

dr inż. Jan Gierczak¹⁾

ORCID: 0000-0003-3219-1844

dr inż. Rajmund Leszek Ignatowicz^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3663-0170

Estimation of thermal stresses trapped in the mast shell shaft after a fire

Oszacowanie naprężeń termicznych uwięzionych w trzonie powłokowym masztu po pożarze

DOI: 10.15199/33.2025.03.02

Abstract: This paper presents a method of analyzing a steel shell structure subjected to a momentary high-temperature load due to a fire caused by an electrical short circuit. Based on metallographic tests and the temperature and distribution recorded during the fire by the extinguishing team, the temperature load on the mast shaft structure was numerically reconstructed. The numerical simulation results showed the formation of internal (residual) stresses after the fire-extinguishing action, which can only be released by dismantling the structure. Based on the damaged state of the zinc coating, a method of estimating the maximum prevailing temperature during the fire was presented.

Keywords: steel structures; shell structures; fire; mast.

Streszczenie: W artykule przedstawiono sposób analizy stalowej konstrukcji powłokowej poddanej chwilowemu obciążeniu wysoką temperaturą na skutek pożaru wywołanego zwarcie instalacji elektrycznej. Na podstawie badań metalograficznych i zarejestrowanej temperatury oraz jej rozkładu w czasie pożaru przez zespół gaśniczy, odtworzono numerycznie obciążenie temperaturą konstrukcji trzonu masztu. Wyniki symulacji numerycznej pozwoliły wykazać powstanie naprężeń wewnętrznych (własnych), powstałych po zakończeniu akcji gaśniczej, które można uwolnić tylko przez demontaż konstrukcji. Na podstawie stanu uszkodzenia powłoki cynkowej przedstawiono sposób oszacowania maksymalnej temperatury panującej w czasie pożaru.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe; konstrukcje powłokowe; pożar; maszt.

Lighting masts supporting floodlights are a standard structural element of stadiums. A commonly adopted solution uses polygonal-section steel shell masts, which are cold-formed with tapered cross-sections. The cross-sectional profile of the mast transitions linearly from the base to the apex. The sectional dimensions are selected to accommodate the internal electrical installation within the structure. The design of lighting masts up to 20 m in height is governed by specific regulatory standards [1÷4], whereas masts exceeding 20 m must be designed in accordance with the fundamental Eurocode 3 standards [5÷8]. The primary loads acting on such structures include self-weight, the weight of the floodlights, and wind pressure [9]. This study presents an investigation and analysis of a lighting mast exceeding 43 m in height, in which an internal fire was triggered by an electrical short circuit. Structural steel components exposed to elevated temperatures deform during fire exposure and undergo rapid cooling due to firefighting efforts. This results in microstructural changes within the steel, caused by the uniform and rapid temperature rise at the onset of the fire, followed by a rapid decrease due to the application of extinguishing agents [10÷13]. Microstructural changes in steel caused by fire exposure increase hardness and correspondingly decrease ductility and impact resistance.

Stałym elementem stadionów są maszty oświetleniowe, na których umieszcza się reflektory. Popularnym rozwiązaniem jest zastosowanie stalowych masztów powłokowych o przekroju wielokątnym, formowanych na zimno, o zbieżnych przekrojach. Przekrój poprzeczny masztu zmienia się liniowo od dołu do szczytu masztu. Gabaryty przekroju dobrano tak, aby możliwe było wykonanie instalacji elektrycznej w środku konstrukcji. Projektowanie masztów oświetleniowych do 20 m jest ujęte w osobnych przepisach normowych [1÷4]. Maszty o wysokości większej niż 20 m muszą być projektowane na podstawie norm podstawowych EC3 [5÷8]. Głównym obciążeniem takiej konstrukcji jest ciężar własny, ciężar reflektorów oraz obciążenie od parcia wiatru [9]. Przeprowadziliśmy badania i analizy masztu oświetleniowego o wysokości powyżej ~43 m, w którego wnętrzu doszło do pożaru na skutek zwarcia instalacji elektrycznej. Konstrukcje stalowe, które były poddane działaniu temperatury, odkształcają się w czasie pożaru, a następnie są gwałtownie schładzane w wyniku akcji gaśniczej. Powoduje to zmiany w mikrostrukturze stali, będące skutkiem równomiernego i gwałtownego wzrostu temperatury – na początku pożaru, a następnie gwałtownego jej spadku na skutek zastosowanych materiałów gaśniczych [10÷13]. Zmiany w mikrostrukturze stali konstrukcyjnej, na skutek działania pożaru, powodują zwiększenie twardości, a tym samym radykalne zmniejszenie jej ciągliwości i udatności.

W wyniku wygrzewania może dojść do „uwolnienia” naprężeń własnych, występujących w miejscach zgniotu/załomu po-

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: rajmund.ignatowicz@pwr.edu.pl

Prolonged heating may also release residual stresses, particularly in areas of localized plastic deformation, such as the cold-formed shell folds. This phenomenon reduces the local strengthening effect and may consequently decrease the original load-bearing capacity of the mast's shell section. Post-fire, the structural capacity of the cross-section becomes more uniform across its perimeter, as the local strengthening effect diminishes.

Mast Structure

The total height of the mast was 42.6 m. The structure comprised the main mast and a cantilevered section for mounting the floodlight substructure. The modular assembly lengths were: 3×11.90 m, 4.40 m, and 7.80 m. The cross-section was a sixteen-sided polygon, with the wall thickness varying from 8 mm at the base to 4 mm at the top. The cross-section width at the foundation interface was 1350 mm, narrowing to 845 mm at the upper part of the mast shaft. This dimension allowed an internal service ladder to access the maintenance platform at 35.0 m. The mast was designed and fabricated using S355J0 steel. The base plate, circular in shape, had a diameter of 1650 mm and a thickness of 70 mm. Anchor bolt holes for M36 bolts were distributed around the perimeter of the base plate, with reinforcing ribs positioned between the holes. A maintenance hatch measuring 1550×500 mm was located in the lower section of the mast shaft. The steel structure was protected with a galvanized coating, and the edge of the access hatch was reinforced with a 20 mm thick plate. A second access hatch at the mast's apex, at the maintenance platform, enabled entry to the technical platform. Electrical wiring and the control system, located approximately 80 cm above the base plate, were housed within the mast. The floodlight head featured a support structure for 75 R2MAXI/5NA726 floodlight units rated at 2 kW. The head structure was tilted 15° from the vertical axis.

Fire Incident

Following a speedway event, with the floodlights in operation, smoke emanated from the mast's apex. The power supply was immediately disconnected, and firefighting operations were swiftly initiated. Upon opening the lower hatch, the ignition source was identified in the electrical control installation (Figure 1). During the response, firefighters monitored the mast's steel temperature using thermal imaging cameras. The maximum recorded temperature near the mast base did not exceed 450°C , while most of the mast's surface temperature ranged between $250\text{--}300^\circ\text{C}$ at the fire's peak. Fire suppression lasted approximately 0.5 hours. The cause of the fire was identified as a short circuit in the contactor, likely due to undetected material defects or wear, leading to sparking and ignition.

Condition of the Mast Structure After the Fire

Traces of severe oxidation of the zinc coating were observed on the external walls, caused by exposure to high temperatures above 200°C , which reactivates the reaction between iron and

włoki (zaginanej na zimno) i redukcji efektu lokalnego wzmocnienia. Może to prowadzić do zmniejszenia pierwotnej nośności przekroju trzonu powłokowego, traktowanego całościowo (wynikającej z lokalnych wzmocnień), która będzie po takim incydencie pożarowym bardziej wyrównana na całym obrysie przekroju.

Konstrukcja masztu

Całkowita wysokość masztu wynosiła 42,6 m. Konstrukcja składała się z masztu głównego i części wspornikowej służącej do zamocowania podkonstrukcji dla reflektorów. Długość poszczególnych części montażowych wynosiła: $3 \times 11,90$ m, 4,40 m, 7,80 m. Przekrój poprzeczny masztu był szesnastobocznym wielobokiem. Grubość poszczególnych części zmieniała się na wysokości od 8 mm do 4 mm. Szerokość przekroju poprzecznego masztu przy podstawie (w miejscu zamocowania w fundamencie) wynosiła 1350 mm, a na górze trzonu głównego 845 mm. Taka szerokość przekroju umożliwiła umieszczenie w środku drabiny serwisowej w celu zapewnienia komunikacji z pomostem montażowym na wysokości 35,0 m. Konstrukcję zaprojektowano i wykonano ze stali S355J0. Podstawę masztu wykonano z blachy w kształcie koła o średnicy 1650 mm i grubości 70 mm. Na zewnątrz blachy podstawy masztu rozmieszczono otwory dla śrub kotwiących M36. Blachę podstawy pomiędzy otworami wzmocniono żebrami. W części dolnej trzonu masztu zlokalizowany był właz rewizyjny o wymiarach 1550×500 mm. Konstrukcja stalowa masztu była zabezpieczona powłoką cynkową. Krawędź otworu rewizyjnego wzmocniono blachą o grubości 20 mm. Na szczycie trzonu wieży, tj. w miejscu pomostu rewizyjnego, znajdował się drugi otwór rewizyjny, który umożliwiał wejście na pomost techniczny. W środku masztu były zainstalowane przewody elektryczne oraz cały układ sterująco-załączający, który znajdował się ~ 80 cm nad blachą podstawy. Głowica słupa oświetleniowego miała konstrukcję wsporczą pod pakiety reflektorów typu R2MAXI/5NA726 (75 sztuk o mocy 2 kW). Konstrukcja głowicy była pochylona do osi pionowej o kąt 15° .

Przebieg pożaru

Po zakończonym meczu żużlowym, przy włączonych reflektorach, zauważono dym wydobywający się ze szczytu masztu. Natychmiast zostało odłączone zasilanie i przystąpiono bardzo sprawnie do akcji gaśniczej. Po otwarciu włazu dolnego widać było zarzewie ognia w miejscu instalacji elektrycznej – sterowniczej (rysunek 1). Strażacy, prowadząc akcję gaśniczą, kontrolowali jednocześnie temperaturę trzonu stalowego masztu za pomocą kamer termowizyjnych. Maksymalna zarejestrowana temperatura występowała blisko podstawy masztu i wynosiła nie więcej niż 450°C , natomiast na większej części powierzchni słupa, w szczycie rozwoju pożaru, mieściła się w zakresie $250\text{--}300^\circ\text{C}$. Akcja gaśnicza trwała ok. 2,5 h. Ustalono, że przyczyną pożaru było zwarcie w styczniku na skutek trudnych do określenia wad materiału lub zużycia, co spowodowało iskrenie i zapłon.

zinc. The visible white streaks contain compounds such as zinc oxide, zinc hydroxide, and zinc carbonate (Photo 1).

This phenomenon occurs when freshly galvanized surfaces have not yet developed a protective layer, i.e., a patina of zinc carbonate, and come into contact with moisture. It is likely that due to the hot gases escaping from the top of the column during the fire, approximately three-quarters of the column's height reached a sufficiently high temperature to activate the reaction between zinc and iron. Solidified condensates of the zinc coating were observed in the lower part of the column, indicating that the temperature in these areas may have locally exceeded 419.5°C. The solidified molten zinc droplets were primarily found at the base of the column, on the side facing the stadium slab. When rapidly heated above 420°C, the zinc melted, and the Fe-Zn reaction could not absorb its entire amount (Photo 2).

No gap was observed between the base plate and the foundation, and no excessive column tilting was visually detected. However, the column structure's flexibility, the eccentric location of the cantilever and lighting panel, and its high susceptibility to wind action made it difficult to measure the actual deflection.

The fundamental criterion for assessing the suitability of a steel structure exposed to high temperatures during a fire and subsequently subjected to rapid cooling is the examination of the structural material's microstructure. Samples were taken from various locations for material testing, ensuring that the integrity of the mast shaft's cross-section remained unaffected, and laboratory analyses were commissioned [7]. In addition to samples from the steel structure,

a fragment of the aluminium alloy mounting rail, which had partially melted at approximately 70 cm above the base of the column, was also collected. Aluminium alloys melt at a temperature of 660°C. Furthermore, samples were taken from an

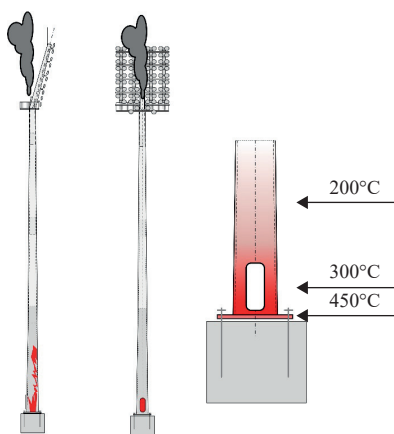


Fig. 1. Diagram of a fire inside a lighting mast

Rys. 1. Schemat pożaru wewnątrz masztu oświetleniowego

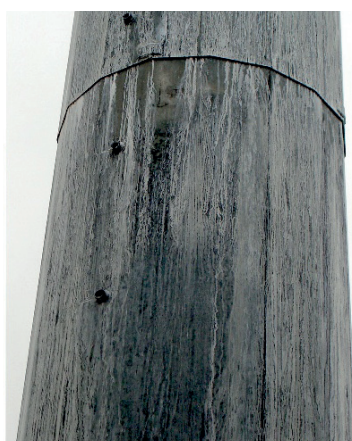


Photo 1. Oxidized zinc coating streaks on the walls of a column subjected to temperature division during a fire

Fot. 1. Zacieki z utlenionej warstwy powłoki cynkowej na ścianach słupa poddanego działaniu temperatury podczas pożaru

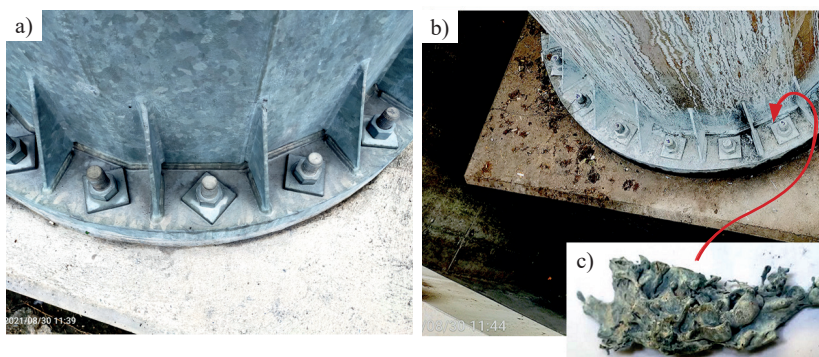


Photo 2. Column base: a) witnessed column; b) column subjected to temperature during a fire; c) pond of solidified molten zinc

Fot. 2. Podstawa słupa: a) słup świadek; b) słup poddany działaniu temperatury podczas pożaru; c) jeziorko zastygłego upłynionego cynku

Stan konstrukcji masztu po pożarze

Na ścianach zewnętrznych występowały ślady silnego utleniania powłoki cynkowej, co było spowodowane działaniem wysokiej temperatury, która powyżej 200°C uaktywnia ponownie reakcję pomiędzy żelazem a cynkiem. Widoczne białe zacieki tworzą związki takie, jak tlenek cynku, wodorotlenek cynku lub węglan cynku (fotografia 1).

Takie zjawisko przebiega wtedy, gdy świeżo ocynkowane powierzchnie nie zdołały jeszcze wytworzyć warstwy ochronnej, tj. patyny z węglanu cynku, a już zetknęły się z wilgocią. Prawdopodobnie pod wpływem gorących gazów, uchodzących górną słupa w czasie pożaru, 3/4 wysokości trzonu osiągnęło temperaturę na tyle dużą, że uaktywniła się reakcja pomiędzy cynkiem a żelazem. W dolnej części słupa zauważono zastygłe skropliny warstwy cynkowej, co wskazywałoby, że temperatura w tych miejscach mogła lokalnie osiągnąć ponad 419,5°C. Zastygłe skropliny ciekłego cynku występowały przede wszystkim przy podstawie słupa od strony płyty stadionu. Cynk przy gwałtownym nagrzaniu do temperatury wyższej niż 420°C stopił się, a reakcja FeZn nie zdążyła zaabsorbować całej jego ilości (fotografia 2).

Nie zauważano żadnej szczeliny między blachą podstawy a fundamentem i nie stwierdzono wizualnie nadmiernego przechylenia słupa. Należy podkreślić, że konstrukcja słupa utrudniała pomiar rzeczywistego wychylenia ze względu na wiotkość konstrukcji, mimośrodową lokalizację wysięgu słupa wraz z panelem oświetleniowym oraz dużą podatność na działanie wiatru.

Podstawą oceny przydatności konstrukcji stalowej, poddanej działaniu wysokiej temperatury podczas pożaru,

jest badanie mikrostruktury materiału konstrukcyjnego. Pobrano próbki z różnych miejsc do badań materiałowych, tak aby nie naruszyć integralności przekroju poprzecznego trzonu masztu i zlecono badania [7].

a następnie nagłemu jej schłodzeniu, jest badanie mikrostruktury materiału konstrukcyjnego. Pobrano próbki z różnych miejsc do badań materiałowych, tak aby nie naruszyć integralności przekroju poprzecznego trzonu masztu i zlecono badania [7].

identical reference mast, which had not been exposed to fire. The study included an analysis of the material's chemical composition, microstructure, and hardness.

Post-fire structural test results

The results of the material tests [14] indicated that the samples taken from the access panel (Photo 3) exhibited an identical ferritic-pearlitic microstructure with distinct banding resulting from the plastic deformation of the element. Additionally, locally visible features of the Widmanstätten structure were observed, which did not result from overheating the steel during the fire but rather from incomplete recrystallization after cold working. No grain growth was detected in either of the analyzed samples. Their surface was covered with a discontinuous, damaged zinc coating. The average hardness of both samples was similar, measuring: sample No.1: 197.8 ± 8.6 HV10 reference sample: 194.6 ± 8.9 HV10. Spectral analysis of the access panel's chemical composition confirmed that the material corresponds to S355JR steel (PN-EN 10025-2:2019-11), with a silicon (Si) content of approximately 0.24%. The samples exhibited comparable chemical composition, hardness, and microstructural characteristics. The surface layer contained a zinc coating that showed no signs of melting or severe oxidation. These findings indicate that sample No. 1, which was directly exposed to the fire's heat, did not overheat beyond 200°C the temperature at which rapid oxidation of the zinc layer and the growth of Fe-Zn intermetallic phases occur.

Material sample No. 7, taken from the screw of the access panel, exhibited a proper martensitic microstructure with a hardness of 385.9 ± 6.4 HV10. The chemical composition of the tested screw was also similar to that of class 10.9 bolts, as specified in PN-EN ISO 898-1:2013-06. According to this standard, the hardness of a class 10.9 screw should range between 320–380 HV. The average hardness of the tested screw slightly exceeded the maximum hardness specified by the standard. Bolts of class 10.9, according to PN-EN ISO 898-1:2013-06, should undergo tempering at a minimum temperature of 425°C. The high hardness value suggests that the screw was tempered at the minimum recommended temperature of approximately 425°C. If the screw had been exposed to fire temperatures exceeding 425°C, its hardness would have decreased. Therefore, the findings indicate that the screw was not subjected to temperatures higher than 425°C during the fire. The screw's surface featured a zinc coating, along with a partially oxidized zinc layer of 15–20 µm thickness. Locally, the zinc

Oprócz próbek z konstrukcji stalowej pobrano również fragmenty szyny montażowej ze stopu aluminium, która uległa częściowemu stopieniu na wysokości ok. 70 cm od podstawy słupa. Stop aluminium topi się w temperaturze 660°C. Dodatkowo pobrano próbki konstrukcji stalowej z identycznego masztu, tzw. świadka, który nie był poddany działaniu pożaru. W ramach badań określono skład chemiczny, mikrostrukturę i twardość.

Wyniki badań konstrukcji masztu po pożarze

Wyniki badań materiałowych [14] wykazały, że materiał próbek pobrany z drzwiczek (fotografia 3) charakteryzował się identyczną mikrostrukturą ferrytyczno-perlityczną z wyraźną pasmowością wynikającą z przeróbki plastycznej elementu oraz z lokalnie widocznymi cechami struktury Widmanstättena, która nie wynikała z przegrzania stali podczas pożaru, lecz z niepełnej rekrytalizacji po zgnioście. W obu analizowanych próbkach nie stwierdzono rozrostu ziarna. Ich powierzchnię pokrywała nieciągła uszkodzona powłoka cynkowa. Średnia twardość obu próbek była zbliżona i wynosiła odpowiednio: nr 1 – $197,8 \pm 8,6$ HV10; próbki świadka $194,6 \pm 8,9$ HV10. Analiza spektralna składu chemicznego drzwiczek potwierdziła gatunek stali S355JR (PN-EN 10025-2:2019-11), z zawartością krzemu Si ok. 0,24%. Próbki wykazały zbliżony skład chemiczny i twardość oraz zbliżone cechy mikrostruktury, a na powierzchni występuje warstwa cynkowa niewykazująca cech nadtopienia lub silnego utlenienia. Świadczy to o tym, że próbka z drzwiczek nr 1 bezpośrednio narażonych na ciepło pożaru nie została przegrzana powyżej 200°C, w której temperaturze następuje szybkie utlenianie warstwy cynkowej i przyrost faz stopowych Fe-Zn.

Próbka materiału nr 7 pobrana ze śruby z drzwiczek charakteryzowała prawidłowa mikrostruktura martenzytu o twardości $385,9 \pm 6,4$ HV10. Skład chemiczny badanej śruby był również zbliżony do składu chemicznego śrub klasy 10.9 zgodnie z normą PN-EN ISO 898-1:2013-06. Zgodnie z normą PN-EN ISO 898-1:2013-06 twardość śruby klasy 10.9 powinna wynosić 320–380 HV. Średnia wartość twardości badanej śruby nieznacznie przekracza maksymalną twardość określoną przez tę normę. Śruby klasy 10.9 zgodnie z normą PN-EN ISO 898-1:2013-06 powinny być odpuszczane w temperaturze minimum 425°C. Górna wartość dopuszczalnej twardości świadczy, że śruba była odpuszczana przy minimalnej temperaturze zalecanej normą, a więc ok. 425°C. W przypadku oddziaływania temperatury pożaru większej niż 425°C, twardość śruby malałaby, co wskazuje, że podczas pożaru śruba nie była narażona na temperaturę wyższą niż 425°C. Na powierzchni śruby występowała warstwa

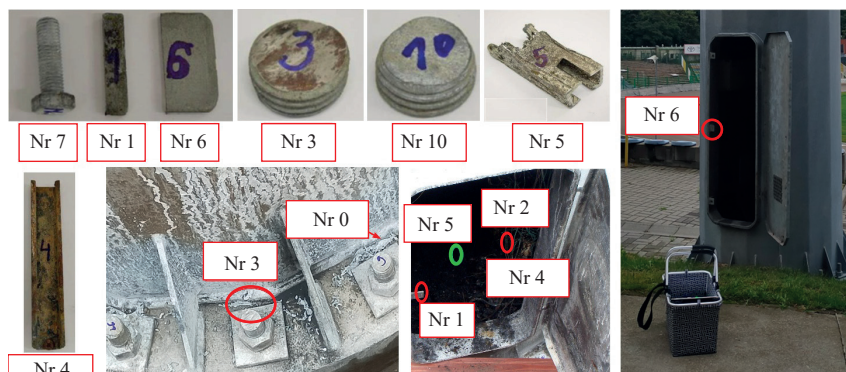


Photo 3. Locations of samples taken for metallographic testing
Fot. 3. Miejsca pobranych próbek do badań metallograficznych

layer did not contain iron, which, considering its small thickness, suggests that it was a galvanised zinc layer applied by diffusion. The minor local oxidation of this layer indicates that the fire's heat exposure was not intense, and the temperature did not exceed 420°C. Since pure zinc melts at 419.5°C, a galvanised coating composed almost entirely of pure zinc would have melted rapidly at higher temperatures. The presence of only small amounts of oxygen further confirms that the oxidation of the zinc coating at high temperatures was not severe. Additionally, the high zinc content in the coating suggests that the temperature remained significantly below 420°C. Severe oxidation of the zinc coating and the diffusive formation of Fe-Zn intermetallic phases typically occur at temperatures above 200°C.

The chemical composition of sample No.5, taken from the aluminium busbar (located near the contactor box), was identified as an aluminium alloy from the 6000 series, specifically EN AW 6101, according to PN-EN 573-3:2019 E. The microstructure of the melted section displayed a dendritic structure similar to that of cast aluminium alloys. The melting temperature of wrought aluminium alloys is approximately 660°C. Based on this, it can be concluded that the busbar was locally exposed to temperatures exceeding 660°C. However, considering the results of the previously analysed samples, which indicate that the temperature near these elements did not exceed 300÷420°C, it seems unlikely that only the area near the aluminium busbar would have reached temperatures above 660°C. This suggests that an electrical short circuit at the contactor may have caused the melting of the aluminium busbar. The current flowing through the busbar would have induced resistive heating, which could have melted the material.

Analysis of the Mast Structure Exposed to High Temperatures. Material testing of the collected samples indicated that the temperatures recorded during the fire did not cause adverse changes in the steel microstructure. However, due to exposure to such high temperatures, certain areas of the structure must have reached stress levels equal to or near the yield strength, potentially leading to the entrapment of residual stresses upon cooling. This phenomenon results from changes in mechanical properties with increasing temperature [5,10]. These effects were incorporated into nonlinear GMNIA (Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections) simulations, which accounted for variations in yield strength $f_y(T)$, elastic modulus $E(T)$, and thermal expansion coefficient $\alpha_T(T)$, following the methodology outlined in [5]. To develop a shell model of the entire mast structure, nonlinear elastic constraints (including contact stresses and friction) were implemented to simulate the connection to the foundation and the clamped mounting joints between structural components. The column structure model (Figure 2) was created using SOFiSTiK software [15]. The primary objective of the analysis was to identify potential locations of residual (thermal) stress entrapment following the completion of the firefighting operation. The numerical simulations were conducted in multiple stages: Stage I – Operational phase (normal service conditions of the mast), Stage II – Fire phase (heat exposure and structural response), Stage III – Cooling phase (thermal contraction and potential stress entrapment), Stage IV – Dismantling phase (considering

cynekowa i częściowo utleniona warstwa cynkowa o grubości 15÷20 μm . Lokalnie warstwa cynkowa nie zawierała żelaza, co, z uwzględnieniem jej małej grubości, wskazuje na to, że jest to warstwa cynku galwanicznego, nakładana dyfuzyjnie. Niewielkie lokalne utlenienie tej warstwy świadczy o tym, że oddziaływanie ciepła pożaru nie było również na tyle intensywne, a temperatura nie powinna przekraczać 420°C. Czysty cynk topi się w temperaturze 419,5°C, tak więc powłoka galwaniczna zbudowana niemal z czystego cynku uległaby szybkiemu stopieniu w wyższej temperaturze. Niewielkie ilości tlenu potwierdzają również, że utlenianie powłoki cynkowej w wysokiej temperaturze nie było intensywne, a duża zawartość cynku w powłokach świadczy o tym, że temperatura była znacznie niższa niż 420°C. Silne utlenianie powłoki cynkowej oraz dyfuzyjne tworzenie się faz międzymetalicznych Fe-Zn zachodzi od temperatury powyżej 200°C.

Skład chemiczny próbki nr 5 z szyny aluminiowej (zlokalizowanej blisko skrzynki stycznika) zidentyfikowano jako stop aluminium serii 6000, np. gatunku EN AW 6101 wg normy PN-EN 573-3:2019 E. Mikrostrukturę przetopionego fragmentu charakteryzowała budowa dendrytyczna, zbliżona do mikrostruktury odlewniczych stopów aluminium. Temperatura topnienia stopów aluminium do przeróbki plastycznej wynosi ok. 660°C. Na tej podstawie należałoby stwierdzić, że szyna znajdowała się lokalnie w obszarze o temperaturze przekraczającej 660°C. Analizując jednak wyniki badań wcześniej opisywanych próbek, z których wynika, że temperatura w pobliżu tych elementów, z których pobrano próbki, nie przekraczała 300÷420°C, wydaje się wątpliwe, aby jedynie w pobliżu aluminiowej szyny temperatura przekraczała 660°C. Co potwierdzałoby, że przyczyną stopienia szyny aluminiowej mogło być zwarcie prądowe na styczniku. Prąd płynący przez szynę będzie powodował jej oporowe rozgrzewanie, które może doprowadzić do stopienia materiału.

Analiza konstrukcji masztu poddanej działaniu wysokiej temperatury. Badania materiałowe pobranych próbek wykazały, że temperatura, jaką zarejestrowano w czasie pożaru, nie spowodowała niekorzystnych zmiany w mikrostrukturze stali. Jednak konstrukcja, w wyniku oddziaływania takiej temperatury, musiałaby w pewnym obszarze osiągnąć naprężenia równe lub bliskie granicy plastyczności, a tym samym w wyniku ostudzenia mogłyby zostać uwiecznione naprężenia własne. Wynika to ze zmiany parametrów wytrzymałościowych ze wzrostem temperatury [5, 10]. Uwzględniono to w analizach nieliniowych typu GMNIA wraz ze zmianami $f_y(T)$, $E(T)$, $\alpha_T(T)$ zgodnie z [5]. Tworząc model powłokowy całej konstrukcji masztu, wykorzystano dodatkowo nieliniowe więzi sprężyste (naprężenia kontaktowe, tarcie), które odwzorowywały połączenie z fundamentem oraz montażowe połączenia zaciskowe pomiędzy elementami montażowymi. Model konstrukcji słupa (rysunek 2) stworzono w systemie SOFiSTiK [15]. Celem analizy było określenie potencjalnych miejsc uwięzienia naprężeń własnych (termicznych) po zakończeniu akcji gaśniczej. Analizy numeryczne przeprowadzono wieloetapowo: I – etap eksploatacji słupa, II – etap pożaru, III – etap schłodzenia, IV – etap demontażu konstrukcji, z uwzględnieniem deformacji i sztywności elementów powłokowych z poprzedniego kroku obliczeniowego.

Otrzymane wyniki analiz numerycznych (rysunek 3) uwiarydlały w konstrukcji występowanie miejsc, w których zostały wprowadzone naprężenia termiczne w czasie pożaru o wartoś-

deformations and stiffness changes from previous steps). Each stage accounted for the deformations and stiffness variations of the shell elements from the preceding calculation step, ensuring an accurate representation of the structural response throughout the entire process.

The results of numerical analyses (Figure 3) revealed specific areas within the structure where thermal stresses introduced during the fire reached the yield strength. Partial release of these stresses is possible after removing the external constraints, which, in this case, requires a complete dismantling of the structure. As a result, the residual stresses that could be released in the mast shaft shell after full dis-

assembly did not exceed approximately 22 MPa. It is important to emphasize that the presented analysis did not account for material changes resulting from cold forming of the mast shaft shell, which could further refine the conclusions drawn from the study. To enhance the understanding of structural behaviour, ongoing numerical investigations continue by parameterizing key variables. The methodology for these calculations should be further refined as potential guidelines for similar future cases. According to the analysis, dismantling the structure is necessary for repair and maintenance and to release the residual stresses trapped during the fire (Photo 4).

Summary and Conclusions

In analysing the case presented, two main issues relevant to the reconstruction or restoration of steel structures after

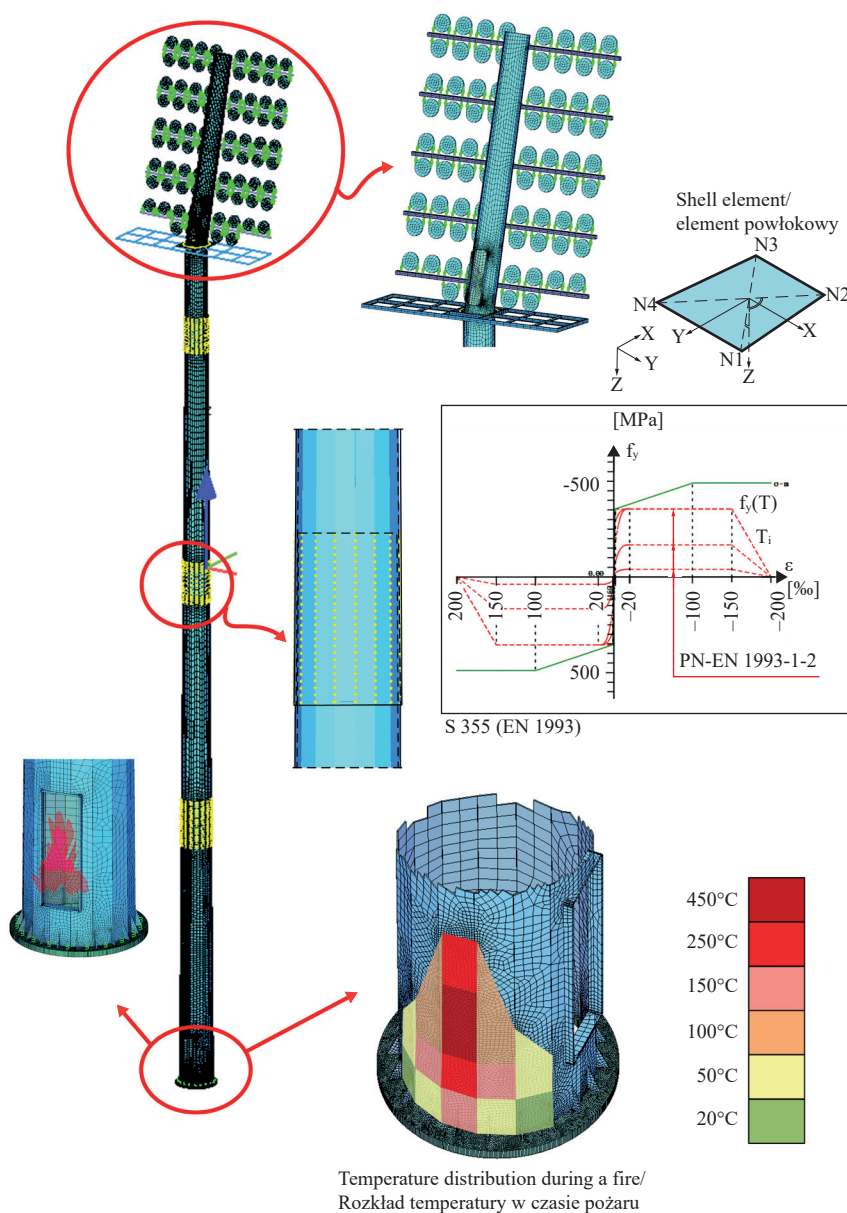


Fig. 2. Numerical model of the SOFiStiK shell lighting mast structure [15]

Rys. 2. Model numeryczny konstrukcji masztu oświetleniowego powłokowego SOFiStiK [15]

wytycznych przy realizacji tego typu zadania. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, w tym przypadku konieczny jest demontaż konstrukcji nie tylko w celu naprawy i konserwacji, ale również z powodu częściowego uwolnienia naprężeń uwięzionych w czasie pożaru (fotografia 4).

Podsumowanie i wnioski

W analizie przedstawionego przypadku można wyszczególnić dwa główne zagadnienia, które mogą mieć zastosowanie przy rekonstrukcji lub odbudowie obiektów konstrukcji stalowych po pożarze. **Pierwsze zagadnienie, to obserwacja uszkodzenia powłoki cynkowej na powierzchni elementów stalowych.** Pozwala to oszacować temperaturę, jaka panowała w elemencie oraz jak długo ten element był poddany działaniu danej temperatury. W temperaturze powyżej 200–350°C, po kilkunastu

ciach granicy plastyczności. Częściowe uwolnienie tych naprężeń jest możliwe po usunięciu więzi zewnętrznych, co w tym przypadku oznaczało demontaż całkowity konstrukcji. W efekcie naprężenia, jakie można było uwolnić w powłocie trzonu, po całkowitym demontażu, nie przekraczały ~ 22 MPa. Należy podkreślić, że przedstawiona analiza nie uwzględniała zmian materiału, jakie wynikają z formowania powłoki trzonu słupa na zimno, co mogłoby wzbogacić zaprezentowane rozważania o dodatkowe wnioski. Kontynuujemy więc badania numeryczne, parametryzując poszczególne zmienne. Sposób podejścia do obliczeń powinien zostać doprecyzowany w formie ewentualnych

a fire can be identified. **The first issue is the observation of damage to the zinc coating on the surface of the steel elements.** This allows for estimating the temperature in the element and the duration of exposure to a given temperature.

At temperatures exceeding $200\pm 350^{\circ}\text{C}$, after several minutes, the zinc coating would react with the iron. The colour of the coating should appear dull silvery-grey, changing to reddish-grey with extended heating times. In the case of silicon-unsaturated steels, the behaviour of the coating differs, as the d-phase layer increases until it achieves a thickness that inhibits the diffusion of iron. At temperatures above 420°C , the zinc melts and flows down the surface. The duration at this temperature was brief enough that the coating did not turn red-grey, indicating

that the FeZn reaction did not penetrate the entire zinc coating thickness. Examining the zinc coating and its degree of damage and colour can indicate the temperature range experienced in the structure and its duration. In the case under consideration, the duration of the temperature exceeding 420°C was a maximum of several minutes.

The second issue is the inherent stresses trapped in the structure after a fire. As a result of the high temperature, some elements elongate. With statically determinable systems along the elements, this has no effect. However, in the transverse di-

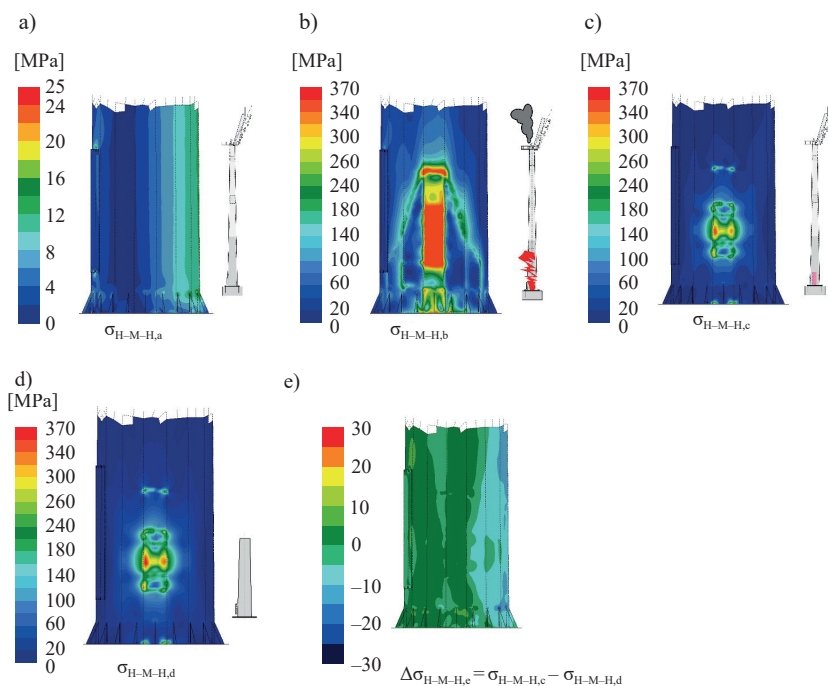


Fig. 3. Distributions of trapped thermal stresses (σ_{H-M-H}) after the fire: a) pre-fire condition; b) condition during the peak of the fire; c) condition after the fire has been extinguished and the structure has cooled; d) lower section after disassembly of the mast top; e) stress difference between the post-fire condition before and after disassembly of the mast top. The stresses shown are for the outside of the shell

Rys. 3. Rozkład uwieczonych naprężeń (σ_{H-M-H}) termicznych po pożarze: a) stan przed pożarem; b) stan w czasie szczytu pożaru; c) stan po ugaszeniu pożaru i chłodzeniu konstrukcji; d) dolna sekcja po demontażu góry masztu; e) różnica naprężeń między stanem po pożarze przed i po demontażu konstrukcji masztu. Przedstawione naprężenia dotyczą zewnętrznej części powłoki



Photo 4. Structural condition of the mast base after dismantling

Fot. 4. Stan konstrukcji podstawy trzonu masztu po demontażu

W rozpatrywanym przypadku czas trwania temperatury powyżej 420°C wynosił maksymalnie kilkanaście minut.

Drugie zagadnienie, to naprężenia własne uwieczone w konstrukcji po pożarze. W wyniku działania wysokiej temperatury część elementów wydłużyła się. Przy układach statycznie wyznaczalnych wzdłuż elementów nie ma to wpływu. Natomiast przy kierunku poprzecznym, w miejscu mocowania słupa do fundamentu, gdzie więzi przytrzymują elementy nieprzesuwne i nie mają swobody odkształceń poprzecznych, występują dodatkowe naprężenia własne. W miarę wzrostu temperatury

minutach powłoka cynkowa związana byłaby w wyniku reakcji z żelazem. Kolor powłoki ze stali powinien być matowy srebrzystoszary, a przy dłuższym czasie nagrzewania zmieniłby się na czerwonoszary.

W przypadku stali nieuspokojonych krzemem zachowanie powłoki będzie odmienne, gdyż warstwa fazy d wzrasta do momentu osiągnięcia grubości, kiedy wytworzona z niej bariera zahamuje dyfuzję żelaza. W temperaturze powyżej 420°C cynk stopił się i zaczął spływać po powierzchni. Czas trwania tej temperatury był na tyle krótki, że powłoka nie zmieniła koloru na czerwonoszarą, czyli reakcja FeZn nie zajęłaby całej grubości powłoki cynkowej. Obserwacja powłoki cynkowej, jej stopień uszkodzenia oraz kolor pozwalają określić przedział temperatury, jaki panował w konstrukcji i jak długo trwała.

rection, where the column is attached to the foundation, where the ties hold the elements non-slip and are not free to deform transversely, there are additional self-stresses. As the temperature increases, these stresses reach their yield limit and the structure deforms permanently. The stresses may stabilise at a constant level equal to the yield stress. Without the freedom to return deformation, the resulting stresses may remain even when the thermal load disappears. This is possible without freedom for the structure to return to its original state. In the case under consideration, only the dismantling of the structure resulted in a partial reduction of the stresses caused by the high temperature. This was confirmed by computational simulations performed in the SOFiSTiK software [15].

naprężenia te dochodzą do granicy plastyczności i konstrukcja trwale się deformuje. Naprężenia mogą się ustabilizować na stałym poziomie równym nawet granicy plastyczności. Przy braku możliwości powrotnego odkształcenia powstające naprężenia mogą pozostać nawet wtedy, gdy obciążenie termiczne zniknie. Możliwe jest to przy braku swobody powrotu konstrukcji do stanu wyjściowego. W rozpatrywanym przypadku dopiero demontaż konstrukcji spowodował częściowe zmniejszenie naprężeń wywołanych wysoką temperaturą. Zostało to potwierdzone symulacjami obliczeniowymi wykonanymi w programie SOFiSTiK [15].

*Received: 31.10.2024 r.
Revised: 02.12.2024 r.
Published: 21.03.2025 r.*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 31.10.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.12.2024 r.
Opublikowano: 21.03.2025 r.*

Literature

- [1] BS EN 40–3-1:2013. Lighting columns. Part 3–1: Design and verification. Specification for characteristic loads.
- [2] BS EN 40–3-2:2013. Lighting columns. Part 3–1: Design and verification. Verification by testing.
- [3] BS EN 40–3-3:2013. Lighting columns. Part 3–1: Design and verification. Verification by calculation.
- [4] Labocha S, Skotny Ł, Paluszyński J. Stalowe słupy powłokowe. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [5] PN-EN 1993-1-2:2007 Projektowanie konstrukcji stalowych. Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [6] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [7] PN-EN 1993-1-6–2009 Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [8] PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–9: Zmęczenie.
- [9] PN-EN 1991–1-4:2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Obciążenia wiatrem.
- [10] Maślak M. Badania stali konstrukcyjnej po pożarze w kontekście oceny możliwości jej dalszego użytkowania w elementach nośnych ustrojów budowlanych, *Przegląd Budowlany* 2012; 6: 48–50.
- [11] Chliszcz S, Puch I, Rompa A, Rompczyk Z, Piątkowski M. Badania wytrzymałościowe stali po epizodzie pożarowym, *BUILDER*, 2024; 329 (12): 14–19, DOI: 10.5604/01.3001.0054.8341.
- [12] Maślak M. Zachowanie się stali konstrukcyjnej w warunkach pożaru. Materiały, nowoczesne technologie, realizacje konstrukcji stalowych, T.2. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2020.
- [13] Maślak M, Żwirski G. Zmiany strukturalne w stali konstrukcyjnej wywołane epizodami jej nagrzewania i stygnięcia podczas pożaru/Changes in Structural Steel Microstructures Following Heating and Cooling Episodes in Fires, *Bezp. Tech. Pożarnicza*, 2017; 48: 34–52, DOI: 10.12845/bitp.48.4.2017.2.
- [14] Badanie zmian oddziaływaniem ciepła pożaru elementów konstrukcyjnych. Sprawozdanie z badań nr 210914/K/352. Machinefish. Materials & Technologies, Wrocław, 2010.
- [15] SOFiSTiK 2025, Licencja Rajmund Ignatowicz.