

Kazimierz Czapliński*

Obliczanie dawnych konstrukcji z żeliwa i stali

Calculation of old cast iron and steel constructions

1. Wstęp

W praktyce inżynierskiej zdarza się, że konieczne jest sprawdzenie nośności dawnych konstrukcji wykonanych z żeliwa lub stali¹, przy czym jednak natrafia się na brak danych dotyczących tego problemu. Dopiero bowiem w 1986 wydana została (w dość niskim nakładzie) broszurka [1], w której przytoczono 32 pozycje literaturowe (w tym 16 w języku polskim), natomiast w roku 2009 ukazała się książka [2], którą opracowano na podstawie 76 pozycji literaturowych, w tym 37 w języku polskim.

Korzystając z danych zawartych w obu wymienionych pozycjach przedstawiono sposoby sprawdzania nośności konstrukcji wykonanych z żeliwa oraz z dawnych stali.

2. Elementy żeliwne

Elementy żeliwne najczęściej występują w postaci słupów. Rzadziej w postaci belek lub podciągów, często o zmiennym przekroju poprzecznym.

Do projektowania tych elementów stosowano z reguły metodę naprężeń dopuszczalnych. Zgodnie z zasadami tej metody konstrukcja jest bezpieczna, o ile nie zostanie przekroczona wartość naprężeń dopuszczalnych. Wartość tę otrzymuje się dzieląc wartość granicy plastyczności przez współczynnik bezpieczeństwa [3]. W metodzie tej przyjmuje się charakterystyczne wartości obciążeń.

W związku z powyższym przy sprawdzaniu nośności konstrukcji z żeliwa należy także stosować metodę naprężeń dopuszczalnych. Po pierwsze dlatego, że tak zostały zaprojektowane, a po

1. Introduction

In engineering practice, it happens that it is necessary to check the load capacity of the structures made of old types of cast iron and steel¹, however, there are no formulas or data regarding this problem. It was only in 1986 when a booklet was published (with quite low number of copies) [1] with references to 32 publications (including 16 in Polish), and only in 2009 was a book published [2] which was written on the basis of 76 scientific publications, including 37 in Polish.

Making use of the data included in both of these publications the methods of checking calculation methods of the load capacity of structures made of the old types of cast iron and steel were presented.

2. Cast iron elements

Most often the cast iron elements occur in the form of columns, and rarely in the form of beams or floor girders, often with a variable cross section.

As a rule the permissible stresses method was applied in order to design those elements. According to the principles of that method, a structure is safe as long as the value of permissible stresses is not exceeded. This value is received by dividing the value of yield point by safety ratio [3]. This method assumes the characteristic load values.

Consequently, when checking the load capacity of structures made of old types of cast iron the permissible stresses method should be also applied. Firstly, because of their design and secondly

drugie dlatego, że dla tego tworzywa nie określono wartości naprężeń granicznych.

Elementy żeliwne są na ogół ściskane osiowo, rzadziej mimośrodowo. Bywają też zginane.

Elementy ściskane osiowo należy sprawdzać według relacji:

$$\sigma = \frac{P\omega}{F} \leq \sigma_{dop} \quad (1)$$

gdzie: σ – naprężenia w MPa,
 P – siła ściskająca osiowo w MN,
 ω – współczynnik wybożeniowy,
 F – powierzchnia przekroju poprzecznego w m²,
 σ_{dop} – naprężenie dopuszczalne w MPa.

because the values of critical stresses were not calculated for that material.

The cast iron elements are usually compressed axially, rarely eccentrically. Sometimes they are bent.

The elements which are compressed axially should be checked according to the following formula:

where: σ – stresses in MPa,
 P – axial compression force in MN,
 ω – buckling ratio,
 F – cross section area in m²,
 σ_{dop} – permissible stress in MPa.

Tab. 1. Współczynnik wybożeniowy
Buckling ratio

λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω	1,00	1,01	1,05	1,11	1,22	1,39	1,67	2,21	3,50	4,43	5,45

Smukłość $\lambda = l_w/i_{min}$; dla wartości pośrednich λ współczynnik ω interpolować liniowo
Slenderness $\lambda = l_w/i_{min}$; for intermediate values of λ ratio ω to be interpolated linearly

Nośność słupów osiowo ściskanych można też określić korzystając z tablicy 11.4. (s. 90-93) poz. [2].

W przypadku słupów o zmiennym przekroju poprzecznym można skorzystać z wzorów podanych w [2] na s. 27.

Wartości naprężeń dopuszczalnych dla żeliwa szarego podano w tablicy 2. Moduł sprężystości podłużnej dla tego żeliwa wynosi $E = 100$ GPa.

The load capacity of columns compressed axially can be found in table 11.4. (pp. 90-93) item [2].

In the case of columns with a variable cross section the formulas provided in [2] on p. 27 can be used.

The values of permissible stresses for gray cast iron are shown in table 2. The longitudinal modulus of elasticity for this cast iron is $E = 100$ GPa.

Tab. 2. Naprężenia σ_{dop} w MPa dla żeliwa
Stresses σ_{dop} in MPa for cast iron

Rodzaj konstrukcji Type of structure	Żeliwo z XIX wieku Cast iron from the 19 th century			Żeliwo wg DIN 1051 z 1937r. Cast iron per DIN 1051 from 1937		
	Ściskanie Compression	Zginanie Bending		Ściskanie Compression	Zginanie Bending	
		Ściskanie Compression	Rozciąganie Tension		Ściskanie Compression	Rozciąganie Tension
Słupy Columns	80	80	40	90	90	45
Inne konstrukcje Other structures	80	50	25	90	60	30

Przy mimośrodowym ściskaniu słupa należy sprawdzać naprężenia krawędziowe według wzoru:

$$\sigma = \frac{P\omega}{F} \pm \frac{M}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (2)$$

Tak obliczone naprężenia nie mogą przekraczać wartości dopuszczalnych podanych w tablicy 2.

Elementy zginane sprawdza się według wzoru:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (3)$$

When a column is compressed eccentrically, the edge stresses should be checked according to the following formula:

The values of stresses cannot exceed the permissible values provided in table 2.

The bent elements should be checked according to the following formula:

gdzie: M – jest momentem od obciążeń charakterystycznych w MNm,
 W – wskaźnik zginania w m^3 .

where: M – moment of characteristic loads in MNm,
 W – bending ratio in m^3 .

3. Elementy stalowe

Elementy stalowe (wg terminologii z 1925 r.) projektowano posługując się także metodą naprężeń dopuszczalnych. Podobnie jak dla elementów żeliwnych dla dawnych wyrobów stalowych nie zostały określone naprężenia graniczne. Zatem także te konstrukcje należy sprawdzać stosując metodę naprężeń dopuszczalnych.

Elementy stalowe mogą być rozciągane, ściskane lub zginane.

W wypadku rozciągania obowiązuje relacja:

$$\sigma = \frac{P}{F_n} \leq \sigma_{dop} \quad (4)$$

gdzie: σ, P, σ_{dop} – jak we wzorze (1),
 F_n – powierzchnia przekroju poprzecznego netto w m^2 .

W przypadku ściskania osiowego:

$$\sigma = \frac{P}{\beta F} \leq \sigma_{dop} \quad (5)$$

gdzie: $\sigma, P, F, \sigma_{dop}$ – jak we wzorze (1),
 β – współczynnik wyboczeniowy (mniejszy od 1 w przeciwieństwie do ω , który jest większy niż 1).

W przypadku ściskania mimośrodowego:

$$\sigma = \frac{P}{\beta F} \pm \frac{M}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (6)$$

a w wypadku zginania:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (7)$$

Naprężenia dopuszczalne dla różnych rodzajów stali produkowanych w XIX wieku i na początku wieku XX podano w tablicy 3.

3. Steel elements

Steel elements (acc. to terminology from 1925) were designed with the use of the permissible stresses method too. Similarly to cast iron elements, the values of critical stresses were not calculated for old steel products either. Consequently, these structures should be checked with the use of the permissible stresses method too.

Steel elements can be drawn, compressed or bent.

In the case of tension the following formula applies:

where: σ, P, σ_{dop} – as in formula (1),
 F_n – net cross section area in m^2 .

In the case of axial compression:

where: $\sigma, P, F, \sigma_{dop}$ – as in formula (1),
 β – buckling ratio (lower than 1 unlike ω which is greater than 1).

In the case of eccentric compression:

and in the case of bending:

The permissible stresses different types of steels produced in the 19th century and at the beginning of the 20th century are shown in table 3.

Tab. 3. Naprężenia dopuszczalne dla stali
 Permissible stresses for steel

Rodzaje stali Types of steel	Naprężenia dopuszczalne na rozciąganie, ściskanie i zginanie w MPa Permissible stresses for tension, compression and bending in MPa	
	I ²	II ²
żelazo zgrzewane (Schweiß Eisen) wrought iron (Schweiß Eisen)	nie występuje not applicable	90
żelazo zlewne (Flusseisen) ingot iron (Flusseisen)	nie występuje not applicable	100
stal zlewna (Flussstahl) ingot steel (Flussstahl)	nie występuje not applicable	140
St 00.12 (wg DIN ³) St 00.12 (per DIN ⁶)	120	120
St 37.12 i stal handlowa (wg DIN) St 37.12 and commercial steel (per DIN)	140	160
St 52 (wg DIN) St 52 (per DIN)	210	240

Tab. 3. Ciąg dalszy
Continuation

OW, X, St0S (wg PN) OW, X, St0S (per PN)	120	140
O15.W37, KX (K37), St3S (wg PN) O15.W37, KX (K37), St3S (per PN)	140	160
6.1.20.W52, K52, St 52 (wg PN) 6.1.20.W52, K52, St 52 (per PN)	200	230
Współczynniki: sprężystości podłużnej $E = 210$ GPa sprężystości poprzecznej $G = 81$ GPa rozszerzalności podłużnej liniowej $e_t = 0,000012/^\circ\text{C}$ Coefficients: longitudinal elasticity $E = 210$ GPa elasticity in shear $G = 81$ GPa longitudinal linear expansion $e_t = 0,000012/^\circ\text{C}$		

W tablicy 4 zestawiono fragmenty tablic zawierających współczynniki wyboczeniowe β^A według przepisów polskich, niemieckich i rosyjskich.

Table 4 presents fragments of the tables including the buckling ratios β^A according to Polish, German and Russian regulations.

Tab. 4. Współczynniki wyboczeniowe (fragment)
Buckling ratios (fragment)

Rodzaj stali Type of steel	β wg przepisów β per regulations	Smukłość λ Slenderness λ									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
zwykłej jakości regular quality	polskich Polish	0,98	0,95	0,92	0,89	0,85	0,80	0,74	0,68	0,62	0,55
	niemieckich ⁵ German ⁵	1,00	0,96	0,93	0,88	0,83	0,77	0,71	0,65	0,58	0,53
	rosyjskich Russian	0,99	0,96	0,94	0,92	0,89	0,86	0,81	0,75	0,69	0,60
podwyższonej jakości increased quality	polskich Polish	0,98	0,95	0,92	0,88	0,83	0,77	0,69	0,60	0,50	0,41
	niemieckich ⁵ German ⁵	1,00	0,94	0,90	0,84	0,78	0,71	0,63	0,56	0,49	0,36
	rosyjskich Russian	0,98	0,95	0,93	0,90	0,83	0,78	0,71	0,63	0,54	0,45

4. Stale do zbrojenia betonu

Do zbrojenia betonu używano takich samych rodzajów stali jak do wykonania konstrukcji stalowych.

W roku 1925 przyjęto podział stali zbrojeniowych na cztery grupy, zestawione w tablicy 5.

4. Steels to reinforce concrete

The same type of steel was used to reinforce concrete as to manufacture steel structures.

In 1925, a division of reinforcing steel into four groups was agreed (see table 5).

Tab. 5. Grupy stali do zbrojenia betonu
Groups of steel to reinforce concrete

Grupa stali Steel group	Rodzaj stali Type of steel	D [mm]	$R_{e,min}$ [MPa]	R_m [MPa]	min. A10 [%]
BSt I		–	220	340-500	18
BSt II	stale wysokowartościowe, utwardzane naturalne extra-fine steels, naturally hardened	≤ 18	360	500-620	20
		≥ 18	340	500-640	18
BSt IIb	stale specjalne, ulepszone cieplnie special-purpose steels, heat toughened	≤ 18	420	500	18
		≥ 18	400	500	18
BSt IIIa	stale naturalnie utwardzane naturally hardened steels	≤ 18	420	500	8
		≥ 18	400	500	8
BSt IIIb	Stale specjalne ulepszone na zimno (tylko jako stale kształtowe do zbrojenia betonu) special-purpose steels, cold toughened (only as special shape steels to reinforce concrete)	≤ 18	420	500	8
		≥ 18	400	500	8
BSt IVa	stale utwardzane naturalnie naturally hardened steels	–	500	–	16
BSt IVb	stale specjalne ulepszone na zimno oraz siatki zbrojeniowe special-purpose steels, cold toughened and reinforcing mesh	–	500	–	8

6. Określenie rodzaju tworzywa przyjętego do obliczeń

Najlepszym sposobem określenia rodzaju tworzywa i jego parametrów wytrzymałościowych jest przeprowadzenie kompleksowych badań laboratoryjnych próbek pobranych z przedmiotowego tworzywa. Określa się wtedy nie tylko rodzaj tworzywa i jego skład chemiczny, lecz również wytrzymałość zmniejszoną wskutek starzenia się, wpływów dynamicznych itp.

Jednak pobranie próbek o wymaganych wymiarach i w odpowiedniej liczbie nie zawsze jest możliwe, pozostają więc wtedy następujące warianty postępowania.

Pierwszą możliwością jest uzyskanie informacji dotyczących przedmiotowego tworzywa. Czy jest to żeliwo, czy też tzw. żelazo zgrzewne (*Schweißeisen*), żelazo zlewne (*Flusseisen*), stal zlewna (*Flussstahl*), stal St 00.12, St 37.12, OW, O15W37 itp. Jeśli uda się uzyskać wiarygodne informacje w tym zakresie, to można przyjąć naprężenia dopuszczalne z tablicy 3. Z uwagi na proces starzenia się tworzywa zaleca się przyjmować do obliczeń naprężenia niższe o 10 do 20% od podanych w tej tablicy, stosując zasadę, że im tworzywo jest starsze, tym niższe należy przyjąć naprężenia dopuszczalne.

Jeżeli nie ma możliwości uzyskania informacji o rodzaju przedmiotowego tworzywa, trzeba określić okres, w którym powstała dana konstrukcja i przyjąć, że została ona wykonana z najsłabszego tworzywa produkowanego w tym okresie. Dla tak określonego tworzywa należy, jak poprzednio, przyjąć naprężenia niższe niż podane w tablicy 3.

Orientacyjnie można przyjąć, że żeliwo z XIX wieku produkowane było jeszcze na początku wieku XX, więc bezpieczniej będzie żeliwo z wieku XX przyjmować od około roku 1915.

Co do stali orientacyjnie można przyjąć, że dla drugiej połowy XIX wieku było to żelazo zgrzewne, którego produkcja zanikała i po roku 1900 praktycznie nie było już produkowane.

Dla okresu od roku 1900 do roku 1925 można przyjąć, że było to żelazo zlewne (*Flusseisen*).

Od roku 1925 do roku 1937 mogła to być stal St 00.12 (zabroniono stosowania jej do konstrukcji budowlanych od 16.06.1937).

Od roku 1938 do lat sześćdziesiątych XX wieku mogła to być stal OW (oznakowana także jako X lub St0S).

Po ustaleniu parametrów tworzywa i jego właściwości (na podstawie tablic 2 i 3) można prowadzić obliczenia korzystając z odpowiednich wzorów wyrażonych w relacjach od (1) do (7).

6. Determination of the type of material assumed for calculations

The best way to determine the type of material and its strength parameters is to conduct comprehensive laboratory tests on samples taken from the material in question. This way, apart from the determination of the type of material and its chemical composition, its reduced strength as a result of aging, dynamic factors, etc. are also determined.

If taking samples with required dimensions and in necessary number is not possible, the following procedures can be applied.

The first possibility is collecting information regarding the material in question. Is it cast iron or so called wrought iron (*Schweißeisen*), ingot iron (*Flusseisen*), ingot steel (*Flussstahl*), steel St 00.12, St 37.12, OW, O15W37, etc. If it is possible to gather reliable information in this respect, the permissible stresses listed in Table 3 can be assumed. Due to the material aging process it is recommended to assume for calculations the stresses 10-20% lower than in the Table, applying the rule that the older the material, the lower the values of permissible stresses should be assumed.

If it is impossible to gather the information about the type of the material in question, it should be determined when a given structure was built and assumed that it was built of the weakest material manufactured at that time. The values of the stresses assumed for such a material should be, as earlier, lower than those listed in table 3.

It can be tentatively assumed that the cast iron from the 19th century was still used at the beginning of the 20th century, so it would be safer to assume that the cast iron from the 20th century would actually be the cast iron used after about 1915.

As for steel, it can be tentatively assumed that, for the second half of the 19th century it was wrought iron, whose production was gradually disappearing and practically it was not produced any more after 1900.

It can be assumed that from 1900 until 1925 it was ingot iron (*Flusseisen*).

From 1925 until 1937 it could be steel St 00.12 (its application for building structures was forbidden as of 16.06.1937.)

From 1938 until the 1960s it could be steel OW (marked also as X or St0S.)

After determining the parameters of the material and its properties (on the basis of table 2 and 3) the calculations can be made with the use of applicable formulas (1) to (7).

Literatura • References

- [1] Bodarski Z., Czaplinski K., *Informacje dla rzeczoznawców w zakresie spraw ogólnych oraz wybranych problemów wytrzymałości, stateczności i sztywności elementów konstrukcyjnych wykonanych z dawnych gatunków stali, a także z dawnych asortymentów drewna*, CUTOB PZITB, Wrocław 1986.
- [2] Czaplinski K., *Dawne wyroby ze stopów żelaza*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009.
- [3] Mutermilch J., Olszewski E., Łubiński M., *Wymiarowanie konstrukcji stalowych, nowe metody*, Wyd. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956.

* Politechnika Wroclawska, Wroclaw, Polska

* Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland

¹ Termin „stal” użyto tutaj zgodnie z definicją obowiązującą od 1925 roku (por. [2], s. 9).

² Zgodnie z przepisami niemieckimi występuje I i II rodzaj obciążeń. I rodzaj składa się z obciążenia stałego i zmiennego, jednak bez uwzględnienia wpływu śniegu i wiatru. II rodzaj składa się z I rodzaju obciążeń oraz równoczesnego oddziaływania wiatru, zmian temperatury, śniegu, hamowania suwnic. Zgodnie z przepisami polskimi obowiązuje I i II rodzaj naprężeń dopuszczalnych. W I rodzaju, przy obliczeniach mniej dokładnych, pomija się mniej istotne obciążenia. W II rodzaju, przy dokładnych obliczeniach, uwzględnia się równoczesne działanie wszelkich możliwych obciążeń.

³ Zgodnie z DIN 1050 z 1937 r. stosowanie stali St00.12 do konstrukcji budowlanych zostało zabronione z dniem 16.06.1937.

⁴ Pełny zbiór współczynników β według przepisów polskich i rosyjskich zawarty jest w [2], tabl. 11.5, s. 94-96.

⁵ Przeliczono jako odwrotność współczynnika ω .

¹ The term “steel” is used here according to the definition applicable from 1925 (com. [2], p. 9).

² According to German regulations type I and II loads occur. Type I consists of permanent and variable loads, however, without taking account of the impact of snow and wind. Type II consists of type I loads and concurrent impact of wind, temperature changes, snow, crane braking. According to Polish regulations permissible stresses type I and II apply. In type I, with less accurate calculations, the less significant loads are ignored. In type II, with precise calculations, all possible concurrent loads are taken into account.

³ Acc. to DIN 1050 from 1937 the application of steel St00.12 in building structures was forbidden as of 16.06.1937.

⁴ Complete list of β ratios acc. to Polish and Russian regulations is included in [2], table 11.5, pp. 94-96.

⁵ Calculated as inverse of ω ratio.

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia metody sprawdzania nośności dawnych konstrukcji wykonanych z żeliwa lub stali. Z tego względu autor przedstawia podstawowe wzory oraz niektóre wybrane dane z książki „Dawne wyroby ze stopów żelaza” napisanej przez autora niniejszej pracy i wydanej przez DWE w 2009 roku.

Abstract

The paper presents the checking calculation methods of the load capacity of structures made of old types of cast iron and steel. For this purpose, the author presents the basic formulas and some data selected from the book “The Old Products Made of Iron Alloys” written by the author of this paper and published by the DWE in the year 2009.