

# Odształcenia, relaksacja i zmniejszenie wytrzymałości stali sprężającej w temperaturze pożarowej.

## Wskazówki na temat praktycznego wykorzystania modelu Eurokodu 2-1-2

prof. dr hab. inż. Robert Kowalski, mgr inż. Bogumiła Juchnowicz-Bierbasz,  
mgr inż. Julia Wróblewska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

### 1. Wprowadzenie

Aktualnie prognozowanie nośności ogniowej elementów sprężonych najczęściej jest realizowane na podstawie prostych *Danych tabelarycznych* podanych w normie [1], a w przypadku powtarzalnych, prefabrykowanych elementów strunobetonowych – również na podstawie wyników normowych badań ogniowych. Można się jednak spodziewać, że w przyszłości ocena nośności ogniowej elementów sprężonych, zwłaszcza nietypowych, coraz częściej będzie prowadzona na bazie analiz obliczeniowych, w których pożar jest rozpatrywany jako wyjątkowa sytuacja projektowa [2]. W analizach tych kluczowe znaczenie odgrywa nie tylko adekwatne oszacowanie zmniejszenia wytrzymałości stali sprężającej, ale również, a raczej przede wszystkim, określenie odształceń wyęzonych cięgien sprężających, spowodowanych wzrostem temperatury. Odształcenia te mogą być dużo większe od występujących w zwykłych warunkach. Może to prowadzić do wystąpienia znacznej relaksacji naprężeń w cięgnach i zmniejszenia siły sprężającej, nawet już w początkowej fazie pożaru. Ponadto duże odształcenia zbrojenia rozciąganego mogą być przyczyną obniżenia obliczeniowej (i rzeczywistej) nośności przekroju w stanie granicznym [2].

W artykule przedstawiono praktyczne wskazówki na temat wykorzystania modelu pogorszenia właściwości mechanicznych stali sprężającej w wysokiej temperaturze, podanego w aktualnym Eurokodzie PN-EN 1992-1-2 [1] oraz w najnowszym projekcie tej normy [3], przydatne do prognozowania odształceń cięgien sprężających w elementach narażonych na warunki pożarowe. Wskazano też występowanie analogii między wydłużaniem się stali sprężającej ogrzewanej w warunkach pożarowych a pęczaniem betonu w zwykłych warunkach oraz podano wytyczne przydatne do oszacowania relaksacji naprężeń w cięgnach i określenia zmniejszania się siecznego modułu odształcalności stali sprężającej w warunkach pożarowych. Powyższe informacje odniesiono

do aktualnie powszechnie stosowanych splotów wykonanych ze stali Y1860, których charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie wynosi  $f_{pk} = 1860$  MPa, a charakterystyczny moduł sprężystości  $E_{pk} = 195$  GPa [4].

### 2. Właściwości mechaniczne stali sprężającej w temperaturze pożarowej w świetle modelu normowego

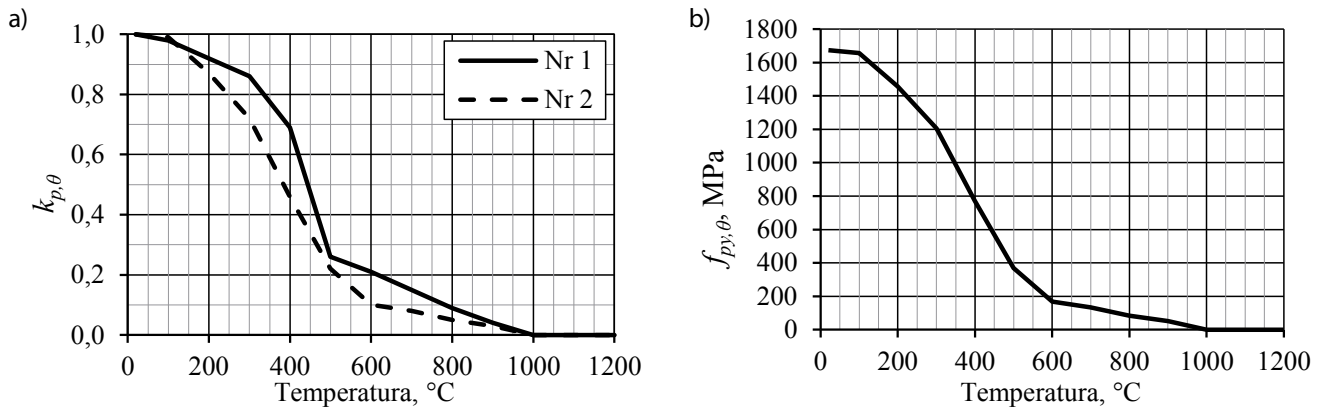
Właściwości mechaniczne stali sprężającej ogrzewanej do temperatury pożarowej można określić na podstawie modelu podanego w Eurokodzie [1]. Składa się on z ogólnej zależności (wykresu) naprężenie-odkształcenie oraz podanych w tabeli współczynników służących do określenia kluczowych punktów wykresu. Model [1] został zaproponowany przez Y. Anderberga [5] w latach 80. XX w., na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych w warunkach ustalonej temperatury. W najnowszym projekcie Eurokodu [3] model znajdujący się w [1] pozostawiono w praktycznie niezmienionej formie.

Według [1] maksymalne naprężenie, jakie może wystąpić w zbrojeniu sprężającym w temperaturze pożarowej  $\theta$ , określa wzór:

$$f_{py,\theta} = k_{py,\theta} \cdot \beta f_{pk} \quad (1)$$

w którym wartości współczynnika  $k_{py,\theta}$  są podane dla wartości temperatury będących kolejnymi wielokrotnościami 100°C. Wykresy wartości współczynnika  $k_{py,\theta}$  (dla stali klasy B) podano na rysunku 1a, a dla rozpatrywanej tu stali Y1860S7 – na rysunku 1b. Do opracowania rysunku 1b przyjęto wartość występującego we wzorze (1) współczynnika  $\beta = 0,9$ , zgodnie z zaleceniem polskiego Załącznika Krajowego do [1]. W projekcie Eurokodu [3] pominięto podział stali na klasy A i B, a wzór (1) zastąpiono wzorem:

$$f_{py,\theta} = k_{py,\theta} \cdot f_{p01,k} \quad (2)$$



**Rys. 1.** Wartości współczynnika  $k_{p,\theta}$  do określenia zmniejszenia wytrzymałości stali sprężającej w wysokiej temperaturze [1]: wykres nr 1 – pręty, nr 2 – sploty i druty (klasy B) (a), zmniejszenie wytrzymałości splotów Y1860S7 w wysokiej temperaturze (b)

Podczas obliczania nośności ogniowej zginanych elementów żelbetowych, w których na działanie warunków pożarowych jest narażona strefa rozciągana, kluczowe (i zazwyczaj wystarczające) jest określenie zmniejszenia granicy plastyczności stali w zależności od temperatury.

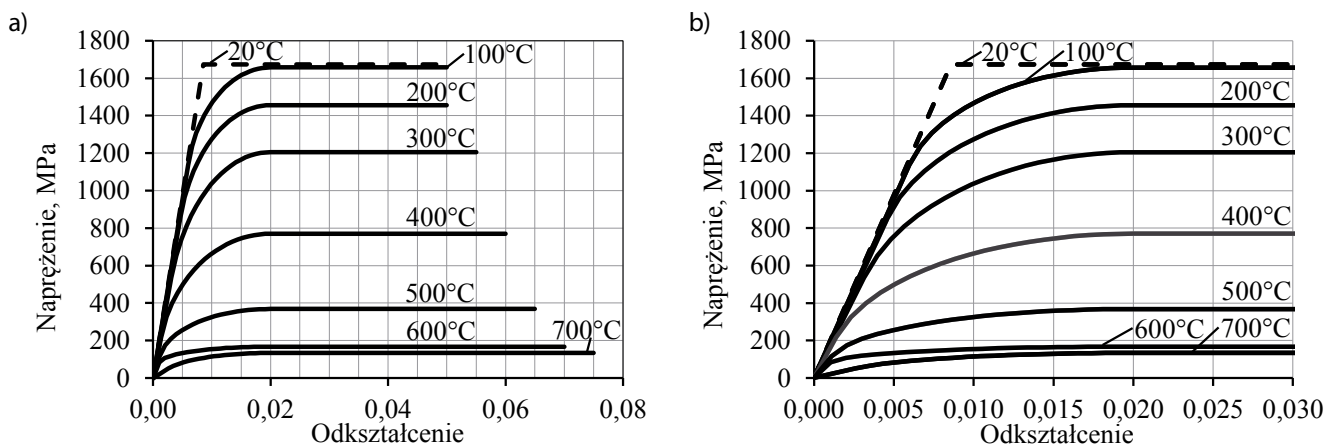
Postępując analogicznie w odniesieniu do elementów sprężonych, można by obliczać ich nośność ogniową (np. stosując metody uproszczone), przyjmując do analiz jedynie obniżoną wytrzymałość cięgien na rozciąganie, określoną na podstawie współczynników podanych w [1] (rys. 1a lub 1b).

Przyjęcie do analiz elementów sprężonych, prowadzonych ze względu na warunki pożarowe, jedynie informacji podanych na rysunku 1 spowodowałoby całkowite pominięcie odkształcalności cięgien sprężających i związanej z tym spodziewanej dużej relaksacji naprężeń w cięgnach. Projektując elementy z uwagi na nośność ogniową, rzadko kiedy rozpatruje się inne stany niż obliczeniowe zniszczenie elementu. Wydaje się jednak, że odkształcenia cięgien sprężających ogrzanych do temperatury pożarowej mogą być tak duże, że zniszczenie elementu (obliczeniowe, ale również rzeczywiste), w niekorzystnym przypadku, może wystąpić wcześniej, niż wynikałoby to z analizy nośności przekroju przy przyjęciu jedynie informacji zaczerpniętych z rysunku 1.

Konieczne jest zatem adekwatne oszacowanie również spodziewanego odkształcenia cięgien. Odkształcenie to można określić na podstawie ogólnego modelu [1].

Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie opracowane po wstawieniu parametrów splotów ze stali Y1860 do ogólnego modelu normowego [1] przedstawiono na rysunku 2a, a fragment rysunku 2a w przedziale odkształcenia do 0,03 – na rysunku 2b.

Rozpatrując rysunek 2b, można łatwo zauważyć, że określone na nim wartości odkształceń cięgien ogrzanych do wysokiej temperatury są znacznie większe od występujących w zwykłych warunkach. Rzeczywiste odkształcenia cięgien w elementach narażonych na warunki pożarowe mogą być jednak jeszcze większe. Model podany w [1] został bowiem opracowany na podstawie badań prowadzonych w warunkach ustalonej temperatury i tylko do takich odkształceń się on odnosi. W dalszej części artykułu omówiono, w jaki sposób na podstawie modelu [1] można oszacować rzeczywiste odkształcenia cięgien w elementach narażonych na warunki pożarowe. Wymaga to jednak uprzedniego zwrócenia uwagi na możliwe sposoby badania stali w wysokiej temperaturze oraz na to, w jakich warunkach zazwyczaj znajdują się cięgna w elementach poddanych działaniu pożaru.



**Rys. 2.** Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie dla splotów ze stali sprężającej Y1860 w wysokiej temperaturze, opracowane po wstawieniu parametrów splotów Y1860S7 do ogólnego modelu normowego [1] (a), powiększony fragment rysunku 2a (b)

### 3. Sposoby badania stali w wysokiej temperaturze

W zwykłej temperaturze do określenia właściwości mechanicznych stali jest zazwyczaj wykorzystywana dwuwymiarowa zależność odkształcenie-naprężenie. Podczas rozpatrywania warunków pożarowych właściwości mechaniczne stali muszą być jednak opisywane za pomocą trzech zmiennych: odkształcenia, naprężenia i temperatury. W modelu normowym [1] dwuwymiarowa zależność naprężenie-odkształcenie jest podana dla wartości temperatury równych kolejnym wielokrotnościom 100°C. Model ten jest zatem trójwymiarowy.

Prowadzenie eksperymentów przy trzech zmiennych (czynnikach) wejściowych (badanych) byłoby niewygodne i niecelowe, m.in. ze względu na trudności w jednoznacznym interpretowaniu uzyskiwanych wyników. Powoduje to, iż w praktyce wyodrębnia się dwa podstawowe sposoby realizacji badań [2, 5, 6, 7]:

- w ustalonej temperaturze,
- w zmiennej (wzrastającej) temperaturze.

Podczas pierwszego sposobu badania, w różnych zmieniających, ale ustalonych w danym eksperymencie temperaturach są określane zależności naprężenie-odkształcenie. Warunki ich badania mogą być modyfikowane, jednak najczęściej w wysokiej temperaturze jest stosowany sposób podobny do próby rozciągania stali, wykonywanej w temperaturze pokojowej. Zapewnia to możliwość porównania wyników oraz sprawia, że badania prowadzone w ustalonej temperaturze są stosunkowo łatwe do zrealizowania w praktyce. Model Y. Anderberga [5] wprowadzony do Eurokodu [1] został opracowany właśnie na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ustalonej temperaturze.

Podczas badań prowadzonych w zmiennej temperaturze, najczęściej ustalone jest wyężenie próbki. Wtedy przy różnych, zmieniających, ale ustalonych w danym eksperymencie wartościach naprężenia w próbkach, są one ogrzewane w określony sposób, a mierzone są wartości odkształcenia (wydłużenia).

Wyniki uzyskane przy zastosowaniu dwóch wymienionych wyżej sposobów nie mogą być porównywane bezpośrednio [2, 6, 7].

Całkowite wydłużenie cięga sprężającego w wysokiej temperaturze  $\epsilon_{p,tot}$  może być wyrażone jako suma czterech składników [2, 5, 6, 7]:

$$\epsilon_{p,tot} = \epsilon_{p,0} + \epsilon_{p,\sigma} + \epsilon_{p,\sigma\theta} + \epsilon_{p,cr} \quad (3)$$

gdzie:

$\epsilon_{p,0}$  – oznacza swobodne wydłużenie termiczne stali (bez obciążenia);

$\epsilon_{p,\sigma}$  – oznacza wydłużenie stali powstające na skutek działania obciążenia w zwykłej temperaturze; ewentualnie można by tu jeszcze wyodrębnić część sprężystą i plastyczną;

$\epsilon_{p,\sigma\theta}$  – oznacza wydłużenie spowodowane jednoczesnym działaniem obciążenia i wysokiej temperatury; jest to przyrost odkształcenia spowodowany pogorszeniem właściwości mechanicznych stali pod wpływem wzrostu temperatury;

$\epsilon_{p,cr}$  – oznacza wydłużenie spowodowane pełzaniem stali, będące wynikiem jednoczesnego działania obciążenia i wysokiej temperatury, ale w odpowiednio długim czasie; odkształcenie to, w przedziałach czasu odpowiadających rzeczywistym pożarom, tzn. do ok. 4 godzin, jest małe [2] i nie będzie rozpatrywane w dalszej części tej pracy.

Podczas badań prowadzonych w ustalonej temperaturze, zazwyczaj pomiar odkształcenia jest rozpoczynany dopiero po ustabilizowaniu się w próbce założonej temperatury. Powoduje to, że wyniki badań przeprowadzonych w ustalonej temperaturze przeważnie nie obejmują swobodnego wydłużenia termicznego stali  $\epsilon_{p,0}$ . Podczas badań w wysokiej temperaturze jest zatem mierzone jedynie odkształcenie określone wzorem:

$$\epsilon_{p,\theta=const} = \epsilon_{p,\sigma} + \epsilon_{p,\sigma\theta} \quad (4)$$

tzn. obejmujące sumę odkształcenia próbki powstającego na skutek działania obciążenia w zwykłej temperaturze i przyrostu odkształcenia powstającego na skutek pogorszenia właściwości mechanicznych stali, spowodowanego podwyższeniem temperatury. Jak już wspomniano wyżej, podstawę modelu [1, 5] stanowiły właśnie badania przeprowadzone w ustalonej temperaturze. Nie odzwierciedlają one jednak warunków, w jakich zazwyczaj znajduje się zbrojenie elementów narażonych na działanie pożaru [2, 6, 7].

Warunki te bardziej adekwatnie może odwzorować sposób prowadzenia badań we wzrastającej temperaturze. Przed rozpoczęciem pożaru elementy konstrukcyjne są najczęściej wyężone, co oznacza, że w ich zbrojeniu występują już naprężenia [2, 6, 7].

Podczas badań prowadzonych we wzrastającej temperaturze, przed rozpoczęciem ogrzewania, próbka jest rozciągana (w zwykłej temperaturze) do wystąpienia w niej założonego naprężenia. Od programu badań zależy, czy jest wtedy mierzone odkształcenie powstające na skutek działania obciążenia w zwykłej temperaturze  $\epsilon_{p,\sigma}$ , czy pomiar wydłużenia próbki rozpoczyna się po jej uprzednim obciążeniu. W pierwszym przypadku jest możliwe określenie całkowitego odkształcenia zbrojenia  $\epsilon_{p,tot}$  wyrażonego wzorem (3). Jeżeli jednak podczas badania nie rejestruje się wydłużenia próbki spowodowanego obciążeniem w zwykłej temperaturze  $\epsilon_{p,\sigma}$  to jako wynik otrzymuje się tylko wydłużenie wyrażone wzorem:

$$\epsilon_{p,\sigma=const} = \epsilon_{p,0} + \epsilon_{p,\sigma\theta} \quad (5)$$

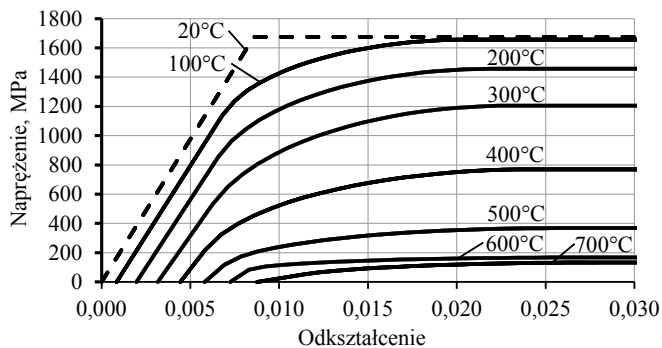
Warto jeszcze dodać, iż w związku z brakiem jednoznacznych danych, w jaki sposób pogorszenie właściwości

mechanicznych stali spowodowane jednoczesnym działaniem obciążenia i wysokiej temperatury ( $\varepsilon_{p,\sigma\theta}$ ) zależy od prędkości jej wzrastania, prędkość tę należy dobrać tak, aby możliwie dokładnie odwzorowane było rzeczywiste tempo przyrostu temperatury w cięgnach elementu narażonego na działanie pożaru [2].

#### 4. Odształcenia stali sprężającej w elementach narażonych na warunki pożarowe

Jak już wskazano wyżej, model podany w [1], przedstawiony na rysunku 2, został opracowany na podstawie badań przeprowadzonych w ustalonej temperaturze. Nie ujmuje on zatem całkowitego odkształcenia stali, a jedynie jego część wyrażoną wzorem (4). Aby określić odkształcenie całkowite, tzn. takie, jakiego należy się spodziewać w elementach narażonych na warunki pożarowe, do odkształcenia obliczonego na podstawie rysunku 2 należy dodać swobodne wydłużenie termiczne stali.

Zazwyczaj przyjmuje się, że wartość współczynnika odkształcalności termicznej stali jest stała i wynosi od 1,0 do  $1,2 \times 10^{-5}$  [1/°C]. W Eurokodzie [1] podana jest jednak dokładniejsza zależność opisująca swobodną odkształcalność termiczną stali sprężającej. Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie dla splotów sprężających Y1860S7, opracowane według zasady podanej na początku tego podrozdziału, przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie w wysokiej temperaturze odpowiednie do oszacowania całkowitego wydłużenia cięgien Y1860S7 w elementach narażonych na warunki pożarowe

Wartości wydłużenia odłożone na osi poziomej wykresu są sumą odkształcenia obliczonego na podstawie modelu normowego [1] (wzór (4), rys. 2) oraz swobodnego odkształcenia termicznego stali sprężającej. Wartości odkształceń podane na rysunku 3, określone wzorem (6), są odpowiednie do szacowania wydłużenia cięgien sprężających (Y1860) w elementach narażonych na działanie pożaru.

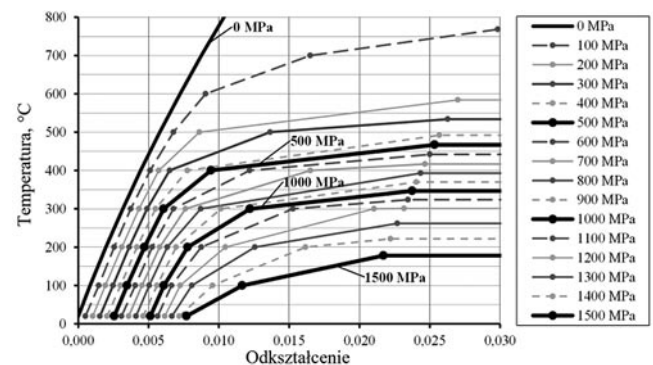
$$\varepsilon_{p,fi} = \varepsilon_{p,0} + \varepsilon_{p,\sigma} + \varepsilon_{p,\sigma\theta} \quad (6)$$

#### 5. Analogia wydłużania się cięgien sprężających w elementach narażonych na warunki pożarowe do pełzania betonu w zwykłych warunkach

Jak wspomiano wyżej, model normowy [1] oraz opracowany na jego podstawie model podany na rysunku 3 w rzeczywistości są trójwymiarowe. Możliwe jest zatem przedstawienie tych modeli w innym układzie współrzędnych.

Wykresy zależności wydłużenia cięgien, przy ustalonej wartości naprężenia, w zależności od temperatury podano na rysunku 4. Wykresy te opracowano na podstawie rysunku 3, w wyniku przeniesienia z krzywych podanych na tym rysunku odpowiednich punktów o współrzędnych odkształcenie-naprężenie, do układu współrzędnych odkształcenie-temperatura.

Wartości odkształceń odłożone na osi poziomej rysunku 4 – podobnie jak na rysunku 3, określone wzorem (6) – są odpowiednie do szacowania wydłużenia cięgien sprężających (Y1860S7) w elementach narażonych na działanie pożaru.



**Rys. 4.** Wykresy zależności temperatura-odkształcenie odpowiednie do oszacowania całkowitego wydłużenia cięgien Y1860S7 w elementach narażonych na działanie pożaru

Rozpatrując krzywe przedstawione na rysunku 4, można dostrzec pewną analogię pomiędzy wydłużaniem się cięgien elementów sprężonych narażonych na działanie pożaru, a pełzaniem betonu w zwykłych warunkach. Na początku (oraz przed rozpoczęciem) pożaru w cięgnach występują odkształcenia określone położeniem punktów wykresów opisanych rzędną 20°C. Przy okazji warto podkreślić, iż do obliczenia tych odkształceń  $\varepsilon_{p,\sigma} = \sigma_p / E_p$  należy przyjąć naprężenie w cięgnach występujące w momencie rozpoczęcia pożaru. Powinno to być naprężenie obliczone po uwzględnieniu strat sprężania. W czasie pożaru, wraz ze wzrostem temperatury, przy stałym naprężeniu, następuje znaczny przyrost wydłużenia cięgien, opisany krzywymi podanymi na rysunku 4. Przykładowo przy naprężeniu wynoszącym 1000 MPa, po ogrzaniu cięgien do temperatury wynoszącej 300°C, należy się spodziewać przyrostu odkształcenia od wartości ok. 0,005 do wartości ok. 0,012, a więc o ok. 140%. Odpowiada to wartości współczynnika pełzania wynoszącej 1,4.

**Tabela 1.** Wartości całkowitego wydłużenia  $\varepsilon_{p,ff}$  określonego wzorem (6), cięgien sprężających Y1860S7 ogrzanych do temperatury pożarowej oraz współczynnika  $\phi_{p,fi}$  określonego wzorem (7)

$\sigma_p$ [MPa]	$\varepsilon_{p,\sigma}$	3	Temperatura, $\theta$ [°C]								patrz kol.12	*
			100	200	300	400	500	600	700	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	$\varepsilon_{p,0}$	0,0008	0,002	0,0032	0,0044	0,0058	0,0072	0,0088	-	-	
100	0,0005	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0015	0,0026	0,0037	0,0051	0,0068	0,0091	0,0165	0,0298	768	
		$\phi_{p,fi}$	1,8	4	6,3	9	12,2	16,7	31,2	57,2		
200	0,001	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0019	0,0031	0,0043	0,0057	0,0086			0,027	584	
		$\phi_{p,fi}$	0,9	2	3,2	4,6	7,4			25,3		
400	0,0021	$\varepsilon_{p,fi}$	0,003	0,0042	0,0055	0,0078				0,0257	492	
		$\phi_{p,fi}$	0,5	1	1,7	2,8				11,5		
600	0,0031	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0041	0,0053	0,0068	0,0122				0,025	442	
		$\phi_{p,fi}$	0,3	0,7	1,2	3				7,1		
800	0,0041	$\varepsilon_{p,fi}$	0,005	0,0063	0,0087					0,0243	393	
		$\phi_{p,fi}$	0,2	0,5	1,1					4,9		
1000	0,0051	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0061	0,0078	0,0122					0,0238	347	
		$\phi_{p,fi}$	0,2	0,5	1,4					3,6		
1200	0,0062	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0073	0,0105	0,021					0,0232	301	
		$\phi_{p,fi}$	0,2	0,7	2,4					2,8		
1400	0,0072	$\varepsilon_{p,fi}$	0,0095	0,0162						0,0222	222	
		$\phi_{p,fi}$	0,3	1,3						2,1		

\* W kol. 12 zestawiono wartości temperatury, dla której dany poziom naprężenia jest równy zmniejszonej wytrzymałości stali na rozciąganie  $f_{py\theta}$ .  
Wartości  $\varepsilon_{p,fi}$  oraz  $\phi_{p,fi}$  odpowiadające tej temperaturze zestawiono w kolumnie 11.

W zależności od naprężenia w cięgnach występującego na początku pożaru oraz od temperatury, zestawiono wartości (tab. 1):

- całkowitego wydłużenia cięgna  $\varepsilon_{p,ff}$ ; są to wartości zaczerpnięte z rysunku 4, określone wzorem (6);
- współczynnika  $\phi_{p,fi}$  obliczonego według wzoru (7), wyrażającego stosunek przyrostu wydłużenia cięgna spowodowanego działaniem temperatury pożarowej do wydłużenia na początku pożaru; wzór (7) ma postać analogiczną do definicji współczynnika pełzania betonu w zwykłych warunkach.

$$\phi_{p,fi} = \frac{\varepsilon_{p,fi} - \varepsilon_{p,\sigma}}{\varepsilon_{p,\sigma}} = \frac{\varepsilon_{p,0} + \varepsilon_{p,\sigma\theta}}{\varepsilon_{p,\sigma}} \quad (7)$$

## 6. Zmniejszenie siecznego modułu odkształcalności stali sprężającej i relaksacja naprężeń w cięgnach w elementach narażonych na warunki pożarowe

Na podstawie wykresów podanych na rysunku 3 lub wartości odkształceń zestawionych w tabeli 1 jest możliwe obliczenie siecznego modułu odkształcalności cięgien

sprężających w elementach narażonych na działanie pożaru  $E_{p,ff}$  według wzoru:

$$E_{p,fi} = \sigma_p / \varepsilon_{p,fi} \quad (8)$$

W zależności od naprężenia występującego w cięgnie i jego temperatury przedstawiono wartości względnego obniżenia modułu odkształcalności cięgien (Y1860S7) w elementach narażonych na warunki pożarowe (tab. 2). Podane wartości obliczono jako stosunek siecznego (wypadkowego) modułu odkształcalności cięgien  $E_{p,ff}$  według wzoru (8), do ich modułu sprężystości w zwykłej temperaturze  $E_p = 195$  GPa.

Łatwo zauważyć, że moduł sprężystości stali sprężającej ogrzanej do temperatury pożarowej jest znacznie mniejszy niż w zwykłej temperaturze. Przy okazji warto zwrócić uwagę, iż wartości podane w tabeli 2 są znacznie mniejsze od współczynników opisujących względne obniżenie modułu odkształcalności stali sprężającej (odnoszących się do zakresu sprężystego;  $E_{p,\theta}$ ) podanych w [1].

Podczas analiz elementów sprężonych większe znaczenie praktyczne od określenia obniżenia modułu odkształcalności cięgien może mieć oszacowanie relaksacji występujących w nich naprężeń. Można to wykonać na podstawie rysunku 4.

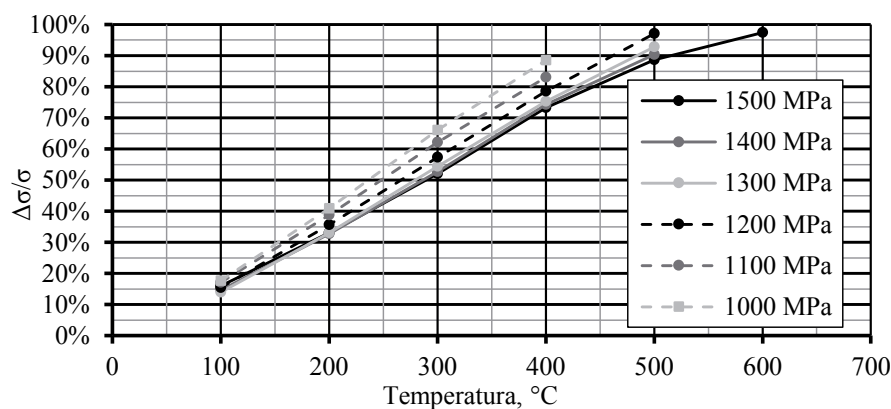
**Tabela 2.** Wartości względnego zmniejszenia modułu odkształcalności cięgien sprężających (Y1860S7) pod wpływem temperatury pożarowej (podane wartości obliczono jako stosunek  $E_{p,fi}/E_p$  według wzoru (8) do  $E_p=195$  GPa)

$\sigma_p$ [MPa]	Temperatura, $\theta$ [°C]								
	100	200	300	400	500	600	700	patrz kol.10	*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	0,3535	0,2003	0,1373	0,1004	0,0757	0,0566	0,0311	0,0172	768
200	0,5346	0,3309	0,2374	0,1792	0,1190			0,0270	584
400	0,6809	0,4919	0,3728	0,2643				0,0257	492
600	0,7595	0,5854	0,4550	0,2525				0,0250	442
800	0,8136	0,6485	0,4713					0,0243	393
1000	0,8422	0,6587	0,4200					0,0238	347
1200	0,8483	0,5880	0,2926					0,0232	301
1400	0,7521	0,4441						0,0222	222

\* W kol. 10 zestawiono wartości temperatury, dla której dany poziom naprężenia jest równy zmniejszonej wytrzymałości stali na rozciąganie  $f_{py,\theta}$ .  
Wartości  $E_{p,fi}/E_p$  odpowiadające tej temperaturze zestawiono w kol. 9.

**Tabela 3.** Zmniejszenie i relaksacja naprężeń w cięgnach sprężających (Y1860S7) w zależności od temperatury

$\sigma$ [MPa]		Temperatura, $\theta$ [°C]					
		100	200	300	400	500	600
1500	$\sigma-\Delta\sigma$	1261	1003	720	401	170	39
	$\Delta\sigma$	239	497	780	1099	1330	1461
	$\Delta\sigma/\sigma$	16%	33%	52%	73%	89%	97%
1400	$\sigma-\Delta\sigma$	1195	943	661	361	135	
	$\Delta\sigma$	205	457	739	1039	1265	
	$\Delta\sigma/\sigma$	15%	33%	53%	74%	90%	
1300	$\sigma-\Delta\sigma$	1119	870	592	322	93	
	$\Delta\sigma$	181	430	708	978	1207	
	$\Delta\sigma/\sigma$	14%	33%	54%	75%	93%	
1200	$\sigma-\Delta\sigma$	1015	772	512	258	36	
	$\Delta\sigma$	185	428	688	942	1164	
	$\Delta\sigma/\sigma$	15%	36%	57%	79%	97%	
1100	$\sigma-\Delta\sigma$	912	674	417	187		
	$\Delta\sigma$	188	426	683	913		
	$\Delta\sigma/\sigma$	17%	39%	62%	83%		
1000	$\sigma-\Delta\sigma$	824	591	339	115		
	$\Delta\sigma$	176	409	661	885		
	$\Delta\sigma/\sigma$	18%	41%	66%	89%		



**Rys. 5.** Relaksacja naprężeń w cięgnach sprężających (Y1860S7) w zależności od temperatury

W tabeli 3 podano wartości:

- naprężenia  $\sigma-\Delta\sigma$ , do którego obniży się naprężenie początkowe (podane w pierwszej kolumnie tabeli 3) w wyniku ogrzania cięgien do określonej temperatury, przy założeniu, że odkształcenie jest stałe,
- różnicy naprężeń  $\Delta\sigma$ ,
- obliczonej na podstawie powyższych parametrów relaksacji naprężeń w cięgnach  $\Delta\sigma/\sigma$ .

Wykresy relaksacji naprężeń w cięgnach w zależności od temperatury ( $\Delta\sigma/\sigma$ , według tabeli 3) przedstawiono na rysunku 5. Relaksacja ta jest

bardzo znaczna i niezbyt „mocno” zależy od wartości naprężeń występujących w cięgnach przed rozpoczęciem pożaru. Na przykład już po ogrzaniu cięgien do temperatury wynoszącej 300°C należy się liczyć ze zmniejszeniem siły sprężającej o ponad 50%.

Jednak z drugiej strony, rzadko kiedy cięgna są ogrzewane podczas pożaru na całej swojej długości, w wyniku czego rzeczywiste obniżenie siły w cięgnach nie powinno być aż tak znaczne, jak można by się tego spodziewać na podstawie rysunku 5.

## 7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wskazówki na temat wykorzystania modelu pogorszenia właściwości mechanicznych stali sprężającej w wysokiej temperaturze, podanego w EC2-1-2, przydatne do oszacowania zmniejszenia siły sprężającej w elementach narażonych na warunki pożarowe.

Adekwatne oszacowanie tej siły ma kluczowe znaczenie podczas obliczeń nośności ogniowej elementów sprężonych. Przyjęcie do analiz wyłącznie obniżenia wytrzymałości stali określonego na podstawie modelu EC2-1-2 może być przyczyną znacznego niedoszacowania zmniejszenia siły sprężającej w warunkach pożarowych lub przyczyną zawyżenia obliczeniowej nośności przekroju w stanie granicznym nośności rozpatrywanym w wyjątkowej sytuacji projektowej pożaru.

Do adekwatnego oszacowania zmniejszenia siły sprężającej w elementach narażonych na warunki pożarowe konieczne

jest odpowiednie oszacowanie wydłużenia cięgien, spowodowanego wzrostem ich temperatury. W tym celu konieczne jest zsumowanie odkształcenia cięgien powstałego na skutek pogorszenia ich właściwości mechanicznych pod wpływem temperatury i swobodnego wydłużenia termicznego stali.

Podane w tekście artykułu wartości: całkowitych odkształceń stali, względnego obniżenia wypadkowego (siecznego) modułu odkształcalności stali oraz relaksacji występujących w niej naprężeń, pod wpływem temperatury pożarowej odnoszą się do splotów ze stali Y1860.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-1-2:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008
- [2] Kowalski R., Konstrukcje żelbetowe w warunkach pożarowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
- [3] prEN 1992-1-2:2021. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, European Committee for Standardization, Brussels, 2021
- [4] prEN 10138-3:2009. Prestressing steels – Part 3: Strand. European Committee for Standardization, Brussels, 2009
- [5] Anderberg Y., Modelling Steel Behaviour. Fire Safety Journal 13/1988, str. 17–26
- [6] Kowalski R., The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. Procedia Engineering, 193, 2017, str. 27-34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
- [7] Abramowicz M., Kowalski R., Stress-strain relationship of reinforcing steel subjected to tension and high temperature, Applications of Structural Fire Engineering. Proceedings of International Conference, Prazka Technika, 2009, str. 134–139



**XVII**

**KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA**

**WARSZTAT PRACY  
RZECZOZNAWCY BUDOWLANEGO**

**Kielce - Cedzyna  
19-21 października 2022 roku**

[rzeczoznawstwo2022.tu.kielce.pl](http://rzeczoznawstwo2022.tu.kielce.pl)

**ADRES KOMITETU ORGANIZACYJNEGO**

Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
„Rzeczoznawstwo 2022”  
25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
tel. +48 41 34 24 546 / +48 501621627  
fax +48 41 34 43 784  
e-mail: [rzeczoznawstwo2022@tu.kielce.pl](mailto:rzeczoznawstwo2022@tu.kielce.pl)  
[rzeczoznawstwo2022.tu.kielce.pl](http://rzeczoznawstwo2022.tu.kielce.pl)

organizatorzy:



ODDZIAŁ KIELCE



**Politechnika Świętokrzyska**  
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I ARCHITEKTURY