

PAWEŁ KOSSAKOWSKI¹

WIKTOR WCIŚLIK²

MICHAŁ BAKALARZ³

Kielce University of Technology

¹ e-mail: kossak@tu.kielce.pl

² e-mail: wwcislik@tu.kielce.pl

³ e-mail: mbakalarz@tu.kielce.pl

SELECTED ASPECTS OF APPLICATION OF ALUMINIUM ALLOYS IN BUILDING STRUCTURES

WYBRANE ASPEKTY ZASTOSOWANIA STOPÓW ALUMINIUM W KONSTRUKCJACH BUDOWLANYCH

Abstract

The article describes the basic issues related to the use of aluminium alloys in civil engineering. The classification of aluminium alloys according to PN-EN standards is presented. The advantages and disadvantages of aluminium elements in construction are indicated. In addition, examples of buildings made of aluminium alloys are also featured.

Keywords: aluminium alloys, aluminium structures in building, design of aluminium structures

Streszczenie

W niniejszym artykule opisano podstawowe zagadnienia związane z zastosowaniem stopów aluminium w konstrukcjach budowlanych. Przedstawiono klasyfikację stopów aluminiowych według PN-EN. Wskazano wady i zalety zastosowania elementów aluminiowych w budownictwie. Ponadto scharakteryzowano przykładowe obiekty budowlane wykonane ze stopów aluminium.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, konstrukcje aluminiowe w budownictwie, projektowanie konstrukcji z aluminium

1. Introduction

Due to common occurrence in nature and unique properties, aluminium is a material widely used in engineering. It is used for package manufacturing, machinery and automobile industry, in aeronautics and space exploration. Recently aluminium alloys are also used in civil structures. This refers not only to the elements such as joinery, facades, roof coverings, but also to members of load bearing structure, especially where high corrosion resistance is required (for example storage tanks in chemical plants).

The first applications of aluminium alloys in civil engineering occurred in the last decade of 19th century [1]. Dynamic development of aluminium structures took place during World War II, when steel supply was

1. Wprowadzenie

Z uwagi na powszechne występowanie w przyrodzie i unikalne właściwości aluminium jest często stosowane w technice. Wykorzystuje się je do produkcji opakowań, maszynierii, w przemyśle motoryzacyjnym oraz w lotnictwie i badaniach kosmosu. Również w budownictwie obserwuje się coraz większy udział konstrukcji aluminiowych.

Pierwsze przykłady zastosowania aluminium w budownictwie datuje się na ostatnie dziesięciolecie XIX wieku [1]. Rozwój konstrukcji aluminiowych zaobserwowano w okresie II wojny światowej, kiedy ilość dostępnej na rynku stali była ograniczona. W ostatnich latach elementy aluminiowe ponownie stają się coraz bardziej powszechne w budownictwie [2].

limited. In recent years aluminium members become more and more common in civil engineering [2].

The use of aluminum in construction enables the creation of new architectural forms and innovatory structures, constituting the originality of the building. Despite the high costs, the aspects of aesthetics, prestige, ease of recycling, low construction weight, and low sensitivity to corrosive factors are often decisive for investors.

2. Classification and designation of aluminium alloys

Pure aluminium is a mild material and thus it is rarely used in technical applications. In order to improve its mechanical parameters some elements (magnesium, copper, silicon, manganese) are added. As a result, alloys with various properties are obtained. Two basic groups of aluminium alloys can be distinguished: cast alloys – used for complex shapes forming (contain copper, silicon and manganese); plastic working alloys – Al-Mg (high corrosion resistance), Al-Mg-Si (high ductility, machinability and weldability), Al-Zn-Mg (duralumin, high strength, good weldability), Al-Cu-Mg (high strength, but poor corrosion resistance) [3].

Standard [4] introduces digital signage of alloys, basing on the presence of alloying elements: 1xxx aluminium content above 99%; 2xxx aluminium and copper alloys (2000 series); 3xxx aluminium and manganese alloys (3000 series); 4xxx aluminium and silicon alloys (4000 series); 5xxx aluminium and magnesium alloys (5000 series); 6xxx aluminium, magnesium and silicon alloys (6000 series); 7xxx aluminium and zinc alloys (7000 series); 8xxx alloys of aluminium and other elements (8000 series); 9xxx special alloys.

The second digit defines the subsequent modifications of the original alloy (0 indicates original alloy), and the following digits play the identification role.

It is worth noting that the standard [5] specifies 3000, 5000, 6000 and 7000 series for the use in civil structures.

The range of aluminium alloys application is related to their states. Standard [6] defines the following states of aluminium products: F – fabricate state (extruded, rolled etc.), O – annealed state, H – cold-work hardening state, W – supersaturated state, T – state after heat treatment, H – state after heat treatment with additional hardening.

Zastosowanie aluminium umożliwia tworzenie nowych form architektonicznych, rozwiązań konstrukcyjnych, stanowiąc o oryginalności obiektu budowlanego. Pomimo wysokich kosztów dla inwestorów często decydujące okazują się aspekty związane z estetyką, prestiżem, łatwością recyklingu, niskim ciężarem konstrukcji, niewielką wrażliwością na działanie czynników korozyjnych.

2. Podział i oznaczenia stopów aluminium

Czyste aluminium jest materiałem miękkim, dlatego też jest rzadko wykorzystywane w technice. W celu poprawienia właściwości mechanicznych dodaje się inne pierwiastki (np. magnez, miedź, krzem, mangan), uzyskując stopy o różnych właściwościach. Wyróżnia się dwie podstawowe grupy stopów aluminium: stopy odlewnicze – umożliwiają uzyskanie skomplikowanych kształtów (zawierają miedź, krzem, magnez); stopy do przeróbki plastycznej – Al-Mg (wysoka odporność na korozję), Al-Mg-Si (dobra plastyczność, skrawalność i spawalność), Al-Zn-Mg (duralumin, wysoka wytrzymałość, dobra spawalność), Al-Cu-Mg (wysoka wytrzymałość, słaba odporność na korozję) [3].

Norma [4] wprowadza cyfrowe oznaczenia stopów, klasyfikując je na podstawie obecności pierwiastków stopowych: 1xxx zawartość aluminium powyżej 99%; 2xxx stopy aluminium i miedzi (seria 2000); 3xxx stopy aluminium i manganu (seria 3000); 4xxx stopy aluminium i krzemu (seria 4000); 5xxx stopy aluminium i magnezu (seria 5000); 6xxx stopy aluminium, magnezu i krzemu (seria 6000); 7xxx stopy aluminium i cynku (seria 7000); 8xxx stopy aluminium i innych pierwiastków (seria 8000); 9xxx stopy specjalne.

Druga cyfra w poszczególnych oznaczeniach definiuje kolejne modyfikacje stopu oryginalnego (0 oznacza stop oryginalny), natomiast kolejne cyfry pełnią jedynie funkcję identyfikacyjną.

Należy pamiętać, że norma [5] przewiduje zastosowanie w konstrukcjach budowlanych stopów serii 3000, 5000, 6000 i 7000.

Obszar zastosowania elementów wykonanych z aluminium jest powiązany z ich stanem. Norma [6] wyróżnia następujące stany wyrobów aluminiowych: F – stan wytworzony, tzn. wyciskany, walcowany itp., O – stan wyżarzony, H – stan umocniony zgniotem, W – stan przesycony, T – stan obrobiony cieplnie, H – stan obrobiony cieplnie z dodatkowym umocnieniem.

3. Application of aluminium in civil engineering

3.1. Advantages and disadvantages of aluminium for engineering

The factors favouring the use of aluminium in engineering can be divided into two groups. The first group includes features that mostly decide about the possibility of using aluminium in the widely understood general engineering. The more of them occur simultaneously, the more the effectiveness of such solution increases. The second group includes secondary factors, those of less importance. The implemented classification divides the factors depending on the level of their influence on the competitiveness of this material, taking into consideration the economy of the solution, material properties or technological aspects.

3.1.1. Primary factors

The properties of the scope of the first group are the following:

- a. *Corrosion resistance.* It can be assumed that in air-dry state and in humid air, except for the activities connected with the restoration of the aesthetics, both painted elements and the elements in raw state do not require additional rehabilitation operations [7]. It therefore allows to reduce the costs of the maintenance of the objects and to reduce the significance of the conditions of the environment in which the object will be used.
- b. *The lightness of the aluminium structures.* Aluminium's specific weight is approximately 3 times lower than the specific weight of steel, and this allows to: reduce the dead load of load bearing structure; reduce the values of section forces and obtain slimmer structures, thereby increase the usable area of the object or reduce the gross covered area; accelerate the time of developing the object; facilitate the transport of the elements, and it will have influence on reducing the risk of the occurrence of the accidents during construction.
- c. *Comprehensiveness of designing and shaping.* Because of beneficial plastic properties, aluminium is easy to process and it is weldable [7, 8]. It enables almost any kind of shaping of the form or cross section, and this fact allows to assign different functions to the same element [9, 10].
- d. *Strength of material.* Aluminium alloys have a wide range of strength, and this, together with their lightness, allows to achieve a high strength to weight ratio [11].

3. Zastosowanie aluminium w inżynierii budowlanej

3.1. Zalety i wady stosowania aluminium w budownictwie

Czynniki przemawiające za zastosowaniem aluminium w budownictwie można podzielić na dwie grupy. W pierwszej grupie znajdują się cechy, które w największym stopniu decydują o możliwości zastosowania aluminium w szeroko rozumianym budownictwie ogólnym. Im więcej z nich występuje jednocześnie, tym bardziej wzrasta efektywność takiego rozwiązania. Grupa druga to czynniki drugorzędne o niższym znaczeniu. Wprowadzona kategoryzacja dzieli czynniki w zależności od poziomu ich wpływu na konkurencyjność tego materiału, uwzględniając między innymi ekonomię rozwiązania, właściwości materiałowe czy względy technologiczne.

3.1.1. Czynniki pierwszorzędne

W zakresie grupy pierwszej wyróżniono:

- a. *Odporność na korozję.* Można przyjąć, że w stanie powietrzno-suchym, jak i powietrzu wilgotnym, z wyjątkiem czynności związanych z przywracaniem estetyki, zarówno elementy pomalowane, jak i w stanie surowym nie wymagają dodatkowych zabiegów rehabilitacyjnych [7]. Pozwala to zatem zredukować koszty utrzymania obiektu oraz zmniejszyć znaczenie warunków środowiska, w którym obiekt będzie użytkowany.
- b. *Lekkość konstrukcji aluminiowych.* Aluminium ma w przybliżeniu trzykrotnie niższy ciężar właściwy od stali, co pozwala: zredukować ciężar własny ustroju nośnego; zmniejszyć wartości sił przekrojowych uzyskując smuklejsze konstrukcje, tym samym zwiększyć powierzchnię użytkową obiektu bądź zmniejszyć powierzchnię zabudowy; przyspieszyć czas wykonywania obiektu; ułatwić transport elementów, co wpłynie na zmniejszenie ryzyka wystąpienia wypadków podczas budowy.
- c. *Wszechstronność projektowania i kształtowania.* Ze względu na korzystne cechy plastyczne łatwo poddaje się obróbce i jest spajalne [7, 8]. Umożliwia to niemal dowolne kształtowanie formy czy przekroju poprzecznego, co pozwala przypisać różne funkcje temu samemu elementowi [9, 10].
- d. *Wytrzymałość materiału.* Stopy aluminium mają szeroki zakres wytrzymałości, co w połączeniu z ich lekkością pozwala uzyskać wysoki wskaźnik wytrzymałości do wagi [11].

3.1.2. Secondary factors

However, the group of the secondary factors, that have less influence on the scope of use in engineering, includes:

- a. *Service life*. The material is resistant to weather conditions, ultraviolet rays, as well as to some acids, and this can make the service life of the structure longer [12].
- b. *Thermal conductivity*. It is a good conductor, and it is used in ventilation systems. In the case of window or door joinery, the thermal conductivity is reduced by proper shape of the profiles [12].
- c. *Environmental performance*. Products made of aluminium do not have negative influence on the surrounding environment (air, surface water, soil or the surface of the area), and in the case of fire, they burn without producing harmful gases. This material is non-toxic. The aspect of pro-ecological performance of this material is more extensively raised in publication [11].
- d. *Recycling*. Aluminium processing does not cause deterioration of its mechanical parameters and quality, and the material losses connected with it are inconsiderable, within the range of few percent [11, 12].

On the other hand, several significant disadvantages of this metal should be mentioned in comparison with its biggest competitor – steel. Despite the fact that the price has decreased over decades, this material is relatively expensive. What is more, some mechanical parameters are to its disadvantage, such as low modulus of elasticity or low melting point [13].

3.2. Aluminium as a construction material

Because of numerous benefits resulting from using aluminium, and from using its alloys to be more specific, the areas where they are used are successively growing. The elements made of aluminium alloys are especially effective in the solutions of the following objects and structures [8–10, 12]:

- roofing systems in the form of trusses or bar shells, for which characteristic features are lightness and the rapidity of assembly. Truss systems are usually three-layer structural roofings, and their basic element is the so-called pyramid. This solution was spread in the humid climate of the countries in Latin America as roofing in exhibition centres, communication terminals, swimming pools and many other public utility facilities. Shell roofings are built as grid roofings of different shape, and the dome is the most popular among them;

3.1.2. Czynniki drugorzędne

Natomiast do grupy czynników drugorzędnych, które w mniejszym stopniu wpływają na obszar zastosowań w budownictwie zaliczono:

- a. *Okres użytkowania*. Materiał jest odporny na działanie warunków atmosferycznych, promieni ultrafioletowych i niektórych kwasów, co może wydłużyć czas użytkowania konstrukcji [12].
- b. *Przewodność cieplna*. Dobry przewodnik, stosowany w systemach wentylacyjnych. W przypadku ślusarki okiennej czy drzwi przewodność cieplna zmniejsza ukształtowanie profili [12].
- c. *Ekologiczność*. Produkty wykonane z aluminium nie oddziałują negatywnie na otaczające środowisko (powietrze, wody powierzchniowe, glebę czy powierzchnię terenu), a w przypadku pożaru spalają się bez wydzielania szkodliwych gazów. Materiał ten jest nietoksyczny. Obszerniej aspekt proekologiczności tego materiału poruszono w publikacji [11].
- d. *Recykling*. Przetwarzanie aluminium nie powoduje pogorszenia się jego parametrów mechanicznych i jakości, a straty materiałowe z tym związane są niewielkie, w zakresie kilku procent [11, 12].

Należy wymienić również kilka istotnych wad tego metalu w porównaniu do jego największego konkurenta – stali. Wciąż pomimo spadającej ceny na przestrzeni dekad materiał ten jest relatywnie drogi. Co więcej, na jego niekorzyść przemawiają niektóre parametry mechaniczne, takie jak niski moduł sprężystości czy niska temperatura topnienia [13].

3.2. Aluminium jako materiał konstrukcyjny

W związku z licznymi korzyściami wynikającymi z zastosowania aluminium, a ściślej jego stopów, sukcesywnie powiększa się obszar, w którym są stosowane. Elementy wykonane ze stopów aluminium są szczególnie efektywne w rozwiązaniach obiektów i konstrukcji, takich jak [8–10, 12]:

- zadaszenia systemowe w postaci kratownic lub powłok prętowych, których charakterystyczną cechą jest lekkość i szybkość montażu. Układy kratownicowe to najczęściej trójwarstwowe przekrycia strukturalne, których podstawowym elementem jest tzw. piramidka. Rozwiązanie to rozpowszechnione zostało w wilgotnym klimacie krajów Ameryki Łacińskiej jako zadaszenie centrów wystawowych, terminali komunikacyjnych, basenów i wielu innych obiektów użyteczności publicznej. Zadaszenia powłokowe budowane są jako przekrycia siat-

- the objects exposed to direct, permanent or periodic impact of factors causing corrosion, as for example: pipelines formed from welded aluminium panels (pharmaceutical, chemical, refining industry), vertical cylindrical containers with flat bottom (storage of fluids of low temperatures – cryogenic fluids);
- structures and their elements with limited access to them (towers or masts);
- the elements of infrastructure in transport infrastructure engineering, such as: vertical and horizontal supporting structures of traffic lights, signs and lighting of communication routes, as well as bridge facilities (bridges, culverts);
- the elements of load bearing structure of buildings [12]. The aluminium and aluminium alloys are commonly used to make: elevations and facades, window and door joinery and cold-formed elements of roofings (roof panels, thin walled beams, etc.).

Attention should be paid to the fact that in the case of all the above objects and structures, one or more factors from the first group in favour of such solution can be assigned to them.

3.2.1. System solutions

Special attention should be paid to structural bar roofing systems of significant spans, such as Mero, Space Deck or Triodetic developed in 1940s and 1950s [14]. In these systems, the ends of one-dimensional geometric elements (bars) are adjusted to be connected to each other in specially structured nodes. Bar systems assembled in such manner form spatial structures or shells, frequently covered by transparent panels that increase the access to natural light. These roofings can be shaped in the form of flat or curved surfaces emphasising the spectacular architecture of the object being created as, for example, domes, rings, cones, pyramids or hyperboles [15].

3.2.2. Examples of realizations

Flat surfaces are most frequently shaped in the case of structural roofings with great clear spans and with great outreach of cantilever elements. It is possible thanks to minimizing the dead load of the structure [15]. An important example of such structure is Interamerican Exhibition Centre of Sao Paulo in Brazil, built in 1969 (Fig. 1). Because of the fact that it was mounted entirely on the construction site and because 25 cranes were used, it was made in incredibly short period of time – 27 hours. The height of the structure is 2.36 m,

- kowe o zróżnicowanym kształcie, wśród których najpopularniejszym jest kopuła;
- obiekty narażone na bezpośrednie, stałe bądź okresowe oddziaływanie czynników powodujących korozję, jak na przykład uformowane ze spawanych paneli aluminiowych rurociągi (przemysł farmaceutyczny, chemiczny, rafineryjny), pionowe cylindryczne zbiorniki o płaskim dnie (składowanie cieczy o niskich temperaturach – ciecze kriogeniczne);
- konstrukcje oraz ich elementy, do których dostęp jest ograniczony (wieże lub maszty);
- elementy infrastruktury w budownictwie komunikacyjnym, takie jak pionowe i poziome konstrukcje wsporcze sygnalizacji świetlnych, oznakowania oraz oświetlenia tras komunikacyjnych, a także obiekty mostowe (mosty, przepusty);
- elementy ustroju nośnego budynków [12]. Powszechnie aluminium oraz jego stopy wykorzystywane są do wykonania elewacji i fasad, ślusarki okiennej i drzwiowej oraz formowanych na zimno elementów pokryć dachowych (panele dachowe, belki cienkościenne itd.).

Należy zauważyć, iż dla opisanych powyżej obiektów i konstrukcji można przyporządkować jeden lub więcej czynników z pierwszej grupy przemawiający za przyjęciem takiego rozwiązania.

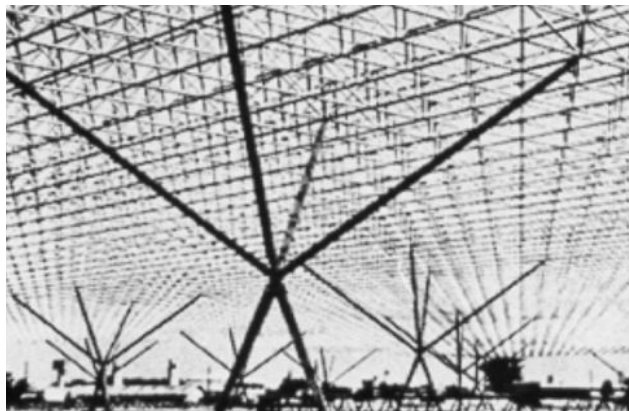
3.2.1. Rozwiązania systemowe

Na szczególną uwagę zasługują systemy przekryć prętowych o znacznych rozpiętościach, takie jak Mero, Space Deck czy Triodetic, rozwinięte w latach 40. i 50. ubiegłego wieku [14]. W systemach tych końce jednowymiarowych elementów geometrycznych (prętów) są przystosowane do połączenia ze sobą w specjalnie skonstruowanych węzłach. Tak złożone układy tworzą przestrzenne struktury bądź powłoki często pokryte transparentnymi panelami zwiększającymi dostęp naturalnego światła. Zadażenia te ukształtowane mogą być jako płaskie lub zakrzywione powierzchnie podkreślające spektakularną architekturę obiektu, jak na przykład kopuły, pierścienie, stożki, piramidy czy hiperbole [15].

3.2.2. Przykłady realizacji

Płaskie powierzchnie kształtowane są najczęściej w przypadku przekryć o dużych rozpiętościach w świetle i dużym wysięgu części wspornikowych. Możliwe jest to dzięki zminimalizowaniu ciężaru własnego struktury [15]. Ważnym przykładem takiej konstrukcji jest Interamerican Exhibition Centre of Sao Paulo w Brazylii wzniesione w 1969 roku (rys. 1). Z uwagi na zmontowanie w całości na placu budowy i montaż

and the total height of the object is 16.36 m. The roofing weighs only 16 kg/m² and it covers approximately 67600 m² [10].



z wykorzystaniem 25 żurawi wykonana została w niewiarygodnie krótkim czasie 27 godzin. Wysokość struktury wynosi 2,36 m przy całkowitej wysokości obiektu równej 16,36 m. Przykrycie ważyło tylko 16 kg/m² i pokrywało w przybliżeniu około 67600 m² [10].

Fig. 1. Two-layer structural roofing of Interamerican Exhibition Centre of Sao Paulo in Brasil [16]

Rys. 1. Dwuwarstwowe przekrycie strukturalne Interamerican Exhibition Centre of Sao Paulo w Brazylii [16]

The curved surfaces most frequently have the form of synclastic spherical covering of diverse cap height depending on the size or the utility function of the object. Most frequently, they are circular, and grid geodesic domes are dominant solution among them. An undoubted asset of this solution is the possibility to create a slim structure of roofing, which does not require an additional supporting structure within the surface being covered.

A rarer solution includes coverings that have many curves in the form, as hyperbolic paraboloids or roofings that are similar to waves in shape (Fig. 2) [14].

Powierzchnie zakrzywione przyjmują najczęściej formę synklastycznej powłoki kulistej o zróżnicowanej wyniosłości czaszy uzależnionej od wielkości czy funkcji użytkowej obiektu. Najczęściej budowane są na planie koła, gdzie dominującym rozwiązaniem są siatkowe kopuły geodezyjne. Niewątpliwym atutem tego rozwiązania jest możliwość utworzenia smukłej konstrukcji, niewymagającej dodatkowej konstrukcji wsporczej w obrębie pokrywanej powierzchni.

Rzadszym rozwiązaniem są powłoki, w których występuje wiele wygięć formy, jak hiperbole paraboloidalne lub zadania kształtem przypominające fale (rys. 2) [14].



Fig. 2. Roofing of Lynx Central Station in Orlando, Florida: a) general view, b) view of the structure [17]

Rys. 2. Zadanie dworca Lynx Central Station w Orlando, w stanie Floryda: a) widok ogólny, b) widok na układ struktury [17]

Undoubtedly, an interesting example of structural multitasking of this material is the building of Aluminium Centre designed by Micha de Haas, a Dutch architect (Fig. 3). The uniqueness of the object is a resultant of extraordinary architecture inspired by

Niewątpliwie ciekawym przykładem wielozadaniowości konstrukcyjnej tego materiału jest budynek Centrum Aluminiowego projektu holenderskiego architekta Micha de Haasa (rys. 3). Niepowtarzalność obiektu jest wypadkową nietuzinkowej architektury

the scenery of forest, properties of modern material and unusual location of the object [18]. Load bearing structure of the building was fully designed and made of aluminium. The body of tier includes beams, plates and metal sheets, supported by rows of columns. The tilt of and distance between the columns is diverse, and their diameters are gradated every 30 mm in the range from 60 mm to 210 mm. This diversity, which is seemingly chaotic, follows some rules resulting from the expected distribution of forces. For example, lower diameters of columns are used in greater aggregations. Another significant aspect of the building structure is the use of one cross section of beams, and the increase of the cross section is performed by joining several elements with each other.

zainspirowanej krajobrazem lasu, właściwości nowoczesnego materiału oraz niecodziennej lokalizacji obiektu [18]. Konstrukcja nośna budynku w całości zaprojektowana została i wykonana z aluminium. Bryła kondygnacji składa się z belek, płyt i blach, podpartych na rzędach słupów. Rozstaw oraz pochylenie słupów jest zróżnicowane, a ich średnica jest stopniowana co 30 mm w zakresie od 60 mm do 210 mm. Zróżnicowanie to na pozór chaotyczne, rządzi się pewnymi prawami, wynikającymi ze spodziewanego rozkładu sił. Na przykład mniejsze średnice słupów stosowane są w większych skupiskach. Innym istotnym aspektem konstrukcji budynku jest zastosowanie jednego przekroju poprzecznego belek, a zwiększanie przekroju odbywa się poprzez łączenie ze sobą kilku elementów.



Fig. 3. Aluminium Centre view from the river site [18]
Rys. 3. Centrum Aluminiowe widok od strony rzeki [18]

4. Summary and conclusions

Because of its undeniable advantages, the aluminium is more commonly used in construction, not only to make roofings, joinery, but also as construction material. In many cases, it allows to create spectacular objects and to produce innovative architectural and construction forms. Low weight and excellent corrosion resistance are the reasons for the aluminium construction elements to be successfully used in general and industrial engineering.

4. Podsumowanie i wnioski

Z uwagi na swoje niezaprzeczalne zalety aluminium jest coraz częściej stosowane w budownictwie, nie tylko do wykonywania pokryć dachowych, stolarki, ale także jako materiał konstrukcyjny. W wielu przypadkach umożliwia tworzenie spektakularnych obiektów oraz realizację nowatorskich form architektonicznych i konstrukcyjnych. Niski ciężar oraz znakomita odporność korozyjna powoduje, że aluminiowe elementy konstrukcyjne są stosowane w budownictwie powszechnym i przemysłowym.

References

- [1] Macillo V., *Special joint systems for aluminium structures: experimental tests and numerical models*, PhD thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2013.
- [2] Kwiatkowski T., *Aluminium w nowoczesnych konstrukcjach budowlanych (Aluminium in modern civil structures)*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo, 18 (168), 2012, s. 108–115.
- [3] Kwiatkowski T., *Charakterystyka i wykorzystanie stopów aluminium oraz taśm węglowych w budownictwie (Characteristics and use of aluminium alloys and carbon strips in construction)*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo, 17 (167), 2011, s. 112–118.
- [4] PN-EN 573-1:2006 Aluminium and aluminium alloys – Chemical composition and form of wrought products – Part 1: Numerical designation system.
- [5] PN-EN 1999-1-1:2011/A2:2014-05 Eurocod 9: Design of aluminium structures. Part 1-1: General structural rules.
- [6] PN-EN 515:1996 Aluminium and aluminium alloys. Wrought products. Temper designations.

- [7] Kossakowski P., *Elewacje aluminiowe (Aluminium facades)*, „Przegląd Budowlany” 2014, 12, s. 39–43.
- [8] Kissel J.R., Ferry R.L., *Aluminium Structures: A Guide to Their Specifications and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York 2002.
- [9] Mazzolani F.M., Mandara A., *Modern trends in the use of special metals for the improvement of historical and monumental structures*, “Engineering Structures” 2002, 24, pp. 843–856.
- [10] Mazzolani F.M., *Structural Applications of Aluminium in Civil Engineering. Structural Engineering International (SEI)*, “Journal of the IABSE” 2006, 4, pp. 280–285.
- [11] Kossakowski P., *Aluminium – materiał ekologiczny (Aluminium – ecological material)*, „Przegląd Budowlany” 2013, 10, s. 36–41.
- [12] <<http://european-aluminium.eu/>>.
- [13] Gwóźdź M., *Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych (Design issues of modern aluminium structures)*, „Czasopismo Techniczne. Architektura” 2007, z. 4-A, s. 281–286.
- [14] <<http://chodor-projekt.net/>>.
- [15] <<http://www.triodetic.com/>>.
- [16] <http://www.eurocodes.fi/1999/1999-1-1/background/Mazzolani_2008.pdf>.
- [17] <<https://www.cstindustries.com/products/aluminum-space-frame-structures/>>.
- [18] <<http://www.michadehaas.nl/>>.
- [19] Gwóźdź M., *Konstrukcje aluminiowe. Projektowanie według Eurokodu 9 (Aluminium structures. Design by Eurocode 9)*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.
- [20] PN-EN 573-2:1997 Aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and form of wrought products. Chemical symbol based designation system.