

Nietypowy przypadek oddziaływania termicznego w analizie nośności hali przemysłowej

Dr inż. Krzysztof Chudoba, dr inż. Szymon Seręga, dr inż. Maciej Suchodoła,
Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Wiele z funkcjonujących aktualnie obiektów przemysłowych pozostaje w użytkowaniu przez okres przekraczający 50 lat. W związku z tym właściciele tych obiektów formułują pytania co do możliwej dalszej ich bezpiecznej eksploatacji. Zagadnienia oceny stanu technicznego obiektów przemysłowych po długoletnim okresie użytkowania stanowią często nietypowe przypadki analizy konstrukcji, wymagające indywidualnego i uważnego potraktowania z uwzględnieniem czynników, takich jak: braki, a nawet błędy w oryginalnej dokumentacji projektowej, rzeczywiste charakterystyki elementów konstrukcyjnych i parametrów mechanicznych wbudowanych materiałów, zrealizowane przebudowy bądź modernizacje ingerujące w układ konstrukcyjny lub zmieniające obciążenia. Częstą sytuacją jest także zmiana przeznaczenia obiektu w trakcie jego użytkowania – z możliwą niekorzystną zmianą warunków pracy elementów konstrukcyjnych (np. podwyższona agresywność środowiska wywołana zachodzącymi procesami technologicznymi) i wystąpieniem nowych oddziaływań (mechanicznych – statycznych i dynamicznych, termicznych, a nawet o charakterze wyjątkowym).

W artykule przedstawiono przykład analizy hali przemysłowej po wieloletnim okresie jej użytkowania w zmienionych w stosunku do podstawowych założeń projektowych warunkach, ze szczególnym uwzględnieniem nietypowych oddziaływań o charakterze termicznym.

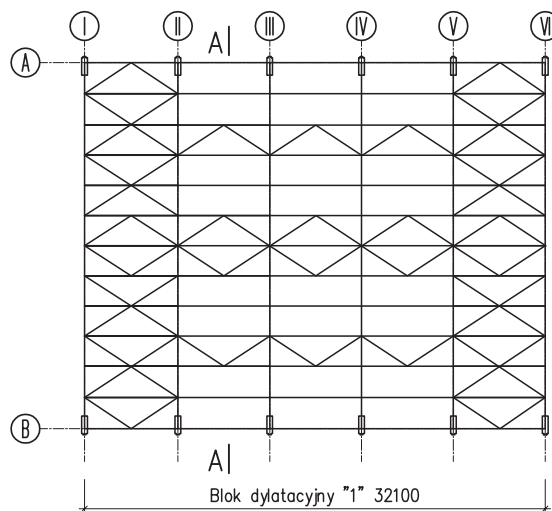
2. Ogólna charakterystyka przedmiotowego obiektu

Hala przemysłowa będąca przedmiotem analizy została zaprojektowana na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Rzut obiektu ma kształt prostokąta, o wymiarach w osiach głównej konstrukcji nośnej wynoszących 25,5 m x 141 m. Całkowita wysokość hali wynosi około 17,4 m. Hala została podzielona na cztery bloki dylatacyjne. Według pierwotnej dokumentacji hala pełniła funkcję pomieszczeń obrabiarek, obecnie

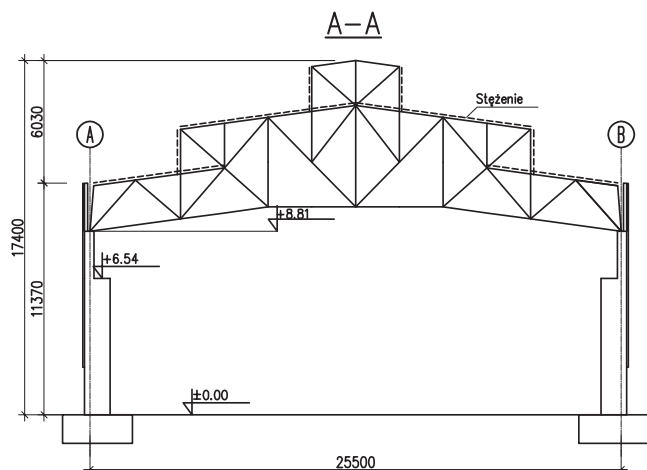
zaś w obiekcie zlokalizowany jest zespół pieców grafityzacyjnych typu Achesona.

Główny ustrój nośny hali stanowi mieszana konstrukcja żelbetowo-stalowa w postaci: żelbetowych słupów wspornikowych o zmiennym przekroju poprzecznym w rozstawie co 6,4 m, zamocowanych w stopach fundamentowych oraz stalowej konstrukcji przekrycia w formie rozbudowanego dźwignara kratowego o rozpiętości 25,5 m i wysokości 8,2 m, stężonego poprzecznie i podłużnie w płaszczyznach połączy dolnej i pośredniej, a także pionowo w płaszczyźnie świetlików i wywietrzników. Dźwigar stalowy oparto na słupach w poziomie +8,81 m na jednym końcu w sposób przegubowy, na drugim – przegubowo przesuwany. Szkielet konstrukcji wypełniono ścianami ceramicznymi stanowiącymi osłonę wnętrza hali.

Na rysunku 1 pokazano rzut stalowej konstrukcji dachu dla pierwszego bloku dylatacyjnego hali grafityzacji – z przyjętym oznaczeniem osi dźwignarów (od I do VI) i podpór (A, B) oraz układem stężeń konstrukcji dachu. Natomiast rysunek 2 przedstawia przekrój poprzeczny przez więzary dachowy i konstrukcję wsporczą w postaci słupów żelbetowych.



Rys. 1. Rzut segmentu dylatacyjnego stalowej konstrukcji hali grafityzacji

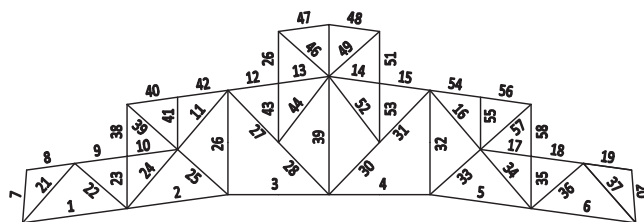


Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez więzary dachowy i konstrukcję wsporczą

Kratowe dźwigary stalowe konstrukcji przekrycia pochodzą z dwóch okresów. Elementy pomiędzy osiami I-V zostały odbudowane po katastrofie spowodowanej wybuchem jednego z pieców, mającym miejsce w trakcie powodzi w roku 1997. Pozostałe elementy (od osi VI aż do skrajnej osi ostatniego bloku dylatacyjnego XXIII) to dźwigary pierwotne. Elementy dźwigara stalowego wykonano jako złożone z walcowanych profili w postaci zestawów podwójnych kątowników łączonych w węzłach blachami o grubości 18 mm. W większości prętów wykratowania kątowniki zwrócone są do siebie półkami – z zachowaniem odległości wynikającej z grubości blachy węzłowej – i połączone przewiązkami. Część kątowników (np.: pasy dolne elementów pierwotnych) układano „na styk” łącząc je poprzez spawanie. Na rysunku 3 podano przyjęte oznaczenia dla poszczególnych prętów stalowego dźwigara dachowego w hali grafityzacji.

W trakcie wizji lokalnych stwierdzono, że profile zastosowane w dźwigarach w obszarze pomiędzy osiami VI-XXII różnią się od podanych w pierwotnej dokumentacji projektowej. Różnice te mogą wynikać z próby eliminacji błędów projektowych, przeprowadzonej już na etapie budowy obiektu (część prętów jest wzmocniona) lub podczas późniejszych prac remontowych. Zmiany w stosunku do dokumentacji pierwotnej dotyczą prętów nr: 23 i 35; 40 i 56; 42 i 54; 21 i 37 (oznaczenia prętów według rysunku 3).

Pierwotne pokrycie hali zostało wykonane z żelbetowych płyt korytkowych izolowanych przeciwwodnie trzema warstwami z papy bitumicznej. Ponad 50-letnia eksploatacja w agresywnym środowisku pyłów o składzie siarczanowo-węglowodorowym oraz incydentalne erupcje pieców podczas procesów technologicznych doprowadziły do istotnej korozji pierwotnych płyt żelbetowych korytkowych. Płyty te sukcesywnie wymieniano. Oryginalne płyty zostały zastąpione blachą trapezową. Przy osi A pomiędzy osiami VII-XXII zamiast blachy zastosowano nowe płyty korytkowe pokryte papą. Płyty pokrycia oparto na płatach stalowych wykonanych



Rys. 3. Oznaczenia prętów dla stalowego dźwigara dachowego w hali grafityzacji

z kształtowników walcowanych dwuteowych i teowych, ciągłych, podwieszonych w środku rozpiętości.

Na żelbetowych słupach na poziomie +6,54 m zostały przewidziane belki żelbetowe oryginalnie stanowiące podporę toru jezdnych trzech suwnic natorowych, dwudźwigarowych, o udźwigu 50 ton i rozpiętości 24 m. Obecnie belki te nie pełnią już roli nośnej – nad belkami wykonano nowe stalowe belki podsuwnicowe (dwuteowe), z których reakcje przekazywane są bezpośrednio na słupy żelbetowe.

Przedmiotowa hala pracuje w bardzo trudnym środowisku, ze względu na procesy technologiczne związane z grafityzacją wyrobów zachodzącą w temperaturze około 3000°C. Konstrukcja hali poddawana jest ciąglemu oddziaływaniu gorącego powietrza w trakcie rozbiierania pieców po ukończeniu cyklu „wypalania” elektrod węglowych (temperatura konstrukcji oscyluje wówczas w granicach 50–60°C). W trakcie procesu rozbiórki pieców panuje duże zapylenie – uwalniane pyły charakteryzują się silnym działaniem korozyjnym. Osadzający się na konstrukcji agresywny pył stanowi zaczątki ognisk korozyjnych, zarówno dla elementów stalowych, jak i żelbetowych. Efekt agresywności potęguje fakt, że hala jest otwarta (wywietrzniki w poziomie górnym, brak okien w poziomie dolnym), co podsygnalizowane jest potrzebą intensywnego chłodzenia obiektu podczas prowadzenia procesów technologicznych. W miejscach styczności elementów konstrukcyjnych z chłodnym środowiskiem dochodzi do ich szybkiego wystudzenia i w konsekwencji do kondensacji pary wodnej na powierzchni prętów stalowych. Ponadto miejsca te (w szczególności przy świetlikach i wywietrznikach) narażone są na zalewanie wodą opadową. Agresywny pył w połączeniu z wodą działa wyjątkowo destrukcyjnie na stal profilową. W przypadku przedmiotowej hali efekt korozji jest potęgowany szybko starzejącymi się – pod wpływem temperatury technologicznej – powłokami zabezpieczenia antykorozyjnego.

Dodatkowe oddziaływanie na konstrukcję hali grafityzacji stanowią incydentalne zjawiska erupcji w trakcie procesu grafityzacji, polegające na gwałtownym wyrzuceniu z pieca dużej ilości gazów z pyłem. Erupcje takie zdarzały się kilkanaście razy w okresie ostatnich 15 lat i trwały jednorazowo około 20 minut. Ze względu na żywiołowy charakter zjawiska erupcji, temperatura gazów, a także jej przebieg w czasie zdarzenia w poziomie sta-



Fot. 1.
Przykłady korozji
elementów stalowych



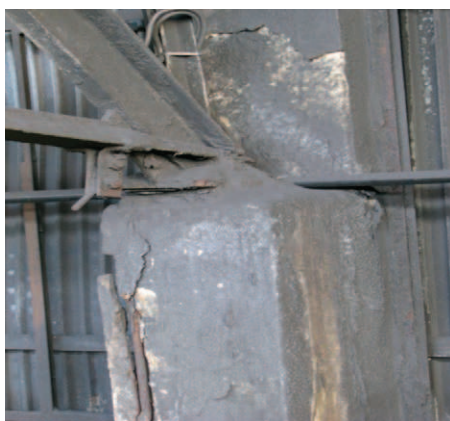
Fot. 2. Ślady korozji i złuszczenia farby na elementach stalowych przy świetliku

lowego dźwigara kratowego są bardzo trudne do określenia. Nieznane jest również ciśnienie gazów w piecu w chwili poprzedzającej wybuch. Wysoka temperatura otoczenia w czasie erupcji gazów również wyjątkowo destrukcyjnie oddziałuje na stan powłok antykorozyjnych na stalowych elementach konstrukcyjnych. Należy podkreślić, że projekt techniczny przedmiotowej hali nie uwzględniał w żadnym punkcie efektów termicznych w czasie zwykłego procesu technologicznego, możliwości zaistnienia wyjątkowej sytuacji spowodowanej erupcją materiału pieca, jak również agresywnego środowiska pracy konstrukcji. Przedmiotowa hala zaprojektowana została zatem jako zwykły obiekt,

a nie pracujący w agresywnym środowisku ze zmiennym oddziaływaniem temperatury.

3. Analiza stanu technicznego hali

W trakcie przeprowadzonych wizji lokalnych dokonano inwentaryzacji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych hali. Szczegółowym oględzinom i ocenie stanu technicznego poddano zarówno stalową konstrukcję dachu, jak i żelbetową konstrukcję podbudowy. Uszkodzenia stalowych elementów konstrukcji dachu hali obejmowały: powierzchniowe złuszczenia farby, korozję materiału elementów konstrukcji dachu, nieliczne lokalne wygięcia elementów. Koncentrację uszkodzeń stwierdzono w obszarach najsilniejszych oddziaływań od prowadzonych w hali grafityzacji procesów technologicznych. Nasilenie uszkodzeń elementów w tych obszarach związane jest z możliwym bezpośrednim oddziaływaniem wody opadowej od strony świetlika. Korozja stalowych elementów przebiega szczególnie intensywnie w węzłach i tych obszarach w pasach dolnych, w których możliwe jest gromadzenie i zaleganie pyłów, będących efektem prac technologicznych prowadzonych w hali. Osady te w obecności podwyższonej temperatury i wilgoci (lub nawet bezpośrednio – wody opadowej) prowadzą do przyspieszonej korozji stali elementów konstrukcyjnych dźwigara przekrycia hali. Stopień korozji, zwłaszcza w środkowej części rzutu hali nad piecami oraz w miejscach narażonych na oddziały-



Fot. 3.
Uszkodzenia w strefie oparcia
dźwigarów stalowych

wanie wód opadowych i śniegu, kwalifikował konstrukcję stalową główną i stężenia do ponownego malowania. W przypadku węzłów, słupków świetlików i wywietrzników, zalecono także odtworzenie skorodowanych profili.

Uszkodzenia słupów żelbetowych skoncentrowane były w obszarze podparcia stalowych dźwigarów dachowych i obejmowały: lokalne ubytki powierzchniowe, pęknięcia i odspojenia części przekroju betonowego, odsłonięcia prętów zbrojeniowych oraz ślady korozji tych prętów. Zalecono naprawę najbardziej uszkodzonych elementów żelbetowych, stwierdzając, że docelowo powinno się rozważyć naprawę i wzmocnienie w strefie oparcia dźwigarów stalowych dla wszystkich słupów, ze względu na fakt, że część wspomnianych wcześniej uszkodzeń może się ujawnić po dokładnym oczyszczeniu warstw odspojonego tynku oraz zalegającego pyłu.

Przykłady typowych uszkodzeń elementów stalowych dźwigarów dachowych oraz żelbetowych słupów podbudowy przedstawiono na fotografiach 1–3.

4. Analiza termiczna i statyczno-wytrzymałościowa

W celu oceny bezpieczeństwa pracy podstawowej konstrukcji nośnej hali grafityzacji przeprowadzono kontrolne obliczenia statyczno-wytrzymałościowe dla parametrów mechanicznych materiałów określonych na podstawie badań (w przypadku stali – na próbkach wyciętych z konstrukcji, natomiast w przypadku betonu konstrukcyjnego – na podstawie metod nieniszczących materiału). Dla spodziewanych scenariuszy obciążenia określono stopień wyczerpania oraz maksymalną temperaturę każdego z elementów konstrukcyjnych, przy której przewiduje się utratę jego nośności. Przeprowadzona analiza została poprzedzona oszacowaniem temperatury w hali w trakcie incydentalnej erupcji gorących gazów.

4.1. Oszacowanie temperatury oddziałującej na dźwigar stalowy w trakcie wybuchu

Ponieważ nie dysponowano żadnymi szczegółowymi danymi od służb technicznych użytkownika hali opisującymi wybuchowe wyrzucenie gazów (wartości temperatury gazu, przebieg ich zmian w czasie, poziom ciśnienia panującego w piecu podczas wybuchu) zdecydowano się dokonać zgrubnego szacunku temperatury w poziomie stalowej konstrukcji dachu, opierając się na następujących danych:

- temperatura rdzeni grafitowych w piecu: 3000°C,
- temperatura powietrza w hali podczas szarży: 50°C,
- skład gazów ustalony na podstawie badań emisji spalin – głównym gazem powstającym w trakcie szarży jest tlenek węgla (98%).

Dodatkowo przyjęto założenia do obliczeń, dotyczące:

- ciśnienia gazu w piecu w chwili poprzedzającej erupcję: 0,15–0,25 MPa,
- pominięcia temperatury i ilości wyrzucanego w trakcie eksplozji pyłu (niemożliwych do oszacowania bez pomiarów doświadczalnych),

– modelu obliczeniowego polegającego na oszacowaniu temperatury mieszaniny dwóch różnych gazów (tlenek węgla i powietrze), posiadających różną temperaturę i znajdujących się pod różnym ciśnieniem:

$$T_{\text{miesz}} = \frac{T_{\text{CO}} c_{\text{CO}} m_{\text{CO}} + T_{\text{pow}} c_{\text{pow}} m_{\text{pow}}}{c_{\text{CO}} m_{\text{CO}} + c_{\text{pow}} m_{\text{pow}}} \quad (1)$$

gdzie: T_{miesz} – temperatura mieszaniny gazów tlenku węgla (T_{CO}), powietrza (T_{pow}), c_{CO} – ciepło właściwe tlenku węgla, c_{pow} – ciepło właściwe powietrza, m_{CO} – masa tlenku węgla (dla założonego ciśnienia wybuchu), m_{pow} – masa powietrza (dla ciśnienia atmosferycznego).

Ponadto w obliczeniach przyjęto, że wyrzucany gorący gaz w całości wypełnia komorę pieca i miesza się z chłodnym powietrzem jedynie w słupie ograniczonym rzutem pieca i górnym obrysem dźwigara stalowego. W obliczeniach zaniedbano zależność ciepła właściwego powietrza i tlenku węgla od temperatury i ciśnienia, przyjmując do obliczeń wartości bardziej niekorzystne, wynoszące 1260 J/(kg·K) dla tlenku węgla i 1005 J/(kg·K) w przypadku powietrza. Należy zaznaczyć, że przyjęty model opisuje ustaloną sytuację termiczną po upływie pewnego czasu od incydentu, przy założeniu braku wentylacji. Rozwiązanie dokładne problemu na drodze analitycznej, uwzględniające proces wymiany gazów z otoczeniem hali, nie jest możliwe bez sprowokowania wybuchu i doświadczalnego pomiaru ilości wyrzucanych materiałów, ciśnienia wewnątrz pieca, a przede wszystkim opisanie modelu fizycznego i określenia mechanizmu powstawania erupcji. W wyniku zastosowanej procedury obliczeniowej określono średnią temperaturę gazów na poziomie 250–300°C. Oszacowana temperatura dotyczy otoczenia a nie samej konstrukcji. Ze względu na opór przejmowania ciepła na powierzchniach elementów stalowych dźwigara dachowego oraz bezwładność nagrzewu konstrukcji, rzeczywista średnia temperatura profili stalowych w trakcie incydentu termicznego będzie niższa.

4.2. Stalowa konstrukcja dachu

Obliczenia nośności stalowych dźwigarów kratowych wykonano w oparciu o normę PN-90/B-3200 [1]. W obliczeniach wykorzystano właściwości mechaniczne stali gatunku St3 (ustalonego na podstawie badań laboratoryjnych próbek stali wyciętych z konstrukcji), przyjmując w temperaturze eksploatacji konstrukcji $T < 70^\circ\text{C}$ wytrzymałość obliczeniową $f_d = 215 \text{ MPa}$ dla profili o grubości ścianki $t \leq 16 \text{ mm}$ oraz początkowy współczynnik sprężystości $E = 205 \text{ GPa}$. Przyjęte w obliczeniach właściwości materiałowe w przedziale temperatur $70^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$, wyrażono jako funkcje temperatury T zgodnie z zależnościami podanymi w [1].

Analizę statyczno-wytrzymałościową dźwigarów kratowych przeprowadzono w oparciu o geometrię podaną w dokumentacji projektowej przy uwzględnieniu stwierdzonych w trakcie wizji lokalnych zmian w przekrojach poprzecznych prętów. W obliczeniach przyjęto przegu-

bowe połączenia prętów kratownicy oraz ich długości wybozczeniowe równe teoretycznej długości prętów pomiędzy węzłami skratowania.

Obliczenia wykonano dla następujących obciążeń (określonych z wykorzystaniem norm [3–5]): ciężar własny kratownicy; ciężar własny konstrukcji pokrycia dachu, tj. blach trapezowych wraz z płatwiami oraz stężeniami pościowymi; ciężar własny konstrukcji pokrycia dachu, tj. żelbetowych płyt korytkowych pokrytych papą wraz z płatwiami oraz stężeniami pościowymi; obciążenie temperaturą $T = 50^{\circ}\text{C}$, nierównomiernie rozłożoną na wysokości kratownicy – ten rodzaj obciążenia wykorzystano dalej jako obciążenie pomocnicze do określenia nośności poszczególnych prętów kratownicy przy wzrastającej temperaturze eksploatacji ustroju nośnego (uwzględniając w ten sposób oddziaływanie termiczne w trakcie wybuchu materiału pieca); obciążenie śniegiem (dla strefy II); obciążenie wynikające z obecności worków śnieżnych powstałych na skutek działania wiatru. Dla wymienionych obciążeń zbudowano osiem kombinacji dla stanu granicznego nośności dla dwóch typów konstrukcji dachu (blacha trapezowa albo płyty żelbetowe korytkowe pokryte papą).

W tabeli 1 przedstawione zostały rezultaty obliczeń statycznych wybranych prętów dla kombinacji obciążenia wywołującego maksymalne lub minimalne siły osiowe F .

Tabela 1. Rezultaty obliczeń statycznych dla wybranych prętów.

Nr pręta*	F [kN]	φ	NR [kN]	Tgr [OC]
23, 35	185,2	0,36	104,3	***
39, 57	-185,2	nie dotyczy **	206,4	31
40, 56	142,4	0,37	151,8	22

Uwagi: */ oznaczenia według rysunku 3; **/ pręt rozciągany; ***/ niedobór nośności dla kombinacji bez uwzględnienia temperatury

Współczynnik wybozczeniowy φ uwzględnia zarówno efekty wybozczenia względem osi materiałowej albo niemateriałowej oraz wybozczenia względem osi 1 pojedynczej gałęzi, dla której uzyskuje się najmniejszy promień bezwładności przekroju. Wraz ze wzrostem temperatury eksploatacji konstrukcji T zmianie ulegają nie tylko właściwości mechaniczne stali, ale również siły przekrojowe w poszczególnych elementach kratownicy. W celu określenia wrażliwości poszczególnych prętów na wzrost temperatury, policzono graniczną wartość $T = T_{gr}$, w jakiej może teoretycznie pracować pręt z uwzględnieniem wyżej wymienionych efektów. Brak wartości T_{gr} oznacza przekroczenie warunku nośności bez dodatkowego wpływu temperatury. Wartość T_{gr} należy rozumieć jako wartość szacunkową określoną dla poszczególnego elementu i w żadnym razie nie wiązać jej z temperaturą graniczną określoną dla dźwigara kratowego. Praca ustroju nośnego w wysokich temperaturach związana jest z dużymi przemieszczeniami, które w rozważanym obiekcie muszą być ograniczone ze względu na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne. Dodatkowo duże przemieszczenia będą odpowiedzialne za dalszy wzrost sił przekrojowych związanych z przestrzenną pracą ustroju.

Rezultaty wykonanej analizy przedmiotowego dźwigara kratowego wskazały na konieczność dokonania wzmocnień w niektórych prętach dźwigarów pierwotnych (oznaczenia według rysunku 3): nr 23 i 35. Nośność tych prętów okazała się niewystarczająca dla kombinacji obciążeń bez uwzględnienia wpływu temperatury eksploatacyjnej 50°C .

Osobną grupę stanowiły pręty 39 i 57 oraz 40 i 56 (oznaczenia według rysunku 3). Nośność tych prętów jest niewystarczająca dla kombinacji uwzględniających wpływ temperatury eksploatacyjnej. Pręty te należą do grupy wykazującej wrażliwość na działanie temperatury, tj. wraz ze wzrostem temperatury rosną wartości sił osiowych. Przy określonym ich poziomie wyężenia dla kombinacji obliczeniowej, wynoszącym około 90%, nawet niewielki wzrost temperatury może spowodować utratę nośności. Utrata nośności tych elementów nie musi oznaczać utraty nośności dźwigara stalowego, niemniej zalecono wzmocnienie tych prętów.

4.3. Żelbetowa konstrukcja podbudowy

Obliczenia słupów żelbetowych podbudowy hali grafityzacji wykonano w oparciu o dane geometryczne przekrojów i ilość zbrojenia według dokumentacji projektowej. Klasę betonu określono za pomocą metody nieniszczącej (sklerometrycznej). W wyniku przeprowadzonych obliczeń według normy PN-EN 1992-1-1 [2] stwierdzono, że po wykonaniu niezbędnych napraw elementów wykazujących uszkodzenia (p. 3.4.) zapewniona będzie ich dalsza bezpieczna eksploatacja.

4.4. Zalecenia odnośnie wymaganych napraw i wzmocnień

Wyniki przeprowadzonych wizji lokalnych oraz analizy statyczno-wytrzymałościowej z uwzględnieniem efektów termicznych posłużyły do określenia zakresu niezbędnych napraw, wzmocnień i zabezpieczeń elementów konstrukcji przedmiotowej hali grafityzacji.

Zalecane prace dla części stalowej obejmowały: odtworzenie powłok zabezpieczenia antykorozyjnego stalowych elementów konstrukcji dachu, wzmocnienie newralgicznych w analizowanym dźwigarze prętów/słupków kratownicy (nr 23, 35), wzmocnienie prętów nr 39 i 57 oraz 40 i 56 dla wszystkich pierwotnych dźwigarów w hali, uzupełnienie brakujących stężeń pionowych stalowej konstrukcji dachu, oczyszczenie wszystkich łożysk przesuwnych dźwigara dachowego z warstw pyłu i usunięcie wszystkich ograniczeń krępujących swobodę ruchu dźwigara w kierunku poprzecznym hali, oczyszczenie z produktów korozji i dodatkowe wzmocnienie skorodowanych węzłów kratownicy w obszarze świetlików i wywietrzników hali, przywrócenie ciągłości wszystkich przeciętych gałęzi istniejących stężeń.

W przypadku słupów żelbetowych podbudowy zalecono naprawę uszkodzeń (obejmujących: pęknięcia, odspojenia, ubytki powierzchniowe, ślady korozji prętów stali zbrojeniowej). W wyniku prac naprawczych odtwa-

rzających początkową geometrię przekroju i otulinę betonową, przywrócona zostanie pierwotna zdolność konstrukcji do przenoszenia obciążeń i umożliwiona dalsza bezpieczna eksploatacja obiektu.

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule omówiono przypadek analizy hali przemysłowej z nietypowym oddziaływaniem termicznym związanym z prowadzonymi procesami technologicznymi grafityzacji (zachodzącymi w temperaturze około 3000°C) – co skutkuje osiągnięciem temperatury eksploatacji dla stalowej konstrukcji dachu na poziomie około 50°C – i wyjątkowym oddziaływaniem w trakcie wybuchowego wyrzutu materiału pieca o nieustalonych dokładnie parametrach.

Celem realizowanej opinii technicznej była analiza konstrukcji nośnej hali grafityzacji wraz z wytycznymi napraw i koncepcją zabezpieczeń przed wysoką temperaturą. Z uwagi na specyfikę analizowanego przypadku, zakres przeprowadzonych działań obejmował dodatkowo badania laboratoryjne próbek pobranych ze stalowej części konstrukcji (narażonych na oddziaływanie wysokiej temperatury w trakcie incydentalnych erupcji pieców) w celu określenia aktualnych parametrów stali, a także oszacowanie poziomu temperatury działającej na dźwigar stalowy w chwili wybuchu materiału pieca.

W przypadku analizy statyczno-wytrzymałościowej uwzględniono oddziaływania termiczne, tak związane z normalnymi warunkami technologicznymi procesów prowadzonych w hali grafityzacji, jak i incydentalnymi wybuchami materiałów w piecach. Oddziaływania termiczne technologiczne przyjęto jako obciążenie temperaturą $T = 50^{\circ}\text{C}$ nierównomiernie rozłożoną na wysokości kratownicy. Taki sposób obciążenia wykorzystano dalej jako obciążenie pomocnicze do określenia nośności poszczególnych prętów kratownicy przy wzrastającej temperaturze eksploatacji ustroju nośnego. Ostatecznie oszacowano maksymalne/graniczne wartości temperatury powodujące utratę nośności dla poszczególnych elementów dźwigara kratowego, opisując w ten sposób wrażliwość prętów stalowych na wyjątkowe oddziaływanie termiczne występujące w trakcie wybuchów. Zastosowana procedura pozwoliła ostatecznie na określenie, które pręty kratownicy stalowej wymagają wzmocnienia z uwagi na uwzględnienie efektów oddziaływań termicznych.

W stanie aktualnym konstrukcja nośna hali grafityzacji nie wykazywała oznak przeciążenia od występujących oddziaływań – nie stwierdzono znaczących odkształceń dla elementów stalowych konstrukcji dachu, ani symptomów wyczerpania nośności słupów żelbetowych. Niewątpliwie jednak znaczącemu obniżeniu uległa trwałość konstrukcji, wskutek wieloletniego oddziaływania niekorzystnego i agresywnego środowiska oraz podwyższonej temperatury, sprzyjającej korozji tak elementów stalowych konstrukcji dachu, jak i betonu słupów (a w konsekwencji tak-

że prętów stali zbrojeniowej tych elementów). Niezbędne okazało się wykonanie prac naprawczych i wzmocniających w odniesieniu do elementów stalowej konstrukcji dachu, jak i żelbetowych słupów podbudowy. Wymagane prace miały na celu naprawę stwierdzonych uszkodzeń oraz wprowadzenie niezbędnych zabezpieczeń i wzmocnień, tak aby konstrukcja mogła być bezpiecznie użytkowana przez kolejne lata. Realizacja zalecanych wzmocnień w odniesieniu do elementów stalowych dźwigarów pozwoliła także na ich zabezpieczenie przed możliwymi w trakcie incydentalnych erupcji pieców grafityzacyjnych wpływami wysokiej temperatury, gdyż w analizie statyczno-wytrzymałościowej dla tych elementów uwzględniono niekorzystny wpływ czynnika temperatury.

W przypadku przedmiotowej hali specjalne zabezpieczenia konstrukcji dźwigara stalowego przed wysoką temperaturą są nieuzasadnione. Zastosowanie zabezpieczenia w postaci obłożenia konstrukcji materiałem termoizolacyjnym prowadzi do powstania dodatkowych ognisk korozyjnych, niemożliwych do zidentyfikowania i usunięcia w trakcie okresowych przeglądów obiektu, co zagraża bezpieczeństwu i trwałości stalowej konstrukcji dachu. Ewentualne rozwiązanie w postaci farb przeciwogniowych jest również nieskuteczne, ze względu na fakt aktywacji tego typu zabezpieczenia w temperaturze powyżej 250°C. Poniżej tego poziomu temperatury stal nie wykazuje znaczących redukcji właściwości mechanicznych, tak doraźnych, jak i rezydualnych. Oszacowane poziomy temperatury nie wpływają niekorzystnie na nośność słupów żelbetowych podbudowy hali. W trakcie wizji lokalnych nie stwierdzono żadnych przejawów oddziaływania wyższych poziomów temperatury, np. w postaci przebarwień betonu słupów.

Zapewnienie bezpieczeństwa dalszego użytkowania hali grafityzacji wiąże się z realizacją wszystkich zaleceń – dotyczących tak napraw i wzmocnień, jak i wprowadzonych zabezpieczeń – oraz właściwym utrzymaniem obiektu, obejmującym okresowe kontrole i prace zabezpieczające (np. regularne czyszczenie elementów stalowych z osadzonych pyłów i zabezpieczanie ich powłoką antykorozyjną). Pożądane byłoby także wprowadzenie systemu ciągłego monitoringu temperatury na poziomie dolnego pasa dźwigarów stalowych nad każdym piecem (zakres pomiaru 20 – 500°C), co pozwoli uzyskać dane o rzeczywistej wartości temperatury w trakcie normalnej eksploatacji obiektu, jak i podczas incydentów termicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-90/B-03200: Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [3] PN-EN 1990:2004. Podstawy projektowania konstrukcji
- [4] PN-EN 1991-1-1:2006. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [5] PN-EN 1991-1-3:2005. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – obciążenie śniegiem