

Analiza termiczno-mechaniczna w warunkach pożaru

Nośność resztkowa przekroju nagrzanego

Poradnik SectionPro · Nośność resztkowa przekroju w warunkach pożaru,
metodą izotermy 500 °C według EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

Wprowadzenie

Obliczenie w warunkach pożaru przebiega w dwóch kolejnych etapach. Pierwszy etap jest termiczny, jak opisano w poprzednim artykule: SectionPro rozwiązuje zagadnienie przewodzenia ciepła na rzeczywistym przekroju i zwraca pole temperatury w betonie, zbrojeniu oraz w ewentualnym zatopionym kształtowniku stalowym dla każdej żądanej chwili czasowej.

Drugi etap jest mechaniczny. Dla każdego wybranego czasu trwania pożaru moduły mechaniczne wychodzą od odpowiedniego pola temperatury i wyznaczają przekrój nośny wykorzystywany do sprawdzenia. Udział betonu jest redukowany zależnie od nagrzanego obszaru przekroju, natomiast pręty zbrojeniowe oraz zatopiony kształtownik stalowy otrzymują właściwości mechaniczne zależne od temperatury. Otrzymany przekrój nagrany jest następnie analizowany w tym samym duchu, co przekrój w temperaturze otoczenia: sprawdzenie przypadku obciążenia, krzywe i powierzchnia interakcji, odległości, krzywe sztywności oraz czas do zniszczenia.

Metoda izotermy 500 °C

W przypadku betonu SectionPro stosuje metodę izotermy 500 °C według EN 1992-1-2. Beton nagrany powyżej 500 °C zostaje pominięty; beton, który pozostał poniżej 500 °C, jest zachowywany z pełną wytrzymałością w temperaturze otoczenia i ze zwykłym prawem parabola-prostokąt ($\varepsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). Geometria nośna redukuje się zatem do obszaru objętego izotermą 500 °C, który kurczy się wraz z wydłużaniem ekspozycji.

Każdy pręt zbrojeniowy jest redukowany przy własnej temperaturze: jego granica plastyczności i moduł przyjmują wartości $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ oraz $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, ze współczynnikami redukcyjnymi z EN 1992-1-2 (tablice 3.2a i 3.2b). Pręt leżący poza izotermą 500 °C nie jest usuwany; nadal wnosi wkład przy swojej zredukowanej wytrzymałości.

To samo podejście stosuje się do zatopionego kształtownika konstrukcyjnego, gdy jest on zdyskretyzowany na etapie termicznym: każdy element stalowy jest odczytywany przy swojej temperaturze,

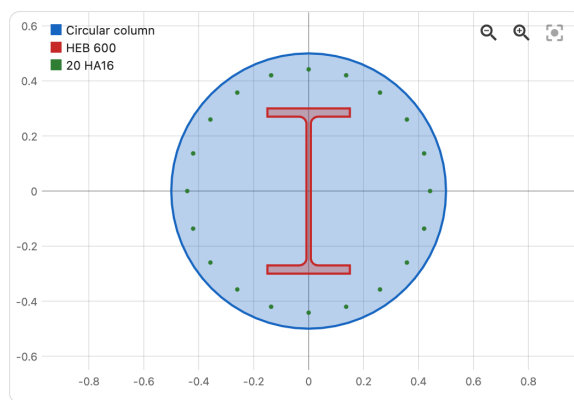
redukowany przez $k_y(\theta)$ i $k_E(\theta)$, a zajmowany przez niego beton zostaje usunięty, aby nie był liczony podwójnie. Po zbudowaniu przekroju nagrzanego sprawdzenie mechaniczne przebiega jak standardowa analiza przekroju, przy czym pożar wpływa na geometrię nośną oraz na prawa materiałowe stosowane w wybranej chwili. Na tym zredukowanym przekroju SectionPro wykonuje:

- Sprawdzenie przekroju: równowaga przypadku obciążenia, z pełnym polem naprężeń i odkształceń w danej chwili.
- Krzywa interakcji: granica nośności w wybranej płaszczyźnie sił, przy jednej ustalonej składowej.
- Powierzchnia interakcji: pełny trójwymiarowy obszar nośności w (N, M_z, M_y) .
- Odległości: stopień wykorzystania każdego obciążenia przez rzutowanie na tę powierzchnię.
- Sztywność: zależność moment–krzywizna oraz sieczna i styczna sztywność giętą.
- Czas do zniszczenia: czas ekspozycji, przy którym obciążenie opuszcza obszar nośności.

Przekrój przykładowy

Obliczenia zilustrowano na słupie zespolonym dostarczonym z przykładami SectionPro:

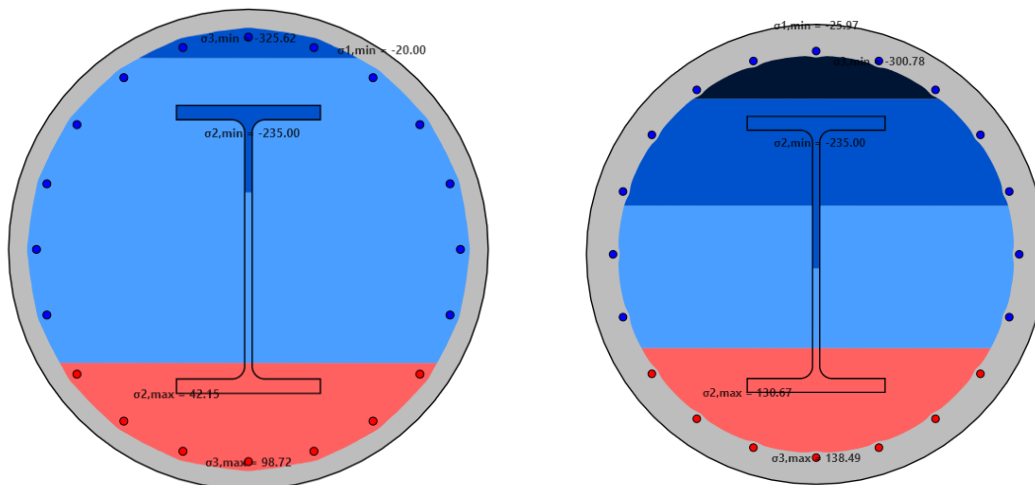
- Przekrój kołowy, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Zatopiony kształtownik HEB 600 ze stali S235.
- 20 prętów $\varnothing 16$ B500B na obwodzie.
- Znormalizowana ekspozycja pożarowa ISO 834.



Sprawdzenie przekroju

Dla obciążenia (N, M_z, M_y) zadanego do sprawdzenia SectionPro wyznacza stan odkształcenia $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ — jedno odkształcenie osiowe i dwie krzywizny — który spełnia wewnętrzną równowagę z przyłożonymi siłami. Rozwiązuje to iteracyjnie, całkując naprężenia po przekroju nagrzanym na każdym kroku: zachowany beton po jego konturach, pręty i zdyskretyzowany kształtownik jako włókna, każdy rządzoney swoim zredukowanym prawem.

Ze zbieżnego stanu odkształcenia SectionPro wyznacza naprężenia i odkształcenia w każdym włóknie, położenie osi obojętnej oraz stopień wykorzystania zdefiniowany jako stosunek odkształcenia miarodajnego włókna do granicznego odkształcenia danego materiału. Stopień wykorzystania poniżej 1 oznacza, że obciążenie jest przenoszone; wartość równa 1 lub większa oznacza, że zredukowany przekrój nie jest już w stanie go zrównoważyć.

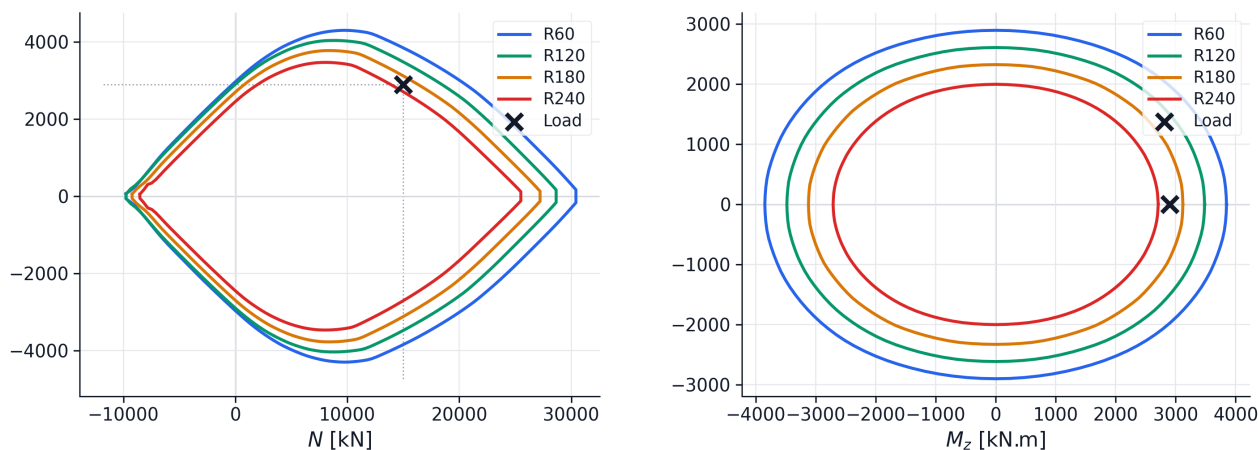


Rysunek 1: Zbieżny stan naprężeń i odkształceń przy R120 i R240 pod obciążeniem $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, w kN i kN · m.

W przykładzie obciążenie wynosi $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, w kN i kN · m. Widoki R120 i R240 przykładają to samo obciążenie do przekroju, którego pole nośne kurczy się wraz z ekspozycją: beton wewnątrz izotermi 500 °C przenosi ściskanie, podczas gdy pręty i zatopiony kształtownik, wciąż chłodne, równoważą zginanie. Przy R240 przekrój osiąga zniszczenie przez zmiażdżenie zachowanego betonu.

Krzywa interakcji N–M_z

Krzywa interakcji N – M_z to granica nośności przekroju przy zginaniu jednoosiowym: zbiór par siły osiowej i momentu zginającego, które przekrój może przenieść względem badanej osi. Przeliczone dla każdego czasu trwania pożaru na przekroju zredukowanym, nałożone krzywe dają bezpośredni obraz nośności utraconej wskutek nagrzania.

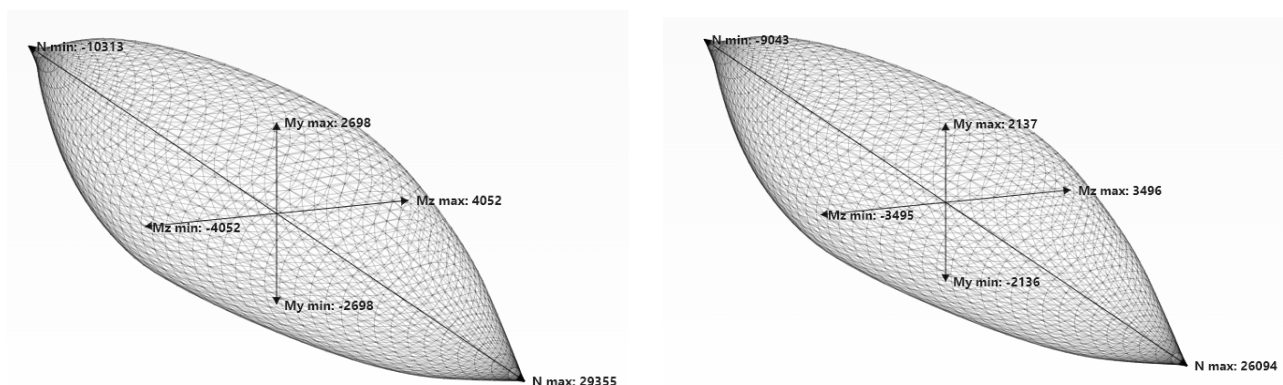


Rysunek 2: Krzywe interakcji pożarowej N – M_z i M_y – M_z przy ISO 834.

Rysunki ukazują utratę nośności wraz ze wzrostem temperatury: obszary nośności stopniowo kurczą się wraz z czasem trwania pożaru. Dla wybranego obciążenia zniszczenie następuje między R180 a R240.

Trójwymiarowa powierzchnia interakcji

Przy zginaniu dwuosowym nośności nie można już ująć pojedynczą krzywą płaską: staje się ona zamkniętą powierzchnią w przestrzeni (N, M_z, M_y) — obszarem nośności przekroju. SectionPro oblicza tę powierzchnię bezpośrednio z granicznych stanów odkształcenia przekroju, branych dla każdego kierunku zginania. Zbudowana na przekroju nagrzanym, pozwala bezpośrednio sprawdzić dowolne obciążenie dwuosowe, bez sprowadzania go do wyróżnionej osi: obciążenie wewnątrz powierzchni jest przenoszone, obciążenie na zewnątrz przekracza nośność.



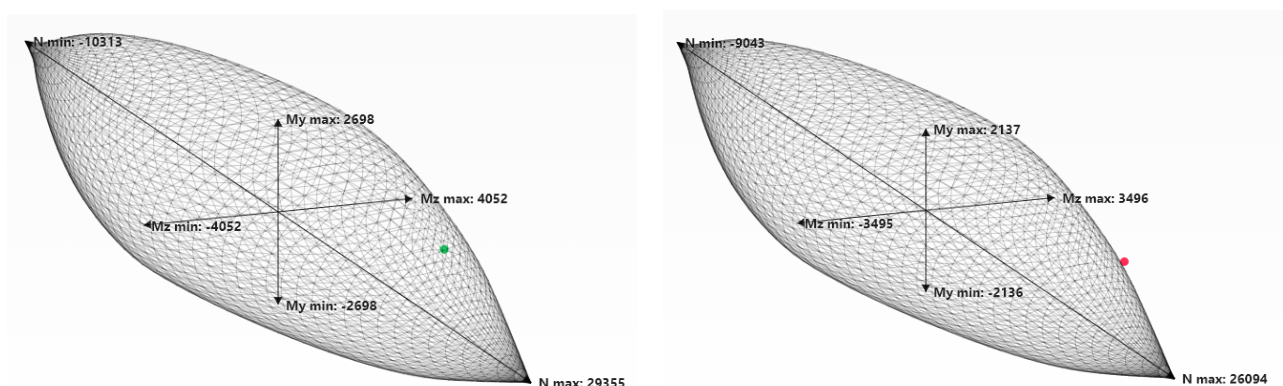
Rysunek 3: Powierzchnia interakcji nośności ogniowej $(N-M_z-M_y)$ przy R120 i R240.

Odległości

Moduł odległości sprawdza graficznie kilka przypadków obciążeń przy zginaniu dwuosowym względem tej samej powierzchni interakcji. Każde obciążenie (N, M_z, M_y) jest rzutowane na powierzchnię i zwracane wraz ze stopniem wykorzystania η , dzięki czemu inżynier od razu odczytuje, które obciążenia pozostają wewnątrz obszaru nośności, a które go przekraczają.

- $\eta < 1$: obciążenie pozostaje **wewnętrzne**, a przekrój ma zapas nośności.
- $\eta = 1$: obciążenie leży na granicy, dokładnie na granicy nośności.
- $\eta > 1$: obciążenie staje się **zewnętrzne**, a nośność zostaje przekroczona.

W warunkach pożaru obszar kurczy się wraz z ekspozycją, więc status tego samego obciążenia może zmienić się z wewnętrznego na zewnętrzny w miarę wydłużania czasu.

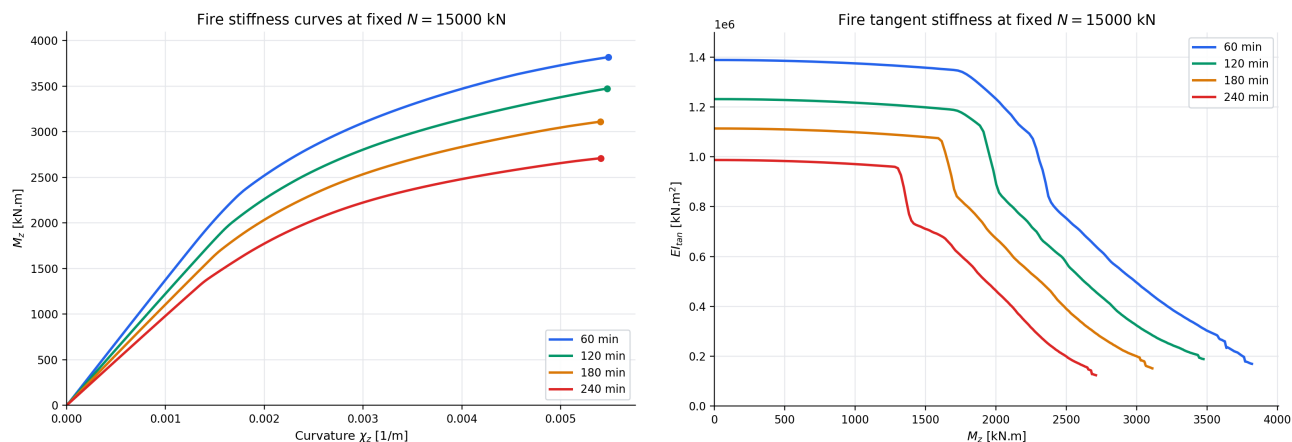


Rysunek 4: Sprawdzenie obciążenia pożarowego metodą odległości na trójwymiarowym obszarze nośności, przy R120 (po lewej) i R240 (po prawej). Obszar kurczy się wraz z ekspozycją; unormowana odległość η wskazuje, czy obciążenie pozostaje **wewnętrzne** ($\eta \leq 1$), czy staje się **zewnętrzne** ($\eta > 1$).

Obciążenie jest **wewnętrzne** przy R120 i **zewnętrzne** przy R240, co jest zgodne z wynikami sprawdzenia przekroju oraz krzywej interakcji.

Sztywność w warunkach pożaru

Nagrzewanie zmniejsza także sztywność giętną słupów. Wraz ze wzrostem krzywizny ta utrata sztywności może wzmacniać efekty drugiego rzędu jeszcze przed osiągnięciem nośności granicznej.



Rysunek 5: Sztywność w warunkach pożaru przy $N = 15000$ kN i $M_y = 0$. Po lewej zależność moment–krzywizna M_z – χ_z . Po prawej sztywność styczna EI_{tan} w funkcji M_z .

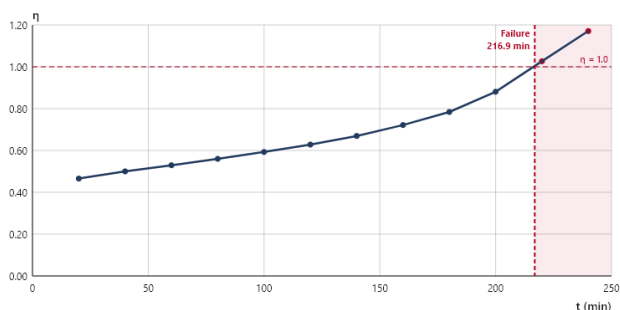
Krzywe ukazują gwałtowną degradację sztywności wraz z czasem trwania pożaru: zależność moment–krzywizna spłaszcza się, a sztywność styczna spada gwałtownie, gdy przekrój nagrzany zbliża się do zniszczenia.

Czas do zniszczenia

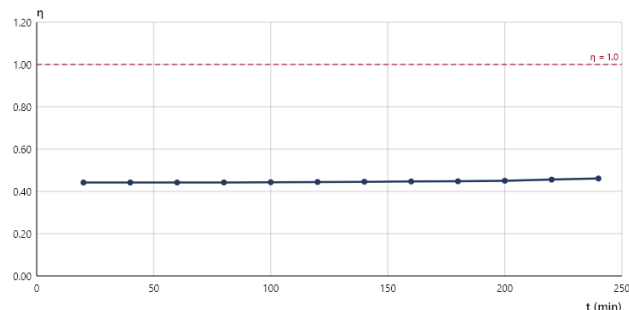
Czas do zniszczenia to obliczenie najbardziej charakterystyczne dla pożaru. Dla ustalonego obciążenia użytkowego SectionPro odtwarza przekrój zredukowany w każdej chwili wyjściowej analizy termicznej i rozwiązuje na nim równowagę. Nośność maleje w miarę kurczenia się izotermy 500 °C i wzrostu temperatury stali; czasem do zniszczenia jest chwila, w której obciążenie opuszcza obszar nośności, gdy zredukowany przekrój nie jest już w stanie go zrównoważyć w granicach odkształceń materiałów.

Następnie na tym samym przekroju przeprowadza się test izolacji, aby sprawdzić, czy zabezpieczenie bierne rozwiązuje ten konkretny problem odporności ogniowej. To samo obciążenie ocenia się najpierw na przekroju bez zabezpieczenia, a następnie z ciągłą warstwą izolacyjną na obwodzie betonu.

Bez zabezpieczenia



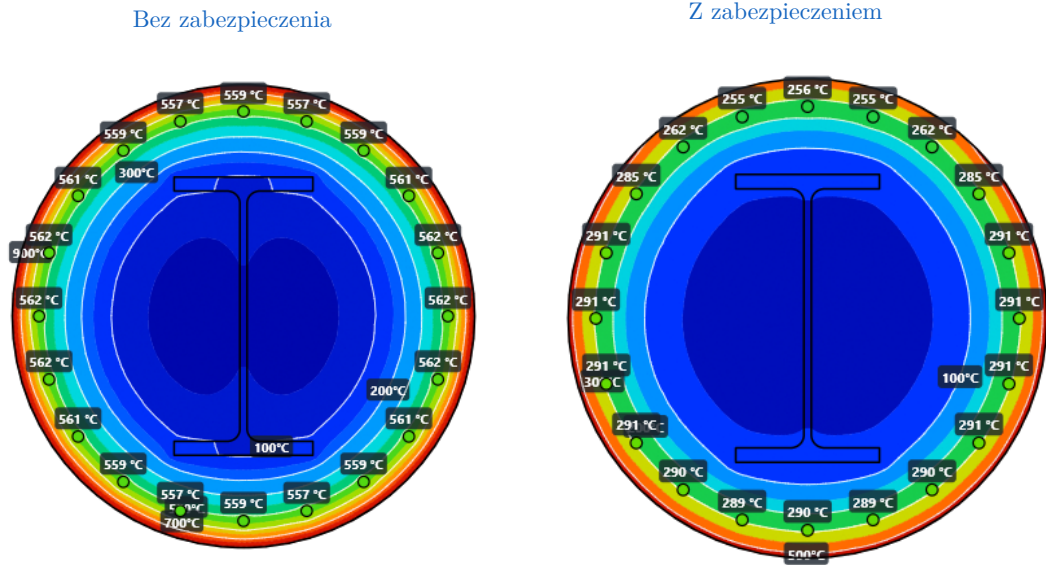
Z zabezpieczeniem



Rysunek 6: Czas do zniszczenia pod obciążeniem $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, w kN i kN · m. Zabezpieczenie bierne przesuwia w tym przypadku wyjście z obszaru nośności poza R240.

Zabezpieczenie modeluje się jako ciągłą warstwę bierną opisaną czterema parametrami cieplnymi. W tym teście izolacji przyjęto następujące wartości:

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)



Rysunek 7: Pole temperatury przy R240, bez zabezpieczenia i z zabezpieczeniem.

Zabezpieczenie jest w tym przypadku bardzo skuteczne: przy zabezpieczeniu biernym temperatura prętów spada z około 560 °C do około 300 °C, a beton pozostaje poniżej 500 °C nawet po 240 min, więc cały przekrój betonowy jest zachowany mechanicznie.

Wydajność oprogramowania

Głównym zadaniem jest obliczenie pola temperatury dla żądanych czasów trwania pożaru. Gdy te pola temperatury są już dostępne, sprawdzenia mechaniczne są szybkie, a cały przepływ obliczeń pozostaje poniżej jednej sekundy dla tego przykładu.

Obliczenie	Czas
Pole temperatury (2 kroki, R120/R240)	0,20 s
Sprawdzenie przekroju (naprężenia-odkształcenia)	+ 4 ms
Krzywa interakcji N-Mz (160 punktów)	+ 31 ms
Obszar My-Mz przy ustalonym N	+ 35 ms
Trójwymiarowa powierzchnia interakcji (50 × 50)	+ 134 ms
Krzywa sztywności (moment-krzywizna)	+ 11 ms
Czas do zniszczenia (pełny przebieg)	+ 52 ms

Ślup zespolony z artykułu, zmierzono na komputerze stacjonarnym. Czasy mechaniczne podano po rozwiązaniu pola temperatury.

Podsumowanie

Metoda izotermi 500 °C zamienia pole temperatury w zredukowany przekrój nośny: beton zachowujący swoją wytrzymałość wewnątrz izotermi, pręty i zatopiona stal osłabione przez lokalną

temperaturę. Z tego stanu nagrzanego analiza daje nośność zadanego obciążenia, obszary interakcji, odległości obciążeń, utratę sztywności oraz chwilę, w której obciążenie opuszcza obszar nośności.

W badanym słupie zespolonym zatopiony kształtownik pozostaje osłonięty przez otaczający beton i zachowuje znaczną część nośności przy pośrednich czasach. Ciągłe zabezpieczenie bierne wyraźnie obniża temperatury przy R240 i odsuwa w czasie zniszczenie badanego obciążenia.

Poszczególne obliczenia są ze sobą spójne: wszystkie wskazują na tę samą utratę nośności i ten sam zakres zniszczenia. Sprawdzenie przekroju daje szczegółowy stan naprężeń i odkształceń dla jednego obciążenia. Krzywa interakcji jest preferowanym ujęciem inżynierskim, gdy obszar nośności potrzebny jest w płaszczyźnie. Powierzchnia interakcji daje globalny obszar dwuosiowy. Sprawdzenie odległości daje szybki status OK/KO dla wielu obciążeń. Krzywe sztywności pokazują, czy przekrój wszedł w reżim silnej degradacji sztywności. Analiza czasu do zniszczenia daje wreszcie przybliżony czas ekspozycji, po którym obciążenie nie może już być przenoszone. Każde ujęcie ma swoją mocną stronę, a razem dają spójny obraz zachowania w warunkach pożaru.