

Różnorodność cech fizyko-mechanicznych stali nierdzewnych w aspekcie zastosowań konstrukcyjnych Diversity of stainless steel physical and mechanical properties in the aspect of structural applications

Izabela Tylek¹, Krzysztof Kuchta²

^{1,2}Katedra Konstrukcji Metalowych
Wydział Inżynierii Ładowej, Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: itylek@pk.edu.pl¹, kkuchta@pk.edu.pl²

^{1,2}Chair of Metal Structures
Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology
ul. Warszawska 24, 31-155 Krakow
e-mail: itylek@pk.edu.pl¹, kkuchta@pk.edu.pl²

Streszczenie

W artykule opisano podstawowe parametry charakteryzujące konstrukcyjną stal nierdzewną, dopuszczoną do stosowania w budownictwie zgodnie z normą PN-EN 1993-1-4 [2]. Podano podstawowe kryteria klasyfikacji tego typu stali, a następnie, w oparciu o przyjęty podział stali nierdzewnych, opisano różnice ich cech fizyko-mechanicznych. Przedstawiono również krótki opis zagadnień dotyczących trwałości stali nierdzewnych oraz wskazano zalety i wady jej stosowania.

Abstract

In the paper principal parameters of structural stainless steel, allowed for use in building structures by standard PN-EN 1993-1-4 [2], were described. Main classification criteria of this type of steel were presented and then, on the basis of assumed stainless steel classification, differences of their physical and mechanical properties were described. Short description of issues concerning stainless steels durability and advantages and disadvantages of its applications were also presented.

Słowa kluczowe: cechy fizyko-mechaniczne, stal nierdzewna, konstrukcje metalowe
Keywords: physical and mechanical properties, stainless steel, steel structures

1. Wprowadzenie

Podstawową właściwością stali nierdzewnej jest jej odporność na korozję wynikająca z odpowiedniego składu chemicznego stopu. Zgodnie z PN-EN 10088 [4-8] stale tego typu powinny zawierać min. 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla. Zawartość pozostałych składników stopowych jest zmienna i zależy od gatunku stali. Wysoka zawartość chromu umożliwia samoistne tworzenie się cienkiej, nieprzezroczystej warstwy tlenków, która zabezpiecza element przed korozją. Warstwa ta jest trwała, nieporowata i ściśle przylegająca do powierzchni elementu. W przypadku jej uszkodzenia (np. zarysowania) wykazuje ona, w zetknięciu z powietrzem lub w obecności utleniaczy, zdolność do natychmiastowej samoregeneracji, dzięki czemu zachowane zostają właściwości antykorozyjne materiału. Wyższa zawartość chromu w stopie podnosi odporność stali na korozję. Dodatkowe zwiększenie odporności korozyjnej można uzyskać wprowadzając do stopu nikiel i molibden.

Istotne dla bezpieczeństwa konstrukcji różnice pomiędzy właściwościami mechanicznymi i fizycznymi stali węglowych i stali nierdzewnych zostały uwzględnione w normie europejskiej PN-EN 1993-1-4 [2].

2. Klasyfikacja stali nierdzewnych

Podstawowa klasyfikacja stali nierdzewnych jest związana z

1. Introduction

Primary property of stainless steel is its resistance to corrosion resulting from appropriate alloy chemical composition. According to PN-EN 10088 [4-8], this type of steel should contain at least 10.5% of chromium and maximum 1.2% of carbon. Content of other alloying components is variable and depends on steel grade. High chromium content allows spontaneous forming of thin, non-transparent oxide film which protects element against corrosion. This film is stable, non-porous and tightly adherent to the element surface. If it is broken down (e.g. by scratching), it is capable of immediate self-repair in the presence of air or an oxidising environment what allows to keep anticorrosive properties of material. Higher chromium content in the alloy increases steel corrosion resistance. Further enhance of corrosion resistance may be achieved by introducing nickel and molybdenum into the alloy.

Differences between carbon and stainless steel mechanical and physical properties, important for structures safety, are specified in European Standard PN-EN 1993-1-4 [2].

2. Stainless steel classification

The main classification of stainless steels is referred to their

ich strukturą i składem chemicznym, które mają bezpośredni wpływ na właściwości fizyko-mechaniczne poszczególnych rodzajów i gatunków stali. Zgodnie z [4-8] wyróżnia się następujące rodzaje stali nierdzewnych: ferrytyczne, martenzytyczne, umacniane wydzieleniowo, austenityczne i austenityczno-ferrytyczne. Postanowienia podane w [2] stosuje się wyłącznie przy projektowaniu konstrukcji stalowych ze stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej, austenitycznej i austenityczno-ferrytycznej. W ramach każdej ze struktur wyróżnia się gatunki stali nierdzewnych, a podstawą podziału, w przeciwieństwie do stali węglowych, nie jest granica plastyczności, lecz skład chemiczny stopu.

3. Właściwości materiałowe stali nierdzewnych

Różnice pomiędzy właściwościami mechanicznymi i fizycznymi stali węglowych i stali nierdzewnych obejmują nie tylko podstawowe właściwości materiałowe, takie jak moduł Younga czy granica plastyczności, ale dotyczą także przebiegu charakterystyki naprężenie-odkształcenie oraz zachowania się materiału podczas formowania na zimno i w podwyższonych temperaturach; ma to istotny wpływ zarówno na stany graniczne nośności i użyteczności oraz zachowanie się konstrukcji pożarze.

Cechą charakterystyczną stali nierdzewnych jest to, że już w fazie sprężystej krzywa σ - ϵ staje się wyraźnie nieliniowa, nie ma wyraźnej granicy plastyczności i charakterystycznej dla stali węglowych półki plastycznej. Stopień nieliniowości zależności σ - ϵ jest charakteryzowany współczynnikiem n , który ze względu na anizotropię stali nierdzewnej przyjmuje zróżnicowane wartości zależne od gatunku stali i kierunku walcowania [2]. Stale nierdzewne charakteryzują się dobrą ciągliwością, pozwalającą na osiągnięcie dużych odkształceń plastycznych w przedziale naprężeń pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie. Wymagania ciągliwości przy projektowaniu konstrukcji ze stali nierdzewnej należy przyjmować zgodnie z [1], przy czym zakłada się, że dla stali gatunków wymienionych w Tabelicy 2.1 PN-EN 1993-1-4 [2] wymagania te są spełnione.

W projektowaniu konstrukcji ze stali nierdzewnych według [2] wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u przyjmuje się równe wartościom nominalnym podanym w Tabelicy 2.1 te same normy, niezależnie od kierunku walcowania. Tabelica 2.1 [2] obejmuje 21 gatunków stali nierdzewnych, w tym: 3 gatunki stali o strukturze ferrytycznej, 16 gatunków stali austenitycznych i 2 gatunki stali austenityczno-ferrytycznych, zawarte tam wartości granicy plastyczności f_y odpowiadają wartościom umownej granicy plastyczności przy odkształceniu 0,2% według [5-8], przy czym dla taśm i blach ze stali ferrytycznych przyjęto bardziej niekorzystne wartości uzyskane dla próbek wzdłużnych, natomiast dla stali austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych wartości dla próbek poprzecznych. Należy również zauważyć, że wartości nominalne określone w Tabelicy 2.1 [2] odpowiadają mniej korzystnym parametrom określonym dla stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia według [5,7]. Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej i austenitycznej charakteryzują się granicą plastyczności zbliżoną do najbardziej popularnych stali węglowych: 210-260 MPa (ferrytyczna) i 175-350 MPa (austenityczna). Stale duplex osiągają wyższe wartości granicy plastyczności, tj. 400-480 MPa.

Wartość modułu sprężystości E stali nierdzewnych zależy od jej struktury: ferrytyczne – 220 GPa, austenityczne – 195/200 GPa i austenityczno-ferrytyczne – 200 GPa [2].

structure and their chemical composition which have direct influence on physical and mechanical properties of particular steel categories and grades. According to [4-8] following categories of stainless steels are distinguished: ferritic, martensitic, precipitation hardening, austenitic and austenitic-ferritic. Provisions given in [2] are applied to design of structures made only of ferritic, austenitic or austenitic-ferritic stainless steels. Within the framework of each stainless steel structure particular grades are distinguished, the basis of grades classification, unlike carbon steel, is not yield strength but alloy chemical compositions.

3. Material properties of stainless steel

Differences between mechanical and physical properties of carbon and stainless steels include not only primary material properties such as Young's modulus or yield strength but also concern stress-strain relationship and behaviour of material during cold working or in elevated temperatures; it has significant influence also on ultimate and serviceability limit states or on structure behaviour during fire.

Characteristic of stainless steel is that curve σ - ϵ becomes clearly nonlinear just in elastic range, it has no explicit yield stress and there is no plateau before strain hardening what is typical for carbon steel. Degree of nonlinearity of σ - ϵ relationship is characterized by coefficient n which, due to stainless steel anisotropy, takes values dependent on steel grades and rolling direction [2]. Stainless steels are characterized by good ductility enabling large deflections in the range of yield strength and ultimate tensile strength. The ductility requirements in design of stainless steel structures should be taken according to [1], it is assumed that stainless steel grades listed in Table 2.1 PN-EN 1993-1-4 [2] satisfy these requirements.

In design of stainless steel structures according to [2] values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u are taken as nominal given in Table 2.1 of mentioned standard, independent of direction of rolling. Table 2.1 [2] contains 21 stainless steel grades, including: 3 ferritic grades, 16 austenitic grades and 2 austenitic-ferritic grades, listed values of yield strength f_y are equal to 0,2% proof stress according to [5-8], while for strips and plates made of ferritic steels more unfavourable values achieved for longitudinal samples, whereas for austenitic and austenitic-ferritic steels values for transversal samples. It should be noted that nominal values, specified in Table 2.1 [2] are equal to less favorable values determined for general purposes stainless steels according to [5,7].

Stainless steel with ferritic and austenitic structures are characterized by yield strength similar to the most popular carbon steels: 210-260 MPa (ferritic) and 175-350 MPa (austenitic). Duplex steels achieve higher values of yield strength, that is 400-480 MPa.

Stainless steel modulus of elasticity E values depends on steel structure: ferritic – 220 GPa, austenitic – 195/200 GPa and austenitic-ferritic – 200 GPa [2]. These Young's modulus values should be assumed for the global analysis used to determine the resistance of members, whereas in estimating deflections the effect of nonlinear stress-strain relationship should be taken into account by using the secant modulus of elasticity $E_{s,ser}$ determined taking account of the stresses for the serviceability limit state and the orientation of the rolling direction [2].

Stainless steel shear modulus G is determined depending on

Powyższe wartości modułu Younga E należy przyjmować w analizie globalnej służącej wymiarowaniu elementów, natomiast przy wyznaczaniu ugięć elementów należy uwzględnić nieliniową zależność naprężenie-odkształcenie, wprowadzając do obliczeń siczny moduł sprężystości $E_{s,ser}$ odpowiadający naprężeniom w stanie granicznym użyteczności i uwzględniający kierunek walcowania [2].

Moduł sprężystości przy ścinaniu stali nierdzewnych wyznacza się w zależności od wartości modułu Younga ze znanego wzoru $G = E/[2(1 + \nu)]$, gdzie ν – współczynnik Poissona, w stanie sprężystym równy 0,3 [2].

Udarność stali nierdzewnych jest zróżnicowana i zmienia się wraz ze strukturą stali oraz temperaturą badania, przy czym największe różnice w zachowaniu stali o różnych strukturach dotyczą zakresu niskich temperatur. Dla stali ferrytycznych i ferrytyczno-austenitycznych charakterystyczne jest występowanie tzw. progu kruchości czyli temperatury, w której zachowanie stali przechodzi od ciągliwego do kruche; w przypadku stali o strukturze austenitycznej nie obserwuje się tego typu zachowania. Podczas projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych można przyjąć, że stale austenityczne i austenitczno-ferrytyczne, objęte normą [2] wykazują odpowiednią udarność i nie są narażone na kruche pękanie w temperaturach eksploatacyjnych do -40°C . W przypadku stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej dobór stali ze względu na kruche pękanie należy przeprowadzić na podstawie zaleceń podanych w [3].

Współczynnik rozszerzalności cieplnej i przewodność cieplna to właściwości fizyczne przyjmujące zróżnicowane wartości w zależności od struktury stali nierdzewnej. Duża rozszerzalność cieplna stali austenitycznych (współczynnik rozszerzalności cieplnej z zakresu $15.8-16.5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) jest przyczyną powstawania znacznych naprężeń i odkształceń termicznych, np. przy spawaniu. Przewodność cieplna stali nierdzewnych maleje wraz ze wzrostem zawartości pierwiastków stopowych. Najniższą przewodność cieplną przy temperaturze 20°C mają stale austenityczne ($12-15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), a najwyższą – stale ferrytyczne ($25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [4].

Gęstość stali nierdzewnych również nie jest wartością stałą, lecz zmienia się w zależności od rodzaju struktury wewnętrznej i gatunku stali od $7,5$ do $8,1 \text{ kg/dm}^3$ [4].

4. Trwałość stali nierdzewnych

Stale nierdzewne wykazują zdecydowanie większą trwałość niż stale węglowe, co jest związane z ich większą odpornością korozyjną. Odporność korozyjna stali nierdzewnej jest zależna od składu chemicznego stopu, w związku z tym różne gatunki stali mogą zachowywać się odmiennie w tym samym środowisku, istotną kwestią jest więc odpowiedni dobór gatunku stali nierdzewnej stosownie do korozyjności środowiska. Norma [2] zaleca, aby ocenę przydatności określonego gatunku stali nierdzewnej przeprowadzić odwołując się do podobnych zastosowań i środowisk. Konstrukcje wykonane ze stali nierdzewnej o odpowiednio dobranym gatunku, znajdujące się w środowiskach lekko i umiarkowanie agresywnych korozyjnie, po standardowych 50-letach eksploatacji mogą wymagać jedynie zabiegów konserwacyjnych i to tylko ze względów estetycznych; podczas gdy trwałość malarskich powłok antykorozyjnych na konstrukcjach ze stali węglowej wynosi w przypadku trwałości „wysokiej” według [9] nie mniej niż 15 lat.

Young's modulus value from well-known formula $G = E/[2(1 + \nu)]$, where ν – Poisson's ratio in elastic stage equal to 0,3 [2].

Fracture toughness of stainless steels is diverse and changes with structure of steel and temperature of test; major differences in behaviour of stainless steel with various structure concern low temperatures. Characteristic for ferritic and ferritic-austenitic steels is so called transition temperature, that is temperature in which steel behaviour transit from tough to brittle; in case of austenitic stainless steels such behaviour is not observed. In design of stainless steel structures it may be assumed that austenitic and austenitic-ferritic stainless steels, covered by Standard [2] are adequately tough and not susceptible to brittle fracture for service temperatures down to -40°C . For the selection of ferritic stainless steels for fracture toughness rules given in [3] should be used.

Coefficient of thermal expansion and thermal conductivity are the physical properties that take different values depending on structure of stainless steel. High thermal expansion of austenitic stainless steels (coefficient of thermal expansion from the range of $15.8-16.5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) is the reason of significant thermal stresses and strains occurring, e.g. during welding. Thermal conductivity of stainless steels decreases with an increase of alloying elements content. The lowest thermal conductivity at 20°C have austenitic steels ($12-15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) and the highest – ferritic steels ($25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [4].

Density of stainless steels is also not a constant value but changes with structure of steel and its grade from $7,5$ to $8,1 \text{ kg/dm}^3$ [4].

4. Durability of stainless steel

Stainless steels show much higher durability than carbon steels due to their higher corrosion resistance. Stainless steel corrosion resistance depends on the alloy composition so various grades may behave differently in the same environment, therefore appropriate selection of steel grade, accordingly to corrosiveness of an environment. Standard [2] recommends that suitability of grades should be assess by referring to experience of stainless steels in similar applications and environments.

Structures made of properly selected stainless steel grade, after standard 50 years of use in low and medium corrosively aggressive environments, may need only maintenance for aesthetic reasons, while durability of anticorrosive paint coatings on carbon steel structures should be, in case of “high” durability [9], more than 15 years.

5. Podsumowanie

Stale nierdzewne stosowane są w realizacjach budowlanych dwojakiego rodzaju: estetycznych – gdy podstawowe znaczenie przy wyborze materiału odgrywa wygląd konstrukcji i jego utrzymanie w okresie eksploatacji oraz konstrukcyjnych – gdy zasadniczą rolę odgrywają właściwości mechaniczne stali [2].

Fizyko-mechaniczne właściwości stali nierdzewnej, istotne w zastosowaniach konstrukcyjnych, są bezpośrednio związane z jej strukturą wewnętrzną i składem chemicznym. Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej osiągają zazwyczaj wyższą granicę plastyczności niż stale austenityczne, natomiast stale austenityczno-ferrytyczne charakteryzują się zdecydowanie najwyższą granicą plastyczności spośród wszystkich rodzajów konstrukcyjnych stali nierdzewnych. Ciągłość stali ferrytycznych i austenityczno-ferrytycznych jest podobna, znakomitą ciągłość mają stale austenityczne, dla których wydłużenie jest około dwa razy większe niż stali ferrytycznych czy stali austenityczno-ferrytycznych.

Dokonując wyboru pomiędzy stalą węglową a nierdzewną inwestor często zwraca uwagę nie tylko na cenę materiału (stal nierdzewna jest ok. 4 razy droższa niż stal węglowa), ale także na całkowity koszt inwestycji, obejmujący również koszty związane z utrzymaniem konstrukcji w założonym okresie użytkowania. Brak konieczności odnawiania zabezpieczeń antykorozyjnych, duża trwałość materiału i długi cykl życia konstrukcji są niewątpliwymi zaletami konstrukcji ze stali nierdzewnej. Czynniki te w połączeniu z dobrymi właściwościami mechanicznymi stali nierdzewnych, łatwością obróbki i montażu elementów, dostępnością zróżnicowanego asortymentu produktów i wyrobów hutniczych oraz rodzajów wykończenia powierzchni sprawiają, że stal nierdzewna jest coraz chętniej stosowana w konstrukcjach budowlanych, zwłaszcza w inwestycjach prestiżowych, będących wizytówką miasta lub regionu, jak np. The Helix Bridge w Singapurze czy Porsche Pavillon w Wolfsburgu.

5. Conclusions

Stainless steels are used in two types of building realizations: cosmetic – where the prime consideration in the choice of material is to maintain the appearance during the life of the product and structural – where steel mechanical properties are the prime consideration [2].

Physical and mechanical properties of stainless steel, important in structural applications, resulting directly from its microstructure and chemical composition. Ferritic stainless steels usually reach higher yield strength than austenitic ones, while austenitic-ferritic steels are characterized by definitely highest yield strength among all types of stainless steel.

Ductility of ferritic and austenitic-ferritic stainless steels is quite similar, austenitic stainless steels have great ductility with elongation about two times larger than for ferritic or austenitic-ferritic steels.

Choosing between carbon and stainless steel investor often pay attention not only to material price (stainless steel is about 4 times more expensive than carbon steel) but also to total investment cost, including also costs of structure maintenance in assumed design life. Lack of necessity of anti-corrosion coatings renewing, high durability of material, long life cycle of a structure are unquestionable advantages of stainless steel structures. These factors in conjunction with good mechanical properties of stainless steel, easiness of machining and joining of elements, availability of various products, diversity of its surface finishing make that stainless steel is more and more willingly used in building structures, especially in prestige investments being city or region signature, such as The Helix Bridge in Singapore or Porsche Pavillon in Wolfsburg.

Literatura • References

- [1] PN-EN 1993-1-1, (2006), *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PKN, Warszawa.
- [2] PN-EN 1993-1-4, (2007), *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-4: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych*, PKN, Warszawa.
- [3] PN-EN 1993-1-10, (2007), *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągłość międzywarstwową*, PKN, Warszawa.
- [4] PN-EN 10088-1, (2007), *Stale odporne na korozję. Część 1: Gatunki stali odpornych na korozję*, PKN, Warszawa.
- [5] PN-EN 10088-2, (2007), *Stale odporne na korozję. Część 2: Warunki techniczne dostawy blach i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia*, PKN, Warszawa.
- [6] PN-EN 10088-3, (2007), *Stale odporne na korozję. Część 3: Warunki techniczne dostawy półwyrobów, prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia*, PKN, Warszawa.
- [7] PN-EN 10088-4, (2010), *Stale odporne na korozję. Część 4: Warunki techniczne dostawy blach grubych, blach cienkich i taśm ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych*, PKN, Warszawa.
- [8] PN-EN 10088-5, (2010), *Stale odporne na korozję. Część 5: Warunki techniczne dostawy prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych*, PKN, Warszawa.
- [9] PN-EN ISO 12944-1, (2001), *Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Część 1: Ogólne wprowadzenie*, PKN, Warszawa.