

Aniela GLINICKA, Michał MACIĄG

SKUTKI POWIERZCHNIOWEJ KOROZJI ATMOSFERYCZNEJ WYBRANYCH KRATOWNIC STALOWYCH

Streszczenie

W artykule omówiono skutki powierzchniowej korozji atmosferycznej kratownic stalowych zachodzącej na powierzchniach wszystkich prętów; to znaczy korozji powierzchniowej globalnej. Obliczono siły w prętach wybranych kratownic płaskich statycznie niewyznaczalnych ustawionych poziomo (dźwigar kratowy) i pionowo (wieża kratowa) przy wielowariantowych układach obciążeń zewnętrznych przekazywanych na kratownice. Przeanalizowano skutki zniszczenia prętów ściskanych z uwzględnieniem wyboczenia. Szybkości korozji stali niestopowej korodującej w dwóch środowiskach atmosferycznych przyjęto z literatury. Przeprowadzono dyskusję zniszczenia, związanej z utratą grubości przekroju poprzecznego, prętów kratownic. W efekcie końcowym przedstawiono uzyskane z obliczeń siły w prętach kratownic przy wielowariantowym obciążeniu oraz zależności spadek nośności kratownic korodujących w dwóch atmosferach z upływem czasu.

WSTĘP

Kratownice stalowe wykonane ze stali niestopowej S235JR lub S235JRG2 występują jako konstrukcje wsporcze lub części konstrukcji wsporczych. Konstrukcje z tego materiału charakteryzują się niską odpornością na korozję atmosferyczną [1], której skutki ujawniają się wyraźnie przy braku odpowiedniego zabezpieczenia ich powierzchni. Korozja atmosferyczna zachodzi w długim czasie eksploatacji, a zwłaszcza gdy brak jest bieżących napraw. Jej skutki zależą od agresywności środowiska, a do szczególnie agresywnych należą: kwas siarkowy, morska woda, produkty zakładów chemicznych. Jest ona przyczyną niszczenia konstrukcji w czasie. Należy tu nadmienić, że nie tylko korozja powoduje niszczenie konstrukcji stalowych. Na osłabienie nośności konstrukcji wpływa znacznie więcej czynników (różne niedoskonałości w ukształtowaniu konstrukcji i w połączeniach prętów, imperfekcje materiałowe, odstępstwa od idealnego przyłożenia obciążenia, błędy montażowe itp.), które są wyszczególnione w normie przedmiotowej do projektowania konstrukcji metalowych [2]. W niniejszej pracy rozważa się tylko jeden czynnik powodujący niszczenie konstrukcji, to jest korozję. Inne czynniki niszczenie konstrukcji powiększają.

W pracy przyjęto następujące założenia:

1. Korozja jest powierzchniowa równomierna.
2. Korozja nie zachodzi wewnątrz objętości materiału.
3. Korozja obejmuje całą kratownicę, jest globalna.
4. Korozja nie powoduje zmiany cech mechanicznych materiału „zdrowego” – nieskorodowanego.
5. Rozwiązanie przeprowadzono dla materiału liniowo- sprężystego.
6. Duży wzrost temperatury nie występuje.

Celem pracy jest określenie zmian nośności korodujących kratownic w dwóch atmosferach w długim czasie. Poddano analizie dwie kratownice statycznie niewyznaczalne o takim samym kształcie skratowania. Te dwa układy konstrukcyjne są różnie usytuowane na płaszczyźnie (dźwigar kratownicowy i wieża kratownicowa), a obciążenie przyłożone zostało do przegubów w postaci sił węzłowych, które były nachylone pod kątem zmieniającym się do zera do dziewięćdziesięciu stopni.

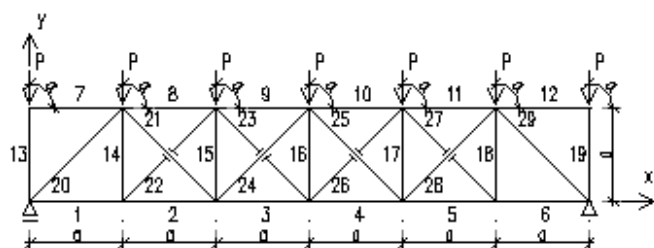
1. SCHEMATY KRATOWNIC I ZAŁOŻENIA OBLICZEŃ STATYCZNYCH

W niniejszej pracy skupiono się nad dźwigarem kratowym i wieżą kratową. Analizowane konstrukcje to odpowiednio 4-ktornie i 5-krotnie statycznie niewyznaczalne kratownice. Siły wewnętrzne zostały wyznaczone bez analizy plastycznej konstrukcji. Konstrukcja ulega zniszczeniu, gdy w dowolnym przęciu zostanie przekroczona graniczna nośność pręta na rozciąganie lub ulegnie on wyboczeniu [3]. Do obliczeń przyjęto częściowe współczynniki bezpieczeństwa: $\gamma_{M0} = 1$, $\gamma_{M1} = 1$, które są zgodnie z normą [2]. Dla poniższych kratownic przyjęto następujące założenia:

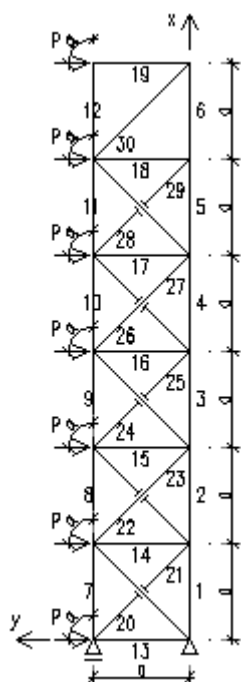
1. Kratownice obciążone są w węzłach siłą $P = 2kN$ pod różnym kątem $\alpha \in (0^\circ, 90^\circ)$.
2. Przekrojem poprzecznym prętów kratowych jest rura o średnicy wewnętrznej $d = 20mm$ i grubości ścianki $g = 2mm$. Charakterystyka geometryczna przekroju to: $A = 1,13cm^2$ (pole przekroju poprzecznego), $J = 0,464cm^2$ (moment bezwładności przekroju poprzecznego),
3. Długości prętów kratowych wynoszą $a = 1m$ oraz $a\sqrt{2} = 1,41m$. Smukłości prętów ściskanych dla przyjętego przekroju poprzecznego wynoszą odpowiednio $\lambda = 156$ i 220 . W związku ze smukłością większą od smukłości granicznej ($\lambda_{gr} \approx 100$) przyjęto sprężyste wyboczenie prętów.
4. Pręty kratowe wykonane są ze stali S235 są w stanie przeniesić siłę w przęciu o wartości $P_{wytrz} = 26,58kN$. Siła krytyczna, przy której dojdzie do wyboczenia, wynosi dla prętów o długości $a \rightarrow P = 9,15kN$ i $a\sqrt{2} \rightarrow P = 4,60kN$
5. Przyjęto model liniowej szybkości korozji [4, 5] prętów kratownic w dwóch atmosferach: miasta przemysłowego oraz morskiej w pobliżu wybrzeża.

$$\Delta g = V_p \cdot t \quad (1)$$

Gdzie: t – czas oddziaływania atmosfery; lata,
 V_p - szybkość korozji [mm/rok]; dla atmosfery miasta przemysłowego – 0,09, dla atmosfery morskiej w pobliżu wybrzeża – 0,5 [4].



Rys.1. Dźwigar kratowy płaski 4-rotnie statycznie niewyznaczalny



Rys.2. Wieża kratowa płaska 5-rotnie statycznie niewyznaczalna

2. ROZWIĄZANIA NIESKORODOWANYCH KRATOWNIC

Zniszczenie korodujących kratownic z rysunków 1 i 2 może wynikać z przekroczenia naprężeń rozciągających w pręcie lub z wyboczenia jednego z prętów [3]. Zatem konieczne jest określenie sił w najbardziej wyężonych prętach dla nieskorodowanej konstrukcji. W Tab.1 i Tab. 2 zamieszczono powyższe wyniki w momencie zniszczenia konstrukcji, gdzie:

$\cos(\alpha)$ – kąt przyłożenia sił skupionych do węzłów zgodnie z rysunkiem,

P_{max} – maksymalna siła rozciągająca/ściskająca w pręcie,

$P_{wyb} = \frac{\pi^2 E J}{(1 a_i)^2}$ – maksymalna siła jaką może przenieść pręt, aby nie ulec sprężystemu wyboczeniu wyznaczona ze wzoru Eulera (bez współczynnika bezpieczeństwa),

a_i – długość pręta ściskanego,

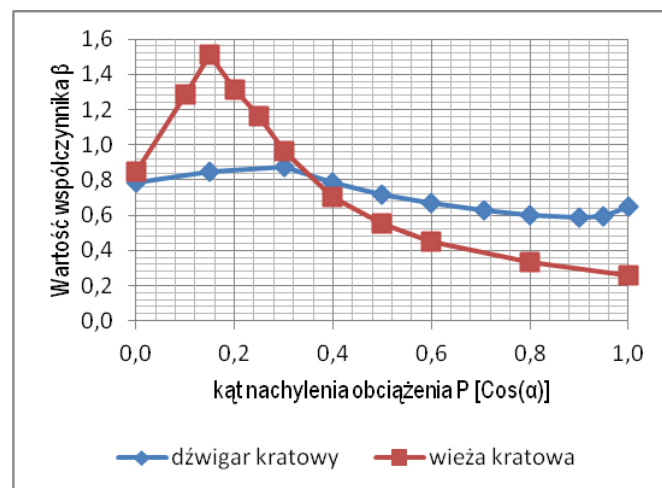
E - moduł Younga.

Zniszczenie kratownic jest zależne od stosunku maksymalnej siły podłużnej powstałej w pręcie ściskanym (P_{max}) do siły krytycznej powodującej wyboczenie (P_{wyb}). Dla analizowanego dźwigara kratowego, niezależnie od rozpatrywanego przypadku, zniszczenie konstrukcji nastąpi w skutek wyboczenia jednego z prętów (Rys.3). Zatem kratownice są w stanie przenieść mniejsze obciążenie zewnętrzne równe $P_{\beta} = \beta P$, gdzie:

P – siły przyłożone w węzłach kratownicy,

P_{β} - siła przyłożona w węzłach kratownicy powodująca wyboczenie w najbardziej wyężonym pręcie,

$\beta = \frac{P_{wyb}}{P_{max}}$ – współczynnik zmniejszający maksymalne możliwe obciążenie przyłożone w węzłach kraty.



Rys.3. Zależność kąta nachylenia sił skupionych od współczynnika redukującego maksymalną siłę możliwą do przyłożenia w kratownicy dla dźwigara kratowego i wieży kratowej

Dla wieży kratowej otrzymaliśmy, dla niektórych przypadków, wartość współczynnika $\beta > 1$. Oznacza, że w kratownicy nie dojdzie do wyboczenia prętów przy sił $P = 2kN$. Należy jednak

Tab.1. Wartości sił podłużnych w najbardziej wyężonych prętach w zależności od kąta przyłożenia sił skupionych w dźwigarze kratowym z Rys.1

$\cos(\alpha)$	1,00	0,95	0,90	0,80	0,71	0,60	0,50	0,40	0,30	0,15	0,00
P_{max}	4,35P	-3,89P	-3,91P	-3,82P	-3,67P	-3,44P	-3,80P	-4,34P	-4,81P	-5,39P	-5,83P
Pręt	3 i 4	9	29	29	29	29	6	6	6	6	6
β	0,650	0,594	0,589	0,602	0,627	0,668	0,720	0,786	0,873	0,849	0,785
Pręt	29	29	29	29	29	29	29	29	29	6	6

Tab.2. Wartości sił podłużnych w najbardziej wyężonych prętach w zależności od kąta przyłożenia sił skupionych w wieży stalowej z Rys. 2

$\cos(\alpha)$	1,00	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,00
P_{max}	18,36P	-13,76P	-10,12P	-8,32P	-6,52P	-4,74P	-3,85P	-2,96P	-2,64P	-3,56P	-5,42P
Pręt	7	1	1	1	1	1	1	1	8	7	7
β	0,26	0,33	0,45	0,55	0,70	0,97	1,16	1,31	1,51	1,29	0,84
Pręt	1	1	1	1	1	1	21	21	21	7	7

zaznaczyć, że taka sytuacja będzie miała miejsce jedynie, gdy kratownicę zaprojektujemy tak, aby wykorzystanie najbardziej wyęźnionego pręta wynosiło 100%. Zwiększając wartość siły skupionej do $P_B = 3,02 \text{ kN}$ spowoduje, że dla dowolnego przypadku, niezależnie od przyjętego przekroju dojdzie do zniszczenia kratownicy ze względu na wyoboczenie pręta.

3. SPADEK NOŚNOŚCI KORODUJĄCEJ KRATOWNICY

W dalszej części skupiono się na analizie dźwigara z Rys. 1 obciążonego siłą skupioną $P = 0,75 \text{ kN}$, przyłożoną do kratownicy pod kątem $\cos(\alpha) = 1$, w związku z globalną korozją konstrukcji. Przekroje poprzeczne oraz długości prętów przyjęto zgodnie z założeniami pkt. 1. Zniszczenie kratownicy nastąpi na skutek wyoboczenia pręta nr 29. W wyniku przyłożenia obciążenia w pręcie nr 29 powstaje siła o wartości $P_{29} = -2,66 \text{ kN}$. Wraz ze zmniejszaniem się korodującego przekroju spada maksymalna siła jaką jest w stanie przenieść pręt bez wyoboczenia.

W Tab. 3 pokazano spadek nośności kratownicy w wyniku korozji globalnej oraz zmianę charakterystyki geometrycznej przekroju poprzecznego - stalowej rury. Jako czas utraty nośności przyjęto moment, w którym siła w pręcie jest równa sile krytycznej, która powoduje wyoboczenie (P_{wyb}) lub siłę, która doprowadzi do uplastycznienia się przekroju ściskanego (P_{wytr}).

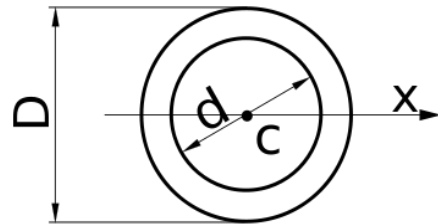
Tab.3. Spadek nośności kratownicy w czasie działania korozji globalnej w dwóch atmosferach

korozja w atmosferze miasta przemysłowego								
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	D[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	klasa przekroju nieskor.	P_{wyb} [kN]	P_{wytr} [kN]
0	0,009	2,000	1,6	1,131	0,464	1 klasa	4,60	26,58
1		1,982	1,6	1,075	0,436	1 klasa	4,33	25,25
2		1,964	1,6	1,019	0,409	1 klasa	4,06	23,94
3		1,946	1,6	0,964	0,382	1 klasa	3,80	22,65
4		1,928	1,6	0,909	0,357	1 klasa	3,54	21,36
5		1,910	1,6	0,855	0,332	1 klasa	3,29	20,08
6		1,892	1,6	0,801	0,307	1 klasa	3,05	18,82
7		1,874	1,6	0,748	0,284	1 klasa	2,82	17,57
7,69		1,862	1,6	0,711	0,268	1 klasa	2,66	16,72
korozja w atmosferze morskiej w pobliżu wybrzeża								
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	D[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	klasa przekroju nieskor.	P_{wyb} [kN]	P_{wytr} [kN]
0	0,05	2,000	1,6	1,131	0,464	1 klasa	4,60	26,58
1		1,900	1,6	0,825	0,318	1 klasa	3,16	19,38
1,38		1,862	1,6	0,712	0,268	1 klasa	2,66	16,72

Zniszczenie kratownicy z Rys.1 według wyników podanych w Tab.3 wynosi 7,69 lat w atmosferze miasta przemysłowego oraz 1,38 lat w atmosferze morskiej w pobliżu wybrzeża. W obydwu przypadkach doszło do zniszczenia w wyniku utraty stateczności jednego z prętów i zmniejszeniu się statycznej krotności niewyznaczalności kratownic.

4. KOROZJA ZEWNĘTRZNA A KOROZJA OBUSTRONNA

W celu porównania szybkości korozji porównano dwa przekroje o tym samym polu przekroju $A = 3,016 \text{ cm}^2$, ściance o grubości $g = 2 \text{ mm}$ i średnicy zewnętrznej $D = 5 \text{ cm}$. Do porównania wybrano rury o przekroju pierścieniowym i rury o przekroju kwadratowym. Charakterystyczne wymiary przekroju są zgodne z Rys.4. Przyjęto ubytek grubości ścianek przekrojów jedynie po zewnętrznej stronie, narażonej na działanie czynników atmosferycznych, oraz dwustronnym przebiegu korozji (przy złym nieuszczelnym zamknięciu przekroju). Porównano obniżenie nośności pręta w dwóch atmosferach korozyjnych (tj. takich jak w poprzednich punktach).



Rys.4. Przekrój poprzeczny prętów kratownic narażony na działanie korozji globalnej.

W Tab.4. i Tab.5. pokazano wpływ korozji na przekrój prętów kratownic. Ze względu na najmniejszą powierzchnię narażoną na działanie czynników atmosferycznych przekroje odpowiednio zamknięte korodują dużo wolniej, a tym samym zapewniają projektowaną nośność obliczeniową konstrukcji. Niedokładne zamknięcie otworów może przyczynić się do lokalnej korozji obustronnej, co może przyczynić się do zniszczenia konstrukcji w miejscu niekrytycznych sił.

Tab.4. Spadek nośności kratownicy w czasie działania korozji globalnej w dwóch atmosferach – korozja zewnętrzna

środowisko miasta przemysłowego								
przekrój rury pierścieniowy								
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	gr blachy nieskor. [cm]	D[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	spadek nośności[%]	
0	0,009	0,2	5,000	4,6	3,016	8,701	100,00	
1		0,2	4,982	4,6	2,875	8,262	94,95	
2		0,2	4,964	4,6	2,734	7,827	89,95	
3		0,2	4,946	4,6	2,594	7,397	85,01	
4		0,2	4,928	4,6	2,455	6,972	80,12	
5		0,2	4,910	4,6	2,315	6,551	75,29	
6		0,2	4,892	4,6	2,177	6,135	70,51	
7		0,2	4,874	4,6	2,039	5,723	65,78	
8		0,2	4,856	4,6	1,901	5,316	61,10	
9		0,2	4,838	4,6	1,764	4,914	56,48	
10		0,2	4,820	4,6	1,628	4,516	51,90	
środowisko na wybrzeżu								
przekrój rury pierścieniowy								
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	gr blachy nieskor. [cm]	D[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	spadek nośności[%]	
0	0,05	0,2	5,000	4,6	3,016	8,701	100,00	
0,5		0,2	4,950	4,6	2,625	7,492	86,11	
1		0,2	4,900	4,6	2,238	6,319	72,63	
1,5		0,2	4,850	4,6	1,856	5,182	59,55	
2		0,2	4,800	4,6	1,477	4,079	46,88	

Tab.5. Spadek nośności kratownicy w czasie działania korozji globalnej w dwóch atmosferach – korozja wewnętrzna

środowisko miasta przemysłowego							
przekrój rury kwadratowej							
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	gr blachy nieskor. [cm]	H[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	spadek nośności[%]
0	0,009	0,2	5,000	4,600	3,016	8,701	100,00
1		0,2	4,982	4,618	2,744	7,916	90,97
2		0,2	4,964	4,636	2,473	7,131	81,95
3		0,2	4,946	4,654	2,202	6,347	72,94
4		0,2	4,928	4,672	1,930	5,563	63,93
5		0,2	4,910	4,690	1,659	4,780	54,93
6		0,2	4,892	4,708	1,387	3,997	45,94
7		0,2	4,874	4,726	1,116	3,215	36,94
8		0,2	4,856	4,744	0,844	2,432	27,96
9		0,2	4,838	4,762	0,573	1,650	18,97
10		0,2	4,820	4,780	0,302	0,869	9,98
środowisko na wybrzeżu							
przekrój rury kwadratowej							
czas [lata]	ubytek [cm/rok]	gr blachy nieskor. [cm]	H[cm]	d[cm]	A[cm ²]	J[cm ⁴]	spadek nośności[%]
0	0,05	0,2	5,000	4,600	3,016	8,701	100,00
0,5		0,2	4,950	4,650	2,262	6,521	74,94
1		0,2	4,900	4,700	1,508	4,345	49,94
1,5		0,2	4,850	4,750	0,754	2,172	24,96
2		0,2	4,800	4,800	0,000	0,000	0,00

Z wyników zamieszczonych w tab. 4 i 5 widać znaczny spadek nośności kratownicy w czasie jej korodowania.

PODSUMOWANIE

Z przedstawionych obliczeń wynikają następujące wnioski:

1. W większości kratownic z prętami o smukłości $\lambda > \lambda_{gr}$ zniszczenie nastąpi na skutek wyboczenia przynajmniej jednego z prętów.
2. Ze względu na niszczące działanie korozji, konstrukcje metalowe należy obowiązkowo zabezpieczać warstwami ochronnymi, przeciwkorozyjnymi. Szczególne znaczenie ma to w środowisku o dużej agresywności (jakim jest atmosfera morska w pobliżu wybrzeża), co istotnie zwiększa czas eksploatacji konstrukcji i zachowanie wymaganej nośności granicznej. Powłoki należy przyjąć zgodnie z normą PN-EN ISO 12944-5 [6] w zależności od miejsca ekspozycji konstrukcji oraz innych czynników mających wpływ na wymaganą grubość powłoki ochronnej.
3. Ze względu na obniżanie się nośności konstrukcji w miarę korozji kratownic, zaleca się projektowanie elementów nośnych z mniejszym wykorzystaniem nośności, niż jest to wymagane według warunków normowych.

4. W przypadku ekspozycji konstrukcji w warunkach środowiska przyspieszającego proces korozji wewnątrz prętów zamkniętych należy dokładnie zabezpieczyć przed środowiskiem zewnętrznym, a co za tym idzie przed możliwością korodowania elementów od środka.

BIBLIOGRAFIA

1. Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., *Stalowe konstrukcje specjalne*. Arkady 1995.
2. PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3, *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
3. Glinicka A., Sedlin K., *Wzrost intensywności oddziaływania korozji równomiernej na nośność kratownic stalowych*. Autobusy 12/2016, str. 162 – 165.
4. Baboian R. (ed): *Corrosion Engineering*. Nace International, Houston, 2002.
5. Ajdukiewicz C., Glinicka A., *Skutki powierzchniowej korozji globalnej schodów stalowych*. Autobusy 6/2017, str. 171 – 174.
6. PN-EN-ISO – 12944-5. *Przeciwkorozyjna ochrona stali systemami powłokowymi*.

EFFECTS OF SURFACE-BASED ATMOSPHERIC CORROSION OF SELECTED STEEL TRUSSES

Abstract

The article discusses the effects of atmospheric corrosion on the steel trusses over the entire surface of all rods. The forces in selected rods were calculated by means of multi-variable external loads transmitted to the trusses. Analysis of the impact of compression rods with buckling effect. Corrosion of trusses was global. Corrosion rates of corrosive non-alloy steel in two atmospheric environments were taken from the literature. There was a discussion of the destruction, related to the loss of cross-sectional thickness of rods of the truss. As a consequence, the obtained results from the calculation of the force in the rods of the trusses with the multivariate load, the graphs in the relation lowered system load - the speed of corrosion.

Autorzy:

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