CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXI, z. 61 (4/14), październik-grudzień 2014, s. 263-282

Izabela TYLEK[1]
Krzysztof KUCHTA[2]

SPECYFIKA CECH FIZYKOMECHANICZNYCH KONSTRUKCYJNYCH STALI NIERDZEWNYCH

Projektowanie elementów konstrukcji budowlanych ze stali nierdzewnych jest objęte normą europejską PN-EN 1993-1-4 [7], rozszerzającą stosowanie wybranych części Eurokodu 3 o stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej, austenitycznej i austenityczno-ferrytycznej. W pracy wskazano zdefiniowane w normie PN-EN 1993-1-4 [7] rodzaje zastosowań stali nierdzewnych w realizacjach budowlanych i specyfikę doboru gatunku stali nierdzewnej, która ma wpływ nie tylko na nośność konstrukcji, ale również na jej trwałość. Podano klasyfikację stali nierdzewnych oraz systemy oznaczania jej gatunków, a także syntetycznie opisano wpływ struktury wewnętrznej stali nierdzewnej na jej właściwości fizyczne, mechaniczne i technologiczne. Różnice między właściwościami fizykomechanicznymi stali nierdzewnych i stali węglowych omówiono, biorąc pod uwagę podstawowe właściwości materiałowe, takie jak moduł Younga czy granica plastyczności, a także przebieg zależności naprężenie-odkształcenie oraz zachowanie się materiału podczas formowania na zimno i w podwyższonych temperaturach. W pracy podano również zakres stosowalności normy europejskiej PN-EN 1993-1-4 [7] do projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych, a także zestawiono parametry wytrzymałościowe wybranych gatunków stali nierdzewnych dopuszczonych do stosowania w budownictwie. Omówiono właściwości antykorozyjne stali nierdzewnej i ich wpływ na trwałość obiektów budowlanych. Zaznaczono, że chociaż poważną wadą stali nierdzewnej ograniczającą jej stosowanie w budownictwie jest wysoka i niestabilna cena materiału, to właściwie zaprojektowana i wykonana konstrukcja z tej stali zazwyczaj nie wymaga dodatkowych zabiegów konserwacyjnych. W porównaniu ze stalą węglową obniża to koszty związane z utrzymaniem konstrukcji i może być czynnikiem decydującym o zastosowaniu tego materiału na elementy nośne konstrukcji budowlanej.

Słowa kluczowe: klasyfikacja stali nierdzewnych, mikrostruktura stali nierdzewnych, właściwości materiałowe stali nierdzewnych, trwałość stali nierdzewnych, PN-EN 1993-1-4

[1] Autor do korespondencji/corresponding author: Izabela Tylek, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 6282372, itylek@pk.edu.pl

[2] Krzysztof Kuchta, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 6282372, kkuchta@pk.edu.pl

1. Wprowadzenie

Stale nierdzewne są stosowane w realizacjach budowlanych dwojakiego rodzaju [7]: estetycznych, gdzie podstawowe znaczenie w wyborze materiału odgrywa wygląd konstrukcji i jego utrzymanie podczas planowego użytkowania, oraz konstrukcyjnych, gdzie zasadniczą rolę odgrywają właściwości mechaniczne stali, a odporność korozyjna zapewnia niezmienność jej parametrów wytrzymałościowych w projektowanym okresie eksploatacji.

Odporność na korozję, która jest podstawową zaletą stali nierdzewnej, istotną w obydwu wymienionych rodzajach realizacji, uzyskuje się poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego stopu [12-16]. Stale tego typu zgodnie z PN-EN 10088 [12-16] powinny zawierać min. 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla, natomiast zawartość pozostałych składników stopowych jest zmienna i zależy od gatunku stali. Większość konstrukcyjnych stali nierdzewnych zawiera ok. 18% chromu i ok. 10% niklu, którego obecność zmniejsza kruchość stali tego rodzaju.

Zawartość chromu jako składnika stopowego umożliwia pasywację powierzchni stali nierdzewnej na skutek utworzenia się cienkiej, nieprzezroczystej warstwy tlenków, która zabezpiecza element przed dalszym postępem korozji. Warstwa ta jest trwała, nieporowata i ściśle przylega do powierzchni elementu, a w przypadku uszkodzenia (np. zarysowania) w zetknięciu z powietrzem lub w obecności utleniaczy wykazuje zdolność do natychmiastowej samoregeneracji. Zwiększanie zawartości chromu w stopie podnosi odporność stali na korozję. Dodatkowe podwyższenie odporności korozyjnej można uzyskać, wprowadzając do stopu nikiel i molibden.

Mimo relatywnie długiego okresu stosowania stali nierdzewnych w budownictwie i wielu niejednokrotnie spektakularnych realizacji obiektów budowlanych z ich zastosowaniem stal nierdzewna zaczęła być powszechnie postrzegana jako konstrukcyjny materiał budowlany dopiero w latach 80. ubiegłego wieku. W obecnej edycji europejskich norm budowlanych reguły i zasady projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych zawarto w normie PN-EN 1993-1-4: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-4: Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych [7], która rozszerza o stale nierdzewne austenityczne, austenityczno-ferrytyczne lub ferrytyczne zakres stosowania norm przedmiotowych: PN-EN 1993-1-1: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Cześć 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków [4], PN-EN 1993-1-3: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno [6], PN-EN 1993-1-5: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice [8] i PN-EN 1993-1-8: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów [9].

Rys. 1. The Porsche Pavillon (2004) – widok ogólny i konstrukcja przewieszenia typu monocoque; obrys rzutu przewieszenia 25 x 30 m; elementy konstrukcyjne i panele obudowy wykonano ze stali nierdzewnej gatunków 1.4301, 1.4571; zużycie stali nierdzewnej 425 t; lokalizacja Wolfsburg, Niemcy [19]

Fig. 1. The Porsche Pavillon (2004) – general view and structure of cantilever monocoque type; dimensions of cantilever contour projection: 25 m x 30 m; structural elements and cover panels made of stainless steel grades 1.4301, 1.4571; consumption of stainless steel 425 t; localization: Wolfsburg, Germany [19]

Rys. 2. The Helix Bridge (2009) – długość 280 m, przęsło 65 m, konstrukcja główna ze stali nierdzewnej, zużycie stali nierdzewnej 600 t; lokalizacja Marina Bay, Singapur, autor zdjęcia Claudio Piombetti, http://www.claudio-piombetti.com/blog/1531/The-Helix-Bridge-in-Singapore

Fig. 2. The Helix Bridge (2009) – length 280 m, span 65 m, main structure made of stainless steel, consumption of stainless steel 600 t; localization Marina Bay, Singapore; author of photography Claudio Piombetti, http://www.claudiopiombetti.com/blog/1531/The-Helix-Bridge-in-Singapore

Specyficzne fizykomechaniczne właściwości stali nierdzewnych, które szerzej zostały opisane w pracach [24, 25], wpływają na bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych i powinny zastać uwzględnione przy formułowaniu i sprawdzaniu warunków stanów granicznych. Autorzy aktualnej normy do projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnej [7] zdecydowali się oprzeć algorytmy wymiarowania tego typu konstrukcji na powszechnie znanych algorytmach dotyczących stali węglowej. Algorytmy te zostały w pewnym zakresie zmodyfikowane, tak aby uwzględnić przynajmniej podstawowe różnice w zachowaniu tych dwóch rodzajów stali zaobserwowane podczas badań. Takie podejście znacząco uprościło procedury wymiarowania konstrukcji ze stali nierdzewnej, prowadząc do bezpiecznego oszacowania nośności, ale jednocześnie nie pozwoliło na pełne wykorzystanie korzystnych właściwości fizycznych i mechanicznych tego rodzaju stali [23].

Brak konieczności odnawiania zabezpieczeń antykorozyjnych, estetyka i duża trwałość materiału oraz długi cykl życia konstrukcji są niewątpliwymi zaletami konstrukcji ze stali nierdzewnej. Czynniki te w połączeniu z dobrymi właściwościami mechanicznymi, łatwością obróbki i montażu elementów, dostępnością zróżnicowanego asortymentu produktów i wyrobów hutniczych oraz rodzajów wykończenia powierzchni sprawiają, że stal nierdzewna jest coraz częściej stosowana w konstrukcjach budowlanych (por. np. [2]), szczególnie

w inwestycjach prestiżowych, będących wizytówką miasta lub regionu, jak np. Porsche Pavillon w Wolfsburgu (rys. 1.) czy The Helix Bridge w Singapurze (rys. 2.).

2. Klasyfikacja stali nierdzewnych

Zgodnie z PN-EN 10088-1 do 5 [12-16] wyróżnia się pięć rodzajów struktur metalograficznych stali nierdzewnych: ferrytyczne, martenzytyczne, umacniane wydzieleniowo, austenityczne i austenityczno-ferrytyczne. Elementy nośne konstrukcji budowlanych zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1993-1-4 [7] można projektować ze stali nierdzewnych o jednej z trzech struktur: ferrytycznej, austenitycznej albo 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 i procentowa zawartość pierwiastków stopowych, które mają bezpośredni wpływ na strukturę oraz związane z nią właściwości fizykomechaniczne i technologiczne stali nierdzewnych.

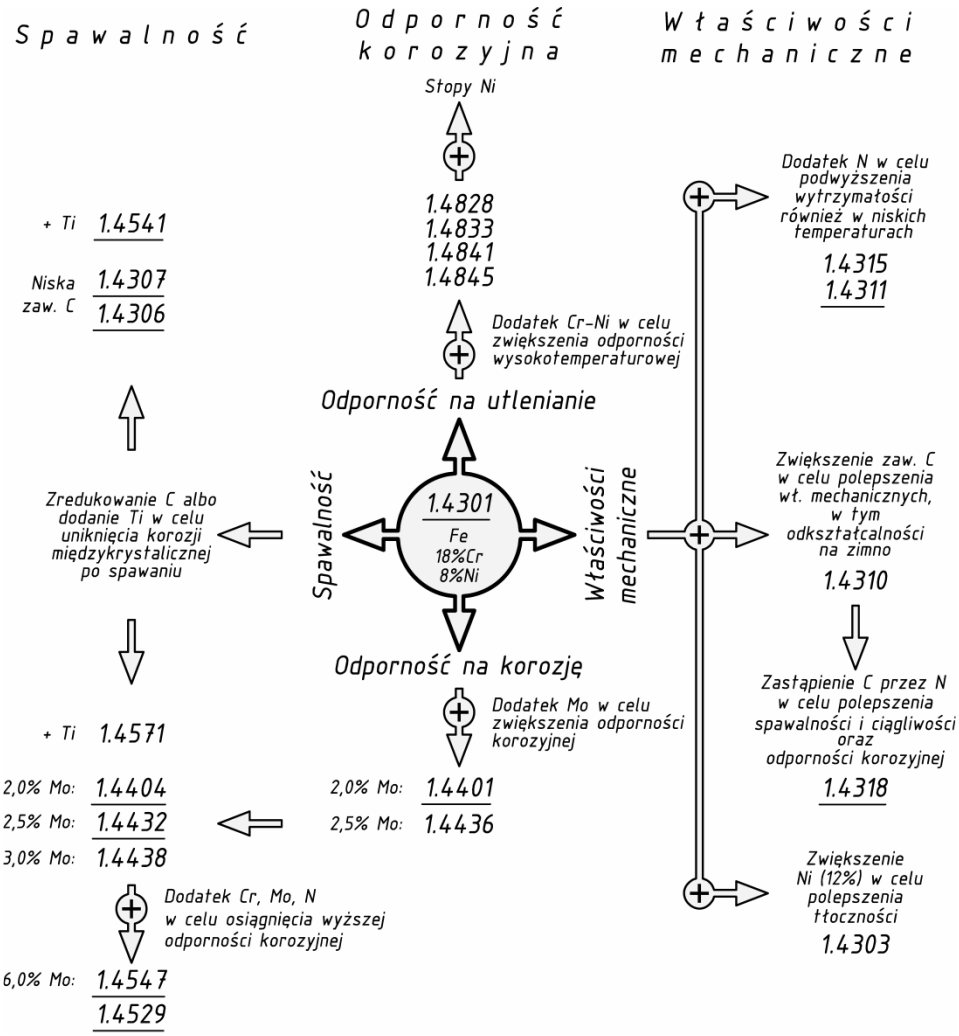
Europejski system oznaczania stali nierdzewnych umożliwia stosowanie dwóch rodzajów opisu: systemu znakowego (alfanumerycznego) oraz systemu cyfrowego. Ze względu na zwięzłość zapisu powszechniejszy w stosowaniu jest system cyfrowy [11], zgodnie z którym oznaczenie gatunku stali nierdzewnej składa się z trzech członów (*1.aabb*). Pierwszy człon (*1*) oznacza materiał (stal), drugi człon (*aa*) oznacza grupę stali, a trzeci człon (*bb*) wskazuje gatunek stali w obrębie rozpatrywanej grupy. W tablicy 2.1 normy PN-EN 1993-1-4 [7] wyszczególniono następujące grupy konstrukcyjnych stali nierdzewnych:

- 1.40*bb* – gatunki zawierające poniżej 2,5% niklu bez dodatku molibdenu, niobu i tytanu,
- 1.43*bb* – gatunki zawierające co najmniej 2,5% niklu bez dodatku molibdenu, niobu i tytanu,
- 1.44*bb* – gatunki zawierające co najmniej 2,5% niklu z dodatkiem molibdenu, ale bez dodatku niobu i tytanu,
- 1.45*bb* – gatunki ze specjalnymi dodatkami stopowymi.

3. Wpływ struktury metalograficznej na fizykomechaniczne właściwości stali nierdzewnych

Głównym składnikiem stopowym stali ferrytycznych jest chrom, jego zawartość dla gatunków wymienionych w tablicy 2.1 PN-EN 1993-1-4 [7] waha się w granicach 10,5-18,0%. Dzięki dużej zawartości chromu i małej zawartości węgla (max 0,08%) struktura tych stali pozostaje niezmienna w zakresie temperatur eksploatacyjnych. Niska zawartość węgla powoduje również, że stale ferrytyczne nie wykazują znacznego utwardzenia przy oziębianiu [12]. O odporności korozyjnej nierdzewnych stali ferrytycznych decyduje chrom niezwiązany z wę-

glem [12]. Nierdzewne stale ferrytyczne gatunku 1.4003 i 1.4512 zawierające 10,5-12,5% chromu są zaliczane do stali o podwyższonej odporności na korozję. W niekorzystnych warunkach atmosferycznych lub w mediach wodnych ich odporność na korozję jest ograniczona [21]. Struktura ferrytyczna fazy α oraz powstająca przy wysokiej temperaturze struktura ferrytyczna fazy δ są magnetyczne i charakteryzują się dobrą ciągliwością.



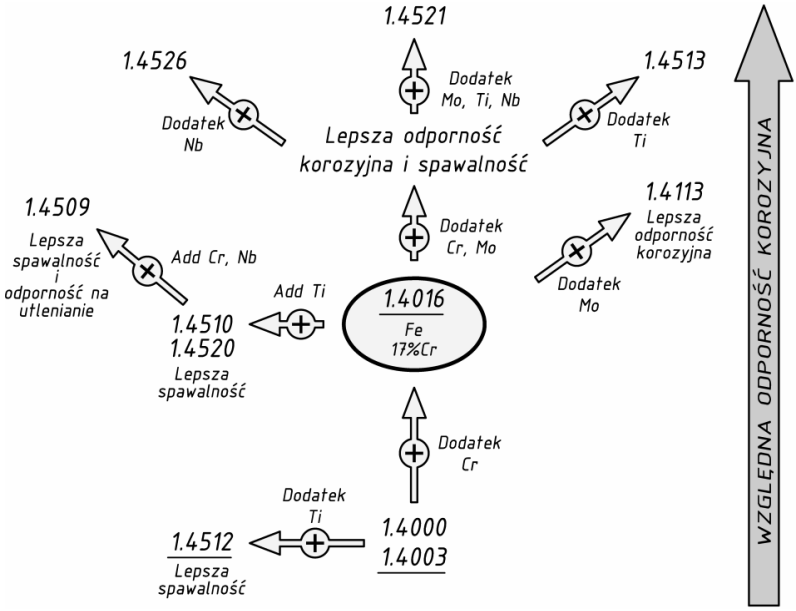
Rys. 3. Wpływ składników stopowych na właściwości austenitycznych stali nierdzewnych

Fig. 3. Influence of alloying components on properties of austenitic stainless steels

Głównymi składnikami stopowymi stali austenitycznych są chrom (min 16%) i nikiel (min 6%). Strukturę tych stali stanowi austenit fazy γ z możliwą obecnością ferrytu fazy δ pozostałego z wysokich temperatur. Austenityczna faza γ jest niemagnetyczna [12]. Ze względu na zwiększoną zawartość chromu stale austenityczne są bardziej odporne na korozję niż stale ferrytyczne. Natomiast duża zawartość niklu sprawia, że struktura austenityczna jest stabilna podczas zmian temperatury stopu.

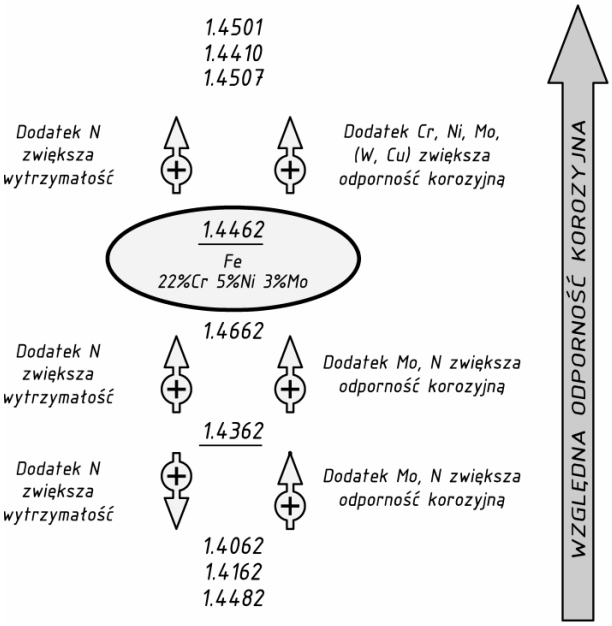
Cechą charakterystyczną stali austenityczno-ferrytycznych (zwanych stalami duplex) jest występowanie w temperaturze pokojowej struktury dwufazowej. Struktura ta składa się z austenitu i ferrytu, przy czym zgodnie z normą [12] zawartość austenitu mieści się w przedziale 40-60%. Zawartość chromu w stalach o strukturze austenityczno-ferrytycznej jest duża (21-24% dla gatunków wymienionych w tablicy 2.1 [7]), a niklu – mała (3,5-6,5% dla gatunków wymienionych w tablicy 2.1 [7]). Stale austenityczno-ferrytyczne są magnetyczne i charakteryzują się dobrą odpornością korozyjną.

Biorąc pod uwagę poszczególne struktury najczęściej stosowanymi gatunkami stali nierdzewnych są: 1.4016 (stal ferrytyczna), 1.4301 (stal austenityczna), 1.4462 (stal austenityczno-ferrytyczna) [22]. Sposób modyfikacji właściwości stali nierdzewnej poprzez wprowadzenie określonych składników stopowych przedstawiono schematycznie na rys. 3-5. dla wybranych gatunków konstrukcyjnych stali nierdzewnych [22].



Rys. 4. Wpływ składników stopowych na właściwości ferrytycznych stali nierdzewnych

Fig. 4. Influence of alloying components on properties of ferritic stainless steels



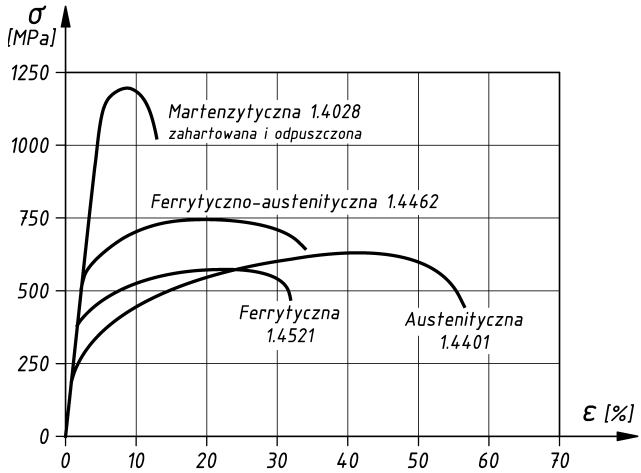
Rys. 5. Wpływ składników stopowych na właściwości nierdzewnych stali duplex

Fig. 5. Influence of alloying components on properties of duplex stainless steels

4. Właściwości materiałowe stali nierdzewnych

Różnice pomiędzy właściwościami fizykomechanicznymi stali węglowych i stali nierdzewnych obejmują nie tylko podstawowe właściwości materiałowe, takie jak moduł Younga czy granica plastyczności, lecz dotyczą także przebiegu zależności naprężenie-odkształcenie (σ-ε), zachowania się materiału podczas formowania na zimno oraz w podwyższonych temperaturach, co ma istotny wpływ na formułowanie warunków stanów granicznych nośności i użytkowalności oraz opis zachowania się konstrukcji w pożarze.

Cechą charakterystyczną stali nierdzewnych jest to, że już w fazie sprężystej zależność naprężenie-odkształcenie staje się nieliniowa, nie ma wyraźnej granicy plastyczności i charakterystycznej dla stali węglowych półki plastycznej (rys. 6.) [1, 3]. Wykres σ-ε nie wykazuje ponadto symetrii przy zmianie znaku siły obciążającej próbkę. W przypadku rozciągania może on być bardziej krzywoliniowy niż podczas ściskania. Stopień nieliniowości krzywej σ-ε jest charakteryzowany współczynnikiem n, który ze względu na różnorodność struktur i składu chemicznego stopu oraz anizotropię cech mechanicznych stali nierdzewnej przyjmuje zróżnicowane wartości w zależności od gatunku stali i kierunku walcowania (por. tablica 4.1 PN-EN 1993-1-4 [7]).



Rys. 6. Charakterystyki σ-ε wybranych gatunków stali nierdzewnych o różnych strukturach metalograficznych

Fig. 6. Stress-strain relationship selected grades of stainless steels with different microstructures

Stale nierdzewne charakteryzują się dobrą ciągliwością, pozwalającą na osiągnięcie dużych odkształceń plastycznych w przedziale naprężeń pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie (rys. 6.). Można przyjąć, że stal gatunków wymienionych w tablicy 2.1 PN-EN 1993-1-4 [7] spełnia wymagania ciągliwości stawiane konstrukcyjnym stalom budowlanym zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [4]. Oznacza to, że specyfikowana minimalna wytrzymałość na rozciąganie f_u jest o co najmniej 10% większa od specyfikowanej minimalnej granicy plastyczności f_y, odkształcenie przy zniszczeniu ε_u jest co najmniej 15 razy większe od odkształcenia przy uplastycznieniu ε_y, a wydłużenie przy zniszczeniu wynosi co najmniej 15%.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stal nierdzewna zarówno zimno-, jak i gorącowalcowana wykazuje większą wytrzymałość w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania niż w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania [20]. W przypadku taśm i blach do zastosowań konstrukcyjnych wykonanych z ferrytycznych stali nierdzewnych różnica wartości umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ ze względu na kierunek wycięcia próbki dla gatunków stali nierdzewnej wyszczególnionych w tablicy 2.1 normy PN-EN 1993-1-4 waha się w granicach 4,8-14% [13, 15]. Dla tych samych wyrobów wykonanych z konstrukcyjnych stali austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych w normach PN-EN 10088-2 [13] i PN-EN 10088-4 [15] wartość $R_{p0,2}$ podano jedynie dla próbek poprzecznych. Zaznaczono jednocześnie, że w przypadku taśmy walcowanej o szerokości poniżej 300 mm wartość umownej granicy plastyczności próbek pobranych wzdłużnie zmniejsza się o 15 MPa. Różnice w wartości $R_{p0,2}$ związane z kierunkiem wycinania próbek w przypadku stali

gatunków austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych wymienionych w tablicy 2.1 normy PN-EN 1993-1-4 [7] zawierają się w przedziałach 4,5-8% dla stali austenitycznych oraz 3,1-3,9% dla stali austenityczno-ferrytycznych.

W projektowaniu konstrukcji ze stali nierdzewnych zgodnie z zaleceniami PN-EN 1993-1-4 [7] wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u przyjmuje się równe wartościom nominalnym podanym w tablicy 2.1 tejże normy niezależnie od kierunku walcowania. Wartości granicy plastyczności f_y podane w tablicy 2.1 [7] odpowiadają wartościom umownej granicy plastyczności przy odkształceniu 0,2% według PN-EN 10088-2 [13] i PN-EN 10088-4 [15] (taśmy i blachy) oraz PN-EN 10088-3 [14] i PN-EN 10088-5 [16] (kształtowniki), 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 w przypadku różnic w wartościach parametrów wytrzymałościowych elementów ogólnego przeznaczenia i elementów do zastosowań konstrukcyjnych wykonanych z tego samego gatunku stali (np. taśmy walcowane na zimno ze stali austenityczno-ferrytycznych) jako wartości nominalne określone w tablicy 2.1 PN-EN 1993-1-4 [7] przyjęto parametry mniej korzystne, czyli dla elementów ogólnego przeznaczenia (por. PN-EN 10088-2 [13] i PN-EN 10088-4 [15]). Parametry wytrzymałościowe wybranych gatunków i struktur stali nierdzewnych dopuszczonych do stosowania w budownictwie zostały zestawione w tab. 1. [7].

Postanowienia normy PN-EN 1993-1-4 [7] obejmują stale nierdzewne o nominalnej granicy plastyczności f_y nieprzekraczającej 480 MPa. W Załączniku B tej normy podano dodatkowe reguły stosowania stali nierdzewnych umocnionych przez zgniot w wyniku walcowania na zimno lub innego procesu wytwarzania elementów konstrukcyjnych albo obu procesów łącznie, których granica plastyczności f_y może przekraczać 480 MPa. Projektując elementy nośne ze stali nierdzewnych dostarczanych w stanie umocnionym zgodnie z PN-EN 10088 [13-16] w obliczeniach można przyjmować podwyższone wartości nominalnej granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u, pod warunkiem że właściwości stali będą utrzymane podczas wytwarzania elementów, wykonywania konstrukcji oraz jej eksploatacji w całym projektowanym okresie użytkowania. Nie zaleca się spawania ani obróbki cieplnej wyrobów ze stali tego typu, chyba że na podstawie badań przeprowadzonych zgodnie z rozdziałem 7. normy PN-EN 1993-1-4 [7] zostanie wykazane, że nie dochodzi do nadmiernej redukcji właściwości mechanicznych stali poniżej przyjętych wartości. Zgodnie z regułami podanymi w normie [7] w projektowaniu konstrukcji budowlanych można wykorzystywać elementy ze stali gatunków co najwyżej C700 (gwarantowana minimalna wytrzymałość na rozciąganie w stanie umocnionym) i CP350 (gwarantowana minimalna umowna granica plastyczności w stanie umocnionym). W przypadku wyższych gatunków stali nierdzewnej w stanie po obróbce plastycznej na zimno projektowanie przeprowadza się na podstawie badań zgodnie

z rozdziałem 7. normy PN-EN 1993-1-4 [7], chyba że konstrukcja nie jest narażona na utratę stateczności i o jej nośności decyduje nośność przekroju klasy nie wyższej niż 3., którą wyznaczono zgodnie z odpowiednimi procedurami podanymi w normie [7]. Umocnienie stali w procesie wytwarzania elementów konstrukcji może być uwzględnione w obliczeniach tylko wtedy, gdy efekt umocnienia został potwierdzony badaniami przeprowadzonymi w skali natural-

Tabela 1. Nominalne wartości granicy plastyczności f_y oraz wytrzymałości na rozciąganie f_u dla konstrukcyjnych stali nierdzewnych[1)]

Table 1. Nominal values of the yield strength f_y and the ultimate tensile strength f_u for structural stainless steels[1)]

Rodzaj stali nie-rdzewnej	**Gatunek**	**Wyroby hutnicze**							
		taśmy walcowane na zimno		**taśmy walcowane na gorąco**		**blachy walcowane na gorąco**		**kształtowniki i pręty**	
		grubość nominalna *t*							
		$t \leq 6$ mm		**$t \leq 12$ mm**		**$t \leq 75$ mm**		**$t \leq 250$ mm**	
		f_y [N/mm^2]	**f_u [N/mm^2]**	**f_y [N/mm^2]**	**f_u [N/mm^2]**	**f_y [N/mm^2]**	**f_u [N/mm^2]**	**f_y [N/mm^2]**	**f_u [N/mm^2]**
Ferrytyczna	1.4003	280	450	280	450	250[3)]	450[3)]	260[4)]	450[4)]
	1.4016	260	450	240	450	240[3)]	430[3)]	240[4)]	400[4)]
	1.4512	210	380	210	380	-	-	-	-
Austenityczna	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	460
	1.4307							175	450
	1.4541							190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520		
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404								
	1.4539							230	530
	1.4571		540		540			200	500
	1.4432	240	550	220	550	220	520		
	1.4435								
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580
	1.4439	290		270		270			
	1.4529	300	650	300	650	300	650		
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
Austenityczno-ferrytyczna	1.4362	420	600	400	600	400	630	400[2)]	600[2)]
	1.4462	480	660	460	660	460	640	450	650

[1)] nominalne wartości f_y i f_u podane w tabeli można przyjmować do obliczeń niezależnie od efektów anizotropii lub wzmocnienia materiału

[2)] $t \leq 160$ mm

[3)] $t \leq 25$ mm

[4)] $t \leq 100$ mm

nej zgodnie z rozdziałem 7. normy PN-EN 1993-1-4 [7]. Podczas wspomaganego badaniami projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych należy zadbać o to, aby elementy przeznaczone do badań były wyprodukowane w sposób analogiczny do wyrobu gotowego, tak aby można było uzyskać ten sam poziom wzmocnienia materiału. Ze względu na anizotropię stali nierdzewnych próbki do badań powinny być przygotowane zgodnie z docelowym ukierunkowaniem blach lub taśm w gotowej konstrukcji (poprzecznym lub podłużnym względem kierunku walcowania). Jeżeli docelowe ukierunkowanie jest nieznane lub niepewne, w badaniach należy uwzględnić oba warianty, a następnie przyjąć wyniki mniej korzystne [7].

Modułu sprężystości E stali nierdzewnych zależy od jej struktury, w 20ºC wartość ta jest stała dla stali ferrytycznych i austenityczno-ferrytycznych, wynosi (odpowiednio) 220 i 200 GPa. Moduł sprężystości stali austenitycznych jest dodatkowo uzależniony od gatunku stali i wynosi 195 GPa albo 200 GPa [7]. Wartości te modułu Younga E należy przyjmować w analizie globalnej służącej wymiarowaniu elementów, natomiast przy wyznaczaniu ugięć elementów należy uwzględnić wpływ nieliniowej zależności naprężenie-odkształcenie poprzez wprowadzenie do obliczeń siecznego modułu sprężystości $E_{s,ser}$, wyznaczonego na podstawie naprężeń stanu granicznego użytkowalności przy dodatkowym uwzględnieniu kierunku walcowania [7]. Wartość siecznego modułu sprężystości $E_{s,ser}$ można wyznaczyć jako średnią z modułów siecznych $E_{s,1}$ i $E_{s,2}$ odpowiadających naprężeniom w pasie rozciąganym σ_1 i ściskanym σ_2 [7]:

$$E_{s,ser} = \frac{E_{s,1} + E_{s,2}}{2} \tag{1}$$

Wartości modułów siecznych $E_{s,1}$ i $E_{s,2}$ można wyznaczyć według wzoru:

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0{,}002 \dfrac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\dfrac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \tag{2}$$

gdzie: i = 1 lub 2,

$\sigma_{i,Ed,ser}$ – miarodajne naprężenie w stanie użytkowalności,

n – wykładnik opisujący nieliniowość zależności σ-ε zależny od gatunku stali i kierunku walcowania, wyspecyfikowany w tablicy 4.1 normy PN-EN 1993-1-4 [7] lub szacowany na podstawie pomiarów zgodnie z Załącznikiem C tejże normy.

Norma PN-EN 1993-1-4 [7] dopuszcza uproszczenie obliczeń dotyczących wyznaczania ugięć elementów poprzez pominięcie zmienności siecznego modułu Younga $E_{s,ser}$ na długości elementu. W takim przypadku na całej długości

elementu należy przyjąć wartość minimalną $E_{s,ser}$ odpowiadającą maksymalnej wartości naprężeń miarodajnych $\sigma_{1,Ed,ser}$ lub $\sigma_{2,Ed,ser}$.

Do wyznaczania ugięć można wykorzystywać również metodę elementów skończonych zgodnie z regułami podanymi w PN-EN 1993-1-5 [8], przy czym nieliniowe zachowanie materiału uwzględnia się podczas modelowania jego charakterystyki na podstawie zaleceń Załącznika C normy PN-EN 1993-1-4 [7]. Zależnie od wymaganej dokładności obliczeń i zakresu przewidywanych odkształceń wspomniany załącznik wyodrębnia trzy podejścia w modelowaniu charakterystyki materiału:

1) krzywą naprężenie-odkształcenie z umocnieniem

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E} + 0.002\left(\dfrac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{dla } \sigma \le f_y \\ 0.002 + \dfrac{f_y}{E} + \dfrac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u\left(\dfrac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m & \text{dla } f_y < \sigma \le f_u \end{cases} \tag{3}$$

gdzie: n – współczynnik określony wzorem $n = \ln(20)/\ln(f_y / R_{p0,01})$, wartości n można również przyjmować z tablicy 4.1 [7] lub wyznaczać na podstawie pomiarów,

$R_{p0,01}$ – umowna granica plastyczności przy odkształceniu 0,01%,

E_y – moduł styczny krzywej naprężenie-odkształcenie odpowiadający granicy plastyczności określony wzorem $E_y = E/(1+0{,}002n\, E/f_y)$,

ε_u – odkształcenie graniczne odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie, które w przybliżeniu wynosi $\varepsilon_u = 1 - f_y/f_u$, lecz $\varepsilon_u \le A$, gdzie A – wydłużenie po zerwaniu według PN-EN 10088 [13-16],

m – współczynnik, który można wyznaczać według wzoru $m = 1+3{,}5 f_y/f_u$,

2) krzywą naprężenie-odkształcenie ustaloną jak w przypadku 1., lecz na podstawie cech pomierzonych,
3) rzeczywistą krzywą naprężenie-odkształcenie ustaloną na podstawie parametrów i zależności inżynierskich

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{true} &= \sigma(1+\varepsilon) \\ \sigma_{true} &= ln(1+\varepsilon) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

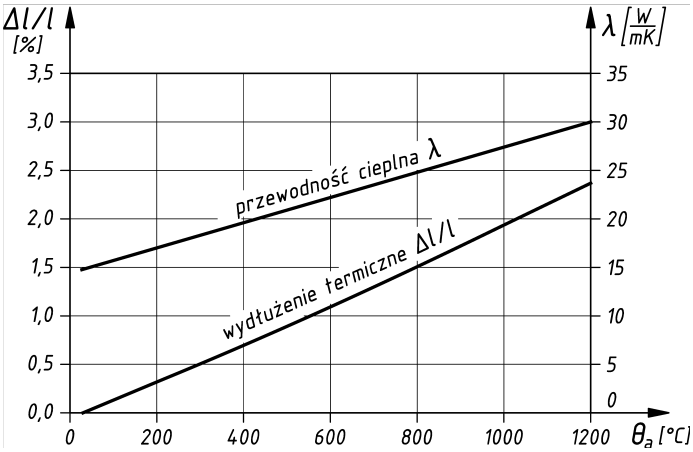
Nieliniową zależność naprężenie-odkształcenie podaną w Załączniku C PN-EN 1993-1-4 [7] można również wykorzystać do alternatywnego opisu zachowania materiałów po obróbce cieplnej.

Moduł sprężystości przy ścinaniu (moduł Kirchhoffa) G stali nierdzewnych wyznacza się zgodnie z PN-EN 1993-1-4 [7] w zależności od wartości modułu Younga ze wzoru $G = E/[2(1 + \nu)]$ (gdzie ν – współczynnik Poissona) w stanie sprężystym równy 0,3.

Udarność stali nierdzewnych jest zróżnicowana i zmienia się wraz ze strukturą stali i jej temperaturą, przy czym największe różnice w zachowaniu stali o różnych strukturach dotyczą niskich wartości temperatury. Cechą charakterystyczną stali ferrytycznych i ferrytyczno-austenitycznych jest tzw. próg kruchości, czyli temperatura, w której zachowanie stali zmienia się od ciągliwego do kruchego. Temperatura ta wynosi zazwyczaj od ok. –60ºC do 0ºC, przy czym dla stali ferrytycznych są to wartości z górnej części zakresu. W stalach o strukturze austenitycznej nie obserwuje się tego typu zachowania. Próg kruchości stali ferrytycznych wzrasta wraz ze wzrostem zawartości węgla i azotu, co oznacza, że stal staje się bardziej krucha przy coraz wyższych temperaturach. Ponadto udarność stali ferrytycznych jest silnie zależna od wielkości ziaren i czystości metalurgicznej stali. Wzrost zawartości ferrytu w stalach austenityczno-ferrytycznych powoduje podwyższenie progu kruchości. Temperatura przejścia w stan kruchy tego rodzaju stali leży na ogół poniżej –50ºC. Stale austenityczne wykazują doskonałą udarność w całym zakresie temperatur i ze względu na stałość zachowania pod obciążeniem dynamicznym są chętnie stosowane w niskich temperaturach [3], np. jako materiał na zbiorniki i instalacje skroplonego gazu ziemnego (LNG).

Można przyjąć, że nierdzewne stale austenityczne i austenityczno-ferrytyczne objęte normą PN-EN 1993-1-4 [7] wykazują odpowiednią udarność i nie są narażone na kruche pękanie w temperaturach eksploatacyjnych do –40ºC. Norma [7] dopuszcza stosowanie stali austenitycznych w jeszcze niższych temperaturach, pod warunkiem każdorazowego określenia stosownych wymagań. W przypadku stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej doboru stali ze względu na kruche pękanie należy dokonać na podstawie zaleceń podanych w PN-EN 1993-1-10 [10].

Współczynnik rozszerzalności cieplnej i przewodność cieplna to właściwości fizyczne, które przyjmują zróżnicowane wartości w zależności od struktury stali nierdzewnej. Wartości współczynnika rozszerzalności termicznej w temperaturach pomiędzy 20ºC i 100ºC dla poszczególnych rodzajów stali nierdzewnej kształtują się następująco [12]: $10{,}0\text{-}10{,}5\cdot10^{-6}$/K dla stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej, $13{,}0\cdot10^{-6}$/K dla stali duplex i $15{,}8\text{-}16{,}5\cdot10^{-6}$/K dla stali austenitycznej (podane wartości dotyczą gatunków ujętych w tablicy 2.1 PN-EN 1993-1-4 [7]). Stosunkowo duża rozszerzalność cieplna stali austenitycznych jest przyczyną powstawania znacznych naprężeń i odkształceń termicznych, np. podczas procesu spawania. Właściwości termiczne stali nierdzewnych można wyznaczać na podstawie Załącznika C normy PN-EN 1993-1-2 [5]. Na rysunku 7. pokazano jak wraz z temperaturą zmieniają się względne wydłużenie termiczne i przewodność cieplna stali nierdzewnych [5].



Rys. 7. Zależność wydłużenia termicznego i przewodności cieplnej stali nierdzewnych od temperatury

Fig. 7. Thermal elongation nad thermal conductivity of stainless steel as a function of temperature

Przewodność cieplna stali nierdzewnych maleje wraz ze wzrostem zawartości pierwiastków stopowych. Najniższą przewodność cieplną przy temperaturze 20ºC mają stale austenityczne 12-15 W/m·K, wyższą stale austenityczno-ferrytyczne 15 W/m·K, najwyższą zaś stale ferrytyczne 25 W/m·K [12]. Podane wartości dotyczą gatunków ujętych w tablicy 2.1 EN 1993-1-4 [7].

Gęstość stali nierdzewnych nie jest stała, lecz przyjmuje zmienną wartość z zakresu od 7,5 do 8,1 kg/dm^3 w zależności od struktury wewnętrznej i gatunku stali [12]. Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej charakteryzują się gęstością w zakresie 7,5-7,7 kg/dm^3, natomiast stale austenityczne i austenityczno-ferrytyczne 7,7-8,1 kg/dm^3 [12]. Gęstość stali nierdzewnej zazwyczaj wzrasta wraz ze wzrostem zawartości pierwiastków stopowych, szczególnie tych o dużej (w porównaniu z żelazem) liczbie atomowej, jak np. molibden [3].

5. Trwałość stali nierdzewnych

Stale nierdzewne wykazują zdecydowanie dłuższą trwałość niż stale węglowe, co jest związane przede wszystkim z ich większą odpornością korozyjną. Zabezpieczenie korozyjne stali nierdzewnych powoduje tworzenie się na ich powierzchni cienkiej (grubości ok. 5 x 10^{-6} mm) warstewki tlenków, tzw. warstwy pasywnej, która uniemożliwia stali wchodzenie w reakcję z atmosferą. Korozja stali nierdzewnych ma miejsce w przypadku, gdy warstwa pasywna ulega uszkodzeniu i nie może się zregenerować, np. ze względu na brak dostępu tlenu.

Zachowanie się warstwy pasywnej jest zależne od składu chemicznego stopu, sposobu obróbki jego powierzchni i agresywności korozyjnej środowiska. W przeciwieństwie do stali węglowych, które do pasywacji powierzchniowej

wymagają dodatkowych zabiegów, takich jak np. oksydowanie, pasywacja powierzchni stali nierdzewnych następuje samoistnie dzięki odpowiedniej zawartości chromu w stopie. Najważniejszymi składnikami stopowymi zwiększającymi odporność korozyjną są (oprócz chromu) nikiel i molibden. Kształtowanie odporności korozyjnej stali nierdzewnych wykonuje się zawsze w odniesieniu do agresywnych czynników środowiska, wprowadzając odpowiednie dodatki stopowe o metalurgicznie zidentyfikowanych właściwościach, jak np. miedź, która zwiększa odporność korozyjną w obecności kwasu siarkowego.

Odporność korozyjna stali nierdzewnej jest pochodną składu chemicznego stopu, w związku z czym różne gatunki stali mogą zachowywać się odmiennie w tym samym środowisku. Istotną kwestią jest zatem odpowiedni dobór gatunku stali nierdzewnej do rodzaju agresywności środowiska. Wybór gatunku stali nierdzewnej ma wpływ nie tylko na trwałość konstrukcji, ale również na jej nośność. W związku z tym ochronę przed wpływami środowiska i wymiarowanie konstrukcji ze stali nierdzewnych należy rozpatrywać łącznie.

Wybór gatunku stali nierdzewnej optymalnego dla danej realizacji ze względu na wymaganą odporność korozyjną powinien być poprzedzony m.in. analizą przewidywanych wpływów środowiskowych oraz wpływu technologii wytwarzania i wykończenia powierzchni na zachowanie się poszczególnych stopów. W analizie tej należy rozważyć ryzyko wystąpienia w projektowanym okresie użytkowania: pękania wskutek korozji naprężeniowej, korozji szczelinowej, galwanicznej i punktowej, przebarwień powierzchni oraz korozyjnej redukcji grubości elementów [7]. Mniejsza niż założona trwałość konstrukcji ze stali nierdzewnej jest zazwyczaj spowodowana niewłaściwym doborem gatunku stali do rodzaju środowiska korozyjnego, niewłaściwym sposobem obróbki technologicznej lub niewłaściwie przyjętymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi zwiększającymi ryzyko korozji (por. PN-EN 1993-1-4 p.A.5 [7]). Zaleca się [7], aby ocenę przydatności określonego gatunku stali nierdzewnej przeprowadzać, odwołując się do podobnych zastosowań i środowisk. W przypadku środowisk atmosferycznych wytyczne doboru gatunku stali nierdzewnej ze względu na korozję podano w tablicy A.1 normy PN-EN 1993-1-4 [7]. W przypadku zastosowań specjalistycznych, gdy stal nierdzewna jest narażona na kontakt z chemikaliami, norma [7] zaleca zasięgnięcie opinii eksperta.

Konstrukcje wykonane ze stali nierdzewnej o prawidłowo dobranym gatunku znajdujące się w środowiskach lekko i umiarkowanie agresywnych korozyjnie po standardowych 50. latach eksploatacji mogą wymagać jedynie niewielkich zabiegów konserwacyjnych i to tylko ze względów estetycznych. Odnosząc ten okres do trwałości malarskich powłok antykorozyjnych na powierzchniach konstrukcji ze stali węglowych, można zauważyć, że najwyższa trwałość zabezpieczeń malarskich, tj. trwałość wysoka (*H*) rozumiana jako czas do pierwszej większej renowacji w sensie klasyfikacji normy PN-EN ISO 12944-1 [17], wynosi przynajmniej 15 lat.

6. Podsumowanie

Fizykomechaniczne właściwości stali nierdzewnej istotne w zastosowaniach konstrukcyjnych są bezpośrednio związane z jej strukturą wewnętrzną i składem chemicznym. Stale 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 (nawet ponaddwukrotnie większą niż stale austenityczne). Wydłużenie przy zerwaniu stali ferrytycznych i austenityczno-ferrytycznych jest podobne – 18-25% w przypadku stali ferrytycznych oraz 20-25% w przypadku stali austenityczno-ferrytycznych (podane wartości dotyczą gatunków konstrukcyjnych wymienionych w tablicy 2.1 normy [7]). Znakomitą ciągliwość w porównaniu ze stalą węglową mają stale austenityczne, dla których wydłużenie po zerwaniu jest około dwa razy większe niż stali ferrytycznych czy stali austenityczno-ferrytycznych i zazwyczaj zawiera się w przedziale 35-45% (wartości dla gatunków konstrukcyjnych wyszczególnionych w tablicy 2.1 [7]).

Stale o strukturze ferrytycznej ze względu na najmniejszą zawartość drogiego niklu są najtańszym rodzajem stali nierdzewnych. Ich wadą jest utrudniona spawalność niektórych gatunków (np. 1.4016), a także zmniejszona ciągliwość w okolicach spoiny i skłonność do rozrostu ziaren w strefie wpływu ciepła. Ferrytyczne stale nierdzewne są często wykorzystywane w realizacjach, w których istotne są czynniki estetyczne.

Jedną z zalet stali nierdzewnych o strukturze austenitycznej jest ich odporność na kruche pękanie w niskich temperaturach. Ze względu na dobre właściwości plastyczne i mechaniczne, dobrą odporność na korozję oraz spawalność stopy te są najczęściej stosowanymi gatunkami stali nierdzewnych.

Dwufazowa struktura wewnętrzna nierdzewnych stali austenityczno-ferrytycznych powoduje, że stale te łączą cechy stali ferrytycznych i austenitycznych. Stale o strukturze austenityczno-ferrytycznej powinny być stosowane w zakresie temperatur eksploatacyjnych od ok. –50°C do +300°C, ponieważ poza tym zakresem udarność tych stali ulega redukcji. Spawalność stali tego typu jest dobra, a jeżeli podczas spawania kontrolowana jest jego prędkość i dostarczane ciepło, to stale duplex zachowują swoją doskonałą odporność korozyjną również po spawaniu. Odkształcenia spawalnicze elementów ze stali austenityczno-ferrytycznej są zazwyczaj mniejsze niż w przypadku gatunków austenitycznych. Niższa zawartość drogiego niklu sprawia, że są one bardziej ekonomiczne od stali austenitycznych. Ponadto ich wyższa wytrzymałość może przekładać się na niższe zużycie materiału. Typowe zastosowania stali austenityczno-ferrytycznych to realizacje, w których jest wymagana wysoka wytrzymałość materiału, dobra odporność korozyjna, niska podatność na korozję naprężeniową lub połączenie tych wymagań.

Trwałość konstrukcji ze stali nierdzewnych w dużym stopniu zależy od właściwego doboru gatunku stali do korozyjnie agresywnych czynników środo-

wiska. W normie [7] podano, że naturalne środowiska atmosferyczne nie mają na ogół znaczącego wpływu na wybór stali nierdzewnej w zastosowaniach konstrukcyjnych. W przypadku zastosowań estetycznych oprócz rodzaju środowiska należy uwzględnić także usytuowanie elementów konstrukcji i możliwość ich naturalnego czyszczenia przez czynniki pogodowe.

Właściwości fizyczne, mechaniczne i technologiczne stali nierdzewnych, ich zachowanie w podwyższonych lub niskich temperaturach mają znaczący wpływ na zakres ich stosowania. W ogólnym przypadku w porównaniu z popularnymi gatunkami stali węglowej (S235 i S355) konstrukcyjne stale nierdzewne charakteryzują się większą wytrzymałością i ciągliwością, niższą przewodnością cieplną oraz przede wszystkim większą odpornością na korozję [24, 25]. Niewątpliwą wadą stali nierdzewnej w porównaniu ze stalą węglową jest niestabilna i wysoka cena materiału (około 4 razy wyższa od stali węglowej, porównując np. stal nierdzewną 1.4301 i węglową S235JR2). Bardziej szczegółową analizę czynników wpływających na cenę stali nierdzewnej przedstawiono w pracy [2]. Jednak należy zwrócić uwagę na to, że oprócz właściwości antykorozyjnych i mechanicznych na wybór rodzaju stali wpływ ma również całkowity koszt inwestycji obejmujący nie tylko cenę materiału i robocizny, lecz również bezpośrednie i pośrednie koszty związane z utrzymaniem konstrukcji w stanie zdatności do eksploatacji w założonym okresie użytkowania. Biorąc pod uwagę te czynniki, stal nierdzewna w pewnych przypadkach może stanowić ekonomicznie atrakcyjną alternatywę stali węglowej. Wysoka cena stali nierdzewnej może być rekompensowana niższym zużyciem stali związanym z jej większą wytrzymałością lub niższymi kosztami eksploatacji konstrukcji wynikającymi z braku konieczności wykonania i odnawiania zabezpieczeń antykorozyjnych.

Jedną z podstawowych różnic w zachowaniu stali nierdzewnych i węglowych jest przebieg zależności naprężenie-odkształcenie. W przypadku stali nierdzewnych jest on krzywoliniowy w całym zakresie pracy konstrukcji i nie posiada wyraźnej półki plastycznej. Przyjmując do projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnej zmodyfikowane algorytmy dla stali węglowych, autorzy normy [7] byli zmuszeni przyjąć uproszczony (biliniowy) model materiału, tak aby spełnić założenia, na których opierały się proponowane procedury obliczeniowe. Należy również pamiętać o tym, że w momencie tworzenia normy [7] istniała ograniczona liczba wyników badań, co nie pozwoliło na odpowiednio precyzyjną weryfikację wspomnianych procedur. Spowodowało to, że zalecenia normowe są zbyt konserwatywne i nie pozwalają w pełni wykorzystać zalet stali nierdzewnych. Sytuacja ta powoli ulega zmianie, gdyż ciągle powiększająca się baza wyników badań eksperymentalnych i numerycznych stanowi podstawę do modyfikacji lub wprowadzania nowych algorytmów obliczeniowych elementów ze stali nierdzewnej. Nowe propozycje dotyczą m.in. zmian w opisie zachowania się połączeń śrubowanych, formuły określającej zależność naprężenie-odkształcenie, wartości granicznych smukłości ścianek b/t służących klasyfikacji przekrojów, modyfikacji współczynnika redukcyjnego ρ czy oryginalnej propo-

zycji odejścia od koncepcji klasyfikacji przekrojów i związanych z nią nośności przekrojowych [18, 23].

Literatura

[1] International Molybdenum Association: Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. London 2009.

[2] Kuchta K., Tylek I.: Application of stainless steels in building structures. Technical Transactions. Civil Engineering, 3-B/2013, pp.19-42.

[3] Leffler B.: Stainless steel and their properties, www.hazmetal.com (30.01.2014).

[4] PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[5] PN-EN 1993-1-2. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

[6] PN-EN 1993-1-3. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.

[7] PN-EN 1993-1-4. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-4: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych.

[8] PN-EN 1993-1-5. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice.

[9] PN-EN 1993-1-8. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.

[10] PN-EN 1993-1-10. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.

[11] PN-EN 10027-2: Systemy oznaczania stali. System cyfrowy.

[12] PN-EN 10088-1: Stale odporne na korozję. Część 1: Gatunki stali odpornych na korozję.

[13] PN-EN 10088-2: Stale odporne na korozję. Część 2: Warunki techniczne dostawy blach i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia.

[14] PN-EN 10088-3: Stale odporne na korozję. Część 3: Warunki techniczne dostawy półwyrobów, prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia.

[15] PN-EN 10088-4: Stale odporne na korozję. Część 4: Warunki techniczne dostawy blach grubych, blach cienkich i taśm ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych.

[16] PN-EN 10088-5: Stale odporne na korozję. Część 5: Warunki techniczne dostawy prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych.

[17] PN-EN ISO 12944-1: Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Część 1: Ogólne wprowadzenie.

[18] Nethercot D.A.: Design of stainless steel structures: Approaches recognising the actual material characteristics. Proc. of the 12th International Conference on Metal Structures – ICMS. Wrocław 2011, pp. 66-84.

[19] Schlaich M., Bleicher A., Pasternak H.: Der Porsche Pavillon in Monocoque-Bauweise. Bauingenieur, nr 89 (2014), pp. 1-10.
[20] The European Stainless Steel Development Association Euro Inox and The Steel Construction Institute: Design manual for structural stainless steel – Commentary, 2nd ed., 2003.
[21] The European Stainless Steel Development Association Euro Inox: Własności stali odpornych na korozję. Luxembourg 2002.
[22] The European Stainless Steel Development Association Euro Inox: What is stainless steel.
[23] Tylek I.: Szerokość efektywna ścianek przekrojów ze stali nierdzewnej. II Międzynarodowa Polsko-Ukraińska Konferencja Naukowa „Aktualne problemy konstrukcji metalowych", Gdańsk 27-28.11.2014, s. 237-240.
[24] Tylek I., Kuchta K.: Mechanical properties of structural stainless steels. Technical Transactions. Civil Engineering, no 4-B/2014, pp. 59-80.
[25] Tylek I., Kuchta K.: Physical and technological properties of structural stainless steel. Technical Transactions. Civil Engineering, no 4-B/2014, pp. 81-100.

THE SPECIFICITY OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STAINLESS STEELS

S u m m a r y

Design of building structure members is covered by European Standard PN-EN 1993-1-4 [7] that extend the application of selected parts of Eurocode 3 to ferritic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels. Defined in PN-EN 1993-1-4 [7] types of stainless steel applications in building structures and specific character of stainless steel grade choice having influence not only on structure carrying capacity but also on its durability were pointed out in the paper. Stainless steel classification and designation system for stainless steel grades were given. It was also briefly described how stainless steel microstructure affect its physical, mechanical and technological properties. Differences between stainless steel and carbon steel physical and mechanical properties were discussed taking into account the basic material properties such as Young's modulus or yield strength and also stress-strain relationship or material behaviour during cold working and in elevated temperatures. The article also indicated the scope of the applicability of the European Standard PN-EN 1993-1-4 [7] to design stainless steels structural members and summarizes the strength parameters of selected grades of stainless steel permitted to use in building structures. Stainless steels resistance to corrosion and its effect on durability of building structures were described.

It was noted that, although the major disadvantage of stainless steel, limiting its use in building structures is high and volatile price of the material, properly design and executed structure made of stainless steel usually requires no additional maintenance. In comparison with carbon steel it reduces the costs associated with the maintenance of the structure and can be the factor that decide of using this material for load-bearing members.

Keywords: classification of stainless steel, stainless steel microstructure, material properties of stainless steel, durability of stainless steel, PN-EN 1993-1-4

Przesłano do redakcji: 31.08.2014 r.
Przyjęto do druku: 02.12.2014 r.

DOI:10.7862/rb.2014.142