

PAWEŁ KOSSAKOWSKI  
Kielce University of Technology  
e-mail: kossak@tu.kielce.pl

# STAINLESS STEEL BRIDGES

## Abstract

*The paper concerns problems of application of stainless steel as construction material in bridges. The characteristics and properties of stainless steel are discussed, taking into consideration its possibilities for using in bridge engineering. As an example, duplex Uranus 35N stainless steel, which is suitable for use in bridges, is presented. Some examples of bridges, which main structure is made of stainless steel are also shown.*

**Keywords:** bridges, bridge structure, stainless steel, ferritic-austenitic duplex stainless steel

## 1. Introduction

The history of metal bridges has over 200 years of tradition, because it reaches the industrial revolution, which began in England and Scotland in the eighteenth century. The progressive industrialization forced the expansion and modernization of communication routes, including, in particular the erection and development of railway lines. These required the construction of new or upgrading existing bridges and viaducts. New structural materials, including primarily metals were introduced. They have been applied in bridge engineering very quickly, because the world's first bridge made of material other than wood and stone was built in Ironbridge in Shropshire in England in 1779. It was Iron Bridge, made of cast iron, which was put into use on January 1, 1781.

In the next period, the research works were conducted on improving and finding new structural materials that could be used for the construction of superstructures. As a result, first the puddle steel, then the cast steel, and finally many structural steels, which are used to our time, were introduced into the engineering. Currently, S235 and S355 are the basic grades of steel used in bridge engineering, but the increase in the use of the high-strength steels is also observed.

The studies are also carried now, and they are not limited only to ferrous materials. The aluminium and its alloys may be an example, which are used in more and more superstructures of bridges and parts of bridges, such as decks or equipment. Substantially it's a separate segment of the bridge construction; the advantages of materials and more favorable raw material prices, as well as products, means that they can compete with

the basic grades used to build steel bridges. The main parameter in favor of the use of aluminium and its alloys in bridges is its excellent resistance to corrosion.

Durability of bridge structures is significant enough that, although a number of solutions for securing their required stability are developed, the materials that they are resistant to corrosion in themselves are still in request. Aluminium and its alloys may be an example of such materials. A separate trend, which is observed in this regard, it is the use of stainless steels to perform not only pieces of bridge equipment, but also to form their superstructure.

## 2. Stainless steels used in the bridge engineering

As mentioned above, the main problem that determines the use of stainless steel in bridge engineering is the durability of the material. PN-EN 1990 [1] standard imposes for bridges a requirement of 100 years of service life, when they must function without failure. Durability of structure is naturally determined by the adverse effects of the environment in which they operate. As a result of these impacts, corrosive phenomena are observed, which lead to the initiation of destructive processes. They reduce load capacity of the structure, and consequently decrease the safety of their use. Therefore the main problem in bridges is on the one hand to ensure adequate resistance to destructive influences, through proper selection of materials of construction and security systems, but also searching for materials with increased corrosion resistance, which guarantee the durability of the required maintenance. Therefore, the gradual introduction for use metallic materials as construction materials which has high

resistance to corrosion, such as aluminium and its alloys and stainless steel is observed.

History of steel dates back to the mid-nineteenth century, when it was discovered in France by adding chromium to the steel means that it becomes resistant to acids. In the following period, its chemical composition was improved, which resulted in developing a number of basic grades. As defined in the standard EN 10088-1 [2] the corrosion resistant steel must contain a minimum 10.5% of chromium and a maximum 1.2% of carbon.

There are more than one hundred grades of stainless steel now, and a substantial group of them is used in the engineering. In bridge engineering 1.4462, 1.4404, 1.4401, 1.4362, 1.4062, 1.4062, 1.4307, 1.4301, 1.4618, 1.4003 and 1.4017 grades are recommended for use. In this group so called ferritic-austenitic duplex Cr-Ni-Mo steels should be highlighted. They are characterized by a chromium content above 16%, 4–6% of nickel and 1.5–3% of molybdenum. In comparison to the austenitic steels they contain less nickel and have much better mechanical properties and simultaneously have good deformability and a resistance to corrosion. Duplex steel also have a very good fracture toughness at low temperatures down to  $-40^{\circ}\text{C}$ , what in the case of bridge structures is essential. Three duplex steels are especially suitable for use in bridge engineering, ie. 1.4462, 1.4362 and 1.4162 EN 10088-4 [3].

One of the grades used as a construction material for bridge superstructures is Uranus 35N duplex steel. According to European standard EN 10216-5 [4] it is denoted as 1.4362 - X2 Cr Ni 23.4. Using this grade as an example, the properties of stainless steel used in bridge engineering are presented below.

Uranus 35N steel is one of the commonly used in the engineering the ferritic-austenitic duplex grade. Its chemical composition is given in Table 1.

Table 1. Chemical composition of duplex Uranus 35N steel (1.4362 – X2 Cr Ni 23.4) [5]

Element content [%]					
C	Cr	Ni	Mo	N	Other
0.02	23.0	4.0	0.2	0.1	S = 0.001
PREN = [Cr %] + 3.3 [Mo %] + 16 [N %] ≥ 24					

This grade of stainless steel has very good mechanical parameters, which significantly exceed the typical characteristics of the basic structural steel used in the bridge engineering, such as for example S235. Table 2 shows the strength and elongation

values obtained for hot-rolled sheet made of Uranus 35N steel (1.4362 – X2 Cr Ni 23.4) with a thickness up to 50 mm.

Table 2. Mechanical parameters of duplex Uranus 35N steel (1.4362 – X2 Cr Ni 23.4) [5]

Temperature [°C]	Parameter			
	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_{p1.0}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Elongation [%]
20	400	440	600	25
100	330	365	570	25
200	280	310	530	20
300	230	260	490	20

Uranus 35N steel has a impact strength of  $90 \text{ J/cm}^3$  at the temperature  $-50^{\circ}\text{C}$  and  $150 \text{ J/m}^3$  at the temperature  $+20^{\circ}\text{C}$ .

In terms of corrosion resistance, Uranus 35N stainless steel has similar properties as 316L grade. The low nickel content and a high chromium content results in the increase of resistance to stress corrosion in comparison to the 304 and 316 grades. Figures 1a and b shows corrosion resistance of stainless Uranus 35N steel compared to other grades of stainless steels.

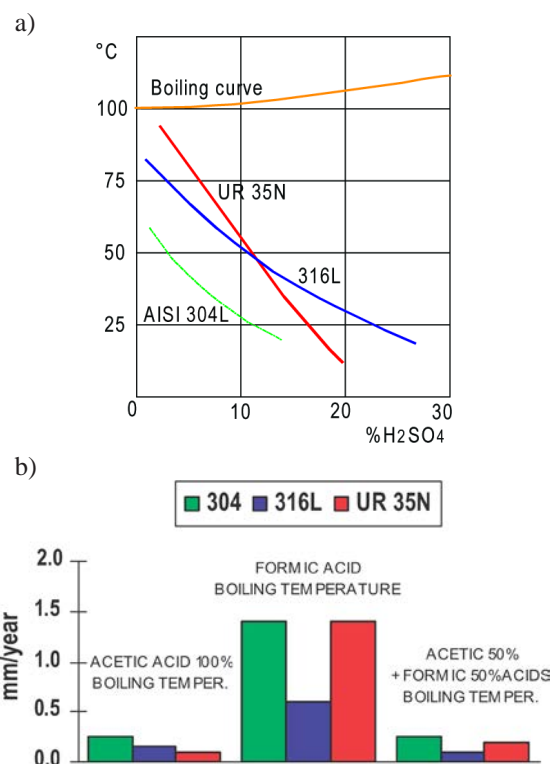


Fig. 1. Corrosion resistance of Uranus 35N steel: a) to stagnant sulfuric acid (0.3 mm/year), b) in different organic acids [5]

### 3. Examples of the bridges made of stainless steel

The history of bridges made of stainless steel is relatively short, about twenty years. The first applications of this material included parts of the equipment, then increasingly it was chosen to construct superstructures. Recently, it has been seen more and more of this type of investments, which lets hope that stainless steel become the equivalent construction material to conventional structural steels commonly used in this industry.

The first applications of stainless steel in bridge engineering was the modernization of arched bridge Kunglav in Sweden, under which in 2003 corroded hangers was replaced for the new one made of 1.4462 steel grade and later wind barriers on the viaduct Crni Kal in Slovenia, made of stainless 1.4162 grade.

Arched bridge built in Spain in 2005 in the town of Cala Galdana on Menorca was the structure of first road bridge in Europe made of stainless steel (Fig. 2).



Fig. 2. Cala Galdana Bridge on Menorca (Spain) [6]

The total length of this bridge is 55 m, width 13 m and span length 45 m. The structure is made in the form of two parallel arches with triangular cross-section 700–1000/700/20–25 mm (element No. 1 according to Fig. 3) connected which two longitudinal girders made of welded rectangular tubes with the central web of the 1000/500/15–25 mm profile (element No. 3 according to Fig. 3). Arches and girders are based directly on reinforced concrete abutments. Arches span is 45 m and the elevation of 6 m. The bridge deck is made of reinforced concrete, in the form of composed structure with steel crossbeams of rectangular section 250/500–570/10–12 mm (middle cross-members) and 250/300–50/8–10 mm (outer cantilever cross-members), which

are arranged in spacing of 2 m (elements No. 4 and 5 according to Fig. 3). For main structural members duplex stainless steel of 1.4462 grade was used, which is characterized by high resistance to corrosion caused by chlorides and high strength.

Another bridges, of which the main structure is made of stainless steel, have been built recently in Italy. These are Arco di Malizia in Siena (2005) and Piove di Sacco in Padua (2006). In both cases, duplex stainless steel was used.

Arco di Malizia is a road viaduct, located above the railway line and made in the form of arch structure with a total length of 50 m (Fig. 4).



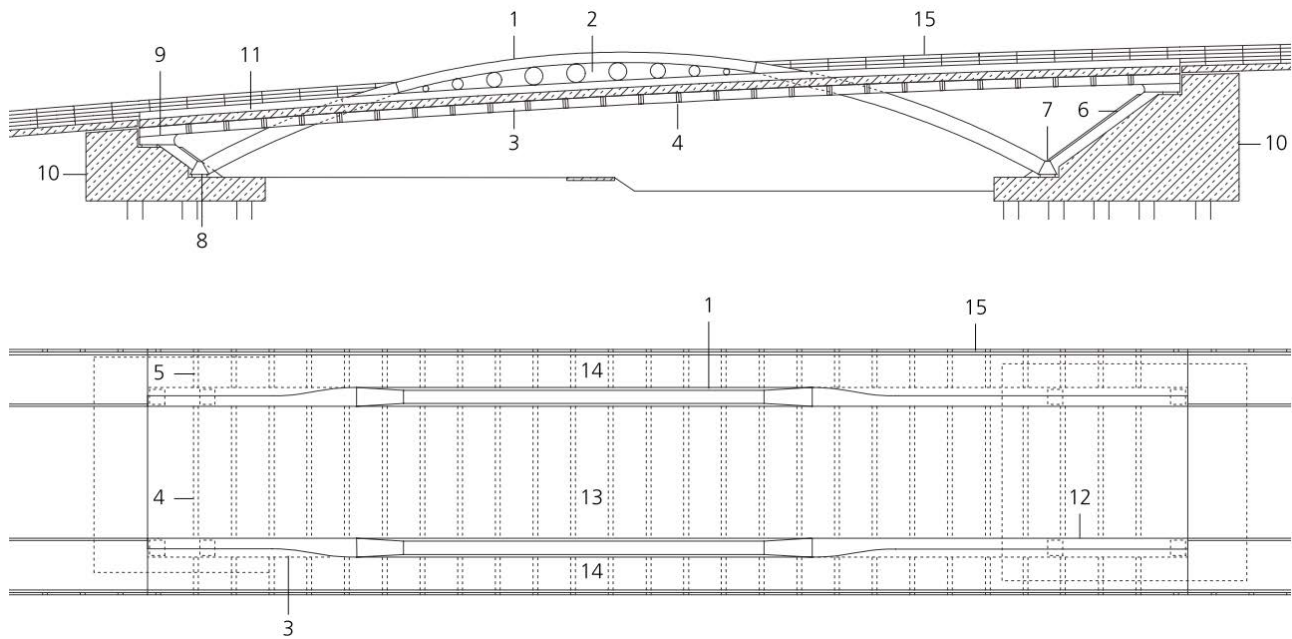


Fig. 3. Structure of Cala Galdana Bridge on Menorca (Spain)



Fig. 4. Arco di Malizia Bridge in Siena (Italy) [7]

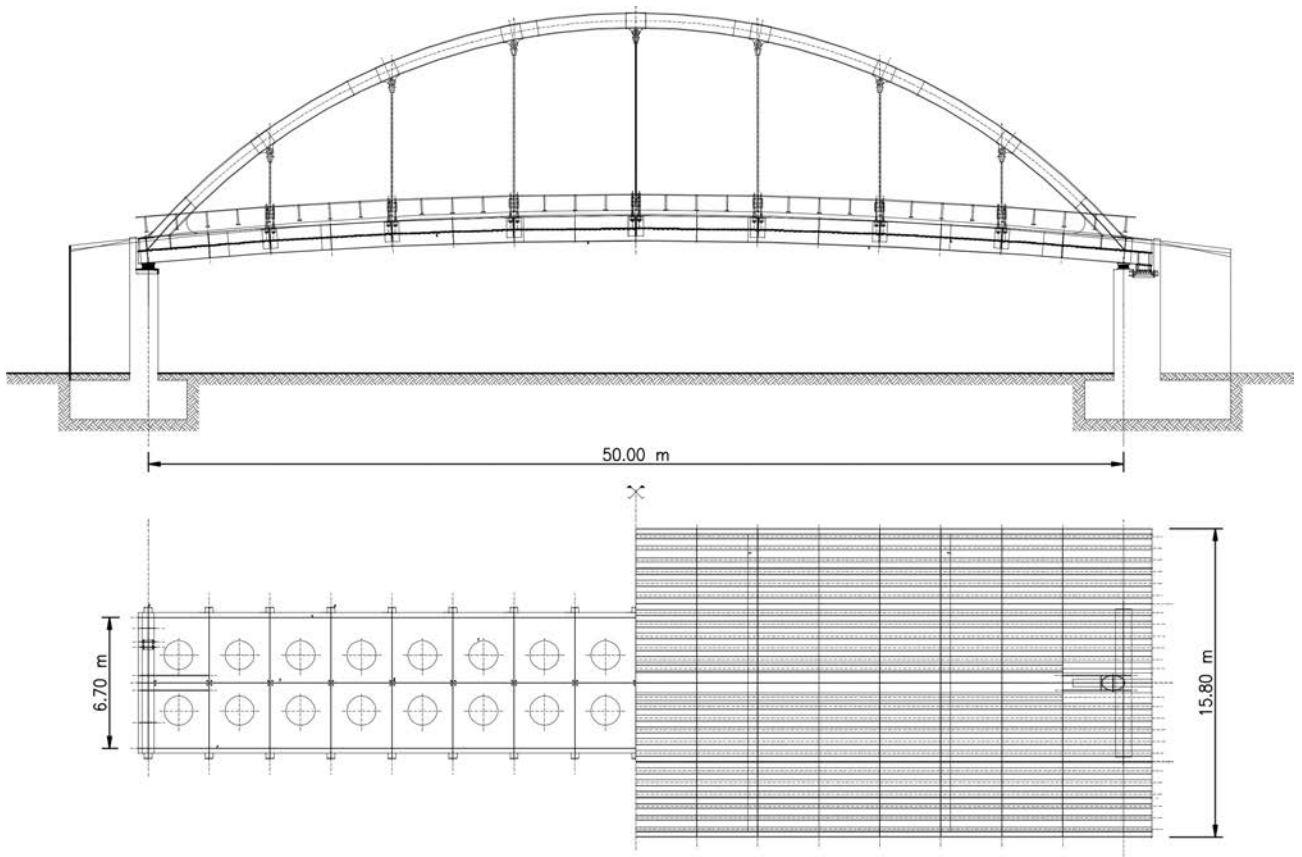


Fig. 5. Structure of Arco di Malizia Bridge in Siena (Italy)

The main structural element of Arco di Malizia Bridge is a single steel arch (Fig. 5). Its length is 50 m and height 10 m. It is constructed in the form of a tube with a circular diameter of 820 mm, made of stainless steel duplex Uranus 35N. It consists of five elements, which are welded together at the assembly. The composite plate steel-reinforced concrete bridge with a width of 15.8 m has been suspended to the arch by tendons.

Of a great interest is the development and application of innovative technology for welding parts of the bridge structure made of duplex stainless steel and structural steel grade S355. It should be mentioned also, that it was the first application in Italy of stainless steel in infrastructure work on such a large scale.

#### 4. Conclusions

Bridge engineering is still looking for new solutions for structural systems and modern materials. The main problem is to provide long life of bridges, usually achieved through the use of suitable corrosion protection. An interesting approach is to search for new construction materials which are resistant to corrosion and sufficiently durable and can be applied in bridges. One of them is stainless steel, which has

been gradually introduced for use for some years. Recently it has been observed an increase in bridge investment, where structure is made of stainless steel.

#### References

- [1] PN-EN 1990:2004 Eurocode – Basis of structural design.
- [2] PN-EN 10088-1:2014-12 Stainless steels. Stainless steels. List of stainless steels.
- [3] PN-EN 10088-4:2010 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes.
- [4] PN-EN 10216-5:2014-02 Seamless steel tubes for pressure purposes. Technical delivery conditions. Stainless steel tubes.
- [5] Uranus 35N. Technical data. Industeel, Arcelor Group, Le Creusot 2000.
- [6] pl.wikipedia.org
- [7] ilnuovocantiere.it

Paweł Kossakowski

## MOSTY ZE STALI NIERDZEWNEJ

### 1. Wprowadzenie

Historia mostów metalowych ma już ponad 200 lat, bo sięga rozpoczętej w Anglii i Szkocji w XVIII wieku rewolucji przemysłowej. Postępujące uprzemysłowienie wymusiło rozbudowę i unowocześnienie tras komunikacyjnych, w tym przede wszystkim powstanie i rozwój linii kolejowych. Te z kolei wymagały budowy nowych lub modernizacji istniejących mostów i wiaduktów. Wprowadzono nowe materiały konstrukcyjne, z których najbardziej interesującymi były metale. Bardzo szybko znalazły one zastosowanie w mostownictwie, bo już w roku 1779 wybudowano w Ironbridge w Shropshire w Anglii pierwszy na świecie most z materiału innego niż drewno i kamień. Był to oddany do użytku 1 stycznia 1781 roku most Iron Bridge, który wykonano z lanego żeliwa.

W następnym okresie prowadzono prace nad doskonaleniem i poszukiwaniem nowych materiałów konstrukcyjnych, które mogłyby znaleźć zastosowanie do budowy ustrojów nośnych. Efektem tego było wprowadzenie do inżynierii stali zgrzewnej, a następnie zlewnej, oraz stali konstrukcyjnych, które poddawane udoskonaleniom są wykorzystywane aż do naszych czasów. Obecnie podstawowe gatunki stali stosowane w mostownictwie to S235 i S355. Coraz szersze zastosowanie znajdują także stale wysokowytrzymałe.

Prace te są prowadzone również i obecnie i nie zawężają się tylko do materiałów żelaznych. Przykładem może być aluminium i jego stopy, z których wykonuje się coraz więcej ustrojów nośnych mostów, jak i ich elementów, takich jak pomosty czy wyposażenie. Jest to w zasadzie osobny segment konstrukcji mostowych, który z uwagi na zalety tych materiałów oraz coraz korzystniejsze ceny surowca jak również wyrobów, powoduje, że mogą one stanowić konkurencję dla podstawowych gatunków stali mostowych. Zasadniczym parametrem przemawiającym za zastosowaniem aluminium i jego stopów w mostownictwie jest jego znakomita odporność na korozję.

Zagadnienia trwałości obiektów mostowych są na tyle istotne, że choć opracowano szereg rozwiązań gwarantujących uzyskanie przez nie wymaganej trwałości, to wciąż poszukuje materiałów, które same w sobie są odporne na korozję. Przykładem może być

właśnie aluminium i jego stopy. Osobnym trendem, jaki obserwuje się w tym zakresie, jest zastosowanie stali nierdzewnych do wykonywania nie tylko elementów wyposażenia obiektów mostowych, ale także kształtowania ich zasadniczej struktury nośnej.

### 2. Stale nierdzewne stosowane w mostownictwie

Jak wspomniano wyżej, podstawowym zagadnieniem, które decyduje o zastosowaniu stali nierdzewnej w mostownictwie jest jej trwałość. Norma PN-EN 1990 [1] dla obiektów mostowych narzuca wymóg 100-letniego okresu trwałości, w czasie którego muszą one bezawaryjnie funkcjonować. Trwałość konstrukcji budowlanych jest w naturalny sposób determinowana niekorzystnym oddziaływaniem środowiska, w jakim one funkcjonują. Efektem tych oddziaływań są rozwijające się zjawiska korozyjne, powodujące inicjację procesów destrukcyjnych które obniżają nośność konstrukcji, a w konsekwencji stwarzają zagrożenie bezpieczeństwa ich użytkowania. Stąd podstawowym zagadnieniem w mostownictwie jest z jednej strony zagwarantowanie odpowiedniej odporności na oddziaływanie czynników destrukcyjnych, poprzez odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych i systemów zabezpieczeń, ale także poszukiwanie materiałów o podwyższonej odporności korozyjnej, które gwarantują utrzymanie wymaganej trwałości obiektów. Stąd sukcesywne wprowadzanie do użytku materiałów metalicznych o wysokiej odporności na korozję, takich jak aluminium i jego stopy oraz stal nierdzewna.

Historia stali nierdzewnej sięga drugiej połowy XIX wieku, kiedy to we Francji odkryto, że dodanie do stali chromu powoduje, że staje się ona odporna na działanie kwasów. W dalszym okresie udoskonalano jej skład chemiczny, opracowując kilka zasadniczych gatunków. Zgodnie z definicją podaną w normie PN-EN 10088-1 [2] za stale odporne na korozję przyjmuje się te, w których zawarte jest minimum 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla.

Obecnie istnieje ponad sto gatunków stali nierdzewnej, a zasadnicza ich grupa znajduje zastosowanie w technice i inżynierii. W inżynierii mostowej zalecane do stosowania gatunki to 1.4462, 1.4404, 1.4401, 1.4362, 1.4062, 1.4062, 1.4307, 1.4301, 1.4618, 1.4003 i 1.4017. W tej grupie na szczególne

wyróżnienie zasługują tzw. ferrytyczno-austenityczne stale typu duplex Cr-Ni-Mo. Charakteryzują się one zawartością chromu powyżej 16%, zawartością niklu 4–6% oraz molibdenu 1,5–3%. W porównaniu ze stalą austenityczną zawierają one mniej niklu oraz mają znacznie lepsze właściwości wytrzymałościowe, a jednocześnie cechują się dobrą odkształcalnością i odpornością na korozję. Stale duplex odznaczają się także dobrą odpornością na pękanie w zakresie niskich temperatur do  $-40^{\circ}\text{C}$ , co w przypadku konstrukcji mostów ma znaczenie podstawowe. W mostownictwie trzy gatunki stali duplex są szczególnie odpowiednie do stosowania, tj. 1.4462, 1.4362 i 1.4162 EN 10088-4 [3].

Jednym z gatunków znajdujących zastosowanie jako materiał konstrukcyjny, z którego wykonuje się ustroje nośne obiektów mostowych jest stal typu duplex Uranus 35N, oznaczany zgodnie z normą europejską EN 10216-5 [4] jako 1.4362 – X2 Cr Ni 23.4. Na przykładzie tego gatunku zaprezentowano poniżej właściwości stali nierdzewnej pod kątem jej wykorzystania w inżynierii mostowej.

Stal Uranus 35N to jeden z powszechnie stosowanych w technice gatunków stali ferrytyczno-austenitycznych typu duplex. Jej skład chemiczny podano w tabeli 1.

Charakteryzuje się ona bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi, znacząco przewyższającymi typowe charakterystyki podstawowych stali konstrukcyjnych stosowanych w mostownictwie, jak np. stale gatunków S235. W tabeli 2 podano wartości wytrzymałości oraz wydłużenia uzyskane dla blach walcowanych na gorąco ze stali Uranus 35N (1.4362 – X2 Cr Ni 23.4) o grubości do 50 mm.

Stal Uranus 35N charakteryzuje się udarnością na poziomie  $90\text{ J/cm}^3$  dla temperatury  $-50^{\circ}\text{C}$  oraz  $150\text{ J/cm}^3$  dla temperatury  $+20^{\circ}\text{C}$ .

W zakresie odporności korozyjnej stal Uranus 35N ma podobne właściwości jak gatunek 316L. Niska zawartość niklu a jednocześnie wysoka chromu sprawia, że gatunek ten ma podwyższoną odporność na korozję naprężeniową w porównaniu z gatunkami 304 i 316. Na rysunku 1a i 1b scharakteryzowano odporność korozyjną stali Uranus 35N w porównaniu z innymi gatunkami stali nierdzewnych.

### 3. Przykłady konstrukcji obiektów mostowych wykonanych ze stali nierdzewnej

Historia obiektów mostowych wykonywanych ze stali nierdzewnej jest stosunkowo krótka, bo około dwudziestoletnia. Pierwsze zastosowania obejmowały

elementy wyposażenia, później coraz szerzej decydowano się na konstruowanie ustrojów nośnych z tego materiału. W ostatnim okresie obserwuje się coraz więcej tego typu inwestycji, co pozwala mieć nadzieję, że stal nierdzewna stanie się równorzędnym dla typowych stali konstrukcyjnych materiałem konstrukcyjnym powszechnie stosowanym w mostownictwie.

Z pierwszych zastosowań stali nierdzewnych w mostach należy wymienić modernizację mostu łukowego Kunglav w Szwecji, w ramach której w roku 2003 wymieniono skorodowane zawiesia stalowe pomostu na nowe, wykonane ze stali gatunku 1.4462 oraz bariery przeciwwiatrowe na wiadukcie Črni Kal w Słowenii, których konstrukcję wykonano ze stali gatunku 1.4162.

Pierwszym w Europie mostem drogowym, którego konstrukcja wykonana została ze stali nierdzewnej był łukowy most wybudowany w Hiszpanii w 2005 roku w miejscowości Cala Galdana na Minorce (rys. 2).

Całkowita długość obiektu wynosi 55 m, szerokość 13 m, rozpiętość przęsła 45 m. Konstrukcję wykonano w postaci dwóch równoległych łuków o przekroju trójkątnym 700–1000/700/20–25 mm (element nr 1 wg rys. 3), przez które przenikają dwa podłużne dźwigary wykonane ze spawanych rur prostokątnych z środkowym średnicą 1000/500/15–25 mm (element nr 3 wg rys. 3). Łuki i dźwigary opierają się bezpośrednio na żelbetowych przyczółkach (oczepach). Rozpiętość łuków wynosi 45 m, a wyniesienie 6 m. Płytę pomostu wykonano z żelbetu, zespalając ją z poprzecznikami stalowymi o przekroju prostokątnym 250/500–570/10–12 mm (poprzecznice środkowe) i 250/300–50/8–10 mm (wspornikowe poprzecznice skrajne), które są rozmieszczone w rozstawie co 2 m (elementy nr 4 i 5 wg rys. 3). Do wykonania konstrukcji obiektu zastosowano stal nierdzewną typu duplex gatunku 1.4462, który cechuje się wysoką odpornością na korozję spowodowaną przez chlorki oraz wysoką wytrzymałością.

Z innych obiektów mostowych, których główną konstrukcję wykonano ze stali nierdzewnej należy wymienić obiekty wybudowane we Włoszech: Arco di Malizia w Sienie (2005) i Piove di Sacco w Padwie (2006). W obydwu przypadkach również zastosowano stal typu duplex.

Arco di Malizia to wiadukt drogowy, zlokalizowany nad linią kolejową. Wykonano go w postaci konstrukcji łukowej o długości całkowitej 50 m (rys. 4). Zasadniczym elementem konstrukcyjnym jest pojedynczy stalowy łuk, do którego podwieszona jest konstrukcja pomostu (rys. 5). Łuk o długości 50 m



i wyniesieniu 10 m wykonano w postaci rury o przekroju okrągłym średnicy 820 mm ze stali nierdzewnej typu duplex Uranus 35N. Składa się on z 5 elementów, które zesparowano na montażu w jedną całość. Zespilona płyta stalowo-żelbetowa pomostu o szerokości 15,8 m została podwieszona do łuku za pomocą cięgien. W obiekcie Arco di Malizia po raz pierwszy we Włoszech zdecydowano się na zastosowanie stali nierdzewnej w pracach infrastrukturalnych na tak dużą skalę. Na uwagę zasługuje opracowanie i zastosowanie innowacyjnej technologii spawania elementów konstrukcji mostu wykonanych ze stali nierdzewnej typu duplex i stali konstrukcyjnej gatunku S355.

#### **4. Podsumowanie**

Inżynieria mostowa poszukuje nowych rozwiązań w zakresie układów konstrukcyjnych oraz nowoczesnych materiałów. Zapewnienie odpowiednio długiej trwałości obiektów mostowych jest od zawsze kluczowym problemem. Standardowo jest ona osiągnięta poprzez zastosowanie odpowiednich zabezpieczeń antykorozyjnych. Interesującym kierunkiem jest poszukiwanie nowych materiałów konstrukcyjnych, które są odporne na korozję, a jednocześnie odpowiednio wytrzymałe i mogą mieć zastosowanie w mostownictwie. Jednym z nich jest stal nierdzewna, która od pewnego czasu jest sukcesywnie wprowadzana do użytku w tej branży. Efektem tego jest obserwowany ostatnio na świecie wzrost inwestycji mostowych, których konstrukcja jest wykonywana ze stali nierdzewnej.