

Aniela Glinicka

Wpływ powierzchniowej korozji lokalnej na zmiany charakterystyk geometrycznych przekrojów poprzecznych prętów stalowych i analiza możliwych następstw

JEL: L63 DOI: 10.24136/atest.2019.006
Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule przeanalizowano skutki działania powierzchniowej korozji atmosferycznej na elementy stalowe. Przedstawiono krótki przegląd wybranych skorodowanych konstrukcji drogowych w infrastrukturze miejskiej. Aby przeprowadzić obliczenia nośności i odkształcalności elementów skorodowanej konstrukcji, trzeba zacząć od wyznaczenia jej wymiarów geometrycznych po korozji. Charakterystyki geometryczne skorodowanych elementów są zmienione w porównaniu do elementów nowych. Ma to wpływ na nośność oraz ugięcia prętów.

Słowa kluczowe: korozja prętów stalowych, korozja barier drogowych.

Wstęp

Kształtowniki stalowe wbudowane w wielu elementach konstrukcji infrastruktury miejskiej, w czasie eksploatacji są poddane obciążeniom statycznym lub dynamicznym oraz wpływom środowiskowym, a więc często ulegają korozji. Zabezpieczenie przed korozją jest jednym z podstawowych wymagań stawianym nowo budowanym konstrukcjom stalowym. Jednak mimo tego wraz z upływem czasu nawet dobrze zabezpieczone elementy ulegają korozji, która ma charakter lokalny lub globalny. Przyczyną korozji zwykle są zmiany wilgotności powietrza i opady atmosferyczne. Jednak równie istotne może to być agresywne działanie środowiska w postaci kwaśnych deszczy oraz różnego rodzaju awarie i zanieczyszczenia czy też brak bieżących napraw.

Efektom korozji konstrukcji stalowej jest zwykle ubytek grubości przekrojów poprzecznych kształtowników, z których jest ona zbudowana. Ubytek ten ma wpływ na nośność i deformacje eksploatowanej konstrukcji. Wpływ ten można oszacować obliczeniowo, jeśli znamy związek opisujący ubytek korozji w czasie i jej rozkład na skorodowanym elemencie. Rozkład ubytków korozyjnych i ich grubość można ocenić doświadczalnie np. metodą ultradźwiękową [1]. Związek opisujący ubytek korozji w czasie można też określić doświadczalnie w laboratorium lub korzystając z literatury (np. [2]).

W niniejszej pracy przedyskutowano wpływ lokalnej korozji atmosferycznej na zmiany charakterystyk geometrycznych i dalsze następstwa na przykładzie spotykanych w rzeczywistych konstrukcjach przekrojów: tj. przekroju pierścieniowym i wybranym przekroju cienkościennym giętym.

1. Przykłady skorodowanych elementów konstrukcji w infrastrukturze miejskiej

Na rys. 1-6 przedstawiono wybrane przykłady elementów konstrukcji stalowych, które uległy korozji w atmosferze miejskiej. Należy nadmienić, że szybkość korozji stali niestopowej w atmosferze miejskiej, która według [2, 3] mieści się w przedziale $0,008 \pm 0,2$ [mm/rok], może być zwiększona ze względu na zaistnienie agresywnych czynników środowiskowych. Powiększenie tempa korozji stali wywołuje zwiększona wilgotność i temperatura, pyły, gazy oraz

różne czynniki zanieczyszczające atmosferę takie jak: tlenki azotu, dwutlenek siarki, dwutlenek węgla, jony chloru, amoniak i jego sole, ozon, kwasy, opady organiczne itd. [4].

Na rys. 1 przedstawiono widok skorodowanych tymczasowych kratowych podpór wiaduktu w mieście; znajdują się one w środowisku wilgotnym z powodu przeciekania wody z wiaduktu. Konstrukcja stalowa była zabezpieczona farbą ochronną, jednak w tych warunkach środowiskowych uległa korozji, która najintensywniejsza okazała się być na dolnych podporach każdej wieży i w dolnych węzłach (rys. 2). Tempo korozji w tych obszarach było największe. W pracy [5] opisującej korozję dźwigara stalowego w podobnych warunkach środowiskowych ustalono trzy różne szybkości korozji, w tym największą na dolnej podporze dźwigara.



Rys. 1. Widok skorodowanych tymczasowych podpór kratowych wiaduktu potwierdzający różne tempa korozji obiektu (fot. własna)



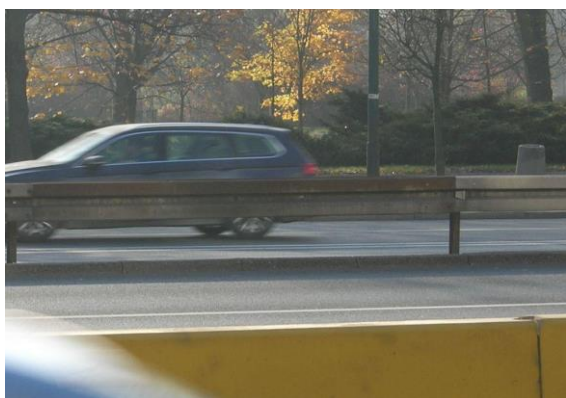
Rys. 2. Widok dolnego, najbardziej lokalnie skorodowanego, węzła tymczasowej podpory kratowej wiaduktu (fot. własna)

Na rys. 3 zilustrowano rurociąg skorodowany lokalnie na górnej powierzchni i umocowany na skorodowanej globalnie stalowej konstrukcji wsporczej. Rurociąg skorodował w atmosferze miejskiej.



Rys. 3. Widok globalnie skorodowanej konstrukcji wsporczej rurociągu skorodowanego lokalnie (fot. własna)

Na rys. 4 zilustrowano skorodowaną lokalnie, w górnym pasie profilu giętego, barierę ochronną. Drogowie bariery tego rodzaju mają za zadanie zapewnić bezpieczeństwo ruchu samochodowego w drodze [6]. Na rys. 5 przedstawiono skorodowane słupki podporowe, do których się mocuje profilowaną taśmę stalową bariery [7]. Zarówno taśma profilowana bariery z rys. 4 jak i słupki z rys. 5 były pokryte powłoką cynkową. Bariery drogowe mogą być ochlapywane wodą przez samochody i poddane działaniu zanieczyszczeń pochodzących z samochodów.



Rys. 4. Widok bariery drogowej lokalnie skorodowanej (fot. własna)



Rys. 5. Widok bariery drogowej z globalnie skorodowanymi słupkami podporowymi (fot. własna)

Auta emitują dwutlenek węgla, dwutlenek siarki, tlenek węgla, ozon, dwutlenek azotu tym silniej, im większe jest natężenie ruchu samochodowego.

Na rys. 6 przedstawiono widok stalowej rurowej bariery ochronnej skorodowanej lokalnie przy podporach i globalnie na długości; bariera znajduje się na małym moście w mieście [8].



Rys. 6. Widok skorodowanej bariery na moście (fot. z pracy [8])

Z przedstawionych przykładów widać, że skorodowane elementy konstrukcji stalowych uległy zmianom na powierzchni w porównaniu do elementów w stanie początkowym. Zatem ocena wpływu korozji powierzchniowej na pracę skorodowanej konstrukcji jest istotna.

2.Zmiany charakterystyk geometrycznych skorodowanych przekrojów poprzecznych

Jeśli element konstrukcji jest skorodowany powierzchniowo, to można wyznaczyć ubytki grubości ścianek i określić rozkłady tych ubytków. Ponieważ konstrukcje i elementy konstrukcji są poddane działaniu obciążeń, to w obliczeniach według norm, rozwiązaniach ścisłych i obliczeniach MES należy podać aktualną (po korozji) geometrię elementów. Postępowanie takie jest opisane w pracach [1, 9, 10].

W pracach [11, 12] przeanalizowano utratę grubości ścianek przez cienkościennie przekroje otwarte. Wykorzystując teorię prętów cienkościennych [13], w której przekroje sprowadza się do linii środkowej można zapisać następujące wzory, według których oblicza się pole przekroju A , stałą skręcania K , momenty bezwładności J_y i J_z oraz wycinkowy moment bezwładności J_ω :

$$A = \sum_{i=1}^n t_i s_i, \quad K_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n t_i s_i^3,$$

$$J_y = \sum_{i=1}^n t_i \int_{l_i} [z(s_i)]^2 ds_i, \quad J_z = \sum_{i=1}^n t_i \int_{l_i} [y(s_i)]^2 ds_i, \quad (1)$$

$$J_\omega = \sum_{i=1}^n t_i \int_{l_i} [\omega(s_i)]^2 ds_i,$$

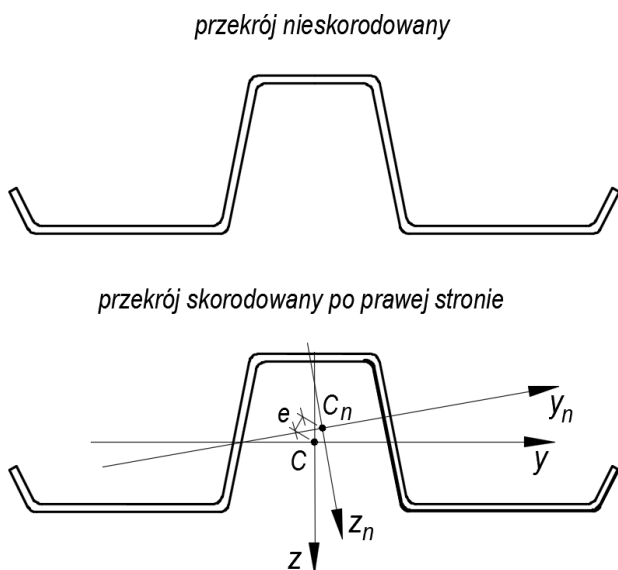
gdzie:

t_i – grubość cienkościennej ścianki przekroju,

s_i – długość ścianki lub współrzędna po linii środkowej ścianki.

W przypadku lokalnej korozji, czyli zmniejszenia się grubości t_i co najmniej jednej ścianki, wartości wyżej wymienionych charakterystyk się zmniejszają. Na rys. 7 pokazano przekrój poprzeczny

profilowanej taśmy stalowej stosowanej na bariery drogowe (takie same stalowe taśmy profilowane są zilustrowane na rys. 4 i 5.) Kształtownik ten został wygięty z blachy o grubości 3 mm, rzut poziomy profilu ma długość 310 mm; wymiary zaczerpnięto z pracy [7].



Rys. 7. Przekrój poprzeczny skorodowanej lokalnie taśmy stalowej bariery drogowej; C_n , y_n , z_n – nowy układ osi centralnych.

Pokazany na rys. 7 przekrój nieskorodowany przy obciążeniu siłą prostopadłą do osi y i o linii działania pokrywającą się z osią z jest jednokierunkowo zginany. Na skutek ubytku korozyjnego grubości dolnej prawej ścianki, a więc niesymetrycznego, środek ciężkości przekroju przesuwają się do punktu C_n i układ osi centralnych y_n , z_n obraca się. Występuje mimośród e , a w ściankach profilu powstaje złożony stan naprężenia. Wobec tego obliczenia nośności i ugięcia stają się bardziej złożone.

W wypadku cienkościenniej rury o przekroju pierścieniowym, przy obciążeniu siłą prostopadłą do osi y i o linii działania pokrywającą się z osią z , skorodowanej zewnętrznie po okręgu symetrycznie względem osi z – rys. 8 – charakterystyki geometryczne oblicza się wg wzorów [1]:

$$A = \pi D t, \quad A_n = \pi D \left(t - \frac{\varepsilon}{2} \right),$$

$$J_y = \frac{\pi D^3}{8} \left(t - \frac{\varepsilon}{2} \right), \quad J_{y_n} = \frac{\pi D^3}{8} \left(t - \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{D^3 \varepsilon^2}{\pi^3 \left(t - \frac{\varepsilon}{2} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

A , A_n – pole przekroju początkowego i skorodowanego,

t – początkowa grubość pierścienia,

D – średnica pierścienia, $t \ll D$,

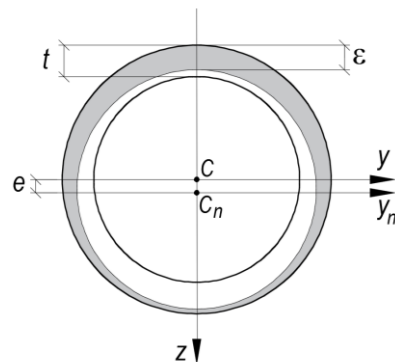
ε – maksymalna utrata grubości ścianki cienkościenniej skorodowanej po okręgu, rys. 8,

J_y , J_{y_n} – moment bezwładności przekroju początkowego i skorodowanego.

Idealizacja kształtu rzeczywistej skorodowanej rury pierścieniowej może być różna, a więc inna niż pokazano na rys. 8. Np. w pracy [10] zauważono, że idealizacja może być przedstawiona jako: równomierny ubytek grubości ścianki na części łuku, ubytek paraboliczny lub ubytek eliptyczny grubości ścianki na części łuku. Na skutek lokalnej korozji ścianki w przekroju poprzecznym układ osi

centralnych y , z zajmuje nowe położenie y_n , z_n ; pojawia się mimośród e ; rys. 8. W ściankach takiej rury wystąpi złożony stan naprężenia.

Wpływ zmiany charakterystyk geometrycznych przekrojów poprzecznych skorodowanych powierzchniowo prętów na nośność i stateczność przeanalizowano w pracach [12, 11, 14, 15], opracowanych z udziałem Autorki. Zmniejszenie wartości charakterystyk geometrycznych ogólnie zmniejsza nośność elementu i zwiększa jego ugięcia.



Rys. 8. Idealizacja kształtu skorodowanej zewnętrznie rury (opis w tekście)

3. Przykład wpływu zmiany charakterystyk geometrycznych skorodowanych przekrojów poprzecznych na podatność bariery

Weźmy teraz pod uwagę barierę ochronną, jak ta na rys. 6, złożoną z siedmiu podłużnych równoległych rur stalowych o jednakowych wymiarach, skorodowanych równomiernie powierzchniowo na całej długości, które zostały zamocowane na obu końcach w słupkach betonowych. Zakłada się, że korozja wewnętrzna nie wystąpiła. Energia pochłaniania przez barierę belkową, przy założeniu jej sprężysto-liniowego zachowania się, wynosi:

$$E_p = 0,5 P y_{\max} \quad (3)$$

gdzie:

P – siła działająca prostopadle, wzdłuż osi y , do bariery i wywołująca jej największe obciążenie,

y_{\max} – strzałka ugięcia; maksymalne ugięcie bariery w punkcie i w kierunku działania siły P .

Energia kinetyczna E_k przy najeździe pojazdu samochodowego na barierę jest [16]:

$$E_k = 0,5 m (v \sin \beta)^2 \quad (4)$$

gdzie:

m – masa pojazdu,

v – prędkość uderzenia pojazdu w barierę pod kątem β .

Pozioma strzałka ugięcia bariery – belki przy obustronnym jej utwierdzeniu jest:

$$y_{\max} = \frac{P l^3}{192 E J_z} \quad (5)$$

gdzie:

l – rozstaw podpór,

E – moduł Younga,

J_z – moment bezwładności przekroju poprzecznego.

Jeśli siła $P = \text{const.}$ oraz moment bezwładności J_z maleje, to strzałka ugięcia bariery y_{\max} rośnie, a więc bariera staje się bardziej podatna.

W pracy [16] podano miary sztywności bariery; w ogólności bariery niepodatne mają małe strzałki ugięcia, a bariery podatne duże

strzałki ugięcia. Dalej zakładamy, że prędkość v jest bardzo mała. Energia kinetyczna E_k jest równoważona przez sumę energii E_p i E_{ds} wg przyjętego prostego modelu:

$$E_k = E_{ds} + E_p \quad (6)$$

gdzie:

E_{ds} – energia pochłaniana przez deformacje pojazdu.

Jeśli bariera skorodowała równomiernie na całym obwodzie rury, to jest ona zginana. Jeśli bariera nie skorodowała równomiernie na obwodzie rury ale np. tak, jak widać na rysunku 8 (idealizującym rozkład ubytku korozyjnego symetrycznie względem osi x lub może ten rozkład być też symetryczny względem osi y), to jest ona zginana na mimośrodku e . W takiej sytuacji maksymalne ugięcie staje się jeszcze większe [17]. Stąd wynika, że zarówno zmniejszenie wartości J_z jak i pojawienie się mimośrodu przyczynia się do zwiększenia podatności bariery. Sytuacja taka jest możliwa wówczas, gdy nie wystąpi korozja wewnętrzna bariery.

Podsumowanie

W artykule przeanalizowano skutki jakie może wywołać korozja powierzchniowa zewnętrzna z punktu widzenia mechaniki. Korozja powierzchniowa równomierna powoduje zmniejszenie grubości elementu, a zatem jest przyczyną zmian charakterystyk geometrycznych przekrojów poprzecznych. Korozja powierzchniowa równomierna lokalna (np. na odcinku przekroju cienkościennego) lub korozja powierzchniowa o rozkładzie nierównomiernym powoduje także mimośrody działania obciążeń. Korozja powierzchniowa zwiększa podatność bariery. Należy tutaj nadmienić, że w przeprowadzonej dyskusji założono, że nie wystąpiła korozja wewnętrzna elementu.

Bibliografia:

1. Lutes L.D., Kohutek T.L., Ellison B.K., Konen K.F., Assessing the compressive strength of corroded tubular members. *Applied Ocean research*, 2001, 23, s. 263-268.
2. Roberge P., R., *Corrosion Engineering. Principle and Practice*. McGraw-Hill, USA, 2008.
3. ISO 9223, 1992. *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification*.
4. Baboian R. (ed): *Corrosion Engineering*. Nace International, Houston, 2002.
5. Liula C., Miyashita T., Nagail M., Analytical study on shear capacity of steel I-girders with local corrosion nearby supports. *Procedia Engineering* 2011, 14, s. 2276-2284.
6. Dębski H., Ferdynus M., Krupa P., Bariery ochronne jako środki bezpieczeństwa transportu drogowego, *Logistyka* 2015, CD2 str. 2926-2931.
7. Mikołajków L., *Drogowe bariery ochronne*. WKiŁ, 1983.
8. Glinicka A., Wasilewska K., Niebezpieczeństwo korozji infrastruktury miejskiej, „*Logistyka*” 2011, nr 6, s.1133 – 1138.
9. Rahgozar R.: Remaining capacity assessment of corrosion dam-aged beams using minimum curves, „*Journal of Constructional Steel Research*”, 65, 2009, s. 299-307.
10. Yanfei C., Xin L., Chai Y.H, Zhou J., Assessment of the flexural capacity of corroded steel pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2010, 87, s. 100-110.
11. Glinicka A., Ajdukiewicz C., Imielowski S., Effects of uniformly distributed side corrosion on thin-walled open cross-section steel columns. Skutki równomiernej korozji słupów stalowych o przekrojach cienkościennych otwartych. „*Roads and Bridges – Drogi i Mosty*”, ISSN 1643 – 1618, e-ISSN: 2449-769x, 15/2016, p.257 – 270.
12. Glinicka A., Imielowski S., Ajdukiewicz C., Influence of uniformly distributed corrosion on the compressive capacity of selected thin walled metal columns. „*Procedia Engineering*” (2015), Vol/issue 111C pp. 262 - 268, doi 10.1016/j. proeng. 2015.07.087.
13. Yu. W.W., LaBoube R.A., *Cold – Formed Steel Design*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
14. Glinicka A., Maciąg M., Wyboczenie techniczne idealnych prętów ściskanych ulegających korozji atmosferycznej. „*Inżynieria i Budownictwo*”, 2019, nr.1, str.12 – 16.
15. Glinicka A., Ajdukiewicz C., Skutki powierzchniowej korozji globalnej schodów stalowych, *Autobusy, bezpieczeństwo i ekologia*, 2017, nr. 6, str. 171-174.
16. Figiel F., Kształtowanie charakterystyk powstrzymywania pojazdów przez bariery drogowe spełniające kryteria badań zderzeniowych, *Autobusy – Eksploatacja i testy*, 2017, nr 7-8, str.175-180.
17. Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W., *Wytrzymałość materiałów*. Tom 2. Arkady, 1985.

The effect of surface corrosion of the changes to the geometric characteristic cross sections of steel rods and analysis of possible consequences

The article analyzes the effects of surface atmospheric coagulation on steel elements. A brief overview of selected corroded road structures in urban infrastructure was presented. In order to carry out calculations of the bearing capacity and deformability of elements of a corroded structure, it is necessary to start from determining its corroded geometrical dimensions. The geometric characteristics of the corroded elements are changed compared to the new element. This affects the load capacity and deflection of beams.

Keywords: corrosion of steel rods, corrosion of road barriers.

Autor:

dr hab. inż. **Aniela Glinicka**, prof. nzw. PW – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej.