

Zabezpieczenie stali zbrojeniowej przed korozją w betonie metodą cynkowania ogniowego

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, prof. Pol. Śl.,
Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

Według Eurokodu 2 [N6], dotyczącego projektowania konstrukcji betonowych, zapewnienie odpowiedniej trwałości w zakładanym okresie użytkowania należy realizować głównie poprzez dobór odpowiedniej grubości i jakości otulenia zbrojenia. Na podstawie klasy ekspozycji budowli (wskazującej na źródło zagrożenia korozją) oraz uwzględniając klasę konstrukcji, ustala się minimalną grubość otulenia oraz minimalną klasę wytrzymałości betonu. W Eurokodzie 2 dopuszczono również możliwości zmniejszenia minimalnego otulenia w przypadku zastosowania ochrony powłokowej betonu lub alternatywnie zastosowania „stali nierdzewnej lub innych specjalnych kroków” [N6]. To ogólne stwierdzenie dopuszczające „inne specjalne kroki” wskazuje między innymi na możliwość użycia zbrojenia chronionego przed korozją za pomocą ogniowej powłoki cynkowej. Warto zaznaczyć, że stosowanie ochrony powłokowej zbrojenia w betonie zostało opisane i wyjaśnione w fib Bulletin 49 [N4].

2. Mechanizm ochrony stalowego zbrojenia przez powłokę cynkową

Silnie przylegająca do stali zbrojeniowej powłoka cynkowa tworzy w środowisku cieczy porowej ogniwo galwaniczne złożone z dwóch stykających się metali Zn i Fe zanurzonych w elektrolicie – por. [13]. Cynk jest metalem o niższym od żelaza potencjale standardowym [13]. Niższy potencjał warstewki cynku na stali zbrojeniowej powoduje, że z chwilą rozszczelnienia lub przebicia powłoki cynkowej przez jony chlorkowe, na zbrojeniu nie dochodzi do procesów korozyjnych. Anodą w układzie $Zn-Fe$ jest cynk, dlatego kationy Zn^{2+} przechodzą do roztworu porowego betonu, aż do wyczerpania „zapasów” tego metalu. Powłoka cynkowa na powierzchni stalowego zbrojenia w pierwszej fazie ochrony – do momentu uszkodzenia (przebicia) – izoluje pręt zbrojeniowy od wpływu wilgoci i dostępu tlenu. W drugiej fazie ochrony, po uszkodzeniu i odstąpieniu dostępu do powierzchni stali zbrojeniowej, powłoka cynkowa przejmuje rolę roztwarzanej elektrochemicznie anody w ogniwie $Zn-Fe$, przez długi czas uniemożliwiając korozję stalowych prętów w betonie.

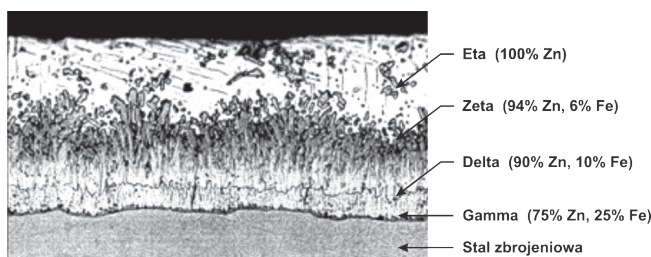
3. Technologia cynkowania ogniowego zbrojenia

Metaliczną powłokę cynkową na powierzchni zbrojenia uzyskuje się w technologii cynkowania ogniowego HDG (*Hot-Dip Galvanizing*), która polega na kąpeli stali zbrojeniowej w stopionym w temperaturze 435–460°C cynku [8]. Proces składa się z trzech głównych etapów: przygotowania powierzchni zbrojenia, obróbki w topniku oraz wytworzenia powłoki cynkowej [8]. W pierwszym etapie przeprowadza się obróbkę wstępną zbrojenia, polegającą na usuwaniu zanieczyszczeń, odtłuszczaniu, trawieniu i płukaniu. W następnym etapie wykonuje się topnikowanie, które ma na celu ostateczne przygotowanie powierzchni stali przed cynkowaniem (m.in. usuwanie tlenków po trawieniu). Końcowy etap procesu polegający na wytworzeniu powłoki cynkowej uzyskuje się w wyniku przeciągnięcia stali zbrojeniowej przez stopiony cynk. Stosunkowo zimna powierzchnia zbrojenia pokrywa się cienką warstwą roztopionego cynku [8, 6, 17].

Czas zanurzenia zbrojenia w kąpeli cynkowej zwykle mieści się w granicach 1,5–5 minut [N4]. W pierwszej minucie grubość powłoki wzrasta gwałtownie, a następnie przyrost grubości stopniowo zmniejsza się. Jest ona zależna od czasu zanurzenia oraz zawartości krzemu i zazwyczaj mieści się w przedziale 50–300 μm [N4]. Według pracy [8] powłoka cynkowa nie powinna być jednak mniejsza niż 80 μm .

W technologii HDG na powierzchni zbrojenia w trakcie procesu cynkowania mogą powstać cztery fazy stopowe powłoki metalicznej o różnych zawartościach cynku i żelaza – rysunek 1 [17]. Pierwsza od strony powierzchni stali zbrojeniowej warstwa – *gamma* jest najcieńsza oraz najtwardsza i zawiera 75% cynku oraz 25% żelaza. Druga warstwa – *delta* składa się z 90% Zn i 10% Fe , natomiast trzecia warstwa krysztalów słupkowych – *zeta*, ma 94% Zn i 6% Fe . Ostatnia, czwarta warstwa powłoki metalicznej na zbrojeniu jest najbardziej miękka i w 100% zawiera czysty cynk [17, 8].

Nie wszystkie powłoki cynkowe składają się z czterech opisanych wyżej warstw. W zależności od struktury stali, a także od warunków technologicznych procesu cynkowania, na powierzchni zbrojenia mogą powstać dwie lub tylko jedna warstwa powłoki cynkowej [8]. Pręty żebrowane o mniejszych średnicach mają zazwyczaj grubszą powłokę czystego



Rys. 1. Metaliczna powłoka cynkowa na zbrojeniu – układ faz stopowych na stali wykonanych w technologii HDG (Hot-Dip Galvanizing) – opis w tekście; [17, M1]

cynku [N4]. Wynika to z szybszego schładzania cienkich żeberek oraz mniejszych odległości między nimi, niż w przypadku prętów o większych średnicach.

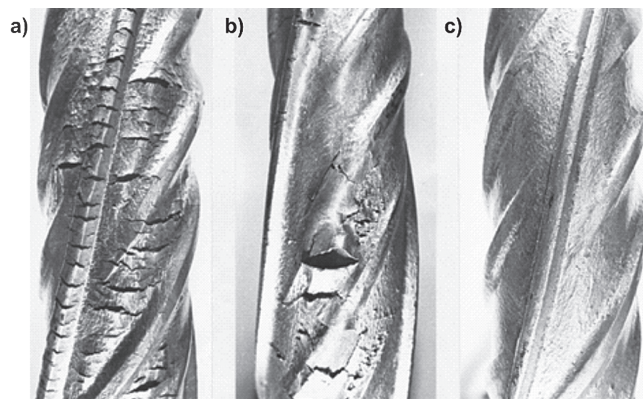
Wymagania techniczne dotyczące cynkowania zbrojenia zamieszczono w amerykańskich przepisach normowych ASTM A-767/A-767M [N2] oraz ASTM A-123/A-123M [N1]. Technologia HDG została również unormowana w Australii, Nowej Zelandii, Kanadzie, Francji, Niemczech, Indiach, Włoszech, RPA, Szwecji i Wielkiej Brytanii. Ujednolicone międzynarodowe przepisy dotyczące cynkowania zbrojenia zostały opublikowane w normie ISO 14657:2005 [N5].

4. Uszkodzenia mechaniczne powłoki cynkowej

Stosowanie zabezpieczania zbrojenia powłokami cynkowymi wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Jednym z głównych problemów jest niebezpieczeństwo uszkodzenia powłok podczas układania zbrojenia w deskowaniu, a także przycinania, odginania lub spawania prętów zbrojeniowych na budowie. Badania wykazują, że optymalna grubość powłoki cynkowej na zbrojeniu zapewniająca odporność na uszkodzenia mechaniczne powinna się mieścić w granicach 80–120 μm [N4]. Trzy fotografie pokazujące skutki gięcia na małym trzpieniu żebrowanego pręta zbrojeniowego pokrytego różnymi grubościami wybranych warstw powłoki cynkowej zamieszczono na rysunku 2. Pierwsza fotografia (rys. 2a) pokazuje przypadek wykonania zbyt grubej warstwy wewnętrznej (*gamma*), druga fotografia (rys. 2b) to przypadek wytworzenia zbyt grubej warstwy zewnętrznej z czystego cynku (*eta*), natomiast trzecia fotografia (rys. 2c) ilustruje optymalnie wykonaną powłokę cynkową [11, N4].

Generalnie powłoki cynkowe charakteryzują się bardzo wysoką odpornością na uszkodzenia mechaniczne. W czasie układania w deskowaniu uszkodzeniu może ulec jedynie wierzchnia – cynkowa warstwa *eta* powłoki o najmniejszej twardości 70 DPN¹ [N4]. Pozostałe trzy warstwy stopowe *zeta*, *delta* i *gamma* są twardsze od stali zbrojeniowej (159 DPN) i stanowią skuteczną barierę ochronną [17, M3]. Typowe twardości tych warstw wynoszą: 179 DPN – *zeta*, 244 DPN – *delta* i 250 DPN – *gamma* [17, N4]. Konieczność naprawy lub uzupełnienia niezabezpieczonej powłoką cynkową powierzchni zbrojenia występuje jedynie w przypadku przecinania lub spawania prętów. Metody napraw tych uszkodzeń ujęto w amerykańskiej

¹ DPN – jednostka skali twardości metali; skrót od *Diamond Pyramid Number*

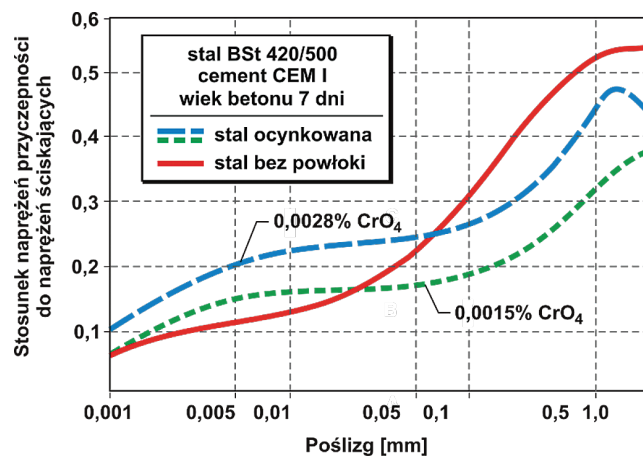


Rys. 2. Stan powłoki cynkowej w wyniku wyginania stalowego pręta żebrowanego na małym trzpieniu: a) zbyt gruba warstwa *gamma*, b) zbyt gruba warstwa *eta*, c) optymalna powłoka cynkowa; [11, N4]

normie ASTM A780 [N3]. Jedną z metod polega na metalizacji uszkodzonych fragmentów powłoki poprzez cynkownię natryskową (np. pistoletem plazmowym), podczas którego rozpylane cząstki cynku uderzają z dużą siłą w powierzchnię stali zbrojeniowej, wbijając się i wygładzając mikronierówności podłoża [6].

5. Przyczepność ocynkowanego zbrojenia do betonu

Stosowanie powłokowego zabezpieczania zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych wymaga określenia wpływu powłoki na przyczepność zbrojenia do betonu. Zasadniczo powłoka cynkowa nie zmniejsza sił przyczepnościowych pomiędzy zbrojeniem i betonem, lecz w większości przypadków ją poprawia. Potwierdzeniem tego faktu są między innymi wyniki badań doświadczalnych [9] przedstawionych na rysunku 3. Badania przeprowadzono na ocynkowanej i nieocynkowanej stali żebrowanej gatunku BSt 420/500 średnicy 16 mm. Beton wyprodukowano z dwóch rodzajów cementów o różnej zawartości chromianów (0,0028% CrO_4 i 0,015% CrO_4). Siły przyczepnościowe badano metodą *pull-off* na dojrzewającym przez 7 dni

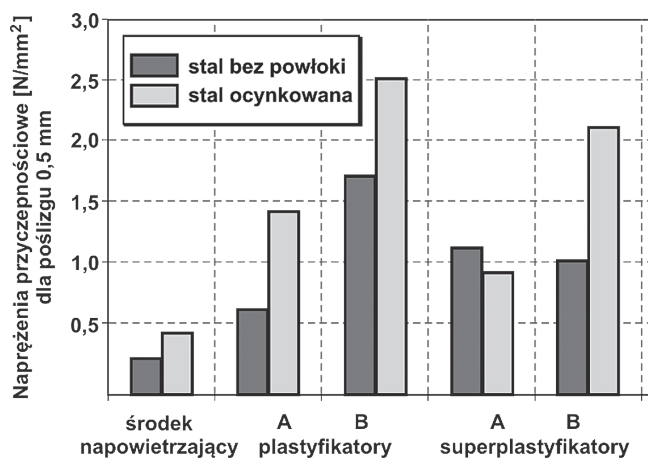


Rys. 3. Przyczepność nieocynkowanej i ocynkowanej żebrowanej stali zbrojeniowej do betonu po 7 dniach dojrzewania [9]

betonie. Analiza badań wykazała, że w przypadku gdy mierzony poślizg pręta zbrojeniowego względem betonu nie przekraczał 0,01 mm, to największą przyczepnością charakteryzowały się pręty ocynkowane znajdujące się w betonie o najwyższej zawartości chromianów (0,0028% CrO_4). Natomiast przy poślizgu powyżej 0,1 mm wyższą przyczepnością charakteryzowała się stal nieocynkowana. Należy wyjaśnić, że stosowanie cementów o niskiej zawartości chromianów powoduje wydzielanie gazowego wodoru na styku powłoki cynkowej i betonu, czego skutkiem jest spadek sił przyczepnościowych pomiędzy zbrojeniem i betonem. Problem ten dość skutecznie poprawia, aczkolwiek nie do końca rozwiązuje, chromianowanie świeżo wykonanej powłoki cynkowej [N4].

Natomiast w badaniach przyczepności do betonu ocynkowanej stali gładkiej jeszcze większą rolę niż w przypadku ocynkowanej stali zbrojonej odgrywa nie tylko zawartość chromianów w cemencie, ale również dodatki wprowadzane do mieszanki betonowej. W przypadku stali gładkiej (bez haków) przyczepność do betonu zapewniają wyłącznie siły adhezji chemicznej i tarcia [14]. Stąd też wydzielanie gazowego wodoru przy zbyt niskiej zawartości chromianów w cemencie silnie obniża przyczepność zbrojenia do betonu. Wyniki badań przyczepności gładkiej stali ocynkowanej i nieocynkowanej o średnicy 20 mm zestawiono porównawczo na rysunku 4. Beton wykonano z cementu o niskiej zawartości chromianów (3 ppm), a do mieszanki betonowej wprowadzono plastyfikatory i superplastyfikatory w najwyższych dopuszczalnych dawkach [7]. Badania przeprowadzono metodą *pull-off* po 7 dniach dojrzewania betonu. Wyniki badań (rys. 4) wykazały zasadniczo lepszą przyczepność stali ocynkowanej niż nieocynkowanej do betonu, z wyjątkiem jednego przypadku (superplastyfikator A). Badania kontynuowano również po 2 i 9 tygodniach dojrzewania betonu, stwierdzając dalszy szybszy wzrost przyczepności stali ocynkowanej do betonu, niż stali bez powłoki cynkowej.

Jak podkreślono w pracy [N4], generalnie wszystkie przeprowadzone dotychczas badania doświadczalne wskazują co najmniej na nie pogorszenie przyczepności stali ocynkowanej do betonu w porównaniu do stali nieocynkowanej.



Rys. 4. Wyniki badań metodą *pull-off* gładkiej stali ocynkowanej i nieocynkowanej w betonie z dodatkami o niskiej zawartości chromianów, po 7 dniach dojrzewania [7]

Wyrażnym zaleceniem przy stosowaniu stali ocynkowanej w betonie jest niestosowanie cementów o obniżonej zawartości chromianów.

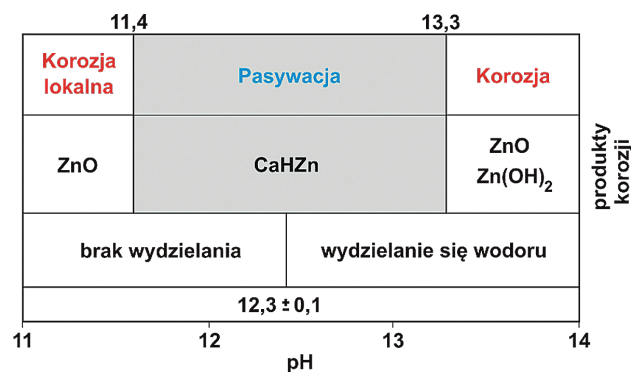
6. Stan powłoki cynkowej na stali w betonie nie zawierającym czynników korozyjnych

Opisane wyżej właściwości powłoki cynkowej na stali zbrojeniowej w betonie mogłyby wskazywać, że tego typu bezpośrednie zabezpieczenie zbrojenia przed korozją ma prawie wyłącznie zalety. Niestety, w przeciwieństwie do stali nieocynkowanej, powłoka cynkowa na zbrojeniu koroduje w roztworze cieczy porowej betonu przy $\text{pH} \geq 13,3$ [17] – rysunek 5. Korozja powłoki cynkowej zachodzi również, gdy odczyn cieczy porowej spadnie poniżej $\text{pH} = 11,4$. Dla porównania inicjacja procesów korozyjnych na stali zbrojeniowej bez powłoki rozpoczyna się przy nieco wyższym $\text{pH} = 11,8$ [12] – rysunek 6. Stan pasywny powłoki cynkowej utrzymuje się wyłącznie w stosunkowo wąskim przedziale $\text{pH} = 11,5\text{--}13,2$ [17, 5]. Dla porównania pasywacja zbrojenia bez powłoki zachodzi przy $\text{pH} > 11,8$, bez górnego limitu wartości pH – por. rysunek 6.

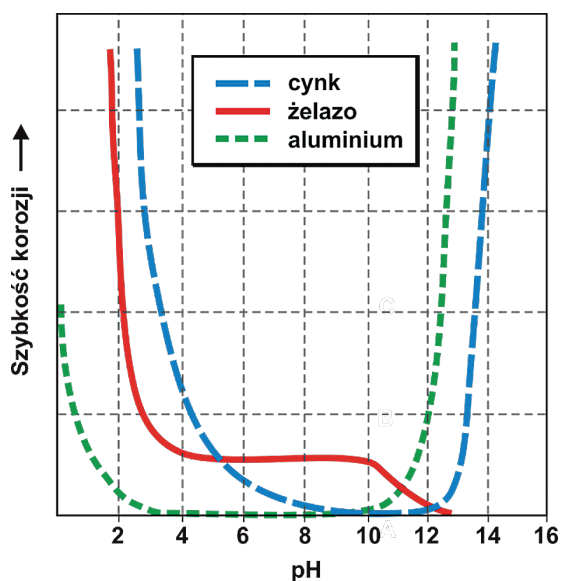
Z chwilą ułożenia mieszanki betonowej w deskowaniu zawierającym ocynkowane pręty zbrojeniowe, nasycony alkalią z cementu roztwór reaguje z cynkiem zgodnie z reakcją:



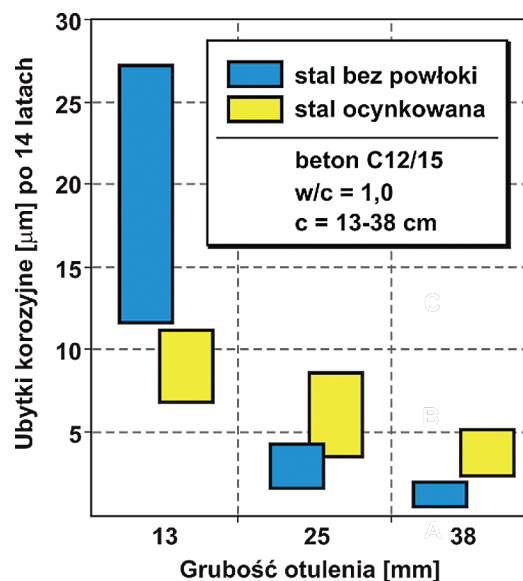
Jest to pierwszy etap reakcji powłoki cynkowej w alkalicznym środowisku, który określa się jako „aktywną korozję” [N4]. W trakcie tego procesu zużywane jest około 10 μm zewnętrznej warstwy cynku [17]. Produktem tej reakcji jest wodorotlenek cynku (zwany również „białą rdzą”) oraz gazowy wodór. Wydzielanie gazowego wodoru poprzez pory twardniejącego betonu zachodzi jedynie powyżej wartości $\text{pH} \approx 12,3$ (por. rys. 5). Wodór gromadzi się w formie małych pęcherzyków, które powoli przemieszczają się w kierunku zewnętrznej powierzchni otulenia, utrudniając proces wiązania betonu. W przypadku małej grubości otulenia wydostający się gazowy wodór może dodatkowo powodować estetycznie niepożądane zmiany na powierzchni betonu [N4]. Jak już wcześniej wspomniano, wydzielający się wodór powoduje również obniżenie



Rys. 5. Wpływ wartości pH na stan pasywacji i korozji ocynkowanej stali [5]



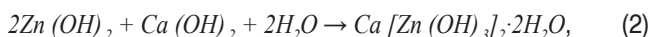
Rys. 6. Szybkość korozji metali w roztworach wodnych w funkcji wartości pH [N4]



Rys. 7. Ubytki korozyjne ocynkowanej i nieocynkowanej stali zbrojeniowej w betonie lekkim po 14 latach ekspozycji [16]

przyczepności zbrojenia do betonu, ale głównie w początkowej fazie jego twardnienia.

W kolejnym etapie wodorotlenek cynku reaguje z wodorotlenkiem wapnia znajdującym się w cieczy porowej betonu tworząc zgodnie z reakcją:



związek określany w skrócie jako CaHZn [17]. Jest to drugi i ostatni etap reakcji powłoki cynkowej w alkalicznym środowisku, który określa się jako „pasywację” [N4]. Związek ten pasywuje powłokę cynkową na zbrojeniu w betonie, zatrzymując usuwanie cynku oraz wydzielanie gazowego wodoru [N4]. W przypadku, gdy odczyn cieczy porowej jest wysoko alkaliczny ($\text{pH} > 13,3$), kryształy CaHZn ulegają degradacji i powstają dwa typy produktów korozji cynku, tj. ZnO i $\text{Zn}(\text{OH})_2$ – por. rysunek 5. W sytuacji gdy odczyn cieczy porowej ulegnie zobojętnieniu ($\text{pH} < 11,4$) produktem korozji jest CaO [17].

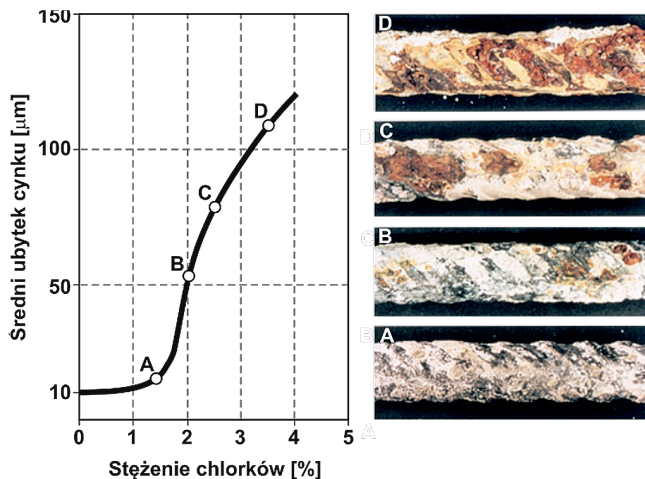
7. Degradacja powłoki cynkowej na zbrojeniu w betonie wywołana CO_2 lub chlorkami

Degradacja powłoki cynkowej na zbrojeniu zachodzi również w przypadku procesu karbonatyzacji otulenia osłaniającego pręty zbrojeniowe. W celu weryfikacji skuteczności tego typu ochronny powłokowej zbrojenia wykonano próbki z betonu klasy C12/15 o wskaźniku $w/c = 1,0$ [16]. Stosując we wszystkich próbkach stałą grubość powłoki cynkowej ($90 \mu\text{m}$), przyjęto trzy grubości otulin: 13, 25 i 38 mm. Po 14 latach ekspozycji próbek w środowisku przemysłowym o podwyższonej zawartości CO_2 w powietrzu atmosferycznym, zidentyfikowano karbonatyzację betonu do głębokości 12–27 mm. Jak pokazano na rysunku 7, przy najmniejszym otuleniu (13 mm), które w całości było skarbonatyzowane, ubytki korozyjne stali nieocynkowanej były znacząco większe, niż ubytki stali ocynkowanej. Dość zaskakująco wyglądała sytuacja przy grubszych

otuleniach (25 i 38 mm), które tylko częściowo uległy karbonatyzacji. W przypadku tych otuleń intensywniej korodowała powłoka cynkowa w strefach niezobojętnionych przez CO_2 (czyli w środowisku alkalicznym), niż nieocynkowana stal w obszarach lokalnie skarbonatyzowanych [N4].

Przyczyną degradacji korozyjnej powłoki cynkowej na zbrojeniu w betonie, podobnie jak zbrojenia niezabezpieczonego powłokowo, mogą być również chlorki. Jak wykazują badania doświadczalne [10, 16, 18, 15] poziom graniczny stężenia chlorków w betonie, który powoduje inicjację procesów korozyjnych na zbrojeniu, jest znacząco wyższy w przypadku stali ocynkowanej, niż stali bez zabezpieczenia powłokowego. W pracy [10] zamieszczono wyniki badań ocynkowanej stali zbrojeniowej osadzonej w elementach betonowych o dwóch grubościach otuleń: 15 i 25 mm. Na wszystkich prętach zbrojeniowych wykonano powłoki cynkowe jednakowej grubości wynoszącej $160 \mu\text{m}$. Elementy próbne eksponowano przez 2,5 roku w środowisku wody morskiej. Uśredniony ubytek cynku w funkcji stężenia chlorków w stosunku do masy cementu w betonie przedstawiono w formie wykresu na rysunku 8a. Natomiast fotografie fragmentów ocynkowanych prętów wyjętych po zakończeniu badań z betonu o różnej zawartości chlorków zamieszczono na rysunku 8b.

Wyniki badań [10] potwierdziły bardzo wysoką wartość graniczną zawartości chlorków, którą oszacowano na poziomie 1,5% w stosunku do masy cementu w betonie – por. rysunek 8a. Jak wynika z wykresu na rysunku 8a, przekroczenie tego stężenia powoduje gwałtowny wzrost szybkości korozji zbrojenia w betonie. Zbliżony zakres stężenia granicznego chlorków (1–2%) ustalono w pracy [16]. Natomiast w innych badaniach [18, 15], nie definiując liczbowo stężenia granicznego podano, że stężenie chlorków inicjujące korozję zbrojenia ocynkowanego jest co najmniej $2,5 \times$ [18], a nawet $4\text{--}5 \times$ [15] wyższe od granicznego stężenia chlorków podawanego dla stali nieocynkowanej. Na znaczny rozrzut podawanych wyżej wyników mają wpływ przede wszystkim skład betonu (rodzaj



Rys. 8. Ubytki korozyjne ocynkowanej stali zbrojeniowej w betonie zwykłym w funkcji stężenia chlorków po 2,5 letniej ekspozycji w wodzie morskiej [10]

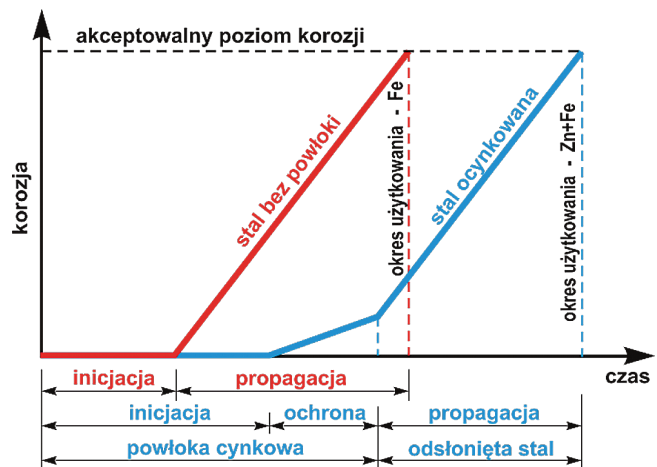
cementu, dodatki, domieszki), ale także grubość i jakość wykonania warstw powłoki cynkowej na zbrojeniu.

8. Trwałość żelbetu z ocynkowanym zbrojeniem

Okres użytkowania konstrukcji żelbetowej zbrojonej niezabezpieczoną powłokowo stalą umownie dzieli się na trzy etapy [12]. Etap pierwszy, będący jednocześnie miarą trwałości żelbetu, kończy się z chwilą inicjacji procesów korozyjnych na powierzchni zbrojenia. Natomiast etap drugi i trzeci – to odpowiednio rozwój korozji oraz pękanie i odpadanie otulenia. Dla uproszczenia dwa ostatnie etapy można sprowadzić do jednego – etapu propagacji korozji [18] – por. rysunek 9. Tego typu uproszczenie pozwala na czytelniejsze pokazanie korzystnego wydłużenia trwałości żelbetu przy zastosowaniu stali ocynkowanej.

W przypadku ocynkowanego zbrojenia w betonie wyróżnia się trzy etapy degradacji żelbetu: inicjację, ochronę i propagację [18, 17] – rysunek 9. Jak można zauważyć, na wykresie modeli okresu użytkowania konstrukcji żelbetowej ze stalą ocynkowaną, etap 1 – czyli czas inicjacji korozji na powłoce cynkowej jest dłuższy niż w przypadku stali bez powłoki. Wynika to po pierwsze z faktu, że symptomy rozwoju korozji cynku ujawniają się, gdy proces karbonatyzacji otulenia neutralizuje ciecz porową, zmniejszając wartość pH poniżej 11,4 (por. rys. 5). W przypadku stali bez powłoki cynkowej korozja zbrojenia następuje już na poziomie $pH = 11,8$ [12]. Po drugie, powłoka cynkowa ulega degradacji korozyjnej przy ponad dwukrotnie wyższym stężeniu granicznym chlorków w betonie, niż niezabezpieczone powłokowo zbrojenie.

W etapie 2 – czyli ochronie zbrojenia, koroduje sama powłoka cynkowa, natomiast ochraniająca stal zbrojeniowa pozostaje nienaruszona. Wynika to z faktu, iż żelazo (główny składnik stali zbrojeniowej) wraz z cynkiem w środowisku cieczy porowej tworzą klasyczne ogniwo galwaniczne, w którym cynk jako metal „mniej szlachetny” jest roztrawiany. Według [18] cynk zabezpiecza odłusniętą stal zbrojeniową w odległości co najmniej 8 mm (badania prowadzono w betonie o $w/c = 0,8$



Rys. 9. Porównanie modeli okresu użytkowania konstrukcji żelbetowej wykonanej ze stali ocynkowanej i nieocynkowanej [18, 17]

wystawionym na działanie mgły solnej). Ponadto produkty korozji cynku mają mniejszą objętość, niż produkty korozji żelaza, dlatego też na etapie ochrony zbrojenia otulenie betonowe zasadniczo nie ulega widocznym uszkodzeniom w wyniku pojawiających się naprężeń rozciągających. Tak więc do końca etapu 2 stal zbrojeniowa, pomimo korozji powłoki cynkowej pozostaje nieuszkodzona. Zgodnie z Eurokodem 2 [N6] oznacza to, że miarą trwałości konstrukcji żelbetowej z ocynkowanym zbrojeniem jest suma dwóch pierwszych etapów degradacji: inicjacji i ochrony (zbrojenia) – por. rysunek 9.

W etapie 3 – czyli propagacji korozji, w przypadku stali ocynkowanej koroduje dalej powłoka cynkowa i jednocześnie rozwijają się procesy korozyjne chronionej wcześniej przez tę powłokę stali zbrojeniowej. Ponieważ poziomy graniczne pH oraz stężenia chlorków dla stali ocynkowanej istotnie przekraczają wartości graniczne dla stali nieocynkowanej, to z chwilą inicjacji korozji stalowego zbrojenia, przebieg procesów korozyjnych może być dość intensywny. Powstające obok produktów korozji cynku produkty korozji żelaza (rdza), gromadząc się w porach betonu, generują naprężenia rozciągające w otuleniu. Ich skutkiem są stopniowe zarysowania i spękania, a w konsekwencji odpajanie i odpadanie fragmentów otulenia.

9. Podsumowanie

Na świecie cynkowanie zbrojenia realizuje się już od ponad 60 lat. Po raz pierwszy powłoki cynkowe na zbrojeniu zastosowano w 1953 r., wykonując narażoną na oddziaływanie wody morskiej żelbetową konstrukcję Long Bird Bridge na Bermudach [M2]. Ten sposób zabezpieczenia stali zbrojeniowej przed korozją jest najbardziej popularny w USA, Australii, Bermudach, Holandii, Włoszech, Wielkiej Brytanii i Niemczech. W Stanach Zjednoczonych cynkuje się około 2% produkowanego zbrojenia, natomiast w Europie około 1% [N4]. Niestety trudno dotrzeć do jakiegokolwiek informacji o zastosowaniu ocynkowanego zbrojenia w odpowiedzialnych konstrukcjach betonowych realizowanych w kraju. Również badania naukowe trwałości ocynkowanej stali zbrojeniowej w betonie są w Polsce



Rys. 10. Największy na świecie zegar słoneczny – Australia: a) widok całej konstrukcji, b) widok z dołu, c) ocynkowane zbrojenie w deskowaniu; [M4]



Rys. 11. Głębiny oceaniczne wyloty kanałów ściekowych w Sydney. Ten rodzaj zabezpieczenia stali dobrze sprawdza się również w tzw. konstrukcjach wysokiego ryzyka w agresywnych korozyjnie środowiskach zakładów przemysłowych (kominach, silosach).

na wczesnym etapie rozwoju [2–5].

Zabezpieczone powłoką cynkową zbrojenie najpowszechniej wykorzystuje się do budowy infrastruktury transportowej (mostów, wiaduktów, tuneli), głównie ze względu na stosowanie w okresie zimowym środków odładowych. Ocynkowaną stal stosuje się również w nabrzeżnych i morskich konstrukcjach betonowych (platformach wiertniczych, molach, falochronach), ze względu na zagrożenie chlorkami pochodzącymi z wody morskiej. Ten rodzaj zabezpieczenia stali dobrze sprawdza się również w tzw. konstrukcjach wysokiego ryzyka w agresywnych korozyjnie środowiskach zakładów przemysłowych (kominach, silosach).

Ciekawym przykładem zastosowania ocynkowanego zbrojenia w konstrukcji betonowej jest największy na świecie zegar słoneczny w Singleton (Australia) – rysunek 10.

Konstrukcja została wzniesiona w 1988 r. z okazji obchodów 200-lecia Australii. Zegar słoneczny ma 14,6 m długości i 7,92 m wysokości. Do jego wykonania zużyto 30 ton betonu oraz 2,5 km ocynkowanej stali zbrojeniowej [M4]. Innym przykładem zastosowania ocynkowanego zbrojenia są żelbetowe okładziny oceanicznych wylotów kanałów ściekowych w Sydney – rysunek 11. Wydrążono trzy tunele głębiny (North Head, Bondi i Malabar) wzdłuż nadmorskich klifów i dna morskiego na odległość 3 km od lądu. Wewnętrzne okładziny tych tuneli (kanałów) wykonano z prefabrykatów i betonu monolitycznego, w obu przypadkach zbrojonych stalą ocynkowaną [M4].

Mając na uwadze opisany wyżej w zarysie bogaty stan wiedzy światowej w temacie ochrony powłokowej zbrojenia

metodą cynkowania ogniowego, a także kilkudziesięcioletnie doświadczenia i obserwacje pozytywnych efektów stosowania tego typu ochrony, warto rozważyć wdrożenie tej metody w warunkach krajowych. Na pewno niezbędne będą działania o charakterze edukacyjnym wśród studentów i inżynierów budownictwa, a także przekonanie inwestorów do opłacalności stosowania w dłuższej perspektywie tego typu zabiegów ochronnych względem zbrojenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Corderoy D.J.H., Herzog H., Passivation of galvanized reinforcement by inhibitor anions. [in:] Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, ASTM STP 713, Baltimore, 1980, str. 142–159
- [2] Jaśniok M., Kołodziej J., Badania impedancyjne wpływu alkalicznego odczynu cieczy porowej betonu na cynkową powłokę ochronną stali zbrojeniowej, Roczniki Inżynierii Budowlanej, zeszyt 15, 2015, str. 37–42
- [3] Jaśniok M., Kołodziej J., Testing with EIS technique to compare the effect of alkaline pH of concrete pore solution on rebars with or without zinc coating, Ochrona przed Korozją, tom 59, nr 5, 2016, str. 170–174
- [4] Jaśniok M., Kołodziej J., Badania elektrochemiczne stali zbrojeniowej chronionej powłoką cynkową w kontakcie z cieczą porową betonu, Izolacje 4/2016, str. 53–55
- [5] Kołodziej J., Jaśniok M., Polarization tests concerning chloride impact on protective zinc coatings applied on reinforcing steel in curing concrete, Ochrona przed Korozją, tom 60, nr 10, 2017, str. 330–334
- [6] Juchniewicz R., Stankiewicz H., Walaszkowski J., Widuchowski A., Technika przeciwochorożyna I, WSiP, Warszawa, 1989
- [7] Koch R., Wohlfahrt R., Rippengeometrie und Verbundverhalten feuerverzinkter Betonstähle. Betonwerk + Fertigteiltechnik 53, 1989, str. 52–57
- [8] Langill T., Galvanized Rebar. Using zinc materials is one way to protect rebar. MC Magazine Archive, <http://www.precast.org/publications/mc/>
- [9] Mang R., Müller R.H., Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau. Stahl und Eisen 18, 1982, str. 889–894
- [10] Nürnberger U., BEUL W., Einfluß einer Feuerverzinkung und PVC-Beschichtung von Bewehrungsstählen und von Inhibitoren auf die Korrosion von Stahl in gerissenem Beton. Werkstoffe und Korrosion 42, 1991, str. 537–546
- [11] Nürnberger U., Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 318, 1981, str. 1–30
- [12] Ścisławski Z., Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa, 1999
- [13] Sobczyk L., Kiszka A., Chemia fizyczna dla przyrodników, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1981
- [14] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, tom 1, wyd. XIII, PWN, Warszawa, 2011
- [15] Tonini D.E., Dean S.W., Chloride corrosion of steel in concrete, ASTM STP 629, Philadelphia, 1976
- [16] Treadaway K.W.J., Brown B.L., Cox R.N., Durability of galvanized steel in concrete, [in:] Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, ASTM STP 713, Philadelphia, 1980, str. 120–131
- [17] Yeomans S.R. [ed.], Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier, 2004
- [18] Yeomans S.R., Performance of black, galvanized and epoxy-coated reinforcing steel in chloride-contaminated concrete, Corrosion, 50, 1, 1994, str. 72–81

NORMY I BIULETYNY

- [N1] ASTM A123/A123M: Standard Specifications for Zinc (Hot-Dipped Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products
- [N2] ASTM A767/A767M: Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement
- [N3] ASTM A780: Standard Practice for Repair of Damaged and Uncoated Areas of Hot-Dip Galvanized Coatings
- [N4] Bulletin 49 fib, Corrosion protection of reinforcing steels, Technical report prepared by Task Group 9.7, February 2009
- [N5] ISO 14657:2005 Zinc-coated steel for the reinforcement of concrete
- [N6] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonem. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

MATERIAŁY ZE STRON INTERNETOWYCH

- [M1] Informacje techniczne American Galvanizers Association – Concrete Corrosion, <http://www.galvanizeit.org/showContent,278,322.cfm>
- [M2] Informacje techniczne Galvanizers Association of Australia – Produkt News; <http://www.spec-net.com.au/press/1105/gaa.htm>
- [M3] Informacje techniczne Midwest Galvanizing Group Inc., Documented Field Results of Epoxy Rebar versus Documented Results and Characteristics of Hot-Dip Galvanized Rebar, Rust free rebar 630.369.8915 – <http://www.rustfreetrucks.com/rebar/>
- [M4] Rust free rebar 630.369.8915 – <http://www.rustfreetrucks.com/rebar/20333.html>
- [M4] Materiały ze strony: www.galvanizedrebar.com