, P. (2022), 'Planning Phases of Glass Projects' [in:] Belis, J., Bos, F., Louter, Ch. (eds.) *Challenging Glass 8 — Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Available at: <https://doi.org/10.47982/cgc.8.445> (accessed: 04.03.2023).

- Liang, Y., Lancaster, F., Izzuddin, B.A. (2016), 'Effective Modelling of Structural Glass with Laminated Shell Elements', *Composite Structures*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.077> (accessed: 10.07.2023).
- Luiblé, A., Schärer, D. (2016), 'Lateral Torsional Buckling of Glass Beams with Continuous Lateral Support', *Glass Structures & Engineering*, 1, pp. 153–171. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40940-016-0008-3>, (accessed: 12.07.2023).
- Mocibob, D. (2008), *Glass Panel under Shear Loading — Use of Glass Envelopes in Building Stabilization*, Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lausanne. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/125889> (accessed: 10.03.2023).
- Muljadinata, A.S.M., Darmawan, A.M.S. (2016), 'Redefining Folded Plate Structure as a Form-resistant Structure', *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 7. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304929845_Redefining_folded_plate_structure_as_a_form-resistant_structure (accessed: 10.03.2023).
- Name Architecture. Available at: <https://www.namearchitecture.net/journal-content/bowwindow> (accessed: 06.03.2023).
- Neugebauer, J. (2014), 'Applications for Curved Glass in Buildings', *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(1–2), pp. 67–83.
- Nicklisch, F. (2008), 'Engineered Transparency — Glass in Architecture and Structural Engineering', *Stahlbau*, 77, pp. 52–54.
- Niezabitowska, E. (2014), *Metody i techniki badawcze w architekturze*, 1st ed., Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Nijsee, R. (2009), 'Corrugated Glass as Improvement to the Structural Resistance of Glass', *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia*. Available at: <https://riunet.upv.es/handle/10251/6710> (accessed: 1.03.2023).
- Nijse, R., Wenting, R. (2014), 'Designing and Constructing Corrugated Glass Facades', *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(1–2), pp. 123–131.
- Nizich, A. et al. (2019), 'Enhancing the Light — Curved Insulated Glass Unit Design Study' [in:] *GPD Glass Performance Days 2019, Tampere, Finland, June 26–28*, conference proceedings, pp. 30–33.
- Nortglass*. Available at: <http://north-glass.com/2-3-curved-glass/> (accessed: 15.03.2023).
- O'Callaghan, J. (2016), 'Glass Challenges — Past, Present, and Future' [in:] Cruz, P.J.S. (ed.) *Structure and Architecture*, London: CRC Press/Balkema, pp. 40–51.
- Pariafsai, F. (2016), 'Transparent Buildings: the Future of All Glass Structure'. Available at: <https://www.glassonweb.com/article/transparent-buildings-future-all-glass-structures> (accessed: 15.02.2023).
- Patterson, M. (2011), *Structural Glass Facades and Enclosures*, 1st ed., Hoboken: John Wiley & Sons.
- Rapport, N. (2009), 'The Structure of Transparency' [in:] Bell, M., Kim, J. (eds.) *Engineered Transparency: The Technical, Visual, and Spatial Effects of Glass*, 1st ed., New York: Princeton Architectural Press, pp. 55–64.
- Respondek, Z. (2018), 'Obciążenia i ugięcia w szybach zespolonych o zróżnicowanej sztywności szyb składowych', *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 7(1), pp. 9–14. Available at: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2018.1.01> (accessed: 06.03.2023).
- Respondek, Z. (2019), 'Glass Building Elements — Technical Aspects of Safe Usage in the Structure', *CzOTO*, 1(1), pp. 291–298. Available at: <https://doi.org/10.2478/czoto-2019-0038> (accessed: 05.03.2023).
- Rogińska-Niesłuchowska, M. (2017), 'Use of Daylight and Aesthetic Image of Glass Facades in Contemporary Buildings', *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 245(082035). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/8/082035/pdf> (accessed: 25.02.2023).
- Rosales, C. (2023), *Spatial Transparency in Architecture. Light, Layering, and Porosity*, 1st ed., New York/Oxon: Routledge.
- Rowe, C., Slutzky, R. (1997) *Transparency*, 1st ed., Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.
- Rubel, Ch. (2021), 'Curved and Large Format Insulating Glass in Architectural Applications' [in:] Weller, B., Schneider, J. (eds.) *Engineered Transparency 2018. Glass in Architecture and Structural Engineering*, 1st ed., Berlin: Ernst & Sohn, pp. 503–509.
- Sacht, H. et al. (2021), 'Specification of Glazings for Facades Based on Spectrophotometric Characterization of Transmittance', *Sustainability*, 13(10):5437, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13105437> (accessed: 10.03.2023).
- Sanches, J. (2013), 'Analysis and Design of Structural Glass Systems'. Available at: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145312104/Extended-abstract.pdf> (accessed: 15.02.2023).
- Sanchez-Gil, J. (2019), 'Curved Glass: Reshaping Architectural Glass with New Possibilities and Frontiers' [in:] *GPD Glass Performance Days 2019, Tampere, Finland, June 26–28*, conference proceedings, pp. 26–29.
- Santo, D., Mattei, S., Bedon, Ch. (2020), 'Elastic Critical Moment for the Lateral-Torsional Buckling (LTB) Analysis of Structural Glass Beams with Discrete Mechanical Lateral Restraints', *Materials*, 13, 2492. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13112492> (accessed: 12.07.2023).
- Schneider, J., Weller, B. (2010), 'Engineered Transparency — International Conference at Glasstec', *Stahlbau*, 79(9), pp. 698–701.
- Schuler, E. (2013), 'Obliczanie szyb zespolonych', *Świat Szkl*, 7-8. Available: <https://www.swiat-szkl.pl/kontakt/7590-obliczenia-szyb-zespolonych.html> (accessed: 05.07.2023).
- Sedak. Available at: <https://www.sedak.com/en/skills/laminating/> (accessed: 25.03.2023).
- Teich, M. (2019), 'Zukunft ist aus Glas Gebaut — Aktuelle Projekte der Seele Unternehmensgruppe' [in:] Weller, B., Tasche, S. *Glasbau 2019*, 1st ed., Berlin: Ernst & Sohn, pp. 1–8.
- Teich, M., Bauchinger, Ch. (2020), 'Aktuelle Entwicklungen und Konstruktionstechniken für Glasfassaden Unternehmensgruppe', *Bautechnik*, 97(5), pp. 338–343.

- Toffolon, M. (2019), 'Dal Carbone ě Nato un Centro Commerciale', *Nouva Finesta*, 5. Available at: https://www.frener-reifer.com/img/media/coal-drops-yard/Nuova_Finestra_May_2019_Coal_Drops_Yard.pdf (accessed: 03.03.2023).
- Tymkiewicz, J. (2014), 'Technologiczna Estetyka Współczesnych Fasad/Technical Aesthetics of Modern Facades', *Czasopismo. Techniczne. Architektura/Technical Transactions. Architecture*, z. 7–A/2014, pp. 257–263.
- Veer, F., de Krom, D., Nijsee, R. (2021), 'Demonstration of the Structural Resiliency of Damaged Sentryglas Laminated Heat Strengthened Glass Fins in Full Scale Testing', *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, 5: 29.37, pp. 29–37. Available at: <https://doi.org/10.3844/sgamrsp.2021.29.37> (accessed: 16.02.2023).
- Wala, E. (2012), *Szkło we współczesnej architekturze*, 1st ed., Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Weller, B. et al. (2009), *Glass in Building. Principles, Application, Examples*, 1st ed., Munich: Detail.
- Wurm, J. (2007), *Glass Structures. Design and Construction of Self-supporting Skins*, 1st ed., Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.