

# Konsekwencje uszkodzeń korozyjnych belek żelbetowych



dr hab. inż.  
**JACEK KORENTZ, PROF. UZ**  
Uniwersytet Zielonogórski  
Instytut Budownictwa  
ORCID: 0000-0002-1521-8681

W artykule przedstawiono przyczyny i skutki korozji w konstrukcjach żelbetowych oraz wyniki analiz nośności i ugięcia belek żelbetowych, w których wystąpiły uszkodzenia korozyjne betonu i zbrojenia o różnej intensywności.

## Wprowadzenie

Każdy budynek i obiekt budowlany ulegają degradacji w wyniku oddziaływania na nie środowiska. W efekcie dochodzi do uszkodzeń powierzchni betonu oraz otuliny betonowej zbrojenia i w dalszej kolejności korozji prętów zbrojenia. Procesy niszczenia mogą doprowadzić do zmniejszenia użyteczności elementów oraz materiałów do takiego stopnia, że konstrukcja obiektu nie będzie w stanie spełniać podstawowych wymagań dotyczących jej nośności czy użyteczności przed upływem projektowanego czasu eksploatacji.

Klasyfikację i podział najczęstszych przyczyn uszkodzeń powierzchni betonu oraz otuliny betonowej zbrojenia, powodowanych warunkami użytkowania, a także korozji zbrojenia, podaje norma [1]. Są one zgodne z klasami ekspozycji betonu związanymi z oddziaływaniem środowiska według normy [2]. Jednak oddziaływania korozyjne wpływające na cechy betonu i zbrojenia nie są uwzględniane jako obciążenia. Według norm [3, 4] konieczne jest projektowanie konstrukcji z uwzględnieniem ich trwałości. Oznacza to, że trwałość konstrukcji jest rozważana, jako jeden

z trzech równorzędnych elementów niezawodności konstrukcji, obok bezpieczeństwa i użyteczności. Odpowiednią trwałość konstrukcji żelbetowych można zagwarantować między innymi odpowiednią grubością otuliny i klasą wytrzymałości [5].

W artykule przedstawiono przyczyny i skutki korozji w konstrukcjach żelbetowych oraz wyniki analiz nośności i ugięcia belek żelbetowych, w których wystąpiły uszkodzenia korozyjne betonu oraz zbrojenia o różnej intensywności. Celem przeprowadzonych analiz jest ocena konsekwencji degradacji belek żelbetowych spowodowanych korozją.

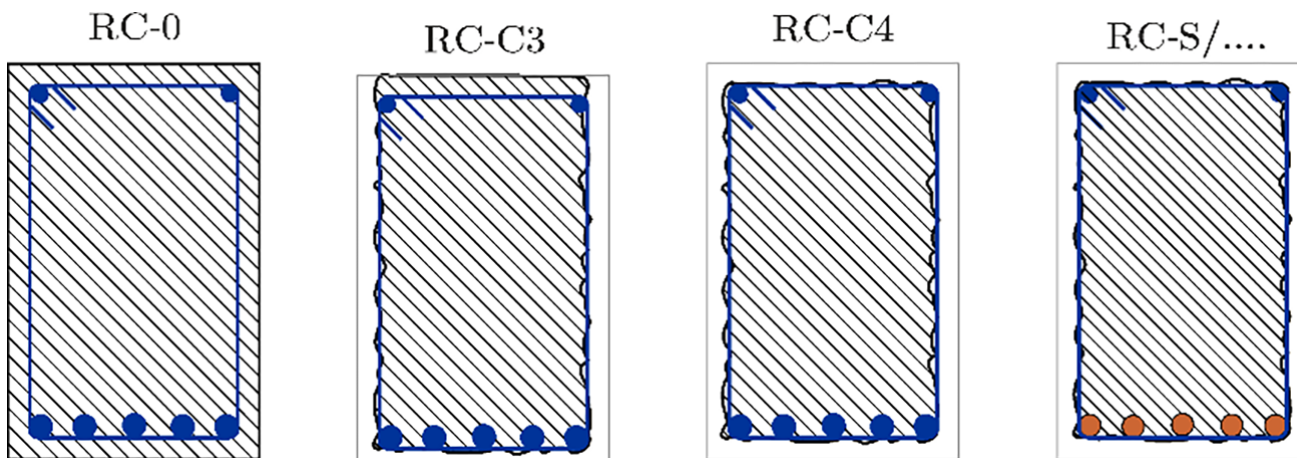
## Przyczyny i skutki korozji betonu oraz stali

Proces niszczenia betonu w wyniku oddziaływania środowiska definiuje się jako korozję. Wyróżnia się dwa rodzaje korozji betonu: wewnętrzną i zewnętrzną. Przyczyną korozji wewnętrznej mogą być składniki, z których wykonano beton; są to głównie alkalia obecne w cemencie lub domieszkach. Korozja zewnętrzna zachodzi pod działaniem niekorzystnych czynników zewnętrznych. Naj-

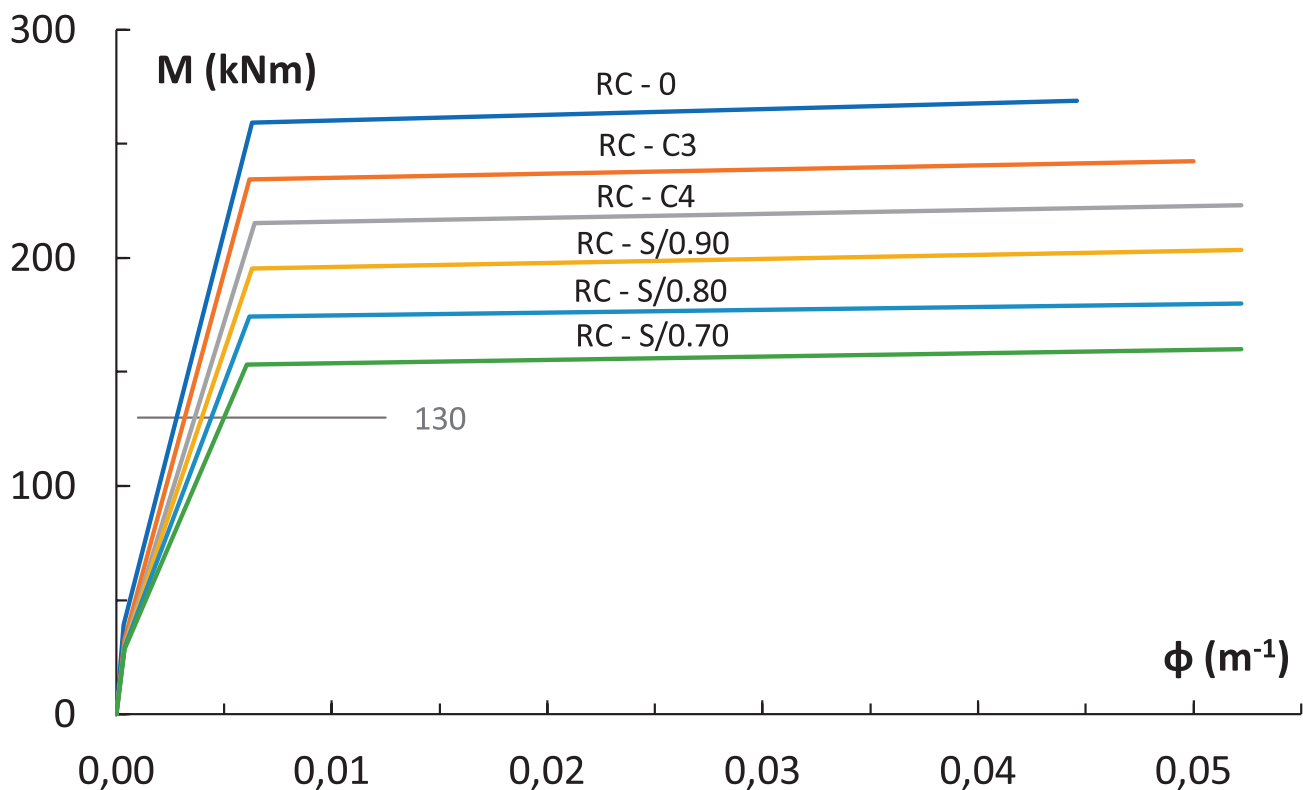
częściej występującymi rodzajami korozji betonu są: karbonatyzacja, korozja chlorkowa, korozja siarczanowa, korozja spowodowana reakcją alkalia-kruszywo, korozja ogólnokwasowa, a także korozja ługująca i korozja wywołana działaniem mrozu [6, 7].

Karbonatyzacja nie ma wpływu na właściwości betonu, ale prowadzi do obniżenia pH i po przekroczeniu granicznej wartości dochodzi do korozji zbrojenia. Agresja chlorkowa prowadzi również do obniżenia pH betonu oraz powstawania ekspansywnych związków, które mogą powodować spękanie betonu i korozję prętów zbrojeniowych. Do skutków fizycznych agresji siarczanowej należy zaliczyć ekspansję, spękania, tuszczanie, a także spadek wytrzymałości betonu oraz korozję zbrojenia. Z kolei reaktywność alkaliczna kruszywo skutkuje naprężeniami wewnętrznymi, które powodują spękanie i rozpad betonu, natomiast korozja ługująca oraz działanie mrozu naruszają strukturę betonu.

Proces korozji zbrojenia przekształca stal w rdzę, co prowadzi do zmniejszenia przekroju stalowego prętów i zwiększania objętości rdzy. W konsekwencji naprężenia wywierane



Rys. 1. Analizowane uszkodzenia korozyjne belek



Rys. 2. Zależności moment krzywizna dla analizowanych uszkodzeń korozyjnych

przez produkty korozji powodują mikrozarzysowanie betonu otaczającego pręty, utratę wiązania między betonem a prętami zbrojenia, a także miejscowe lub całkowite odspojenie otuliny. Są to uszkodzenia typowe dla korozji powierzchniowej, która charakteryzuje się mniej lub bardziej równomiernym ubytkiem na długości pręta. W przypadku korozji wżerowej ubytki występują lokalnie na bardzo małej powierzchni, przy czym ubytki przekroju mogą sięgać głęboko w materiał. Korozja zbrojenia może być też spowodowana prądami błędzącymi. Ponadto korozji betonu i stali towarzyszą zmiany właściwości mechanicznych betonu i prętów zbrojeniowych.

Badania [8] wykazały, że alkalia powodują wzrost wytrzymałości betonu w młodym wieku (7 dni), a wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach zmniejsza nawet o 24%. Podobnie wyższą wytrzymałość wczesną i niższą wytrzymałość późną zaobserwowano dla betonu w obecności korozyjnego chlorku wapnia. Według badań [9] wytrzymałość betonu na ściskanie zmniejsza się, gdy jest on

zanurzony w słonej wodzie: o 51% dla betonu zwykłego i 38% dla betonu o wysokiej wytrzymałości. Jest to spowodowane tym, że beton uprzednio zarzysowany ma niższą wytrzymałość na ściskanie niż beton w jednoosiowym stanie naprężenia [10]. Jest to zjawisko zmiękczenia betonu przy ścisaniu (*compression softening*).

Badania [11] wykazały istotny spadek granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie prętów stalowych o podwyższonej wytrzymałości, który wynosił maksymalnie 28%. Korozja zbrojenia powoduje również zmniejszenie ciągliwości stali. Według badań [12] odkształcenia końcowe prętów skorodowanych mogą być mniejsze o 26% niż prętów bez korozji. Badania [13] pokazały, że stopień korozji prętów stalowych ma duży wpływ na moduł Younga, a spadek modułu w skrajnych przypadkach może osiągać nawet 30%. Natomiast badania [14] wykazały, że korozja zbrojenia ma istotny wpływ na granicę plastyczności i ciągliwość, natomiast moduł Younga ulega obniżeniu w nieznacznym stopniu.

### Wpływ uszkodzeń korozyjnych na zachowanie się belek żelbetowych

Przedmiotem opracowania są belki wykonane z betonu ( $f_{co}=30$  MPa,  $E_c=32$  GPa), swobodnie podparte o rozpiętości  $l=7,5$  m i przekroju prostokątnym o wymiarach  $h=50$  cm,  $b=30$  cm. Zbrojenie belek ze stali klasy B400 ( $f_{sy}=400$  MPa) to: dołem  $5\phi 20$ , górą  $2\phi 10$ . Stopień zbrojenia rozciąganego  $\rho_1 = 1,14\%$ . Nośność na zginanie  $M_0=260$  kNm.

Analizie poddano przekrój belki bez uszkodzeń korozyjnych oznaczony symbolem RC-0 i pięć przekrojów z uszkodzeniami korozyjnymi betonu oraz prętów zbrojeniowych: przekrój RC-C3, w którym odspojeniu uległa otulina na trzech krawędziach, przekrój RC-C4, w którym otulina jest odspojona na całym obwodzie, przekroje RC-S/0,90, RC-S/0,80 i RC-S/0,70 bez otuliny zbrojenia na całym obwodzie i skorodowanych prętach odpowiednio w 10%, 25% oraz 30% ich pola powierzchni (rys. 1).

Dla opisanych sześciu przekrojów belek zbudowano zależności moment  $M$  krzyw-

Tablica 1. Zestawienie wyników obliczeń nośności na zginanie  $M$  i strzałki ugięcia  $a$

Belka	RC-0	RC-C3	RC-C4	RC-S/0.90	RC-S/0.80	RC-S/0.70
$M$ (kNm)	260	234	215	195	174	153
$\Delta M/M$	0%	-10%	-17%	-25%	-33%	-41%
$a = at + \Delta a$ (cm)	2,22	2,44	2,76	2,90	3,15	3,48
$\Delta a/at$	+0%	+10%	+24%	+31%	+42%	+57%

zna  $\phi$  na podstawie modelu tej zależności zacierpniętej z pracy [15]. Ponadto obliczono strzałki ugięcia belek przy wykorzystaniu metody obliczania ugięcia na podstawie rozkładu krzywizny na długości belki [16].

Wykresy zależności moment krzywizna dla belki bez korozji i belek o różnym zakresie i stopniu korozji zamieszczone są na rys. 2.

Rysunek ten wyraźnie wskazuje na to, że korozja betonu i prętów zbrojeniowych przyczynia się do istotnego spadku nośności na zginanie oraz wzrostu krzywizny.

W tab. 1. zestawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń dotyczących nośności belek i ich strzałki ugięcia. Obliczenia strzałki ugięcia  $a_g$  belki bez uszkodzeń wykonano dla quasi-stałej kombinacji obciążeń, dla której  $M=130$  kNm i współczynnika pełzania betonu  $\phi_p=2$ . Dla belek z uszkodzeniami korozyjnymi obliczono przyrost doraźny strzałki ugięcia  $\Delta a$ .

Jak można zauważyć, nośność belek obniża się ze wzrostem uszkodzeń korozyjnych, którym towarzyszy powiększające się ugięcie. Przykładowo ubytek otuliny zbrojenia na całym obwodzie przekroju (belka RC-C4) powoduje spadek nośności o 17% oraz przyrost strzałki ugięcia o 24%. Z kolei ubytek otuliny zbrojenia na całym obwodzie i korozja prętów zbrojenia zmniejszająca przekrój zbrojenia o 30% (belka RC-S/0,70) powoduje spadek nośności o 41% oraz wzrost strzałki ugięcia o 57%.

Wyniki przeprowadzonych analiz mają potwierdzenie w badaniach doświadczalnych. W badaniach [17] nośność na zginanie badanych belek ze skorodowanym zbrojeniem w niektórych przypadkach była niższa nawet o 50%. W belkach badanych przez [18], w których skorodowało 6% masy zbrojenia, stwierdzono spadek nośności do 30% i zwiększone ugięcia o 40–70% w porównaniu z belkami referencyjnymi.

## Podsumowanie

Procesy niszczenia konstrukcji żelbetowych spowodowane korozją betonu i zbrojenia mogą spowodować, że konstrukcja obiektu nie będzie w stanie spełniać podstawowych wymagań dotyczących nie tylko jej nośności i użyteczności przed upływem projektowanego czasu eksploatacji, ale także trwałości. Dlatego bardzo przydatne są stosunkowo proste narzędzia umożliwiające określenie nośności resztkowej skorodowanych elementów wykonanych z betonu zbrojonego. Zaproponowana metoda oparta na trójlinowym modelu zależności moment krzywizna pozwala na racjonalną ocenę nośności i odkształceń skorodowanych belek żelbetowych.

## Literatura

[1] PN-EN 1504-9:2010. Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.

[2] PN-EN 206:2014-04 – wersja polska. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[3] Ajdukiewicz A., 2014, Pre-norma konstrukcji betonowych – fib Model Code 2010, Polski Cement, Kraków.

[4] PN-EN 1990:2004/A1:2008. Eurokod 0. Podstawy projektowania konstrukcji.

[5] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[6] Kurdowski W., 2018, Podstawy chemiczne mineralnych materiałów budowlanych i ich właściwości, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków.

[7] Ścisławski Z., 1999, Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa.

[8] Attar A., Gencturk B., Aryan H., Wei J., 2020, Impact of Laboratory-Accelerated Aging Methods to Study Alkali-Silica Reaction and Reinforcement Corrosion on the Properties of Concrete, Materials, 13, 3273; doi:10.3390/mat13153273.

[9] Ali T.A., 2017, Effect of ground water sodium chloride attack on reinforced concrete footings, „Journal of Geotechnical Engineering”, 4(1), s. 1–8.

[10] Vecchio, F.J., and Collins, M.P., 1993, Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, „Journal of Structural Engineering, ASCE”, 119(12), s. 3590–3610.

[11] Chen H., Zhanf J., Yang J., Ye F., 2018, Experimental Investigation into Corrosion Effect on Mechanical Properties of High Strength Steel Bars under Dynamic Loadings, „International Journal of Corrosion”, 2018, Article ID 7169681, s. 1–13.

[12] Du Y.G., Clark L.A., Chan A.H.C., 2005, Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars, „Magazine of Concrete Research”, 57(7), s. 407–419.

[13] Shopov, Bonev B., 2019, Change of Young's Module on Steel Specimens with Corrosion by Experiment, „International Journal of Modeling and Optimization”, 9(2), s. 102–107.

[14] Taha N.A., 2016, Study of the behavior of corroded steel bar and convenient method of repairing, „HBRC Journal”, 12, s. 107–113.

[15] Korentz J., 2019, A model of the moment-curvature relationship for reinforced concrete beams strengthened under load, Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures, Kraków, Poland, s. 263–264.

[16] Korentz J., 2009, Model zależności moment-krzywizna dla belek żelbetowych – ocena ciągłości, Problemy naukowo-badawcze budownictwa, 55. konferencja naukowa KLiW PAN oraz KN PZITB, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, s. 231–238.

[17] Azad A.K., Ahmad S., Al-Gohi A., 2010, Flexural strength of corroded reinforced concrete beams, „Magazine of Concrete Research”, 62, s. 405–414.

[18] Ballim Y., Reid J.C.R., Kemp A.R., 2001, Deflection of TRC beams under simultaneous load and steel corrosion, „Magazine of Concrete Research”, 53(3), s. 171–181.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.2114

## PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Korentz Jacek, 2021, Konsekwencje uszkodzeń korozyjnych belek żelbetowych, „Builder” 9 (290). DOI: 10.5604/01.3001.0015.2114

**Streszczenie:** Konstrukcje żelbetowe w czasie eksploatacji pracują w różnych warunkach środowiskowych, które wywołują korozję prętów zbrojeniowych i betonu o różnej intensywności. Wówczas mamy do czynienia z uszkodzeniami korozyjnymi, którym towarzyszą zarysowanie oraz ubytki betonu, zmniejszenie przekroju prętów zbrojeniowych, a także obniżenie parametrów cech mechanicznych betonu i stali zbrojeniowej. W konsekwencji wpływa to na dalsze bezpieczeństwo oraz użyteczność konstrukcji żelbetowych. W artykule przedstawiono przykłady oceny nośności i odkształcalności belek żelbetowych o różnym stanie oraz zakresie uszkodzeń korozyjnych betonu i prętów zbrojeniowych. Przeprowadzone analizy wykazały, że uszkodzenia korozyjne prętów zbrojeniowych oraz betonu mogą spowodować istotny spadek nośności i zwiększone ugięcia belek żelbetowych.

**Słowa kluczowe:** belka żelbetowa, korozja betonu, korozja zbrojenia, nośność na zginanie, ugięcie

**Abstract: CONSEQUENCES OF CORROSION DAMAGE TO REINFORCED CONCRETE BEAMS.** Reinforced concrete structures work in various environmental conditions during their service life, which cause corrosion of reinforcing bars and concrete of various intensity. In such cases we are dealing with corrosion damage, which is accompanied by scratching and loss of concrete, reduction of cross-sectional area of reinforcing bars as well as lowering the parameters of mechanical properties of concrete and reinforcing steel. Consequently, this affects the further safety and usability of reinforced concrete structures. This paper presents an analytical method and examples of evaluating the load-bearing capacity and deformability of reinforced concrete beams with different state and scope of corrosion damage to concrete and reinforcing bars. The analyses have shown that corrosion damage to rebar and concrete can cause a significant decrease in the load-bearing capacity and increased deflection of reinforced concrete beams.

**Keywords:** RC beam, corrosion of concrete, corrosion of reinforcement, flexural capacity, deflection