

Zbrojenie ze stali nierdzewnej jako sposób na wydłużenie trwałości konstrukcji żelbetowych

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, prof. PŚ, Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

Bezpośrednie zabezpieczenie stali zbrojeniowej przed korozją w betonie nie musi polegać wyłącznie na tworzeniu dodatkowych zewnętrznych powłok ochronnych (cynkowej lub epoksydowej). Istnieje bowiem, znana od XIX wieku, możliwość poprawy odporności stali na korozję poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków stopowych na etapie jej produkcji. W ten sposób można uzyskać odporne na korozję pręty zbrojeniowe z tzw. stali nierdzewnej – rysunek 1. Należałoby wyjaśnić, że termin „stal nierdzewna” jest określeniem żargonowym, powszechnie stosowanym między innymi w budownictwie do opisu stali trudnordzewiejącej. Natomiast poprawnym określeniem używanym w elektrochemii jest sformułowanie „stal oporna na korozję”. Warto podkreślić, że w punkcie 4.3 Eurokodu 2 [N6], opisującym wymagania dotyczące trwałości konstrukcji betonowych, pojawia się czytelny zapis o możliwości zmniejszenia minimalnego otulenia betonowego, w przypadku zastosowania zbrojenia ze stali nierdzewnej.

2. Rodzaje stali nierdzewnej stosowanej jako zbrojenie do betonu

Określenie stal nierdzewna nie jest opisem jednego, konkretnego materiału, ale odnosi się do całej grupy stali opornych na korozję [N3]. Obok podstawowych składników: węgla i żelaza, stal nierdzewna zawsze zawiera chrom w ilości co najmniej 12% [N5]. Oprócz chromu i niepożądanych zanieczyszczeń, w zależności od gatunku stali, mogą występować jeszcze nikiel, molibden, miedź, mangan, krzem i inne składniki stopowe.

Wszystkie gatunki tej stali można podzielić na różne grupy, których wyróżnikiem może być struktura, skład chemiczny, wytrzymałość itp. [N5]. W przypadku stali nierdzewnej, np. do produkcji zbrojenia konstrukcji betonowych, stosuje się podział według rodzaju struktury, wyróżniając stal [N3]:

- austenityczną,
- ferrytyczną,
- duplex (ferrytyczno-austenityczną).

W podanej klasyfikacji rodzajów stali nierdzewnej o strukturze jednofazowej, obok stali austenitycznej i ferrytycznej często wymienia się stal martenzytyczną [N5]. Ma ona skład chemiczny porównywalny do stali ferrytycznej, ale między innymi



Rys. 1. Zbrojenie ze stali nierdzewnej [M2]

ze względu na niekorzystne zachowanie podczas spawania (tendencja do kruchego pęknięcia), nie nadaje się do produkcji stali zbrojeniowej [N3].

Stal austenityczna zawiera 17–25% chromu i 8–26% niklu. Charakteryzuje się dużą odpornością na korozję równomierną i wżerową, ale jest podatna na korozję naprężeniową. Podstawowym wyróżnikiem stali austenitycznej jest jej niemagnetyczność. Ma bardzo dużą wytrzymałość. Ciągłość stali austenitycznej jest większa niż typowych prętów zbrojeniowych, stąd też znajduje zastosowanie w konstrukcjach betonowych realizowanych na terenach sejsmicznych. Należy do stali spawalnych [N3].

Stal ferrytyczna zawiera 11–30% chromu i do 2% molibdenu. Charakteryzuje się dużą odpornością na korozję ogólną i wżerową, a także wysoką odpornością na korozję naprężeniową w środowisku zawierającym chlorki. Jest stalą ferromagnetyczną. W porównaniu do stali austenitycznej ma korzystnie wyższą granicę plastyczności, ale za to większą kruchość. Znajduje zastosowanie jako zbrojenie konstrukcji betonowych w mniej agresywnych środowiskach korozyjnych [N3]. Stal ferrytyczno-austenityczna (duplex) w przeciwieństwie do jednofazowych stali ferrytycznej i austenitycznej ma strukturę dwufazową złożoną z ferrytu i austenitu. Stal duplex zawiera 22–28% chromu, 4–8% niklu oraz molibden w celu zwiększenia odporności na korozję. Łączy w jednym materiale pozytywne cechy stali ferrytycznej (wysoką granicę plastyczności) i stali austenitycznej (dużą ciągłość i podwyższoną odporność korozyjną). Ponadto ze względu na doskonałe właściwości mechaniczne (wyższa wytrzymałość niż stali austenitycznej) jest bardzo dobrym materiałem do produkcji zbrojenia [N3].

Tabela 1. Właściwości mechaniczne prętów zbrojeniowych ze stali nierdzewnej stosowanej w Wielkiej Brytanii [6], Niemczech [N4] i we Włoszech [2], wg [N3]

Gatunek i rodzaj stali	Skład chemiczny	Sposób przygotowania	Średnica pręta [mm]	Granica plastyczności [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Wydłużenie [%]	Kraj
1.4401 austenityczna	X5CrNiMo 17-12-2	obróbka na ciepło ¹⁾	10	865	1000	20	Wielka Brytania [6]
			20	745	880	25	
			32	620	775	25	
			40	550	685	25	
		walcowana	25 ²⁾	279	579	52	
		skręcana na zimno	20 ²⁾	660	780	28	
1) wartości minimalne; 2) wartości dla wybranych próbek stali							
1.4429 austenityczna	X2CrNiMoN 17-13-3	walcowana na gorąco ⁴⁾	10	880	990	20	Niemcy [N4]
			20	790	900	25	
			32	630	790	25	
			40	550	790	30	
1.4571 austenityczna	X6CrMiMoTi 17-12-2	walcowana na zimno ⁵⁾	10 ³⁾	465	599	39	
1.4462 duplex	X2CrNiMoN 22-5-3		7 ³⁾	870	934	13	
1.4003 ferrytyczna	X2CrNi 12		8 ³⁾	518	608	16	
3) możliwe są również pręty o średnicach 6–14 mm; 4) wartości minimalne; 5) wartości dla wybranych próbek stali							
1.4301 1.4307 1.4401	X5CrNi 18-10 X2CrNi 18-9	obróbka na zimno	10	671 ⁶⁾	831 ⁶⁾	21,4 ⁶⁾	Włochy [2]
1.4404	X5CrNiMo 17-12-2	walcowana na gorąco	20	761 ⁶⁾	864 ⁶⁾	27,9 ⁶⁾	
1.4571	X2CrNiMo 17-12-2		32	754 ⁶⁾	863 ⁶⁾	25,9 ⁶⁾	
	X6CrNiMoTi 17-12-2		40	717 ⁶⁾	878 ⁶⁾	31,1 ⁶⁾	
1.4462	X2CrNiMoN 22-5	obróbka na zimno	10	950 ⁶⁾	1059 ⁶⁾	14,0 ⁶⁾	
6) wartości dla wybranych próbek stali							

3. Właściwości mechaniczne i fizyczne zbrojenia ze stali nierdzewnej

Stal nierdzewna zasadniczo charakteryzuje się nieco lepszymi właściwościami mechanicznymi od zwykłej stali węglowej stosowanej do zbrojenia betonu. W tabeli 1 zestawiono porównawczo, według biuletynu [N3], wybrane charakterystyki wytrzymałościowe różnych rodzajów i gatunków stali nierdzewnej stosowanej do produkcji zbrojenia w Wielkiej Brytanii [6], Niemczech [N4] i we Włoszech [2]. W pierwszej kolumnie tabeli podano nazwę rodzaju stali oraz symbol liczbowy jej gatunku. W drugiej kolumnie zamieszczono skład chemiczny stali za pomocą symboli pierwiastków i liczb oznaczających ich procentową zawartość. Trzecia kolumna tablicy zawiera informacje dotyczące sposobu produkcji lub/i obróbki stali, natomiast kolumna czwarta – średnice analizowanych prętów zbrojeniowych.

W kolumnie piątej zestawiono umowne granice plastyczności stali $f_{0,2k}$ na poziomie 0,2%, ponieważ w przeciwieństwie do stali węglowej walcowanej na gorąco, stal austenityczna i stal duplex nie charakteryzują się wyraźnie zdefiniowaną granicą plastyczności. Wartości liczbowe granicy plastyczności stali nierdzewnej są, w większości przypadków, nieco większe od

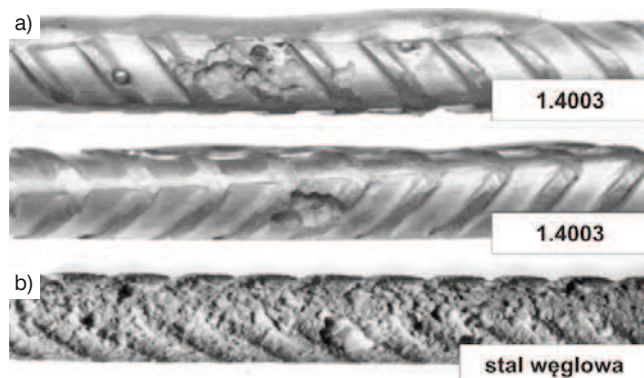
podanego w Eurokodzie 2 [N6] przedziału 400–600 MPa stali węglowej. Korzystną cechą stali austenitycznej jest nieznaczny (zaledwie o 0,2%) spadek umownej granicy plastyczności w temperaturze 500°C, przy jednoczesnym znaczącym obniżeniu wytrzymałości na rozciąganie [N3]. Dla porównania podobne zachowanie stali węglowej obserwuje się przy temperaturze o około 100°C niższej – por. [3].

W kolumnie szóstej tabeli zamieszczono wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, która po podzieleniu przez granicę plastyczności stali nierdzewnej w przybliżeniu odpowiada parametrom stali węglowej z Eurokodu 2 [N6], ale o klasie ciągliwości C. Natomiast w kolumnie siódmej zestawiono wartości wydłużeń e_{uk} stali przy maksymalnej sile rozciągającej. Porównując wartości wydłużeń stali węglowej klasy A ($\geq 2,5\%$), B ($\geq 5,0\%$) i C ($\geq 7,5\%$), podane w Eurokodzie 2 [N6], wyraźnie widać zdecydowanie większą wydłużalność stali nierdzewnej. W ostatniej kolumnie tabeli podano nazwę kraju, którego przepisy normowe lub aprobaty techniczne stanowiły podstawę powyższej analizy porównawczej.

Natomiast w tabeli 2 zestawiono porównawczo wybrane właściwości fizyczne trzech rodzajów stali nierdzewnej stosowanej jako zbrojenie konstrukcji betonowych. Największą gęstością masy charakteryzuje się stal austenityczna, natomiast

Tabela 2. Właściwości fizyczne stali nierdzewnej stosowanej jako zbrojenie [N3]

Rodzaj stali nierdzewnej	Gęstość [g/cm ³]	Przewodność termiczna [W/m·°C]	Ciepło właściwe [J/g·°C]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [K ⁻¹]	Właściwości magnetyczne
ferrytyczna	7,7	23	0,46	12 × 10 ⁻⁶	tak
austenityczna	7,8-8,0	12-15	0,44	17 × 10 ⁻⁶	nie
duplex	7,7	20	0,44	13 × 10 ⁻⁶	tak



Rys. 2. Porównanie degradacji korozyjnej (a) „nierdzewnej” stali ferrytycznej 1.4003 (b) ze skorodowaną, niezabezpieczoną, typową węglową stalą zbrojeniową, po wyjęciu z próbek betonowych eksponowanych w środowisku morskim [1, N3]

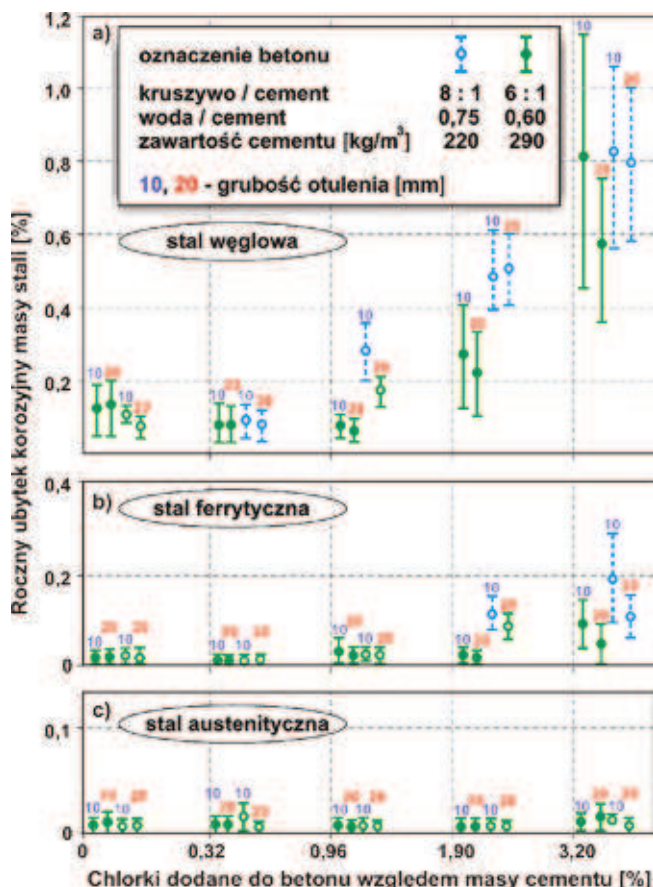
najmniejszymi gęstościami (mniejszymi również od stali węglowej – 7,85 g/cm³ [N6]) stale ferrytyczna i duplex. Największą przewodność termiczną i ciepło właściwe ma stal ferrytyczna, natomiast największy współczynnik rozszerzalności cieplnej stal austenityczna.

Stal austenityczna, jako jedyna spośród stali nierdzewnych, nie ma właściwości magnetycznych, co może być wielkim atutem przy realizacji specjalistycznych obiektów budowlanych. Przykład takiego zastosowania opisano w podsumowaniu artykułu.

4. Degradacja stali nierdzewnej w betonie

Pomimo iż żargonowa nazwa „stal nierdzewna” dotycząca grupy stali ferrytycznej, austenitycznej i martenzytycznej sugeruje całkowitą odporność na czynniki wywołujące procesy korozyjne w betonie, to jednak w rzeczywistości jest to stal trudnordzewiejąca. Dowodem potwierdzającym powyższe stwierdzenie są między innymi fotografie stalowych prętów zbrojeniowych pokazane na rysunku 2.

Dwa górne zdjęcia pokazują stan zebrowanego pręta zbrojeniowego ze stali ferrytycznej gatunku 1.4003, wyjętego z próbki betonowej eksponowanej przez 2 lata w środowisku morskim [1]. Stężenie chlorków w betonie próbki wynosiło przy zbrojeniu 2,5% w stosunku do masy cementu. Jak można zauważyć jony chlorkowe doprowadziły na stal nierdzewnej do powstania lokalnych ubytków korozyjnych (rys. 2a). Jednak stopień uszkodzeń i ich rozmiar jest zdecydowanie mniejszy od degradacji korozyjnej widocznej na niezabezpieczonej antykorozyjnie typowej węglowej stali zbrojeniowej pokazanej na rysunku 2b. W przypadku tego pręta zbrojeniowego



Rys. 3. Porównanie ubytków masy stali w wyniku korozji wywołanej przez chlorki dodane do betonu próbek zbrojonych: a) niezabezpieczoną antykorozyjnie stalą węglową, b) stalą ferrytyczną gatunku 430, c) stalą austenityczną gatunku 316 [5, 4]

ubytki korozyjne są znacznie głębsze i bardzo rozległe oraz obejmują cały widoczny fragment zbrojenia.

Interesujące porównanie odporności różnych typów stali zbrojeniowej na oddziaływanie chlorków w betonie zamieszczono w pracach [5, 4] – rysunek 3.

Badania prowadzono przez 10 lat na dwóch seriach elementów próbnych, różniących się składem i właściwościami betonu (rys. 3a), grubością otulenia (10 i 20 mm) oraz zawartością chlorków dodawanych do mieszanki betonowej (0–3,2% masy cementu). Jako zbrojenie elementów próbnych zastosowano m.in.: niezabezpieczoną antykorozyjnie stal węglową (oczyszczoną przez śrutowanie), stal ferrytyczną gatunku 430 oraz stal austenityczną gatunku 316. Trwałość zbrojenia określano poprzez obserwację rozwoju zarysowania betonu, pomiaru ubytku masy stali i rozmiarów wżerów korozyjnych.

Wyniki badań procentowego rocznego ubytku masy stali węglowej, ferrytycznej oraz austenitycznej w wyniku korozji chlorkowej zestawiono porównawczo na wykresach rysunku 3.

Analiza uzyskanych wyników badań oraz obserwacja prętów zbrojeniowych po wyjęciu z betonowych próbek wykazała, że zwykła niezabezpieczona antykorozyjnie stal węglowa nie nadaje się do wykorzystania, jako zbrojenie odporne na korozję w betonie silnie skażonym chlorkami. Intensywny ubytek korozyjny masy stali odnotowywano już na poziomie stężenia chlorków wynoszącego 0,96% – rysunek 3a.

W przypadku stali ferrytycznej wyraźniejszy ubytek masy stwierdzono dopiero przy stężeniu 1,90% i to tylko w przypadku bardziej porowatego betonu (I), o mniejszej zawartości cementu – rysunek 3b. Przy najwyższym stężeniu chlorków (3,20%) – ubytki korozyjne były obserwowane w obu betonach, przy czym większy w betonie (I) o słabszej jakości. Wyjęte po badaniach z betonu pręty miały na powierzchni wżery korozyjne, ale skoncentrowane tylko w kilku punktach [5, 4]. Natomiast w przypadku stali austenitycznej, wszystkie badane pręty zbrojeniowe wykazały bardzo wysoką odporność na korozję w analizowanych warunkach. Tak więc, stal ta wydaje się być najbardziej odpowiednia do zastosowania w tak agresywnym korozyjnie środowisku.

5. Podsumowanie

Zbrojenie ze stali nierdzewnej od około 30 lat znajduje zastosowanie w obiektach mostowych, wielokondygnacyjnych parkingach, tunelach, murach oporowych, w konstrukcjach morskich i nadbrzeżnych [M1]. Tego typu zbrojenie obecnie stosuje się w Wielkiej Brytanii, USA, we Włoszech, Francji, Danii, Norwegii, Szwecji, Finlandii, Niemczech, na Bliskim i Dalekim Wschodzie oraz w Afryce Południowej [N3].

W kilku krajach produkcja i stosowanie zbrojenia ze stali nierdzewnej zostały unormowane. W Wielkiej Brytanii obowiązują norma BS 6744 [N2], w Niemczech aprobatą techniczną [N7], natomiast w Stanach Zjednoczonych norma ASTM A955M-2001 [N1]. W przygotowaniu jest również norma europejska.

Ciekawym przykładem zastosowania zbrojenia ze stali nierdzewnej w konstrukcji żelbetowej jest budynek G11 Uniwersytetu Nowej Południowej Walii [M2] – rysunek 4.

W przypadku tego obiektu główną przyczyną zastosowania stali nierdzewnej nie było jedynie wydłużenie trwałości konstrukcji, ale przede wszystkim minimalizacja wpływu stali zbrojeniowej na pole magnetyczne wewnątrz budynku. Jako zbrojenie zastosowano nierdzewną stal austenityczną o bardzo niskiej przenikalności magnetycznej. W ten sposób, zagwarantowano brak zakłóceń działania bardzo kosztownego specjalistycznego sprzętu badawczo-pomiarowego, w który wyposażono budynek – rysunek 4.

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza wad i zalet stosowania stali nierdzewnej, jako zbrojenia konstrukcji betonowych, wskazuje na bardzo interesującą alternatywę dla typowej stali węglowej pod kątem wydłużenia trwałości żelbetu. Podstawową wadą stosowania stali nierdzewnej będzie zapewne wzrost kosztów inwestycji na etapie jej wykonania. Ale w perspektywie planowanej kilkudziesięcioletniej eksploatacji



Rys. 4. Budynek G11 Uniwersytetu Nowej Południowej Walii (Australia) ze zbrojeniem z nierdzewnej stali austenitycznej [M2]

może się okazać, mimo wszystko, rozwiązaniem również korzystnym ekonomicznie. Rozważając na etapie projektowania konstrukcji różne sposoby zapewnienia jej trwałości, w kontekście doboru odpowiedniego zbrojenia, należy wziąć pod uwagę również dwie znane alternatywne metody zabezpieczania stalowych prętów, tj. powłokami cynkowymi [7] i powłokami epoksydowymi [8]. Jedynie kalkulacje ekonomiczne powiązane z analitycznym prognozowaniem trwałości mogą dać konkretną odpowiedź, które z rozwiązań w rozważanym przypadku jest najbardziej uzasadnione i racjonalne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hewitt J., Tullmin M., Corrosion and stress corrosion cracking performance of stainless steel and other reinforcing bar materials in concrete [in]: Swamy R. N.: Corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield Academic Press, 1994, str. 527–539
- [2] Pastore T., Pedeferrri P., Corrosion behaviour of duplex stainless steel in chloride contaminated concrete, 351 [in]: Proceedings of the international conference of stainless steel, tom 1, ISIJ, Chiba, 1991
- [3] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, t.1, wyd. XIII, PWN, Warszawa 2011
- [4] Treadaway K. W. J., Cox R. N., Brown B. L., Durability of Corrosion Resisting Steels in Concrete, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 1, 86, 1989, str. 305–331
- [5] Treadaway K. W. J., Corrosion of steel in concrete construction, Materials Preservation Group, Symposium Soc. Chem. Ind., London, 1978
- [6] Whiteley J. D., Selection of stainless steel for corrosion resistant application [in]: Special steels and systems for corrosion prevention in reinforced concrete, Proceedings of the Concrete Society Symposium, London, December 1982, str. 59–70
- [7] Jaśniok M., Zabezpieczenie stali zbrojeniowej przed korozją w betonie metodą cynkowania ogniowego, Przegląd Budowlany 2/2018, str.18–23
- [8] Jaśniok M., Zabezpieczenie powłokami epoksydowymi stali zbrojeniowej przed korozją w betonie, Przegląd Budowlany 6/2018, str. 31–35

NORMY, INSTRUKCJE I WYTYCZNE

- [N1] ASTM A955M:2001, Standard specification for deformed and plain stainless steel, clad carbon steel bars for concrete reinforcement
- [N2] BS 6744:2001, Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete – requirements and test methods
- [N3] Bulletin 49 FIB, Corrosion protection of reinforcing steels, Technical report prepared by Task Group 9.7, February 2009
- [N4] NF EN 10088-1:1995, Stainless steels, list of stainless steels
- [N5] Ochrona przed korozją, Poradnik, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986
- [N6] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N7] Zulassung Z-30.3.6, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen, DIBt, Berlin, 1999

MATERIAŁY REKLAMOWE

- [M1] Euro Inox: Life cycle cost case study, river crossing highway bridge (Schaffhausen Bridge, Switzerland), Zurich, 1997
- [M2] Materiały firmy Ancon: www.ancon.com.au