

Ocena zarysowania betonu
w kominie przemysłowym*Estimation of concrete cracking in industrial chimney*

DOI: 10.15199/33.2022.11.38

Streszczenie. Zarysowanie betonu spowodowane oddziaływaniami termicznymi jest najczęstszą przyczyną przeprowadzania prac remontowych w kominach przemysłowych. Ze względu na ich pracę w środowisku silnie agresywnym chemicznie zarysowanie betonu może prowadzić do postępującej korozji zarówno betonu, jak i zbrojenia. Na etapie projektowania kominów przemysłowych konieczne jest poprawne oszacowanie możliwości wystąpienia rys, jak również szerokości ich rozwarcia. To zagadnienie jest zaprezentowane w artykule.

Słowa kluczowe: komin przemysłowy; beton; zarysowanie; oddziaływania termiczne.

Abstract. Concrete cracking caused by thermal effects is the most common reason for the need to carry out renovation works in industrial chimneys. Due to the operation of industrial chimneys in a highly chemically aggressive environment, concrete cracking may lead to progressive corrosion of both concrete and reinforcement. At the stage of designing industrial chimneys, it is necessary to correctly estimate the possibility of cracks occurrence as well as the width of their opening. This issue is presented in the article.

Keywords: industrial chimney; concrete; cracking; thermal effects.

Kominy przemysłowe są obiektami inżynierskimi, których głównym zadaniem jest odprowadzenie gazów na określoną wysokość. Specyfika ich pracy polega na tym, że są narażone na zmieniające się w czasie warunki środowiskowe. Przy projektowaniu komin należy wziąć pod uwagę oprócz zmiennego obciążenia wiatrem również zmiany temperatury zewnętrznej związane z porami roku oraz wahania dobowe temperatury.

Podczas eksploatacji komin na jego pracę i stan techniczny duży wpływ ma środowisko panujące na zewnątrz i wewnątrz komin. Inne czynniki niekorzystnie oddziałujące na konstrukcję komin występują wewnątrz drąży kominowej, a inne na zewnątrz. Wewnątrz komin przepływają agresywne gazy, panuje zapylenie i wysoka temperatura i może mieć miejsce kondensacja kwaśnych gazów. Natomiast na zewnątrz komin pracuje w środowisku przemysłowym i jest narażony na dobowe wahania temperatury. Ze względu na warunki pracy komin należy klasyfikować jako ekspozycji można określić na podstawie normy PN-EN 206-1 [1] jako XC4, XA2 wewnątrz komin i XC4, XD1, XF2, XA2 na zewnątrz komin. W **kominach energetycznych** zwanych cią-

gowymi lub gorącymi odprowadzane spaliny zawierają agresywne chemicznie tlenki siarki (SO_2 i SO_3), azotu (NO , NO_2) i węgla (CO , CO_2) oraz cząstki stałe (pyły o różnej wielkości). Spaliny **kominów wentylacyjnych** zwanych zimnymi zawierają dodatkowo chlor (Cl), fluorowodor (H_2F_2), chlorowodor (HCl), siarkowodor (H_2S), a także amoniak gazowy, siarczyny amonu oraz mgły kwasu siarkowego. W przypadku kominów wentylacyjnych niska temperatura oraz duża agresywność odprowadzanych gazów powoduje wysokie zagrożenie korozją chemiczną. Z kolei w przypadku kominów energetycznych, najniebezpieczniejszym składnikiem spalin są tlenki siarki, które w wyniku połączenia z wilgocią znajdującą się w spalinach mogą tworzyć parę i skropliny kwasu siarkowego [2]. Związki występujące w odprowadzanych spalinach powodują niszczenie wewnętrznej wykładziny komin, a przy nieszczelnościach w warstwie wykładziny mogą prowadzić do uszkodzeń powłoki konstrukcyjnej trzonu komin. Efekt ten potęguje występowanie rys w płaszczu żelbetowym.

Powodem powstawania rys pionowych w płaszczu kominów ciągowych są odkształcenia betonu wywołane różnicą temperatury w warstwie konstrukcyjnej w okresie zimowym. Różnica ta jest wynikiem wysokiej temperatury odprowadzanych spalin przepływających

przez drążę kominową i niskiej temperatury na zewnątrz komin. Jednocześnie wysoka temperatura odprowadzanych spalin prowadzi do podwyższenia temperatury w warstwie konstrukcyjnej w okresie letnim, co z kolei może mieć wpływ na zmniejszenie wytrzymałości betonu. Zastosowanie warstwy izolacji cieplnej pomiędzy płaszczem i warstwą wykładziny wewnętrznej nie zawsze jest w stanie skutecznie zabezpieczyć beton przed ujemnymi skutkami oddziaływań termicznych. Na stan zarysowania i szerokość rozwarcia rys ma dodatkowo wpływ efekt dobowych wahań temperatury. Ze względu na trwałość konstrukcji i ewentualny jej remont istotne jest zatem odpowiednie przeanalizowanie wpływu oddziaływań termicznych na stan zarysowania betonu w płaszczu komin już na etapie projektowania obiektu.

Oddziaływanie termiczne na płaszcz żelbetowy

W kominach jednoprzewodowych trzon komin składa się z trzech podstawowych warstw: **zewnętrznej konstrukcyjnej**, którą stanowi płaszcz żelbetowy, **wykładziny wewnętrznej** i **warstwy izolacji** pomiędzy nimi. Izolacja ma na celu zminimalizowanie wpływu wysokiej temperatury odprowadzanych gazów na żelbetową warstwę konstrukcyjną. W obliczeniach należy wyznaczyć rozkład spadku tem-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; m.slowik@pollub.pl

peratury w całym trzonie komina w celu uzyskania maksymalnej różnicy temperatury w warstwie konstrukcyjnej Δt_{\max} (obliczenia w warunkach zimowych) i maksymalnej temperatury w płaszczu t_{\max} (obliczenia w warunkach letnich). Z normy PN-88/B-03004 [3] wynika, że jako ekstremalną temperaturę zewnętrzną t_z w lecie należy przyjmować $+35^\circ\text{C}$, a w zimie -25°C . Temperatura wewnętrzna to temperatura odprowadzanych gazów t_w zgodnie z danymi technologicznymi, z uwzględnieniem możliwości jej awaryjnego podwyższenia. W przypadku braku dokładnych danych można uwzględniać zwiększenie temperatury t_w o 20%.

Obliczenia termiczne należy przeprowadzać jak w przypadku przegród cieplnych, uwzględniając rzeczywistą ich grubość. Współczynnik przenikania ciepła U przez warstwową przegrodę cylindryczną i spadek temperatury Δt_i na i -tej warstwie przegrody oblicza się ze wzorów (1) i (2),

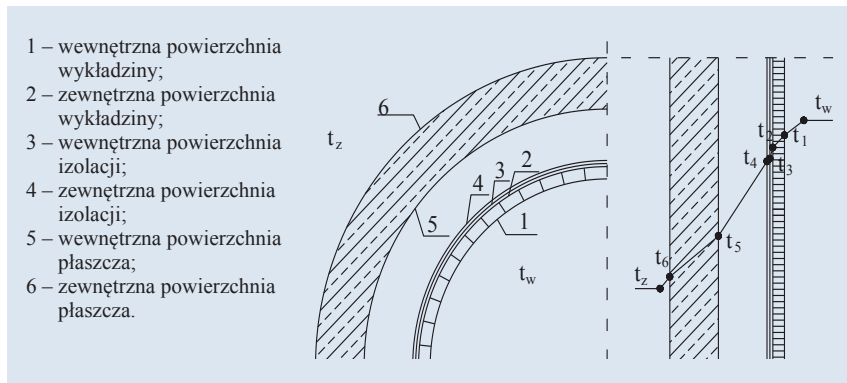
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i}{\lambda_i} \cdot \kappa_i \cdot \frac{R}{r_i} \right) + \frac{1}{\alpha_o} \quad (1)$$

$$\Delta t_i = U \cdot \frac{g_i}{\lambda_i} \cdot \kappa_i \cdot \frac{R}{r_i} \cdot \Delta t \quad (2)$$

gdzie:

- α_n – współczynnik napływu ciepła na wewnętrzną powierzchnię komina;
- α_o – współczynnik odpływu ciepła;
- λ_i – współczynnik przewodności cieplnej i -tej warstwy przegrody;
- κ_i – współczynniki poprawkowe uwzględniające zakrzywienie ściany;
- $\Delta t = t_w - t_z$ – różnica temperatury wyrażona w [K];
- g_i – grubość i -tej warstwy przegrody;
- R – promień zewnętrzny komina;
- r_i – promień zewnętrzny i -tej warstwy przegrody.

Przykładowy rozkład temperatury w płaszczu komina przedstawiono na rysunku 1. Wpływ temperatury przy wymiarowaniu płaszczu uważany jest za nieistotny i można go pominąć wg zaleceń normy PN-88/B-03004 [3], gdy jednocześnie maksymalna różnica na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni płaszczu żelbetowego jest mniejsza niż 30 K, a maksymalna temperatura w płaszczu nie przekracza 70°C . W przypadku spełnienia warunku związanego z różnicą temperatury i gdy jednocześnie maksymalna temperatura w płaszczu jest większa od 70°C , ale



Rys. 1. Spadek temperatury

Fig. 1. Temperature drop

nie przekracza 150°C , można w obliczeniach uwzględnić wpływ temperatury przez zmniejszenie nieprzekraczalnej wartości naprężenia w betonie o 25%. W pozostałych przypadkach należy uwzględnić wpływ temperatury, sprawdzając możliwość pojawienia się rys i ograniczając szerokość ich rozwarcia przez odpowiednie dobranie zbrojenia poziomego (obwodowego). Natomiast w normie CICIND Model Code for Concrete Chimneys [4] znajduje się jedynie zalecenie, aby maksymalna różnica temperatury w płaszczu żelbetowym nie przekraczała 60 K.

Sprawdzenie zarysowania w płaszczu

Powstanie rys pionowych w płaszczu komina żelbetowego na skutek oddziaływania termicznego może prowadzić do destrukcji powłoki konstrukcyjnej komina. Wpływają na to niekorzystne warunki środowiskowe. Jak już wspomniano, zewnętrzna powierzchnia trzonu komina narażona jest na dobowe wahania temperatury związane z nasłonecznieniem. Powoduje to cykliczne zwiększanie i zmniejszanie szerokości rozwarcia rys, co prowadzi do coraz głębszej penetracji środowiska zewnętrznego do wnętrza płaszczu. Kominy pracują w środowisku przemysłowym, w którym mimo stosowania urządzeń filtrujących stężenie agresywnych substancji chemicznych jest wysokie, co prowadzi do postępujących procesów korozyjnych w betonie i stali zbrojeniowej. Zagadnienia związane z trwałością żelbetowych kominów przemysłowych zostały przedstawione w literaturze, np. [5, 6]. Bardzo istotne

jest przeprowadzenie analizy powstania zarysowania w płaszczu komina oraz próby uniknięcia powstania rys pionowych przez zastosowanie warstwy izolacyjnej, a w przypadku, gdy pomimo zastosowania izolacji, rysy mogą powstać, do zminimalizowania ich wpływu na utratę trwałości konstrukcji przez ograniczenie szerokości rozwarcia rys do 0,2 mm. Zgodnie z zaleceniami normy PN-88/B-03004 [3] zarysowanie nie nastąpi, gdy spełniony jest warunek:

$$M_t + M_v < M_1 \quad (3)$$

gdzie:

- M_t – moment zginający wywołany różnicą temperatury na obu powierzchniach trzonu;
- M_v – moment zginający wywołany innymi obciążeniami, np. owalizacją przekroju;
- M_1 – moment rysujący

$$M_t = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t_{\max} \cdot E \cdot I_1}{g} \quad (4)$$

gdzie:

- α_t – współczynnik rozszerzalności termicznej betonu;
- Δt_{\max} – maksymalna różnica temperatury, na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni płaszczu;
- E – moduł sprężystości betonu;
- I_1 – moment bezwładności przekroju niezarysowanego;
- g – grubość płaszczu

$$M_1 = W_1 \cdot \left(f'_{ctk} - \frac{N}{A_1} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- W_1 – wskaźnik wytrzymałości przekroju niezarysowanego;
- f'_{ctk} – wytrzymałość betonu na rozciąganie wyznaczona z uwzględnieniem zakrzywienia ściany;
- N – siła osiowa w przekroju;
- A_1 – powierzchnia przekroju niezarysowanego

$$f'_{ctk} = 0,3 \cdot (f_{ck, cube} + 8)^{0,66} \cdot \frac{2,6 + 24 \cdot g}{1 + 40 \cdot g} \quad (6)$$

Należy zwrócić uwagę, że przy wyznaczaniu momentu rysującego ze wzoru (5) i przyjęciu wytrzymałości na rozciąganie betonu obliczonej na podstawie wzoru (6) uwzględniony został wpływ owalizacji przekroju. Innym istotnym zagadnieniem związanym z projektowaniem konstrukcji narażonych podczas pracy na silne ogrzanie jest wpływ wysokiej temperatury na zmianę cech wytrzymałościowych betonu. Przyjmuje się, że konstrukcje żelbetowe narażone na ogrzanie do temperatury 100°C mogą być projektowane bez uwzględnienia wpływu temperatury na cechy betonu. W przypadku, gdy konstrukcja może być przez dłuższy czas ogrzewana do temperatury 100–200°C, zalecane jest obniżenie obliczeniowej wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie o 20% oraz uwzględnienie wpływu nierównomiernego ogrzania elementów konstrukcji. Współczynnik sprężystości betonu należy zmniejszyć wówczas o 10% przy temperaturze 150°C i o 20% przy 200°C.

Wyniki badań dotyczących wpływu temperatury na zmianę właściwości fizycznych i mechanicznych betonu prezentowane w literaturze naukowo-technicznej wykazują duże rozbieżności. Mogą one wynikać z wykorzystania różnych metod badania, a także zróżnicowania wieku i kształtu próbek, szybkości nagrzewu, okresu izotermicznego wygrzewania,

stosowania lub braku obciążenia przy nagrzewie, różnych sposobów i szybkości chłodzenia. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki wpływu wysokiej temperatury na wytrzymałość betonu na ściskanie badanej na próbkach w postaci walców o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm wykonanych z betonu klasy C30/37 [7].

W przypadku projektowania kominów przemysłowych, w procedurach projektowych zarówno w normie PN-88/B-03004 [2], jak i zaleceniach CICIND [4] nie uwzględniono zmiany cech betonu w sytuacji narażenia płaszcza komina na działanie temperatury powyżej 100°C. Natomiast w normie EN 13084-2:2001 [8] podano, by mechaniczne i termiczne właściwości betonu przyjmować z uwzględnieniem podwyższonej temperatury zgodnie z zaleceniami normy EN 1992-1-2 [9]. Jeśli w płaszczu komina żelbetowego powstaną siły wewnętrzne, powodujące zarysowanie od temperatury, należy sprawdzić stan graniczny zarysowania, aby nie dopuścić to nadmiernego rozwarcia rys. Kontrolę zarysowania od oddziaływań termicznych można uzyskać przez odpowiednio dobranie i rozłożone zbrojenie obwodowe. Obszerne opracowanie dotyczące obliczeniowych procedur wyznaczania szerokości rozwarcia rys w płaszczu komina żelbetowego przedstawiono w [10].

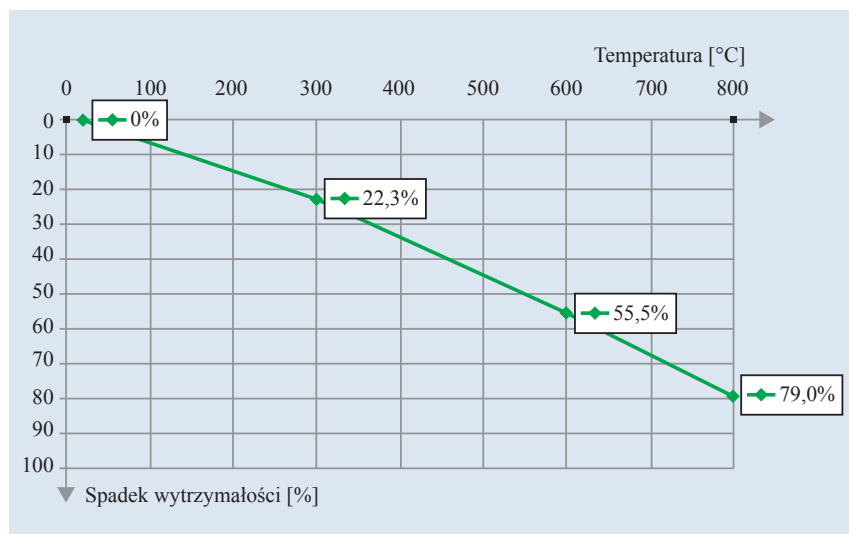
Podsumowanie

Kominy przemysłowe pracują w środowisku silnie agresywnym chemicznie i poddane są niekorzystnym oddziaływaniom zmiennym w czasie, do których zaliczane jest oddziaływanie termiczne. Należy zapobiegać powstaniu zarysowania spowodowanego różnicą temperatury w żelbetowej warstwie konstrukcyjnej płaszcza przez dobranie odpowiedniej warstwy izolacyjnej.

W przypadku wysokiej temperatury odprowadzanych gazów spalinowych może jednak dojść do zarysowania betonu. Wówczas istotne jest także zaprojektowanie zbrojenia, by ograniczyć szerokość rozwarcia rys i tym samym zminimalizować postęp procesów korozyjnych betonu i stali zbrojeniowej. Przy analizie pojawienia się rys na etapie projektowania komina należy poprawnie określić wytrzymałość betonu na rozciąganie, biorąc pod uwagę wpływ owalizacji przekroju i wysokiej temperatury na spadek wytrzymałości betonu.

Literatura

- [1] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] Fijak S. Kominy przemysłowe. Usługi Komputerowe i Poligraficzne JD Gębka, Gliwice, 2005.
- [3] PN-88/B-03004 Kominy murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [4] CICIND Model Code for Concrete Chimneys. Part A: The Shell. Second Edition 2001.
- [5] Fiertak M, Kańska S, Kędziński M. Przyczyny i skutki postępującej destrukcji betonu w trzonach kominów przemysłowych. XXII Konferencja naukowo-techniczna Awarie Budowlane, Szczecin – Międzyzdroje, 2007.
- [6] Kańska S. Materiałowe i eksploatacyjne uwarunkowania trwałości żelbetowych kominów przemysłowych. Politechnika Krakowska, Kraków, 2012.
- [7] Bednarek Z. Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu, Warszawa, Zeszyty Naukowe SGSP. Nr 38, 2009.
- [8] EN 13084-2 Free-standing chimneys – Part 2: Concrete chimneys.
- [9] EN 1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design.
- [10] Noakowski P, Harling A. Reliable Crack width prediction in EN 13084 & CICIND. Archives of Civil Engineering. Vol. LXVI, issue 1. 2020. DOI: 10.24425/ace.2020.131771.



Rys. 2. Procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie betonu klasy C30/37 [7]
 Fig. 2. Percentage drop of compressive strength of concrete class C30/37 [7]

Przyjęto do druku: 22.09.2022 r.