

# Badania stali konstrukcyjnej po pożarze w kontekście oceny możliwości jej dalszego użytkowania w elementach nośnych ustrojów budowlanych

Dr hab. inż. Mariusz Maślak, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem oceny stanu technicznego stalowego ustroju nośnego obiektu budowlanego po pożarze jest ustalenie, które elementy konstrukcyjne mogą być nadal w sposób bezpieczny użytkowane, które natomiast bezwzględnie należy wymienić. W celu dokonania takiej oceny przeprowadza się inwentaryzację zastanych trwałych deformacji i odkształceń, z reguły uzupełniając ją o statyczne próby rozciągania wykonywane na próbkach pobranych lokalnie z miejsc budzących istotne wątpliwości co do faktycznej wytrzymałości materiału. Zgodnie z zaleceniem R. H. R. Tide [1], rezultatem takiej analizy powinno być przypisanie poszczególnych elementów do jednej z trzech grup, wyspecyfikowanych ze względu na realną przydatność do dalszej eksploatacji. Pierwszą grupę zazwyczaj stanowią elementy, w odniesieniu do których nie zaobserwowano znaczących deformacji, a ich ogląd wizualny, po usunięciu nalotu będącego skutkiem zwykłego osmolenia, nie daje powodów do obaw. Do drugiej kategorii kwalifikuje się pręty wyraźnie zdeformowane termicznie, ale takie, które można stosunkowo łatwo wyprostować stosując selektywny i odpowiednio dobrany proces lokalnego nagrzewania, a przy tym proces taki jest uzasadniony ekonomicznie. Pozostałe elementy, przypisane do trzeciej grupy, uznaje się za trwale zdegenerowane przez pożar i jednoznacznie podlegające wymianie. Niezależnie od powyższego zaklasyfikowania należy przeprowadzić inspekcję wszystkich węzłów i połączeń ustroju nośnego pod ką-

tem oceny, czy podczas ekspozycji ogniowej nie nastąpiło zerwanie lub poluzowanie łączników albo nawet rozwarcie lub deformacja blach czołowych w stykach.

W literaturze przedmiotu powszechnie akceptuje się tezę, że zakwalifikowanie elementu do grupy pierwszej jest równoznaczne z niejako automatycznym dopuszczeniem go do dalszego użytkowania. Potencjalne zagrożenia traktuje się bowiem w tym przypadku jako na tyle mało istotne, że bez większego ryzyka mogą być zaniebane [1], [2], [3]. Konstatacja taka wydaje się dostatecznie uzasadniona, jeśli badać jedynie trwałą redukcję granicy plastyczności stali oraz jej wytrzymałości na rozciąganie. Potwierdzają ją chociażby wyniki badań przytoczone w pracy [1]. Niezależnie od nich, M. Kosiorek [4] podaje, że stal gorąco-walcowana wygrzewana przez 3 godziny w temperaturze 600°C, a następnie wystudzona do temperatury pokojowej, w zasadzie nie traci nic ze swoich pierwotnych właściwości mechanicznych. Jednakże już 3-godzinne wygrzanie tej samej stali w temperaturze 700°C i późniejsze jej schłodzenie daje w efekcie nawet 15-procentowy spadek badanych wytrzymałości. Większa redukcja w zasadzie nie jest wykazywana. Należy bowiem pamiętać, że wyższa temperatura typowej stali niskowęglowej wiąże się z jej rekryształizacją i nie powinna być osiągnięta. Dalsze przemiany strukturalne warunkowane są wtedy przebiegiem i intensywnością procesu chłodzenia materiału, co determinuje jego cechy wytrzymałościowe uzyskane po wystudzeniu. W konkluzji pracy [4] projektant znajdzie zatem zale-

cenie, aby dla elementów pozostałych do dalszego użytkowania po pożarze redukować wyjściowe właściwości mechaniczne stali o 10%, nie zmieniając przy tym klasycznego toku wymiarowania.

W opinii autora niniejszego opracowania, uwzględnienie w ocenie przydatności elementów stalowych do dalszej eksploatacji po przejściu przez nie sekwencji epizodów gwałtownego nagrzewania i stygnięcia, jedynie faktu stosunkowo nieznacznej trwałej redukcji wskazanych wytrzymałości może okazać się niewystarczające. O cechach stali konstrukcyjnej po pożarze decydują bowiem w równym stopniu zmiany strukturalne, które mogą w niej zachodzić nawet bez osiągnięcia temperatury progowej, związanej z rekryształizacją. Skutkują one na ogół znaczącym wzrostem podatności materiału na kruche pęknięcie. Wykazanie i analiza tego typu zagrożeń stanowi cel dalszych rozważań.

## 2. Wpływ tempa zmian temperatury stali na jej cechy wytrzymałościowe

Jednym z podstawowych czynników determinujących uzyskane po pożarze parametry wytrzymałościowe stali jest przebieg i intensywność procesów nagrzewania i stygnięcia materiału. Miarą tej intensywności jest zwykle prędkość zmian temperatury. Alternatywnie można rozważać na przykład zmiany strumienia energii rozpraszanej podczas ekspozycji ogniowej. Z. Bednarek i R. Kamocka [5] wykazały eksperymentalnie, że szybsze nagrzewanie stali prowadzi do zmniejszenia jej wydłużalności, co znacznie zwiększa

ryzyko kruchego pęknięcia przy późniejszym użytkowaniu rozważanego materiału w temperaturze pokojowej. Przyczynę takiej relacji uwidocznili badania metalograficzne. Ziarna ferrytu w mniej gwałtownie nagrzewanej stali mają czas na to, aby ulec znacznemu wydłużeniu w kierunku działania obciążenia. Zjawisko to łączy się zwykle z plastyczną formą zniszczenia elementu. Gdy jednak prędkość wzrostu temperatury materiału jest zbyt duża, to takie kierunkowe odkształcenie ziaren nie zdąży się wytworzyć. Nawet jeśli pojedyncze ziarna uzyskają nieznaczne wydłużenia, to i tak kierunki tych wydłużeń nie zostaną uporządkowane. W dodatku chaotyczny wzrost rozmiarów ziaren będzie generował tworzenie się losowych pustek i defektów w strukturze wewnętrznej stali, powodując przy tym osłabienie zespolenia ziaren ferrytu z wiążącą je siatką cementytową. Można zatem mówić o czymś w rodzaju bezwładności materiału na przyrost temperatury elementu. Z punktu widzenia analizy przeprowadzanej w niniejszej pracy, ważne jest to, że powyższe deformacje ziaren są trwałe i nie ulegają zanikom po powrocie do temperatury wyjściowej. Trwała pozostanie zatem skłonność do kruchego pęknięcia, pomimo uzyskania relatywnie wysokiej wartości wytrzymałości  $R_e$  i  $R_m$ . Na innego rodzaju zależności wskazuje M. Kosiorek [6], podając za T. S. Harmathym, że wraz ze wzrostem prędkości nagrzewania stali w badaniach eksperymentalnych obserwuje się coraz wyższe wartości wytrzymałości  $R_e$  i  $R_m$ , a także modułu sprężystości podłużnej  $E$ , przy czym wpływ ten w wysokiej temperaturze jest wyraźnie większy niż w temperaturze pokojowej. W. Skowroński [7] zwraca jednak uwagę na fakt, że wartości analizowanych parametrów zależą w tym przypadku również od samej metodyki badania. Jeżeli test jest próbą izotermiczną (temperatura elementu jest stała, a obciążenie próbki wzrasta), to wartość otrzymanej granicy plastyczności jest znacząco większa od tej uzyskanej z próby anizotermicznej (gdy obciążenie

elementu jest stałe, a jego temperatura rośnie). Zjawisko to jest szczególnie wyraźne na poziomie wydłużenia 0,2%, zanika natomiast przy poziomie 1%.

Jeszcze bardziej istotne wydają się na tym polu przebieg i intensywność procesu stygnięcia elementu. Proces ten na ogół trzeba wiązać z prowadzoną akcją gaśniczą. Należy podkreślić, że zbyt gwałtowne obniżanie temperatury stali na skutek obfitego polewania jej zimną wodą często skutkuje powstaniem siatki wewnętrznych mikrouszkodzeń, w szczególności mikropęknięć, stanowiących zarodki do ich niebezpiecznego rozwoju w późniejszym okresie eksploatacji po pożarze. Z drugiej strony, szybkie schłodzenie może hartować stal, znacznie ją utwardzając, co jednak również wiąże się z pogorszeniem zdolności do plastycznego odkształcania. Znane są nawet przypadki lokalnego wytworzenia się struktury martenzytycznej, charakteryzującej się iglastym ułożeniem faz, a także powstania zaczątków struktury Widmanstättena.

### 3. Inne czynniki wpływające na osłabienie stali po pożarze

Pogorszenie właściwości plastycznych stali po pożarze może być wzmocnione wystąpieniem efektu Portevina – Le Chatelliera (ząbkowanie krzywej  $\sigma - \epsilon$  w zakresie odkształceń plastycznych stali). Efekt taki można wprawdzie wiązać z nieznacznym wzrostem wytrzymałości materiału, niemniej jednak zdecydowanie bardziej niebezpieczne wydaje się znaczące obniżenie jego wydłużalności. Powyższy efekt został zaobserwowany, jakkolwiek w bardzo ograniczonym zakresie, w badaniach J. Setiána, J. J. Gonzáleza, J. A. Alvareza i J. A. Polanco [8]. Szczególnie podatne na trwałe pogorszenie właściwości mechanicznych po pożarze będą stale, które uzyskały swoje nominalne parametry w wyniku przeciągania lub zgniotu. Wynika to z faktu, że początkowy efekt utwardzenia materiału szybko zanika ze wzrostem temperatury. W rezultacie redukcja będzie tym więk-

sza, im większy był wyjściowy zgniot. Innego typu skutkiem pożaru, który powinien być brany pod uwagę w ewentualnej analizie statycznej przeprowadzanej po jego zakończeniu, są potencjalne efekty reologiczne. Chodzi tu głównie o wpływ zintensyfikowanego w wysokiej temperaturze pełzania stali i często mu towarzyszącej relaksacji naprężeń.

Sytuacja nieco się komplikuje, gdy w ramach rozważanego pożaru wystąpiły wielokrotne epizody nagrzewania i częściowego stygnięcia elementu. Powyższa problematyka została w pewnym stopniu podjęta w pracach [9] i [10]. Wskazuje się tam na konieczność precyzyjnej analizy naprężeń z uwzględnieniem kumulujących się w elemencie po każdym pojedynczym epizodzie odkształceń trwałych. Podchodząc do zagadnienia bardziej ogólnie, należy podkreślić, że projektant oceniając przydatność danego elementu do dalszego użytkowania po pożarze zawsze musi się liczyć z obecnością generowanego w nim termicznie, niekorzystnego z punktu widzenia przyszłej pracy statycznej, rozkładu naprężeń własnych. Nawet wtedy, gdy nie obserwuje w nim żadnych znaczących deformacji czy odkształceń. Z tego punktu widzenia, warto w analizie stanu technicznego konstrukcji po pożarze modelować tego typu potencjalne rozkłady jako klasyczne imperfekcje.

### 4. Zmiany strukturalne

Rozważania na temat zagrożeń generowanych przez zachodzące w wysokiej temperaturze zmiany strukturalne stali, często kwitowane są zdawkowym stwierdzeniem, że przecież materiał ten przechodził podobny cykl zmian temperatury w procesie jego wytwarzania, a później dodatkowo podczas obróbki cieplnej i w żaden sposób okoliczności te nie spowodowały jego osłabienia po wystudzeniu. Oczekuje się zatem podobnego zachowania w warunkach pożarowych, zakładając przy tym, że materiał, pomimo zachodzących w nim przemian, znieśie je w zasadzie bez uszczerbku. Podejście takie jest jednak zwodni-

cze. Zapomina się bowiem, że w procesie hutniczym reżim nagrzewania i stygnięcia był odpowiednio dobrany i sterowany, zmiany temperatury w pożarze mają zaś w dużej mierze charakter losowy.

W ocenie stanu materiału po przejściu przez niego ekspozycji ogniowej podstawowe znaczenie ma kwestia czy przekroczona została w nim temperatura progowa  $727^{\circ}\text{C}$ , związana z rekrytalizacją stali. Jeżeli zdarzenie takie miało miejsce, to po wystudzeniu, z dużym prawdopodobieństwem otrzymamy materiał o cechach znacząco różnych od tych, które charakteryzowały materiał wyjściowy. Będą one w dużej mierze zależały od przebiegu procesu stygnięcia. W pracy [3] zwraca się uwagę na to, że fakt przekroczenia w czasie pożaru poziomu temperatury  $\sim 700^{\circ}\text{C}$  przez co najmniej 20 minut, pozostawia widoczny ślad na powierzchni ogrzewanego elementu po zakończeniu ekspozycji ogniowej. Na skutek wzmożonej w tak wysokiej temperaturze dyfuzji tlenu z całej objętości materiału, powierzchnia ta pozostanie po wystygnięciu silnie zerodowana, bez śladów gładkości i połysku typowego dla metali w temperaturze pokojowej. Warto zauważyć, że M. Kosiorkiem [4], że także przekroczenie poziomu  $\sim 350^{\circ}\text{C}$  może być łatwo udokumentowane po zakończeniu pożaru. Jest to bowiem temperatura błękitnego nalotu, przy której stal uzyskuje trwałe charakterystyczne niebieskawe zabarwienie. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że różnego rodzaju zmiany strukturalne, niekorzystne z punktu widzenia przyszłej pracy statycznej, głównie ze względu na obniżenie zdolności do plastycznego odkształcania, zachodzą w materiale bez przeszkód już przy znacznie niższej temperaturze. Ważne jest to, że mają one charakter trwały i nie mogą być pomijane przy jego ocenie po wystygnięciu.

Pierwszą z takich zmian jest grafityzacja. Chodzi o wytrącanie węgla w postaci grafitu wskutek dekompozycji perlitu na ferryt i grafityt. Cząsteczki grafitytu formują ciągle warstwy usytuowane prostopadle do kierunku przyłożo-

nego obciążenia [11]. Warstwy te są rozmieszczone losowo w wewnętrznej strukturze materiału i w oczywisty sposób osłabiają jego zdolność przenoszenia obciążeń. Jeżeli jednak temperatura stali przekroczy poziom  $\sim 550^{\circ}\text{C}$ , to proces grafityzacji zostaje zastąpiony przez sferoidyzację [11]. W takim przypadku degradacja perlitu prowadzi do formowania się cząsteczek cementytu kulkowego zmniejszającego stal. Nie zmienia to jednak niekorzystnego efektu uwidaczniającego się wzrostem kruchości.

Powyższe efekty trzeba przedstawić na tle bardziej ogólnego zjawiska związanego z nasilającym się w wysokiej temperaturze wydzielaniem atomów pierwiastków stopowych i/lub domieszek, głównie fosforu i antymonu. Koncentrują się one na granicach ziaren ferrytu osłabiając ich spójność z zespajającą je siatką cementytową. Efekt ten może być wzmacniany przez postępującą koalescencję faz międzymetalicznych (w procesach hutniczych fazy tego typu nazywane są fazami sigma) [11]. Kolejny potencjalny skutek ekspozycji ogniowej to przegrzanie i wzrost samych ziaren ferrytu.

Wytrącanie się węgla w postaci grafitu może prowadzić do lokalnego nawęglenia stali. Zjawisko to ma głównie charakter powierzchniowy. Wiąże się ono z wyraźnym zwiększeniem twardości materiału, ale również z redukcją jego ciągliwości. W pracy [8] zaprezentowano typową dla nawęglenia mikrostrukturę stali, w której wyraźnie ciemniejszemu obszarowi grafitu towarzyszy znacznie jaśniejsza otoczka oksydowanego żelaza. Możliwe jest również wystąpienie efektu odwrotnego, związanego z lokalnym, powierzchniowym odwęglaniem. Piszą o nim autorzy pracy [12], kojarząc go z wyraźnym obniżeniem twardości. Obniżenie to nie wiąże się jednak z polepszeniem właściwości plastycznych, a zatem nie ma istotnego wpływu na zdolność przenoszenia obciążeń.

## 5. Uwagi końcowe

Zaprezentowane rozważania prowadzą do wniosku, że ocena przydatno-

ści elementu stalowego do dalszego użytkowania po pożarze w urządzeniach nośnych obiektów budowlanych, dokonana na sposób klasyczny, po przeprowadzeniu szczegółowej inwentaryzacji trwałych deformacji prętów i uzupełniona jedynie o wyniki wykonanych lokalnie prób rozciągania, nie wystarcza do uzyskania miarodajnej i wiarygodnej wiedzy o faktycznej zdolności materiału do dalszego przenoszenia obciążeń. Nie uwzględnia bowiem wielu czynników, z których najbardziej istotne wydają się: tempo, sposób i historia zmian temperatury. Niemniej ważne jest również stosunkowo wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia niekorzystnych zmian w strukturze badanego materiału. Jedynym sposobem na zbadanie czy tego typu zagrożenia rzeczywiście w danym przypadku mają miejsce i czy ich ewentualny wpływ na odkształcalność stali jest znaczący, jest uzupełnienie analizy eksperckiej, co najmniej o weryfikację mikrostruktury oraz testy udarowości i twardości.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Tide R. H. R., Integrity of structural steel after exposure to fire, Engineering Journal of American Institute of Steel Construction, First Quarter, 1998, str. 26–38
- [2] Dill F. H., Structural steel after a fire, Proceedings of National Steel Construction Conference, Denver, Co, May 5–6, 1960, AISC, Chicago, II
- [3] Gewain R. G., Iwankiw N. R., Alfawakhiri F., Facts for steel buildings – fire, American Institute of Steel Construction (AISC), October, 2003
- [4] Kosiorek M., Ocena konstrukcji stalowych po pożarze, Materiały XV Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Ustroń, 23–26 luty 2000, str. 51–53
- [5] Bednarek Z., Kamocka R., The heating rate impact on parameters characteristic of steel behaviour under fire conditions, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. XII, 4/2006, str. 269–275
- [6] Kosiorek M., Charakterystyki mechaniczne stali budowlanych w podwyższonych temperaturach, Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Konstrukcje Metalowe”, Katowice 30.05–2.06.1979, str. 281–289
- [7] Skowroński W., O właściwościach stali w podwyższonej temperaturze, Konstrukcje Stalowe, 4(41), czerwiec 2000, str. 50–52
- [8] Setién J., González J. J., Alvarez J. A., Polanco J. A., Evolution on mechanical behaviour in a structural steel subjected to high