

ARTEM CZKWIANIANC

JAN KOZICKI

TADEUSZ URBAN

Katedra Budownictwa Betonowego
Politechniki Łódzkiej

ŻELIWO JAKO MATERIAŁ KONSTRUKCYJNY XIX-WIECZNYCH OBIEKTÓW PRZEMYSŁOWYCH

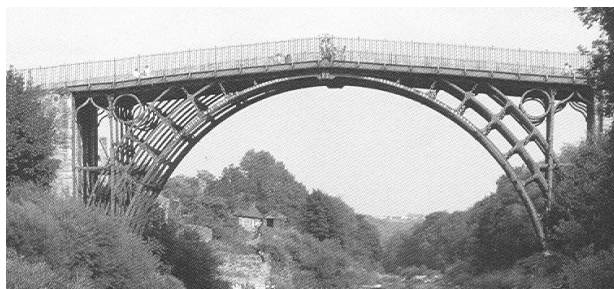
Opiniodawca: **dr hab. inż. Zbigniew Janowski, prof. PK**

W pracy przedstawiono rozwój konstrukcji budowlanych w obiektach przemysłowych XIX wieku w łódzkiej aglomeracji. Szczególną uwagę zwrócono na wprowadzenie do powszechnego stosowania nowego materiału, jakim wówczas było żeliwo. Opis historycznych konstrukcji uzupełniono współczesnymi wynikami badań laboratoryjnych.

1. WPROWADZENIE

Przełom XVIII i XIX wieku to początki rewolucji przemysłowej, która wymagała budowy nowych, niespotykanych na dotychczasową skalę, obiektów przemysłowych. Do 1780 roku podstawową formą konstrukcji wielokondygnacyjnych budynków produkcyjnych i magazynowych były konstrukcje ze stropami drewnianymi, których elementy nośne (belki) oparte były na ścianach zewnętrznych, a podporami wewnętrznymi były słupy drewniane. Rozpiętość belek pomiędzy słupami i ścianami wynosiła od 3 do 4 m. Ta szkieletowa konstrukcja drewniana nie była odporna na ogień. Pożary w fabrykach zagrażały nie tylko robotnikom, ale również składowanym w nich materiałom, maszynom i samym budynkom. Łatwopalne materiały, takie jak włókna bawełny lub kurz, w połączeniu z oparami oleju używanego do smarowania maszyn, z otwartym płomieniem lamp oświetlenia, a czasami z iskrami wytwarzanymi przez maszyny, stwarzały środowisko sprzyjające pożarom.

Szkieletowa konstrukcja drewniana stwarzała dodatkowo nowy rodzaj zagrożenia, który nie występował w budynkach z murowanymi ścianami nośnymi. Zniszczenie lokalne jednego słupa na dolnej kondygnacji powodowało zawalenie się wszystkich kondygnacji znajdujących się powyżej.

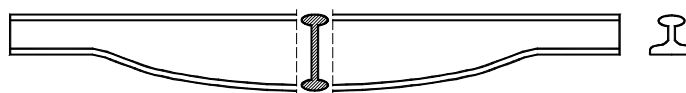


Rys. 1. Żeliwny most przez rzekę Severn w Anglii 1777÷1779

Fig. 1. Cast-iron bridge through the river Severn in England 1777÷1779

Niszczycielskie działania pożarów, jak również naciski firm asekuracyjnych spowodowały poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych odpornych na pożar. Było to między innymi przyczynkiem do zastosowania żeliwa w budownictwie na szeroką skalę. Nie byłoby to możliwe gdyby nie rewolucyjny wynalazek Abrahama Darby I, który opracował w 1709 roku metodę wytopu żeliwa w wielkim piecu przy użyciu koksu zamiast węgla drzewnego. Na początku wynalazek ten nie wzbudził szerszego zainteresowania wśród hutników. Powodem tego była konieczna precyzja w doborze odpowiedniej proporcji rudy i opału, aby można było uzyskać produkt dobrej jakości. Dopiero potomek wynalazcy Abraham Darby II w 1775 r. w Coalbrookdale (środkowa Anglia) buduje wielki piec wykorzystujący koks jako paliwo w pełni konkurujące z węglem drzewnym. Przyczynił się do tego zapewne spektakularny projekt budowy mostu przez rzekę Severn opracowany przez Pritcharda. Lokalizacja mostu w sąsiedztwie pieca hutniczego nie była bez znaczenia dla wyboru żeliwa, jako materiału konstrukcyjnego. Budowniczym mostu został Abraham Darby III, któremu przypisuje się zasługi doprowadzenia dzieła do końca, gdyż autor projektu zmarł w 1777 r., w momencie rozpoczęcia budowy. Most został ukończony w 1779 r. i do dnia dzisiejszego można go podziwiać, jako pierwszy na świecie most żeliwny (patrz rys. 1). Znaczenie tego dzieła znalazło wyraz w decyzji UNESCO wpisania go na listę obiektów światowego dziedzictwa kulturowego. Długość przęsła tego mostu ma wymiar – 30,6 m, a masa wbudowanego żelaza wynosi 385 ton.

W 1789 roku angielski inżynier William Jessop opatentował kształt żeliwnej belki w formie brzucha ryby („fish-belly”), który nawiązywał do wykresów momentów zginających w belce swobodnie opartej (patrz rys. 2). Dociekania jego wynikały raczej z praktycznych doświadczeń niż naukowych rozważań, co było powszechną praktyką w tych czasach.

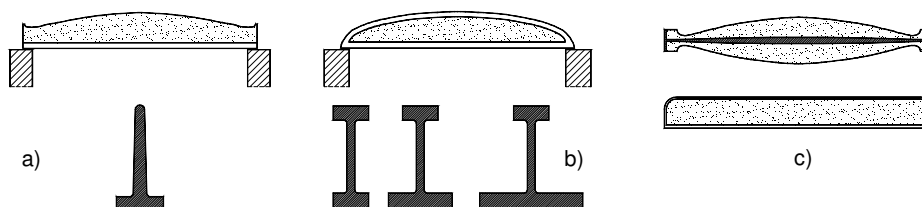


Rys. 2. Żeliwna szyna w kształcie rybiego brzucha opatentowana przez angielskiego inżyniera Williama Jessopa w 1789 r. Kształt belki odzwierciedla wykres momentów zginających

Fig. 2. Cast-iron fish-belly rail patented by the English engineer William Jessop in 1789, the shape in side view reflects the graph of the bending moments

Inaczej do problemu podszedł Eaton Hodgkinson, angielski matematyk, którego celem było stworzenie modelu belki zginanej poddanej poprzecznemu obciążeniu. Zakładał on, że za pomocą tego modelu można byłoby przewidywać wielkości ugięć i obciążeń krytycznych dla dowolnego kształtu przekroju poprzecznego belki. Model ten miał uwzględniać wyłącznie fizyczne właściwości materiału (moduł Younga i wytrzymałość), sposób obciążeń i wymiary belki. Ambicją jego było wyeliminowanie empirycznych parametrów. W pracach swych Hodgkinson wykorzystał osiągnięcia swych wielkich poprzedników, do których należy zaliczyć: Galileusza, Hooke'a, Mariotte'a, Eulera, Coulomba, Younga i Naviera.

Największym osiągnięciem Hodgkinsona było odkrycie, że miejsce zerowania się naprężeń w przekroju zginanym (oś obojętna) pokrywa się ze środkiem ciężkości tego przekroju. W ten sposób mógł uzasadnić najbardziej ekonomiczne rozmieszczenie materiału, jakim był przekrój w kształcie odwróconego „T”. Dla racjonalnej belki żeliwnej, pola przekrojów części rozciąganej i ściskanej powinny być odwrotnie proporcjonalne do wytrzymałości żeliwa na rozciąganie i ściskanie, których stosunek szacowano wówczas na około 1:6.

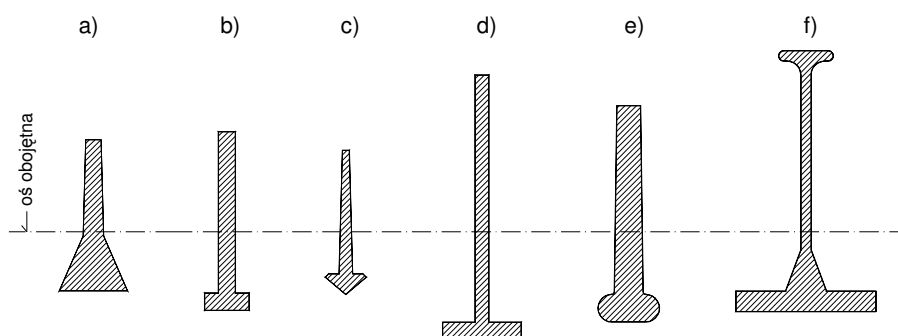


Rys. 3. Przykłady belek żeliwnych według teorii Hodgkinsona z początku XIX w. (według [1])

Fig. 3. Examples of cast iron beams according to the Hodgkinson's theory, early 1800s. (according to [1])

Na rysunku 3 pokazano kształty belek żeliwnych opracowanych na podstawie teorii Hodgkinsona. Mimo ogromnego wkładu intelektualnego, jaki wniósł Hodgkinson do rozwoju inżynierii, nie zdołał w pełni zrealizować swych szczytnych celów, a mianowicie nie rozwiązał problemów związanych z naprężeniami stycznymi, statecznością ściskanej części środka oraz nie wyeliminował empirycznych stałych.

W praktyce pierwszą żeliwną belkę w budynku zastosował Anglik Charles Bage (1751-1822) w 1796 roku. Na rysunku 4 pokazano przekroje środkowe belek żeliwnych zastosowanych w obiektach przemysłowych Anglii z przełomu XVIII i XIX wieku. Zestawienie to sporządzono na podstawie książki Billa Addisa [1].



Rys. 4. Przekroje belek żeliwnych stosowanych w wielokondygnacyjnych fabrykach w Anglii w latach 1796÷1834 (na podstawie [1]):

- a) Castle Foregate 1796 – Charles Bage, b) Salford 1800 – Boulton & Watt,
- c) Belper North Mill 1803 – William Strutt, d) Armlley Mill 1823,
- e) Carll Mills 1824, f) Orrell's Mill 1834 – William Fairbairn

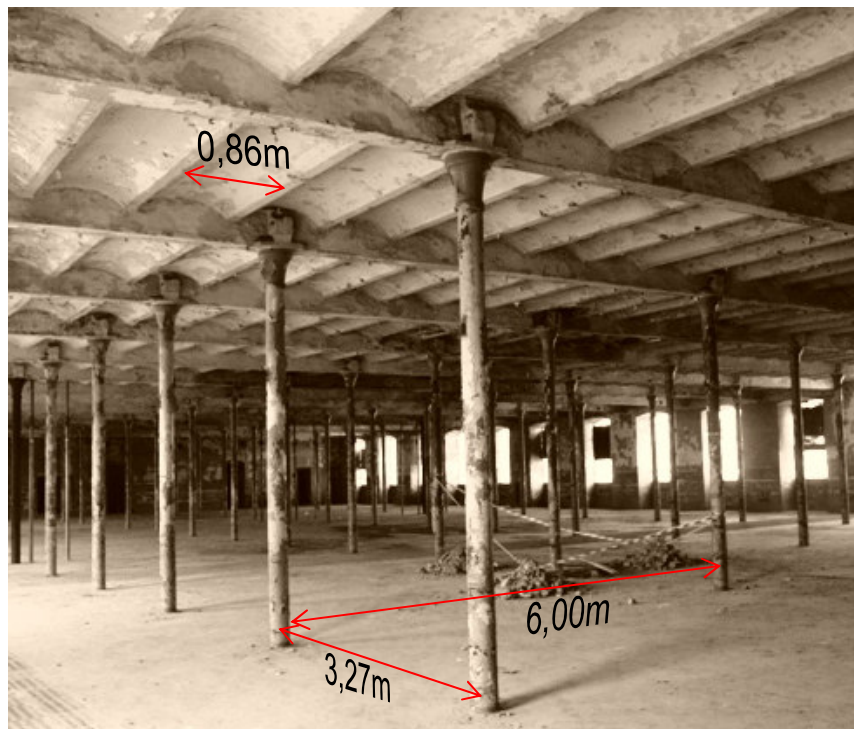
Fig. 4. Cross sections of cast-iron beams used in multistory factories, England, from 1796 to 1834 (according to [1])

Z pośród pokazanych na rysunku 4 belek, na szczególną uwagę zasługuje ostatnia (f) zaprojektowana przez angielskiego wynalazcę, konstruktora i przemysłowca Williama Fairbairna (1789-1874), który, wykorzystując teoretyczne prace Hodgkinsona, zmniejszył zużycie żelaza od 20 do 30 procent w stosunku do ówczynie stosowanych przekrojów. W belkach tych oprócz niesymetrycznego przekroju z dużą dolną półką, mamy po raz pierwszy zastosowaną półkę górną, która ograniczała efekt zwichrzenia.

2. ELEMENTY ŻELIWNE W ŁÓDZKICH FABRYKACH

Żeliwo do konstrukcji łódzkich fabryk trafiło kilkadziesiąt lat później, niż to miało miejsce w Anglii. Jednym z największych obiektów

przemysłowych w końcu XIX wieku w Łodzi był budynek dawnej przędzalni Poznańskiego przy ul. Ogrodowej. Budynek ten wzniesiony w latach 1878÷1880 jest przykładem zastosowania nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych, jakim w tym czasie były elementy żeliwne.



Rys. 5. Żeliwno-stalowy szkielet dawnej przędzalni Poznańskiego w Łodzi

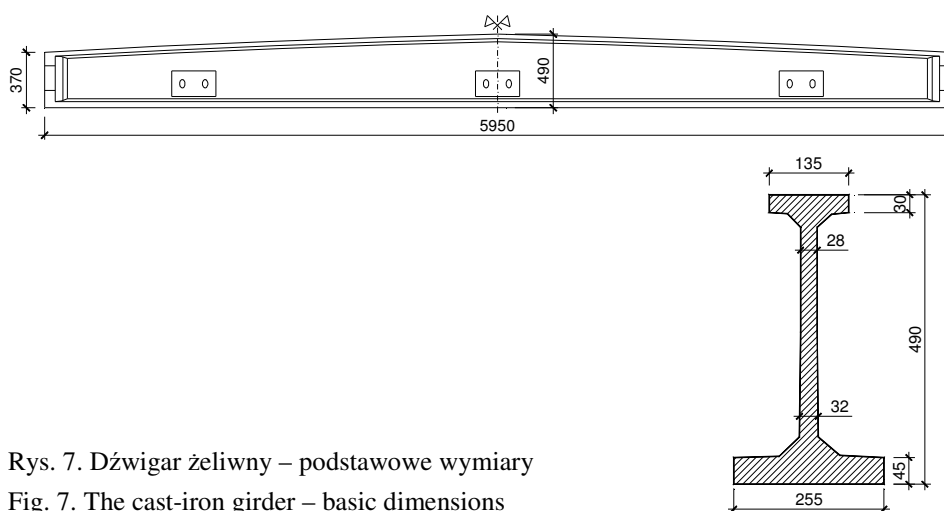
Fig. 5. The cast-iron structure in the former spinning factory of Poznański in Łódź

Ten murowany obiekt o pięciu kondygnacjach nadziemnych, częściowo podpiwniczony, został wyposażony w stropy odcinkowe wsparte na żeliwnych dźwigarach. Główne elementy konstrukcyjne stropów, jakim są żeliwne dźwigary, opierały się na żeliwnych słupach i murowanych ścianach zewnętrznych. Rozpiętość dźwigarów w kierunku poprzecznym budynku wynosi 6,0 m, a ich rozstaw wzdłuż osi podłużnej wynosi 3,27 m. Pomiędzy żeliwnymi dźwigarami rozpięte są stalowe żebra o przekroju szyny kolejowej (prawdopodobnie były to szyny z odzysku). Rozstaw żebier wynosi około 0,86 m. Widok żeliwno-stalowego szkieletu budynku pokazano na rys. 5. Budynek znajduje się obecnie w kompleksie łódzkiej Manufaktury, a po zakończeniu modernizacji, co ma nastąpić w połowie 2009 r., będzie użytkowany jako hotel o wysokim standardzie.



Rys. 6. Szczegół połączenia dźwigara ze słupem

Fig. 6. The detail of the girder connection with the column



Rys. 7. Dźwigar żeliwny – podstawowe wymiary

Fig. 7. The cast-iron girder – basic dimensions

Realizowana modernizacja spowodowała potrzebę wykonania badań niszczących niektórych elementów konstrukcji, przewidywanych przez projektanta do dalszej eksploatacji. Tymi elementami między innymi były żeliwne dźwigary, żebra i słupy. Dźwigary, których dwuteowy przekrój był dostosowany do pola momentów od obciążenia równomiernie rozłożonego, były oparte na głowicach słupów żeliwnych. Szczegół tego połączenia (oparcia) pokazano na zdjęciach (rys. 6), zaś wymiary dźwigarów w charakterystycznych przekrojach na rysunku 7. Na rysunku 8 pokazano dźwigary najwyższej kondygnacji, których część została zdemonstrowana i mogły być wykorzystane do badań niszczących.

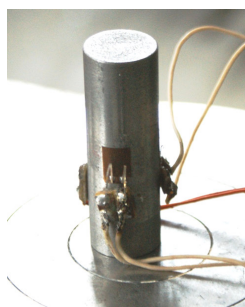


Rys. 8. Dźwigar żeliwny w miejscu wbudowania

Fig. 8. The cast-iron girder in the place of building

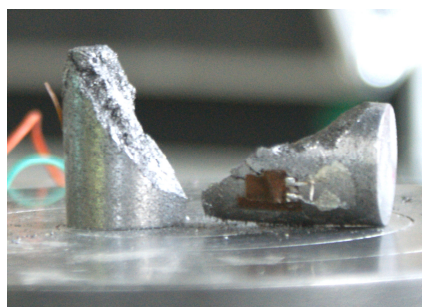
3. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH ŻELIWA

W laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej przeprowadzono szereg badań niszczących w celu określenia własności mechanicznych żeliwa stosowanego w elementach konstrukcyjnych łódzkich fabryk. Z żeliwa pobranego z dźwigarów pokazanych na rys. 8 wykonano próbki do badania na rozciąganie i ściskanie. Wytrzymałość żeliwa na rozciąganie badano na próbkach walcowych o średnicy 16 mm z przewężeniem w części środkowej do 13 mm. Długość części przewężonej wynosiła 130 mm, a całość próbki 290 mm. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-57/H-04320 („Próba statyczna ściskania metali”). Próbę zwykłą wykonano na walcach o stosunku $h/d = 1,5$ (wysokość próbki $h = 37,5$ mm, średnica $d = 25$ mm). Zależność $\sigma - \epsilon$ przy ściskaniu określono na próbkach o średnicy 20 mm i wysokości 40 mm ($h/d = 2$) oraz na próbkach o wysokości 60 mm ($h/d = 3$). Pomiar odkształceń przeprowadzono za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych o bazie pomiarowej 5 mm przyklejonych w połowie wysokości próbki i równomiernie rozmieszczonych na obwodzie. Na rysunku 9 pokazano próbki służące do badań zależności $\sigma - \epsilon$ przy ściskaniu. Badanie odkształceń w próbie ściskania okazało się bardzo trudnym przedsięwzięciem ze względu na konieczność osiowego ustawienia próbki w maszynie wytrzymałościowej. Kolejnym elementem zaskakującym w trakcie badania była znaczna odkształcalność żeliwa. Zakres pomiarowy tensometrów skończył się przy skróceniu wynoszącym około 15‰. Pokazany na rysunku 11 odcinek zaznaczony linią przerywaną jest ekstrapolacją od ostatniego pomiaru odkształceń do wartości naprężeń niszczących próbkę. Graniczne skrócenie próbki można było w ten sposób oszacować na ponad 30‰.



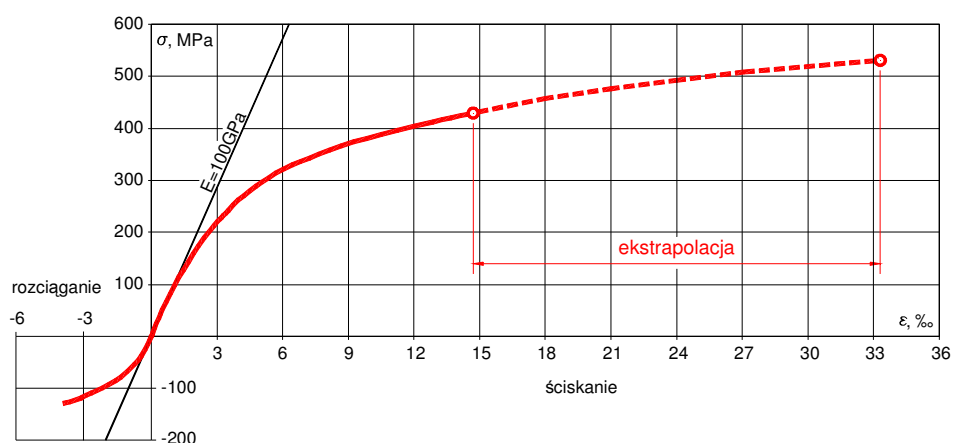
Rys. 9. Próbkę żeliwną o proporcjach $h/d = 3$ do badania zależności $\sigma - \epsilon$ przy ściskaniu

Fig. 9. The cast-iron specimen at proportions $h/d = 3$ to the examination of dependence $\sigma - \epsilon$ on the pressing



Rys. 10. Próbkę żeliwną o proporcjach $h/d = 2$ po zniszczeniu na ściskaniu

Fig. 10. The cast-iron specimen at proportions $h/d = 2$ after failure in the test of the pressing



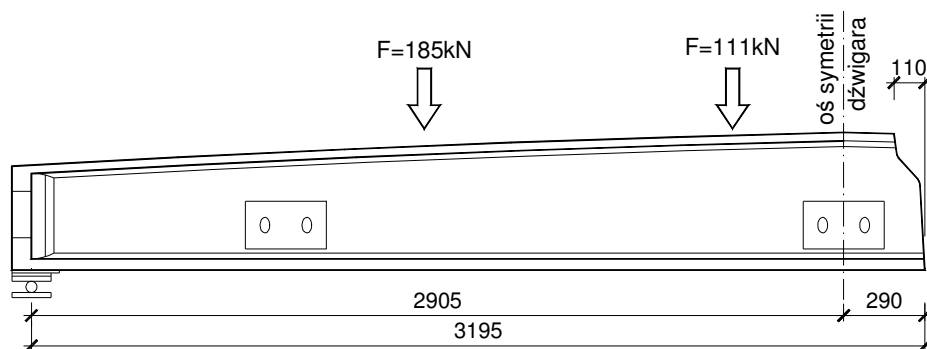
Rys. 11. Zależność $\sigma - \epsilon$

Fig. 11. Stress versus strain ($\sigma - \epsilon$)

Wyniki badań wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 1. Średnia wytrzymałość na rozciąganie z 6 próbek wyniosła 128 MPa przy współczynniku zmienności $v = 4,7\%$, a wytrzymałość na ściskanie – 526 MPa przy znacznie mniejszym współczynniku zmienności $v = 2,1\%$. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie był 1:4, a gęstość badanego materiału wynosiła około $7,10 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych żeliwa
Properties of cast-iron test results

Próba rozciągania			Próba ściskania		
wytrzymałość, MPa		moduł sprężystości, GPa	wytrzymałość, MPa		moduł sprężystości, GPa
wyniki	średnia		wyniki	średnia	
136	128	100	532	526	100
124			544		
136			530		
124			510		
121			516		
125			524		
σ_v	6,02		σ_v	11,08	
v	4,70%		v	2,10%	



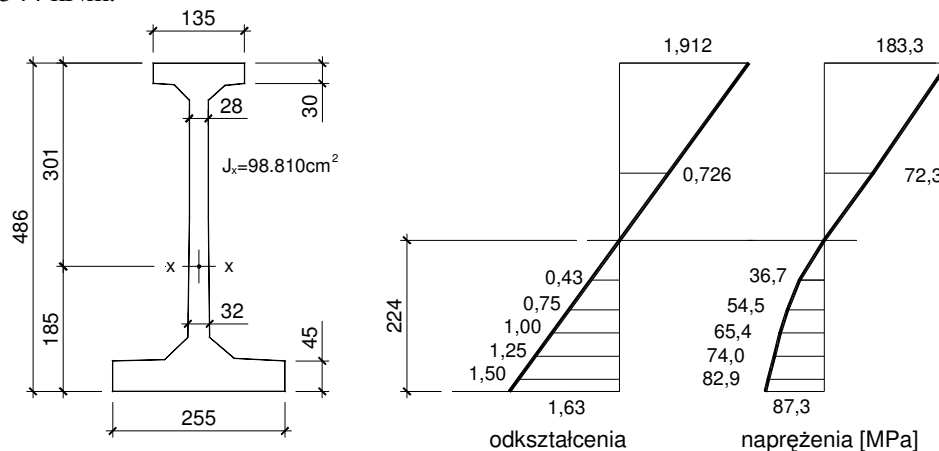
Rys. 12. Dźwigar żeliwny – obraz zniszczenia

Fig. 12. The girder cast-iron – the vision of destruction



Szczegółowe wyniki badań dwóch żeliwnych dźwigarów zostały przedstawione w pracy [2]. Na rysunku 12 pokazano jeden z dźwigarów po zniszczeniu. Belka złamała się blisko połowy rozpiętości przęsła pod

obciążeniem wywołującym moment w środku rozpiętości przęsła równy 544 kNm.



Rys. 13. Analiza odkształceń i naprężeń w przekroju zniszczenia dźwigara

Fig. 13. The analysis of strain and intensity of stress in the section of the failure of the girder

Na rysunku 13 pokazano analizę odkształceń i naprężeń w przekroju w miejscu zniszczenia dźwigara (patrz rys. 12). Na krawędzi rozciąganej odnotowano w stanie granicznym zniszczenia odkształcenia 1,63‰, a na krawędzi ściskanej 1,91‰. Przyjmując hipotezę płaskich przekrojów połączono te dwa skrajne punkty. Posługując się dalej zależnością $\sigma - \epsilon$ z rysunku 11, ustalono rozkład naprężeń na wysokości dźwigara. Część środkowa przekroju zachowuje zakres pracy liniowej, a skrajne włókna belki znajdują się już w zakresie nieliniowej zależności $\sigma - \epsilon$. Miejsce zerowania się odkształceń położone jest wyżej od środka ciężkości przekroju. Ważną informacją wynikającą z badań tej belki jest fakt, że nie osiągnięto wytrzymałości materiału na rozciąganie ($87,3 < 128 \text{ MPa}$). Osiągnięte naprężenia wynoszą tylko około 68% wytrzymałości uzyskanej w próbie rozciągania. Fakt ten można tłumaczyć niejednorodnością materiałową żeliwa. Na powierzchni dźwigarów można było zauważyć liczne imperfekcje wynikające z niedoskonałości procesu technologicznego przy odlewaniu elementów (patrz rys. 14).

Przeprowadzone badania elementów żeliwnych na zginanie pozwalają sformułować wnioski o charakterze ogólnym. Żeliwo należy zaliczyć do materiałów kruchych. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie wynosi około 1:4. Zależność odkształcenie – naprężenie jest krzywoliniowa w całym zakresie obciążenia. Nie należy się spodziewać wykorzystania wytrzymałości na rozciąganie określonej na próbkach

normowych w elementach konstrukcyjnych o znacznych gabarytach. Powodem tego jest tzw. efekt skali, podobny do tego jaki jest obserwowany w elementach betonowych.



Rys. 14. Niedoskonałości odlewnicze dźwigarów żeliwnych

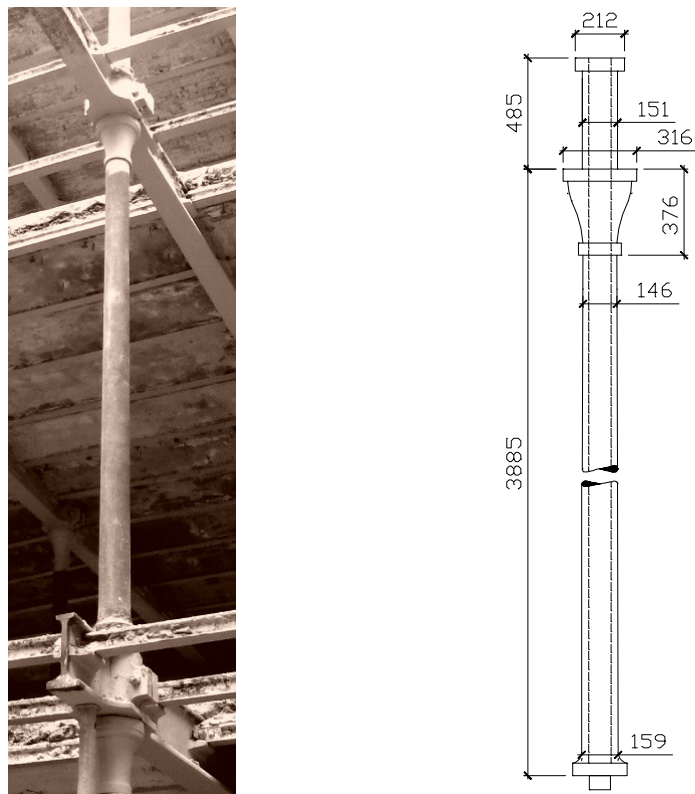
Fig. 14. The casting imperfections of cast-iron girders

4. SŁUPY ŻELIWNE

W łódzkich fabrykach znacznie częściej wykorzystywano żeliwo do wykonywania słupów niż elementów zginanych. Na rysunku 15 pokazano słup w budynku byłej przędzalni Poznańskiego przy ul. Ogrodowej. Jak niedoskonałe kształty mają słupy żeliwne, ilustruje rysunek 16, na którym pokazano przekrój słupa żeliwnego. Zewnętrzna średnica przekroju waha się od 148,3 do 150,3 mm, a wewnętrzna od 90,5 do 93,5 mm. Grubości ścianek mają jeszcze większy rozrzut zawierający się w przedziale 23,5÷33 mm. Dla pokazanego na rysunku 16 przekroju wykonano analizę położenia środka ciężkości przekroju poprzecznego i na tej podstawie określono wielkość niezamierzonego mimośrodru (patrz rys. 17).

Wykonując badania obiektu z żeliwnymi słupami i oceniając ich nośność, można pomierzyć zewnętrzną średnicę. Grubość ścianki można mierzyć, wykorzystując istniejące niewielkie otwory technologiczne lub w przypadku ich braku wiercić je. Z przyczyn oczywistych wykonuje się jeden lub dwa pomiary. Zakłada się zwykle symetrię przekroju. Jako przykład takich pomiarów zestawiono w tabeli 2 grubości ścianek słupów jednego z budynków znajdującego się w zabytkowym zespole zabudowy mieszkalnej „U Scheiblera”. Grubości ścianek były mierzone w poprzecznym przekroju słupa po jego

rozcięciu. Należy również brać pod uwagę fakt, że żeliwne słupy są na ogół zbieżne od dołu ku górze. W przypadku słupów w obiektach fabrycznych Scheiblera, zbieżność ta wynosi około 2,5%. Podobną zbieżność mają słupy w byłej fabryce Poznańskiego (patrz rys. 15).

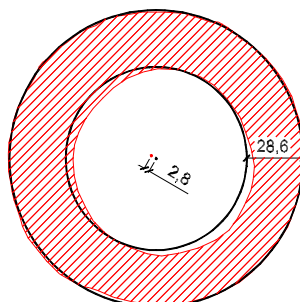


Rys. 15. Słupy żeliwne w budynku byłej przędzalni Poznańskiego przy ul. Ogrodowej: a) widok z natury w trakcie robót b) główne wymiary słupa czwartej kondygnacji

Fig. 15. The cast-iron columns in Poznański's former spinning factory at Ogrodowa street: a) the view of column, b) the main dimensions of column at fourth story

Rys. 16. Przekrój przez słup żeliwny

Fig. 16. Cross-section of cast-iron column



Rys. 17. Przekrój rzeczywisty (czerwony) na tle pierścienia o takim samym polu przekroju

Fig. 17. The real cross-section (red) on background of collar about the same the field of the section

Tabela 2. Wyniki pomiarów grubości ścianek słupów w budynku w zabytkowym zespole zabudowy „U Scheiblera”
The results wall thickness of cast-iron columns in “Scheibler family residenntial complex”

Lp.	Piętro	Grubości ścianek [mm]					Ø [mm]	Pole przekroju [mm ²]	
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t _{śr}		A	A _{śr}
1	I	22,5	21	23	26	23,1	218	14137	14430
2		23	20,5	27	26,5	24,2	219	14802	
3		23,5	24	22,5	24	23,5	218	14352	
4	II	27	24,5	21,5	23	24	216,5	14506	13998
5		18,5	21,5	22,2	24	21,6	216	13185	
6		21	23	25	22	22,8	216	13832	
7		21	27	27,5	20,5	20,5	215,5	14431	

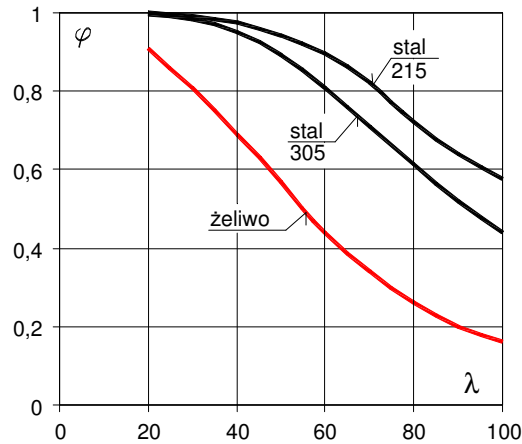
Charakterystyczne dla słupów żeliwnych, co należy uwzględnić w analizach wytrzymałościowych, są znacznie niższe współczynniki niestateczności ogólnej (φ) od tych jakie są przyjmowane dla elementów stalowych. Współczynnik niestateczności ogólnej jest tutaj definiowany zgodnie z PN-90/B-03200:

$$\varphi = \frac{N_c}{N_{Rc}} \quad (1)$$

gdzie: N_c – nośność obliczeniowa elementu,

N_{Rc} – nośność obliczeniowa przekroju.

Na rysunku 18 porównano współczynniki φ żeliwa i stali w funkcji smukłości elementu $\lambda = l_0 / i$ (gdzie l_0 – długość wyboczeniowa elementu, i – promień bezwładności przekroju poprzecznego pręta ściskanego). Wykres współczynnika φ dla żeliwa sporządzono na podstawie danych zawartych w tablicach [3]. Wykresy dla stali zostały sporządzone na podstawie PN-90/B-03200 dla uogólnionego parametru imperfekcji $n = 2$, któremu odpowiada normowa krzywa „a”.



Rys. 18. Wykresy współczynnika niestateczności ogólnej φ w funkcji smukłości elementów λ

Fig. 18. Diagrams of the buckling coefficient φ in function of element slenderness λ

Interesującym zagadnieniem przy współczesnej analizie jest wiedza, jak inżynierowie na przełomie XIX i XX wieku wymiarowali żeliwne słupy. Z literatury [4], [5] wynika, że w latach 1900÷1938 dla żeliwa szarego dopuszczano naprężenia ściskające rzędu 50÷60 MPa, a dla naprężeń rozciągających 25÷30 MPa.

W XIX wieku wymiarowania słupów dokonywano, wykorzystując wzór Schwarza-Rankine'a:

$$\sigma_k = \frac{\sigma_D}{1 + \alpha \cdot \lambda^2}, \quad (2)$$

gdzie: σ_k – dopuszczalne naprężenie ściskające z uwzględnieniem wyboczenia,
 $\sigma_D = 50$ MPa, dopuszczalne naprężenie ściskające,
 $\alpha = 0,0002$ współczynnik bezpieczeństwa,
 λ – smukłość słupa ($\lambda = l_0 / i$).

W roku 1905 we wzorze Schwarza-Rankine'a zmniejszono współczynnik $\alpha = 0,00016$, co spowodowało zwiększenie nośności obliczeniowych słupów o około 12%. W roku 1914 wprowadzono kolejną zmianę polegającą na zwiększeniu wytrzymałości żeliwa do wartości $\sigma_D = 70$ MPa i jednoczesnym zwiększeniu współczynnika bezpieczeństwa $\alpha = 0,0003$.

Po roku 1900 w praktyce inżynierskiej znalazły zastosowanie wzory podane przez Tetmajera:

$$\sigma_k = \frac{1}{s} (776 - 12 \lambda + 0,053 \lambda^2) \quad [\text{MPa}], \quad \text{dla} \quad \lambda \leq 80, \quad (3a)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{s} \cdot \frac{987000}{\lambda^2} \quad [\text{MPa}], \quad \text{dla} \quad \lambda > 80, \quad (3b)$$

gdzie: σ_k – dopuszczalne naprężenie ściskające z uwzględnieniem wyboczenia,
 $s = 10$ współczynnik bezpieczeństwa.

W roku 1905 do wzorów Tetmajera dopuszczono zmniejszony współczynnik bezpieczeństwa $s = 8$ dla słupów osiowo ściskanych.

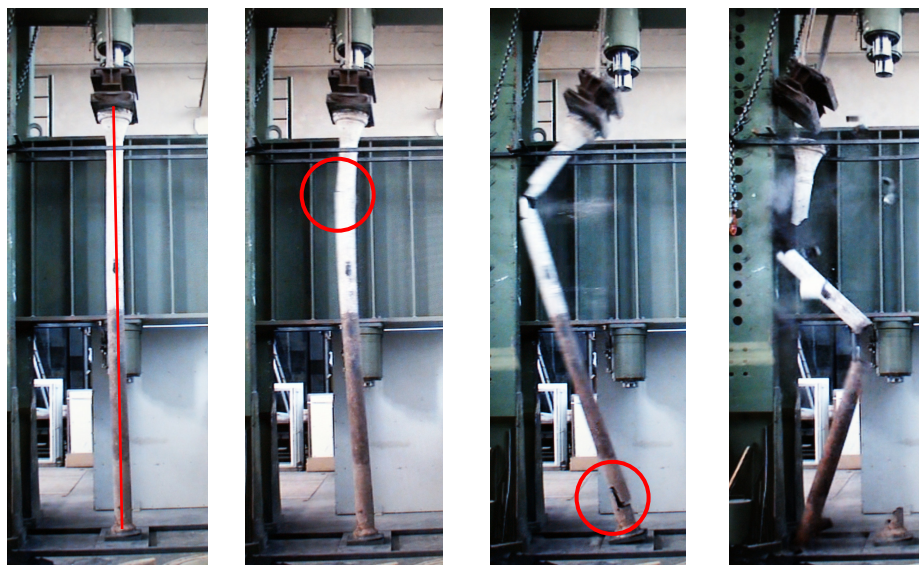
Według normy DIN 1051 z roku 1938 wzory na dopuszczalne naprężenia krytyczne przybierają postać:

$$\sigma_k = (90 - 0,01005 \lambda^2) \quad [\text{MPa}], \quad \text{dla} \quad \lambda \leq 80, \quad (4a)$$

$$\sigma_k = \frac{164500}{\lambda^2} \quad [\text{MPa}], \quad \text{dla} \quad \lambda > 80, \quad (4b)$$

co oznacza, że norma DIN 1051 zmniejszyła współczynnik bezpieczeństwa do wartości $s = 6$, wobec 8 lub 10 zaproponowanych przez Tetmajera.

Na rysunku 19 pokazano fazy niszczenia żeliwnego słupa poddanego próbie niszczącej w laboratorium w Wiedniu [6]. Badania te przeprowadzono w celu weryfikacji nośności słupów pozostawionych w adaptowanym na cele hotelowe budynku pofabrycznym Poznańskiego przy ul. Ogrodowej. Wyniki badań eksperymentalnych czterech słupów wykazały, że nośności eksperymentalne są od 12,7 do 15,0 krotnie większymi wielkościami od nośności krytycznych uzyskanych na podstawie procedury DIN 1051 z roku 1938. Współczynnik bezpieczeństwa przewidywany w tej normie na poziomie 6 jest w rzeczywistości ponad dwukrotnie większy w przypadku badanych słupów.



Rys. 19. Badania niszczące słupa żeliwnego [6]

Fig. 19. Destructive test of cast-iron column [6]

Pierwsza fotografia z lewej strony na rysunku 19 pokazuje wyboczenie słupa na ułamek sekundy przed rozpoczynającym się mechanizmem niszczenia. Pokazana linia czerwona na tej fotografii pokazuje oś słupa przed wyboczeniem. Zaznaczone czerwonymi okręgami miejsca na rysunku 19 wskazują przekroje krytyczne, w których zostało zainicjowane niszczenie słupa. Pierwsze pęknięcie materiału nastąpiło mniej więcej w $\frac{3}{4}$ wysokości słupa (patrz druga fotografia od lewej), a nie w połowie wysokości, gdzie przemieszczenie przekroju było największe w stosunku do osi początkowej słupa. Drugie miejsce krytyczne pokazano na fotografii trzeciej od lewej strony, które znajdowało się tuż nad dolnym przegubem słupa. W obu tych miejscach struktura materiału zawierała niedoskonałości odlewnicze w postaci pęcherzy powietrza. Wszystkie fazy niszczenia słupa pokazane na rysunku 19 zawierają się w przedziale czasowym wynoszącym około 0,1 sekundy.

5. PODSUMOWANIE

Elementy konstrukcji żeliwnych w obiektach przemysłowych w zachodniej Europie pojawiły się pod koniec XVIII wieku. Przez cały XIX wiek były one rozwijane i udoskonalane. W łódzkich fabrykach pojawiają się w ostatnich dwóch dziesięcioleciach XIX wieku. Żeliwo znajduje zastosowanie przede wszystkim w elementach konstrukcyjnych takich jak słupy. Żeliwne elementy zginane są rzadziej stosowane.

Podsumowując, można stwierdzić, że do najważniejszych właściwości żeliwa konstrukcyjnego należy zaliczyć:

- kruchość, wytrzymałość na ściskanie jest rzędu 500÷600 MPa, a na rozciąganie tylko 100÷120 MPa;
- zależność odkształcenie – naprężenie jest w całym zakresie nieliniowa, co nasuwa pewne podobieństwo do betonu;
- moduł odkształcalności podłużnej jest rzędu 100 MPa (dwukrotnie mniej niż dla stali);
- elementy konstrukcyjne mają niedoskonałości odlewnicze, które mogą przejawiać się w geometrii elementów, jak również w wadach wewnętrznych (kawerny, pęknięcia itp.).

Ta ostatnia własność żeliwa jest szczególnie ważna dla bezpieczeństwa konstrukcji. Wszystkie historyczne procedury obliczeniowe, z tego względu, zalecały duże współczynniki bezpieczeństwa wynoszące $s = 6÷10$.

LITERATURA

- [1] **Addis B.:** 3000 Years of Design Engineering and Construction. Phaidon Press Limited, 2007.
- [2] **Czkwianianc A., Bodzak P., Kozicki J., Urban T.:** Badania niszczące żeliwnych dźwigarów stropowych dawnej przędzalni w Manufakturze w Łodzi. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Budownictwo, z. 57, 2008, s. 21÷37.
- [3] **Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.:** Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. Wydanie IV, PWN, Warszawa 1984.
- [4] Hochbaukunde von Hermann Daub (Nauka o budownictwie kubaturowym), von Franz Deuticke, Leipzig und Wien 1914.
- [5] Österreich-ungarischer Bauratgeber-Bauindustrielles Handbuch (Austriacko-węgierski podręcznik budowlano-przemysłowy, wydanie 2), 2 Auflage; Verlag von Moritz Perles, Wien 1914.
- [6] Untersuchungsbericht über Gusssäulen MA39 – VFA 2007-1038.01. Magistrat der Stadt Wien Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien VFA – Labors für Bautechnik, August 2007.

CAST-IRON AS THE STRUCTURAL MATERIAL OF XIX-th CENTURY INDUSTRIAL BUILDINGS

Summary

There is development of the building construction in the 19-th century industrial objects of Lodz area presented in this paper. Special attention is remarked on the introduction to the general use at that time. The description of the historical structures was supplemented by the results of the laboratory tests.

Autorzy artykułu dziękują firmie Andel's Spółka z o.o. – inwestorowi adaptacji przędzalni Poznańskiego przy ul. Ogrodowej na hotel, za udostępnienie cennych informacji na temat badań elementów żeliwnych w laboratorium w Wiedniu.