



TERESA PACZKOWSKA, *teka@ps.pl*
WIESŁAW PACZKOWSKI, *wespa@ps.pl*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

OCENA ZAGROŻENIA AWARYJNEGO STALOWEJ KONSTRUKCJI WSPORCZEJ WIELKOGABARYTOWEJ INSTALACJI PRZEMYSŁOWEJ

ESTIMATION OF THE FAILURE THREAT TO THE LARGE INDUSTRIAL INSTALLATION STEEL SUPPORTING STRUCTURE

Streszczenie Kanał czystych spalin instalacji odsiarczania ma średnicę 6,0 m i jest podłączony do żelbetowego komina o wysokości 170 m. Na skutek przechylenia się komina kanał został pociągnięty doznając znacznych odkształceń na kompensatorach i jednocześnie znacznych przemieszczeń na łożyskach. Jedną z podpór kanału biegnącego na wysokości 18,00 m jest stalowa konstrukcja klatki schodowej. W referacie analizuje się skutki zaistniałych przemieszczeń na bezpieczeństwo konstrukcji.

Abstract The 6 m diameter channel of pure combustion gas being a part of desulfurization installation is supported by a concrete chimney 170 m high. Due to the tilt of the chimney the channel was displaced. Large displacements were exposed both on fabric expansion joints and on the bearings. A staircase structure is also a support for the channel running on the level +18,00 m. The paper presents consequences of the chimney tilt for the safety of the structure.

1. Wstęp

Projektując instalacje w obiektach budowlanych zakłada się, że instalacja oddziałuje na konstrukcję nośną poprzez swój ciężar, który często uwzględniany jest w obliczeniach za pomocą ustalonej, z góry przyjmowanej wartości (np. 0,3 kN/m²) lub w uzasadnionych przypadkach zupełnie pomijany. W przypadku obiektów przemysłowych oddziaływanie instalacji na konstrukcję nośną może stanowić czynnik determinujący projektowanie konstrukcji [1]. Oprócz ciężaru samej instalacji uwzględnia się ciężar mediów występujących w instalacji, ewentualne efekty dynamiczne związane z transportem tych mediów oraz oddziaływania termiczne wynikające ze stosowanej technologii, którą dana instalacja obsługuje. W przypadku obiektów sytuowanych w terenie także oddziaływania klimatyczne (wiatr, śnieg) mogą mieć istotny wpływ na wymaganą nośność konstrukcji. Rzadziej mamy do czynienia z sytuacjami uwzględnienia wpływu oddziaływań sejsmicznych lub związanych z efektami posadowienia na terenie szkód górniczych.

W niniejszej pracy przedstawiono układ powiązań występujący między wielkogabarytową instalacją związaną z odprowadzeniem spalin a konstrukcją budowlaną. W wyniku nieprzewidzianych osiadań występujących w ciągu technologicznym emisji oczyszczonych gazów spalinowych doszło do niekorzystnych obciążeń konstrukcji budowlanej mogących stanowić zagrożenie dla samej konstrukcji, ale także dla instalacji. Stosunkowo prosta i względnie tania

konstrukcja budowlana stanowiąca podporę instalacji została poddana niekorzystnym oddziaływaniom w wyniku przesunięcia się łożysk wsporczych instalacji. W efekcie doszło także do zagrożenia poprawnego funkcjonowania instalacji. W ocenie ekonomicznej tego zdarzenia należy brać pod uwagę fakt, że koszty związane z wyłączeniem instalacji a tym samym ograniczeniem funkcjonowania sfery produkcyjnej zakładu są o wiele wyższe niż koszty naprawy lub wzmocnienia konstrukcji nośnej.

2. Opis konstrukcji

Przedmiotem pracy jest końcowy odcinek kanału czystych spalin (KCS) stanowiącego fragment instalacji wydalania spalin znajdujący się między stacją filtrów a żelbetowym kominem w pewnym obiekcie przemysłowym. Z punktu widzenia analizowanego problemu istotne są trzy składniki tworzące powiązany ze sobą układ:

- kanał czystych spalin na odcinku między kompensatorami 7.3.3 i 7.3.4;
- budynek klatki schodowej będący m. in. podporą dla KCS;
- komin żelbetowy stanowiący podporę dla KCS przy kompensatorze 7.3.4 będący jednocześnie konstrukcją nośną wewnętrznego izolowanego przewodu spalinowego.

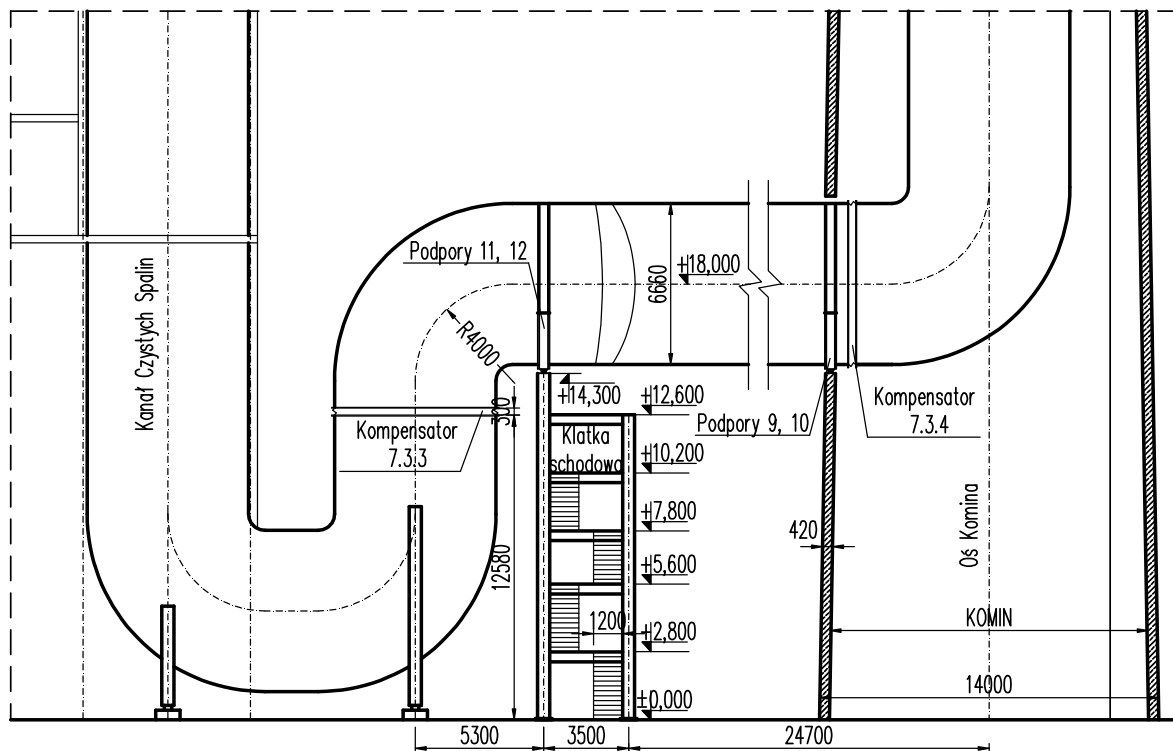
Układ wymienionych elementów pokazano na rys. 1., natomiast na rys. 2 podano podstawowe parametry geometryczne tego układu.



Rys. 1. Ogólny widok kanału czystych spalin biegnącego od stacji filtrów (z lewej), ponad klatką schodową stanowiącą podpory 11 i 12 (w środku), do komina żelbetowego (z prawej)

Analizowany odcinek KCS znajduje się między kompensatorami 7.3.3 i 7.3.4. Wykonany jest łącznie z 14 sekcji, z których każda jest rurą o średnicy wewnętrznej $D = 6000$ mm i grubości ścianki $t = 8$ mm. Analizowany odcinek KCS wychodzi z kompensatora 7.3.3 w kierunku pionowym przechodząc, poprzez odpowiednie ukształtowanie czterech pierwszych sekcji jako kolano w płaszczyźnie pionowej, w krótki jednosekcyjny odcinek poziomy. Na odcinku tym znajdują się podpory 11 i 12. Dwa pionowe wsporniki o zmiennym przekroju skrzynkowym przyspawane są do płaszcza kanału. Poprzez płaskie łożyska przesuwne obciążenie przekazywane jest na słupy klatki schodowej. W dalszej części kanału za pomocą jednej sekcji następuje zmiana kierunku w poziomie o $26,174^\circ$. Kolejne osiem sekcji to sekcje pierścieniowe prowadzące KCS na rzędnej wysokościowej $+18,000$ m w kierunku poziomym do komina nr 3. Na ostatniej sekcji znajdują się podpory 9 i 10 służące oparciu KCS na trzonie komina, a bezpośrednio za nimi kompensator 7.3.4 oddzielający analizowany odcinek KCS od jego przedłużenia biegnącego wewnątrz komina (kolano w płaszczyźnie pionowej zmienia bieg kanału na pionowy).

Na całym analizowanym odcinku rura KCS znajduje się w izolacji termicznej wykonanej z warstwy miękkiej wełny mineralnej o grubości 150 mm zabezpieczoną obudową wykonaną z blachy cynkowej o grubości 1 mm odległej od ścianki rury o 320 mm. Ostatecznie przyjęto, że średnica zewnętrzna obudowy z blachy cynkowej wynosi 6,66 m.



Rys. 2. Podstawowe parametry geometryczne analizowanego fragmentu instalacji odprowadzania spalin

Budynek klatki schodowej jest obiektem o wymiarach 7,32×4,31 m w rzucie poziomym. Budynek ma trzy kondygnacje z dachem płaskim na poziomie do +13,30 m. Kondygnacje I i II piętra połączone są łącznikiem z budynkiem Instalacji Odsiarczania Spalin. Konstrukcję nośną budynku stanowią cztery słupy stalowe HEB 500 rozstawione osiowo w nominalnym układzie 5500×3500 mm. Obudowa budynku wykonana jest z płyt warstwowych termoizolowanych. Wewnętrzną przestrzeń klatki schodowej wypełniają jedynie ażurowe biegi i spoczniki. Szerokość biegów wynosi 1200 mm, zaś szerokość spoczników 1500 mm. W ścianie wschodniej i zachodniej budynku oprócz rygli poziomych występują także stężenia typu X, natomiast w ścianie południowej i północnej znajdują się jedynie rygle poziome.

Końcówki słupów ściany zachodniej wyprowadzone są ponad górną powierzchnię dachu do poziomu +14,30 m i stanowią podpory 11 i 12 kanału czystych spalin. Końcówki słupów zakończone są łożyskami teflonowymi (PTFE), przy czym łożysko podpory 11 jest łożyskiem płaskim niekierunkowym, natomiast łożysko podpory 12 jest płaskie z ograniczoną możliwością przesuwu wzdłuż osi KCS i z wyeliminowanym przesuwem na kierunku poprzecznym.

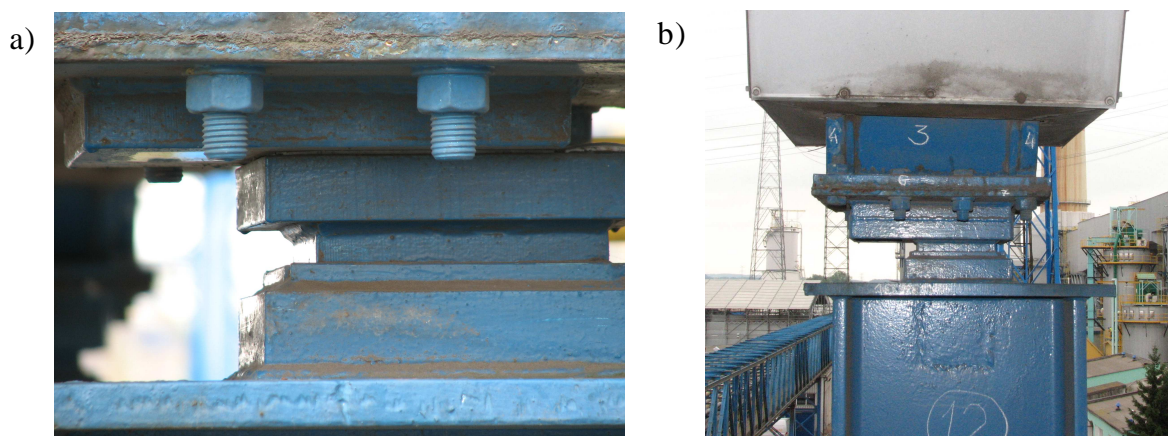
Komin wykonany jest jako trzon żelbetowy o wysokości 170 m oparty na fundamencie pierścieniowym o średnicy zewnętrznej 22,00 m wspartym na palach typu Tubex. Średnica wewnętrzna pierścienia fundamentowego wynosi 8,0 m. Maksymalna grubość fundamentu w miejscu oparcia płaszcza komina wynosi 250 cm i zmniejsza się na krawędziach do 225 cm. Trzon komina w miejscu oparcia na fundamencie ma średnicę zewnętrzną 14,06 m, zaś grubość ściany wynosi 45 cm. Pale Tubex pod płytą fundamentową sięgają głębokości -19,6 m ppt.

3. Stan awaryjny konstrukcji

Od momentu przekazania komina do eksploatacji, co nastąpiło 15 lat temu monitorowano jego osiadanie. Dokonywano pomiarów położenia czterech reperów osadzonych w studzienkach na obwodzie pierścieniowej płyty fundamentowej. Po sześciu latach stwierdzono występowanie znacznych osiadań wykazujących cechy nierównomierności. Po dwóch dalszych latach została wykonana ekspertyza, w której wskazano na konieczność wykonania prac budowlanych o znacznym zakresie w celu powstrzymania osiadania komina. Obserwowane w tym okresie osiadania powodowały w konsekwencji przechył komina nie zagrażający jednak jego bezpieczeństwu. Zrealizowano projekt wzmocnienia polegający na wykonaniu na ok. 1/3 (135°) obwodu od strony wschodniej poszerzenia fundamentu o szerokości 7 m wspierając je na 6 palach dużych średnic $\phi 1,2$ m i długości 17,7 m. Dodatkowo wykonano 15 kotew Titan o nośności 630 kN. Oceniono, że wykonana konstrukcja przyczyniła się do około dziesięciokrotnego spowolnienia tempa osiadania, a tempo wychylenia komina uległo „spowolnieniu, zatrzymaniu lub cofnięciu” [2]. Pochylający się komin pociągnął za sobą kanał czystych spalin oparty na podporach 9 i 10 umieszczony w płaszczu komina. Obie podpory są nieprzesuwne na kierunku osiowym kanału, co spowodowało, że niemożliwe było rozprężenie konstrukcji, a tym samym oddylatowanie reszty konstrukcji od komina.

Do oceny wielkości poziomych przemieszczeń wykorzystano trzy źródła danych:

- a) bezpośredni pomiar na płytach łożyska. Przyjęto, iż w fazie montażu łożyska były ustawione osiowo. Aktualny stan łożysk pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przesunięcie łożysk podpory nr 11 (a) i nr 12 (b) w kierunku komina

Na łożysku płaskim niekierunkowym nr 11 wystąpiło pomieszczenie $\Delta_{11} = 78$ mm, natomiast na łożysku płaskim kierunkowym z możliwością ograniczonego przesuwu wzdłuż osi KCS wykorzystano pełen zakres przesuwu wynoszący $\Delta_{12} = 50$ mm;

- b) na podstawie danych dostępnych w [2] oszacowano wielkość wychylenia komina na poziomie +14,5 m n.p.t. będącym poziomem łożysk podpór 9 i 10. Uzyskano wynik $\Delta_{9,10} = 59,8$ mm, co jest wielkością mniejszą niż Δ_{11} ;
- c) trzecim źródłem oceny wielkości występujących przemieszczeń była odkrywka wykonana na kompensatorze 7.3.3 wykonanym w postaci rękawa o długości 300 mm z EPDM (terpolimer etylenowo-propylenowo-dienowy) grubości 3,5 mm zbrojonego siatką z włókna szklanego. Na rys. 4 pokazano kompensator w obudowie z blachy cynkowej z widocznymi uszkodzeniami oraz widok rękawa kompensatora po zdemontowaniu obudowy.



Rys. 4. Kompensator 7.3.3:

- a) obudowa kompensatora z widocznymi uszkodzeniami spowodowanymi przemieszczeniem się górnej części w lewo (do komina);
- b) pole ciągnień rękawa kompensatora wykonanego z tkaniny technicznej spowodowane przemieszczeniem części górnej w lewo.

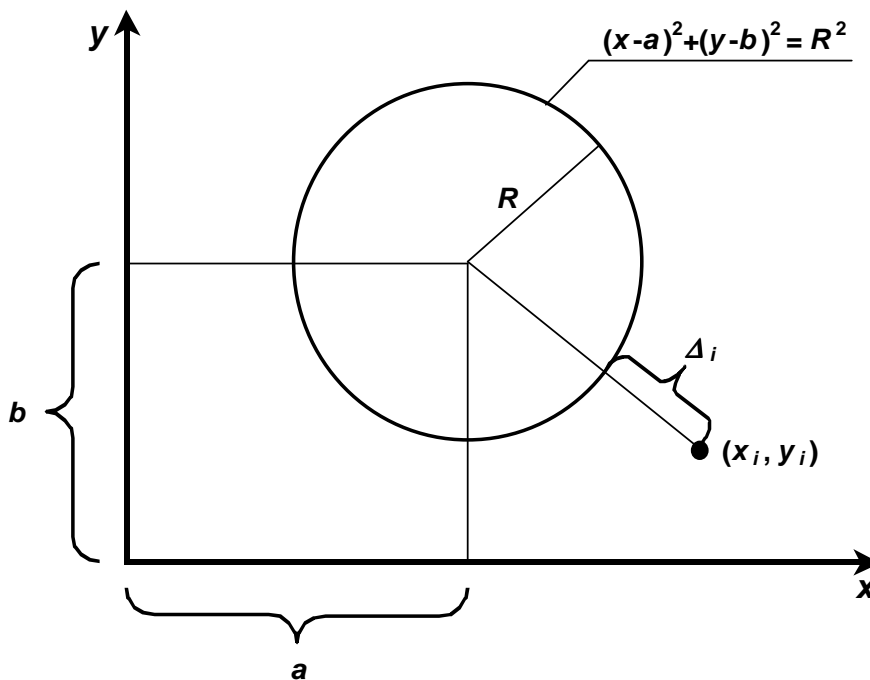
Wykonano $n = 30$ pomiarów na kierunku promieniowym wzajemnych przemieszczeń pierścienia górnego względem pierścienia dolnego kompensatora. Zastosowano metodę najmniejszych kwadratów do zminimalizowania wyrażenia:

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \quad (1)$$

gdzie:

$$\Delta_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R \quad (2)$$

jest odległością punktu i (x_i, y_i) od okręgu o promieniu R ze środkiem o współrzędnych (a, b) zgodnie z rys. 5.



Rys. 5. Odległość Δ_i punktu pomiarowego „i” od okręgu aproksymującego położenie pierścienia górnego

Z warunku:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (3)$$

uzyskano położenie środka przemieszczonego pierścienia górnego, co pozwoliło ustalić maksymalną wartość przemieszczenia $\Delta = 74,6$ mm

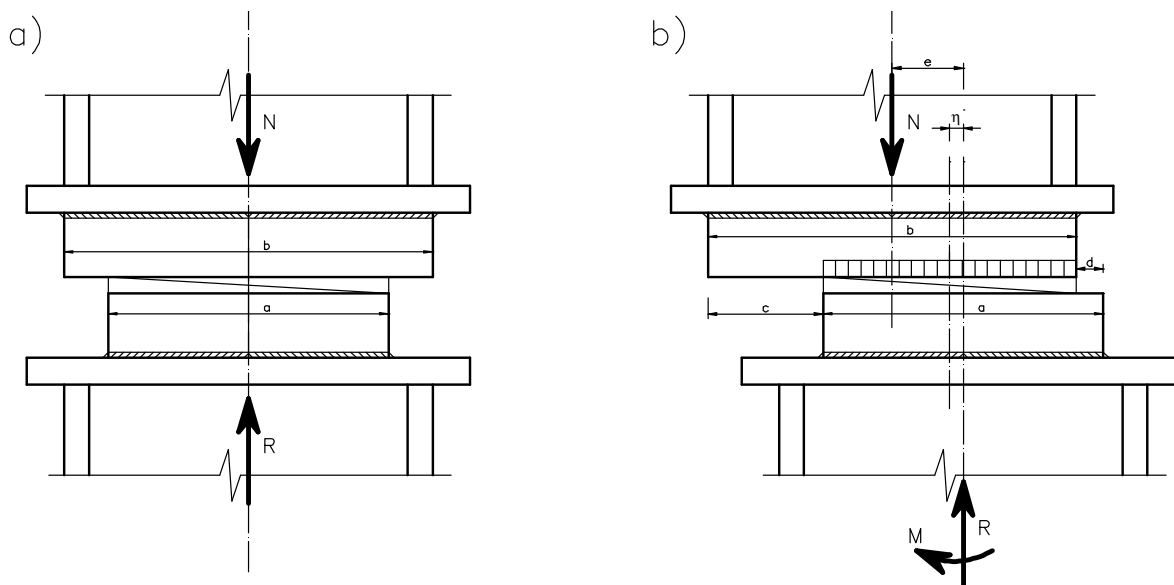
4. Analiza wytrzymałościowa

Całkowita długość KCS na odcinku między kompensatorem 7.3.3 i 7.3.4 wynosi 33,975 m. W związku z tym, że oryginalny projekt wykonany został na podstawie norm polskich, wszystkie analizy wytrzymałościowe wykonano także posługując się normami polskimi. Uzyskano następujące obliczeniowe wartości obciążeń:

- konstrukcja stalowa kanału: 18,26 kN/m;
- termoizolacja w obudowie z blachy cynkowej: 4,70 kN/m;
- obciążenie liniowe śniegiem: 7,50 kN/m;
- obciążenie liniowe wiatrem: 3,93 kN/m.

Warunki nośności i użyteczności KCS spełnione były ze znacznym zapasem. Do oceny oddziaływania mimośrodowego przekazywania obciążeń na przemieszczonych łożyskach

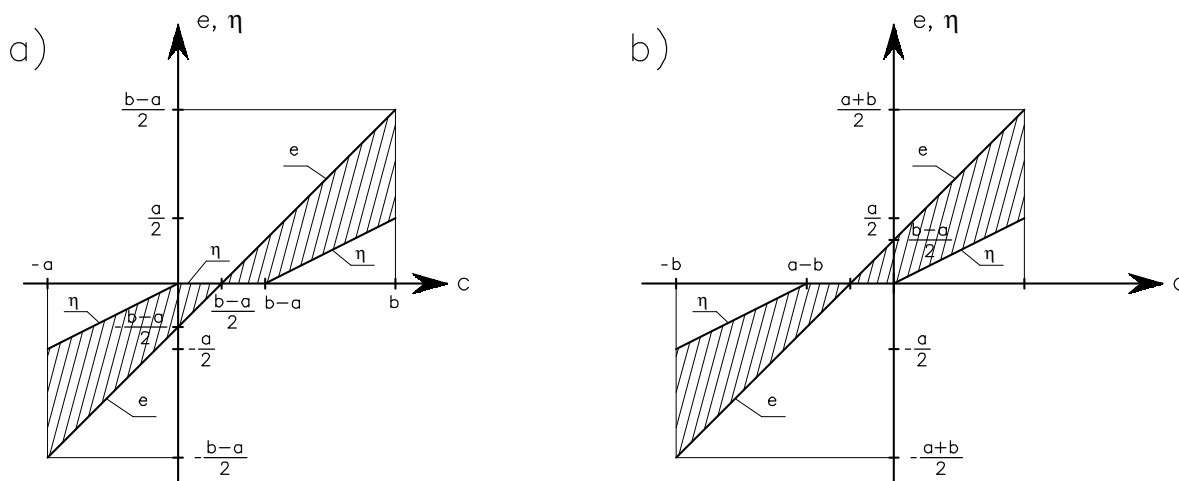
przyjęto oszacowanie od góry i od dołu. Na rys. 6 pokazano łożysko w stanie idealnym oraz po przesuwie.



Rys. 6. Przekazywanie obciążenia w łożysku płaskim przesuwным: a) sytuacja idealna, b) sytuacja po przesuwie części obciążającej

Miarą przesuwu łożyska może być „c” lub „d” pokazane na rys. 6b w zależności od warunków przeprowadzania pomiarów. Jako górne oszacowanie mimośrodru przyjęto „e” będące odległością położenia osi górnej i dolnej części łożyska. Jako dolne oszacowanie mimośrodru przyjęto „η” stanowiące odległość między osią dolnej części łożyska związanej ze stalową konstrukcją wsporczą a położeniem środka odcinka nakładających się na siebie powierzchni docisku. Jest to równoważne z przyjęciem, że na powierzchni kontaktu naprężenia rozłożone są równomiernie, a miarą położenia ich wypadkowej jest „η”.

Biorąc pod uwagę geometryczne ograniczenia zasięgu pracy łożysk uzyskano – pokazane na rys. 7 jako zakreskowane – obszary możliwego położenia rzeczywistego mimośrodru oddziaływania.



Rys. 7. Dolne (η) i górne (e) oszacowanie zmienności rzeczywistego mimośrodru (obszar zakreskowany) w łożysku płaskim w funkcji przemieszczenia „c” lub „d”

Przeprowadzono analizy obejmujące:

- nośność na docisk powierzchni płaskich;
- nośność dolnej części wspornikowej podpory ściskanej i zginanej;
- nośność konstrukcji klatki schodowej pod określonymi wyżej obciążeniami;
- nośność górnej części podpory związanej bezpośrednio z KCS.

We wszystkich przypadkach warunki stanu granicznego nośności zostały zachowane.

5. Uwagi końcowe

Pozornie prosty przypadek nietypowego zachowania się złożonego układu konstrukcyjnego ujawnił całą skomplikowaną naturę powiązań istniejących pomiędzy poszczególnymi elementami tworzącymi ten układ. W odróżnieniu od zadania projektowania, gdzie projektant narzuca konstrukcji wymagane parametry geometryczne i wytrzymałościowe, w przypadku istniejącej konstrukcji konieczne jest sprawdzenie wszystkich parametrów decydujących o jej bezpieczeństwie. Analizowany przypadek wpisuje się w kategorię sytuacji [3], kiedy za pomocą analizy stanu granicznego nośności wykazuje się istnienie wystarczających zapasów bezpieczeństwa, co nie musi być równoznaczne z możliwością pominięcia działań interwencyjnych w tym przede wszystkim ze względu na stany użytkowe. Przedstawiony tu problem niekorzystnego obciążenia konstrukcji stalowych występujących w technologicznym ciągu odprowadzania spalin jest problemem wtórnym w stosunku do głównego problemu, jakim jest przechylenie się komina żelbetowego. Otrzymane wyniki pokazują, iż mimo ewidentnie dużych przemieszczeń na łożyskach, nie zachodzi bezpośrednie zagrożenie zarówno konstrukcji jak i samego przewodu gazowego. W tej sytuacji pozwolono na dalszą eksploatację konstrukcji biorąc przede wszystkim pod uwagę fakt wykonania prowadzonych w dużym zakresie robót wzmacniających posadowienie komina. Zalecono dalszą obserwację zachowania się całego układu. Jeśli stwierdzi się praktyczne zatrzymanie wychylania się komina, nie będzie wymagana interwencja w obszarze stalowych konstrukcji wsporczych. Każdy inny rozwój sytuacji wymagać będzie stosowania szczegółowych rozwiązań dobranych do ewentualnych zagrożeń.

Literatura

1. Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S.: *Stalowe konstrukcje specjalne*, Arkady, Warszawa 1995.
2. Ekspertyza techniczna dotycząca komina nr 3. Prof. Lech Wysokiński. Usługi badawcze i projektowe – geotechnika, geologia, ekologia. Warszawa, sierpień 2010.
3. Starosolski W.: *Analiza obliczeniowa w ocenie stanu awaryjnego konstrukcji żelbetowych*. Inżynieria i Budownictwo, nr 9/2009.