

# Zwiększanie trwałości kominów stalowych

Mgr inż. Ewa Szumigała, dr hab. inż. Maciej Szumigała, Politechnika Poznańska

## 1. Wprowadzenie

Trwałość konstrukcji stalowych rozumiana jako okres planowanej, bezpiecznej i ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji jest różna, lecz stosunkowo krótka w porównaniu z konstrukcjami wykonanymi z innych materiałów. Wśród różnych rodzajów konstrukcji stalowych kminy należą zapewne do obiektów o małej trwałości i wymagają dość systematycznego monitoringu technicznego, aby nie przeoczyć sytuacji wyczerpania nośności, spowodowanego najczęściej postępowaniem korozji.

## 2. Czynniki wpływające na trwałość kominów stalowych

O typowych kominach stalowych należy mówić w czasie przeszłym, gdyż powszechność ich stosowania, szczególnie we wszelkich kotłowniach, minęła z powodu zmiany technologii ogrzewania i przejścia większości kotłowni na gaz ziemny. Kminy stalowe należą do konstrukcji o stosunkowo niskiej trwałości. Trwałość ich zależy od konstrukcji, schematu statycznego,

agresywności i temperatury spalin oraz parametrów dynamicznych.

Są to w zasadzie konstrukcje powłokowe, gdyż w jednostkowym elemencie przekroju poziomego występują zasadniczo siły ściskające albo rozciągające. Również zjawiska stateczności lokalnej analizowane są jak w powłokach.

Natomiast jako całość kminy opisuje się za pomocą modelu prętowego. Zatem, jeżeli traktować komin jako całość, to możemy wyróżnić następujące schematy statyczne:

- kminy wspornikowe,
- kminy z podporą lub podporami pośrednimi niepodatnymi,
- kminy z podporami podatnymi.

Schematy z podporami podatnymi to kminy z odciągami (trzema lub czterema na jednym lub dwóch poziomach). Do podpór niepodatnych (lub o małej podatności) zalicza się trójnogi, wieże kratowe lub podparcia przy budynkach.

Agresywność spalin i ich temperatura, rodzaj wykładziny lub jej brak oraz gatunek zastosowanej stali wpływają istotnie na trwałość kmina, gdyż czynniki te decydują o postępie korozji. O postępie korozji decydują również miejsca wykroplenia kondensatu (np. miej-

sca lokalnego schładzania – wokół żeberk w stykach śrubowych segmentów kmina). Postęp korozji atmosferycznej po stronie zewnętrznej kmina (nawet przy braku odpowiedniej konserwacji malarskiej) jest nieznaczny w stosunku do korozji wewnątrz przewodu. Roczny ubytek korozyjny wynosi przeciętnie 0,1–0,3 mm/rok. Niekiedy może dochodzić do 0,5 mm/rok lub więcej. Przeprowadzone przez autorów wieloletnie badania tych samych kominów potwierdziły powyższe wartości zbliżone do 0,4 mm/rok oraz to, że postęp korozji jest bardzo nierównomierny w czasie oraz na długości kmina i wyraźnie się zwiększa w końcowej fazie eksploatacji (tab. 2).

Schemat statyczny kmina wpływa na jego trwałość w różny sposób:

- wraz ze statyczną niewyznaczalnością kmina wzrasta zapas bezpieczeństwa i również trwałość;
- podpory pośrednie kmina na jego wysokości zmniejszają wartość maksymalną i wyrównują pole rozkładu momentów zginających;
- podpory pośrednie kmina mogą korzystnie wpływać na stateczność ogólną i niekorzystnie

**Tabela 1.** Przykład pomiarów grubości blach płaszcza kmina

Miejsce pomiaru	Średnia pomierzona grubość									
	1994	1997	1999	2000	2003	XI 2003	V 2004	V 2006	V 2007	V 2009
16	12	11,8	11,1	10,8	10,45	10,52	9,84	9,8	9,75	<b>9,38</b>
15	12,1	11,7	11,3	10,88	10,2	10,05	10,05	9,45	9	<b>7,49</b>
14	11,7	10,1	9,6	9,38	8,2	7,48	6,88	5,8	6,7	<b>5,6</b>
13	11,5	10,6	10,1	9,77	8,22	8,12	7,65	7,2	6,4	<b>6,34</b>
12	12,2	10,5	10,1	9,6	8,38	8,35	8,35	7,4	6,55	<b>6,21</b>
10	10,7	9,3	9,1	8,9	6,13	5,85	5,68	4,9	4,2	<b>3,97</b>
9	9,4	9	8,4	7,85	6,75	6,28	6,13	4,9	4,76	<b>3,6</b>
7	9,3	8	7,7	7,15	5,93	5,94	5,63	4,85	4,33	<b>3,65</b>
6	9	8,6	8,3	7,75	7,17	6,95	6,18	5,45	5	<b>3,82</b>
4	10	8,3	8	7,82	6,32	5,86	5,76	4,5	4,06	<b>2,66</b>
3	10,3	8,3	7,7	7,42	6,2	6	5,8	5,2	4,72	<b>2,88</b>

**Tabela 2.** Ubytki korozyjne w czasie

	Ubytek kor. 1994–1997	Ubytek roczny	Ubytek kor. 1997–1999	Ubytek roczny	Ubytek kor. 1999–2000	Ubytek roczny	Ubytek kor. 2000–2003	Ubytek roczny	Ubytek kor. 2003–2003	
16	0,2	0,07	0,7	0,35	0,3	0,3	0,35	0,14	-0,07	
15	0,4	0,13	0,4	0,2	0,42	0,42	0,68	0,272	0,15	
14	1,6	0,53	0,5	0,25	0,22	0,22	1,18	0,472	0,72	
13	0,9	0,3	0,5	0,25	0,33	0,33	1,55	0,62	0,1	
12	1,7	0,57	0,4	0,2	0,5	0,5	1,22	0,488	0,03	
10	1,4	0,47	0,2	0,1	0,2	0,2	2,77	1,108	0,28	
9	0,4	0,13	0,6	0,3	0,55	0,55	1,1	0,44	0,47	
7	1,3	0,43	0,3	0,15	0,55	0,55	1,22	0,488	-0,01	
6	0,4	0,13	0,3	0,15	0,55	0,55	0,58	0,232	0,22	
4	1,7	0,57	0,3	0,15	0,18	0,18	1,5	0,6	0,46	
3	2	0,69	0,6	0,3	0,28	0,28	1,22	0,488	0,2	

na stateczność lokalną (dodatko-  
wa ściskająca siła normalna od od-  
ciągów);

– podpory pośrednie komina  
zmieniają parametry dynamiczne  
(często polepszają).

Wyczerpanie nośności komina  
po określonym czasie eksploatacji  
(trwałość) może nastąpić przez:

– uplastycznienie przekroju (lub  
osiągnięcie przez naprężenia war-  
tości obliczeniowej  $f_d$ );

– utratę stateczności lokalnej  
w przekroju;

– powstanie „łańcucha kinema-  
tycznego” na skutek jw.;

– powstanie „łańcucha kinematycz-  
nego” na skutek zmiany schematu  
podparcia (zerwanie odciążu);

– zmęczenie materiału na skutek  
drażeń poprzecznych wywołanych  
wirami Benarda-Karmana;

– zniszczenie styków śrubowych  
lub spoin między segmentami;

– pojawienie się nadmiernych prze-  
mieszczeń, co może wpływać na  
pole sił wewnętrznych i warunki  
eksploatacji.

O wyczerpaniu nośności decyduje  
często kilka warunków wraz z po-  
stępem korozji.

Problem zwiększenia trwałości ko-  
minów stalowych jest zawsze kom-  
promisem między analizą ekono-  
miczną i warunkami technicznymi.  
Teoretycznie można by komin za-  
projektować z bardzo grubych  
blach, uwzględniając wszystkie  
możliwe naddatki korozyjne. Pro-

blemem byłoby jego wykonanie  
oraz znaczna masa.

Komin wspornikowy do wysoko-  
ści 30 m wykazuje stosunkowo  
małe zużycie stali (prosta kon-  
strukcja), ale wymaga znacznego  
fundamentu. Komin z odciążami  
może być znacznie wyższy, gr-  
bości blach mniejsze i mniejszy  
fundament, lecz wymaga dużo  
wolnej przestrzeni oraz dodatko-  
wych fundamentów dla zakotwie-  
nia odciągów. Komin w trójnogu  
wymaga kosztownej konstrukcji  
trójnogu, fundament trzonu ko-  
mina jest mniejszy, ale konieczny  
jest fundament pod trójnog. Gr-  
bości maksymalne blach są mniej-  
sze niż we wsporniku i po skoro-  
dowaniu trzonu warto wymienić  
go na nowy.

Komin w kratownicy jest znacz-  
nie droższy jako całość, ale może  
być długo eksploatowany po wie-  
lokrotnej wymianie trzonu zazwy-  
czaj z cienkich blach. Wymagany  
jest stosunkowo duży fundament.  
Szukając zatem kompromisu  
w projektowaniu kominów i zwięk-  
szaniu trwałości należy brać pod  
uwagę całość konstrukcji, tj.:  
trzon, konstrukcję wsporczą i fun-  
dament.

O trwałości poprawnie zaprojekto-  
wanego komina decyduje przede  
wszystkim, jak już wyżej wspo-  
mniano, postępowanie korozji. Proces  
ten można w różny sposób opóź-  
nić:

– zastosowanie wykładzin ochron-  
nych wewnątrz trzonu komina;

– zastosowanie stali trudnordze-  
wiających;

– zastosowanie oczyszczania spa-  
lin (filtry, cyklony),

– przestrzeganie zasad popraw-  
nej eksploatacji – sprawność insta-  
lacji odpylania i odsiarczania, ja-  
kość paliwa.

Proces korozji w połączeniu z róż-  
nymi formami wyczerpania nośno-  
ści prowadzi w czasie do wyeks-  
ploatowania obiektu. Poprzez od-  
powiedni schemat statyczny lub  
jego zmianę i odpowiedzialne użyt-  
kowanie można znacznie wydłużyć  
trwałość komina stalowego.

### 3. Przykład wydłużenia okresu eksploatacji komina

Oto przykład praktycznych dzia-  
łań, których celem było wydłu-  
żenie okresu eksploatacji obiektu  
(komin).

W kotłowni przyzakładowej zo-  
stał wybudowany komin stalo-  
wy o wysokości 45,0 m i średni-  
cy 1200 mm. Komin wyposażono  
w trójnog o wysokości 18,0 m. Po-  
czątkowe grubości blach płasz-  
cza wynosiły 12–10 mm. Po okre-  
sie kilkuletniej eksploatacji (moni-  
torowano przez 17 lat) i po przer-  
wie w systematycznym nadzo-  
rze stwierdzono w roku 2003 uby-  
tek grubości, który miał już wpływ  
na nośność obiektu. W analizie ob-

	Ubytek kor. 2003–2004	Ubytek roczny	Ubytek kor. 2004–2006	Ubytek roczny	Ubytek kor. 2006–2007	Ubytek roczny	Ubytek kor. 2007–2009	Ubytek roczny	Średni Ubytek roczny
	0,68	1,36			0,05	0,05	0,37	0,185	0,19
	0	0	0,6	0,3	0,45	0,45	1,51	0,755	0,32
	0,6	1,2	1,08	0,54			1,1	0,55	0,45
	0,47	0,94	0,45	0,225	0,8	0,8	0,06	0,03	0,36
	0	0	0,95	0,475	0,85	0,85	0,34	0,17	0,43
	0,17	0,34	0,78	0,39	0,7	0,7	0,23	0,115	0,46
	0,15	0,3	1,23	0,615	0,14	0,14	1,16	0,58	0,38
	0,31	0,62	0,78	0,39	0,52	0,52	0,68	0,34	0,40
	0,77	1,54	0,73	0,365	0,45	0,45	1,18	0,59	0,35
	0,1	0,2	1,26	0,63	0,44	0,44	1,4	0,7	0,49
	0,2	0,4	0,6	0,3	0,48	0,48	1,84	0,92	0,52
	<b>Średni ubytek korozyjny</b>								<b>0,40</b>

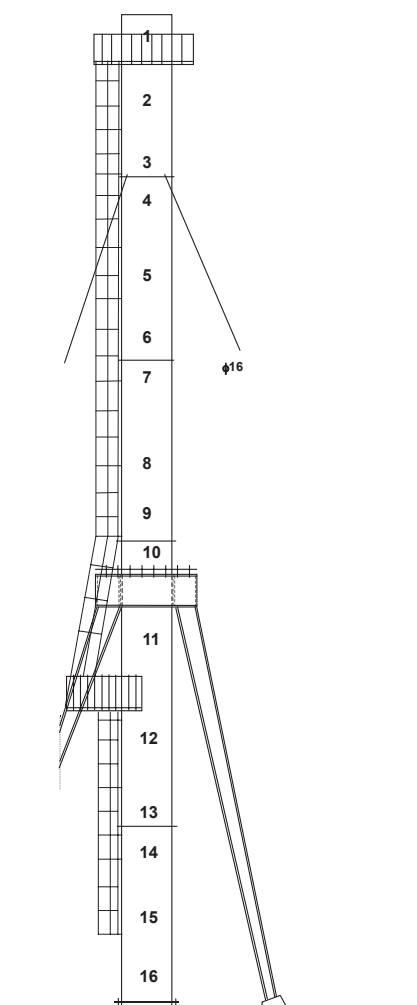
liczeniowej okazało się, że geometria komina i jego parametry dynamiczne umożliwiają drgania poprzeczne, co potwierdziły obserwacje użytkownika. Obliczenia

wytrzymałościowe trwałości (zmęczenia) wykazały niebezpieczeństwo nagłego kruchej uszkodzenia komina. Był natomiast znaczny zapas nośności (statycznej) najbardziej wyężonego przekroju tuż ponad trójnogiem. Użytkownikowi bardzo zależało na dalszej eksploatacji z uwagi na to, że zakład pracował w ruchu ciągłym i planowano docelowo w dalszej przyszłości wymianę kotłowni na gazową. W rachubę wchodziło:

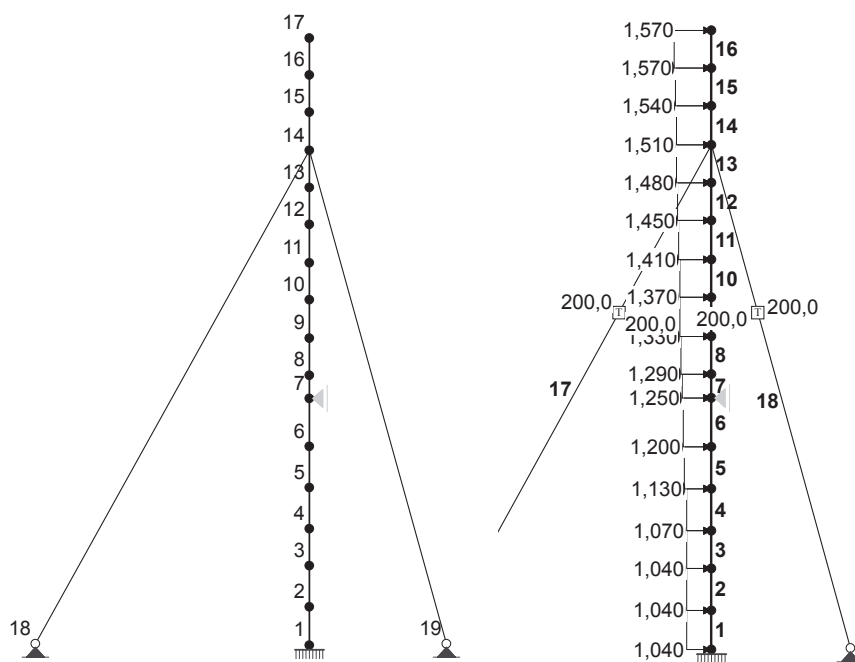
- wzmocnienie skorodowanych segmentów;

- wymiana skorodowanych segmentów na nowe lub wymiana całego trzonu;
- ewentualnie ograniczenie drgań.

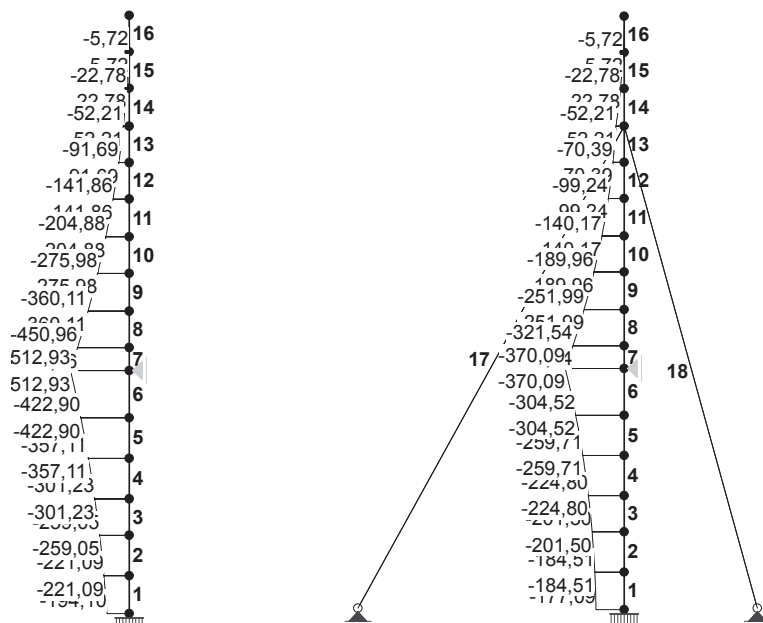
Pierwsza propozycja była trudna technicznie do realizacji. Druga propozycja (pierwsza również w mniejszym zakresie) wymagały przestoju kotłowni, stąd zdecydowano się na rozwiązanie ograniczające drgania. Montaż przerywaczy wirów (turbulizatorów) był niestety tak samo kłopotliwy jak wzmocnianie (powodował dodatkowo wzrost ob-



Rys. 1. Miejsca pomiaru grubości



Rys. 2. Schemat statyczny i obciążenia



Rys. 3. Porównanie momentów (bez i z odciągami)

ciężenia wiatrem), dlatego poszukiwano innego sposobu. Analizowano zmianę strojenia kominu przez usunięcie górnego segmentu. Spowodowana tym zmiana okresu drgań nie zlikwidowała całkowicie niebezpieczeństwa drgań, mimo znacznego obniżenia poziomu naprężeń. Postanowiono zwiększyć tłumienie kominu przez zastosowanie dodatkowych odciągów (rys. 1 i 2). Lokalizacja

kominu pozwalała na takie rozwiązanie. Zastosowano małą średnicę lin (Ø16 mm) i niewielki naciąg wstępny, aby nie wprowadzać zbyt dużej siły normalnej w trzonie kominu oraz przeciążenia odciągów. Uwzględnienie tłumienia dodatkowych odciągów usunęło niebezpieczeństwo drgań, a podpora o dużej podatności na tyle dodatkowo zmieniała pole momentów zginających (rys. 3),

że okres eksploatacji wydłużył się jeszcze o kilka lat (~ 5 lat). Dopiero, gdy średnia grubość blach płaszcza spadła na tyle, że stateczność lokalna decydująco wpłynęła na nośność przekroju (lokalnie między żeberkami pojawiły się nawet oznaki perforacji) podjęto decyzję o wymianie trzonu na nowy.

#### 4. Podsumowanie

Zapewnienie większej trwałości kominów stalowych jest, jak już zaznaczono, kompromisem między możliwościami technicznymi a rachunkiem ekonomicznym oraz często wymogami technologii zakładu, w którym np. kotłownia jest niezbędnym ogniwem. Okazało się, że standardowy i typowy sposób wzmocnienia płaszcza kominu przez dospawanie elementów wzmacniających (blach, płaskowników, kątowników) był nie do zaakceptowania w realizacji. Podejście niestandardowe do problemu przez nieznaczną zmianę schematu statycznego, a przede wszystkim przez zwiększenie tłumienia stało się możliwym do realizacji i przedłużyło znacznie żywotność (trwałość) konkretnego kominu. Stąd wniosek, że niekiedy warto wyjść poza standardowe procedury i przy naprawach nie dostosowywać nośności przekrojów do pola rozkładu sił wewnętrznych, lecz starać się zmniejszyć (zmniejszyć) siły wewnętrzne.

#### Sprawdzenie warunku nośności

$$\text{WarNosn} = \frac{N}{f_t \cdot N_r} + \frac{M}{M_r} < 1,0$$

WarNosn = 0,0073	< 1	h= 41,60 [m]
WarNosn = 0,0353	< 1	h= 38,90 [m]
WarNosn = 0,2419	< 1	h= 36,10 [m]
WarNosn = 0,6286	< 1	h= 33,40 [m]
WarNosn = 0,6719	< 1	h= 30,70 [m]
WarNosn = 0,7398	< 1	h= 27,90 [m]
WarNosn = 1,0249	> 1	h= 25,20 [m]
WarNosn = 1,3017	> 1	h= 22,40 [m]
WarNosn = 1,5221	> 1	h= 19,70 [m]
WarNosn = 1,6090	> 1	h= 18,00 [m]
WarNosn = 0,5284	< 1	h= 14,50 [m]
WarNosn = 0,4322	< 1	h= 11,50 [m]
WarNosn = 0,3610	< 1	h= 8,50 [m]
WarNosn = 0,4029	< 1	h= 5,80 [m]
WarNosn = 0,2421	< 1	h= 2,80 [m]
WarNosn = 0,1705	< 1	h= 0,00 [m]

Rys. 4. Wydruk z obliczeń nośności

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-93/B-03201 Konstrukcje metalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie
- [2] PN-EN 1993-3-2: 2008, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-2 Wieże, maszty i kominy
- [3] Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W., Konstrukcje metalowe. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2000
- [4] Włodarczyk W., Kowalski A., Pietrzak K., Projektowanie wybranych konstrukcji przemysłowych. Przykłady. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995

Praca wykonana w ramach tematu: 11-055/2010 DS