

# ROBOT EC3 Expert

## PROJEKTOWANIE ELEMENTÓW STALOWYCH „PO EUROPEJSKU”

Tytuł jest trochę przekorny, ale coraz częściej spotykamy się w praktyce projektowej z koniecznością korzystania z norm europejskich zwanych EuroCode. Jednak, jak się okazuje, EuroCode to tylko pewne ogólne wytyczne i co kraj, to EuroCode wygląda trochę inaczej. Powód jest dość banalny. Twórcy norm w poszczególnych krajach starają się przystosować EuroCode do wymagań i przyzwyczajzeń projektantów, tak aby zmiana norm krajowych na europejskie nie powodowała zbyt dużego zamętu w projektowaniu. Na szczęście różnice te są na tyle nieznaczne, że program obliczeniowy dla budownictwa napisany w oparciu o normy europejskie może być z powodzeniem używany w różnych krajach (oczywiście w odpowiedniej wersji językowej).

W tym artykule chciałbym zaprezentować program ROBOT EC3 EXPERT, który jest próbą stworzenia uniwersalnego narzędzia do weryfikacji elementów i połączeń konstrukcji stalowych wg wymogów normy ENV 1993-1-1 część 1.1. „Design of Steel Structures: General Rules and Rules for Buildings”. Niestety, ze względu na charakter i zakres programu opiszę tylko, co można zrobić, a nie jak to zrobić. Dlatego tekst ten jest przeznaczony przede wszystkim dla projektantów budowlanych i architektów mających pewne doświadczenie w projektowaniu konstrukcji.

Do rzeczy. Uruchamiamy program i na ekranie naszego monitora pojawia się główne okno, jak na rys. 1.

Okno to zawiera 12 opcji będących w istocie oddzielnymi, małymi programami, umieszczonymi w dwóch grupach. Pierwsza grupa umożliwia weryfikację – pod względem wymogów normowych – oddzielnych elementów konstrukcji stalowych, takich jak:

☉ belki walcowane,  
☉ belki spawane,  
☉ słupy,  
☉ stężenia,  
☉ połączenia belka-belka,  
☉ połączenia belka-słup.

Druga grupa pozwala na

wykonywanie obliczeń wytrzymałości przekrojów, prętów i połączeń. W grupie tej są umieszczone również cztery opcje pomocnicze:

☉ obciążenie belek,

☉ moment krytyczny dla prętów zginanych,

☉ wyężenie od sił osiowych,

☉ charakterystyki przekroju.

Każda z dwunastu opcji umożliwia automatyczne

generowanie not obliczeniowych zawierających opis (wraz

odpowiednimi rysunkami i schematami) przebiegu obli-

żeń i uzyskanych rezultatów. Wła-

ściwość programu pozwala w łatwy sposób weryfikować

inne elementy konstrukcji,

np. chcąc zaprojektować ele-

menty i połączenia zwykłego

zepaka, dobieramy przekrój

słupa, a następnie dla tak dobranych przekrojów projek-

tujemy połączenie. Jeżeli okaże się, że ze względu na

nośność połączenia musimy np. zwiększyć przekrój belki, to wracając do opcji **Belki** zmieniamy tylko przekrój (bo wszystkie wcześniejsze ustawienia i parametry są pamiętane) i weryfikujemy obliczenia.

Ze względu na ograniczoną wielkość tego artykułu, jak i starając się nie zanudzić Czytelnika postaram się przedstawić zakres działania poszczególnych opcji w sposób maksymalnie skrócony.

### BELKI WALCOWANE

Na kolejnych zakładkach okna **Belek walcowanych** definiujemy zakres analizy, jaki nas interesuje:

☉ wytrzymałość przekroju,

☉ zwichrzenie,

☉ stateczność środnika,

☉ zniszczenie i zgniatanie,

☉ uwzględnienie stanu granicznego ugięć,

☉ uwzględnienie stanu granicznego drgań.

Następnie wybieramy przekrój z bazy profili, podajemy długość belki, warunki podparcia (rys. 2) i obciążenie, a następnie uruchamiamy obliczenia. Rezultatem jest weryfikacja belki w zakresie wymaganym przez normę ENV 1993-1-1:

☉ wytrzymałości na ścinanie,

☉ wytrzymałości środnika z otworami na końcu belki na ścinanie,

☉ stateczności środnika,

☉ wytrzymałości przekroju na moment zginający,

☉ stateczności poza płaszczyzną dla momentu zginającego,

☉ współdziałania siły ścinającej i momentu zginającego,

☉ wytrzymałości środnika na zgniatanie siłami poprzecznymi,

☉ wytrzymałości środnika na zniszczenie siłami poprzecznymi,



Rys. 1



Rys. 2

- ⊕ wytrzymałości środnika na wyoboczenie siłami poprzecznymi,
- ⊕ wytrzymałości półki na wyoboczenie wymuszone.

## BELKI SPAWANE



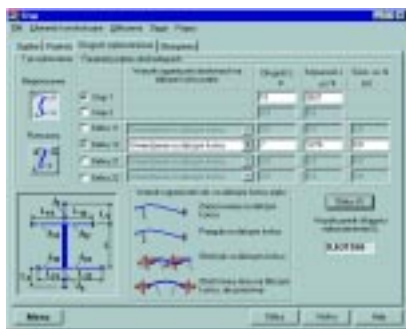
Rys. 3

Opcja działa podobnie jak Belki walcowane, tylko zamiast wybierać przekrój z bazy, Użytkownik musi wybrać typ przekroju i podać jego wymiary lub skorzystać z własnej bazy przekrojów. Program sam obliczy charakterystyki przekroju i zastosuje je w obliczeniach wytrzymałościowych.

## SŁUPY

Podobnie jak w przypadku belek, Użytkownik musi zdefiniować, jakie stany graniczne chce uwzględnić w obliczeniach:

- ⊕ wytrzymałość przekroju,
- ⊕ wyoboczenie giętne,
- ⊕ wyoboczenie giętno-skrętne,
- ⊕ stateczność środnika i półek,
- ⊕ uwzględnienie pasów i środników w systemie skratowania.



Rys. 4

Należy określić sposób obliczania długości wyoboczeniowej:

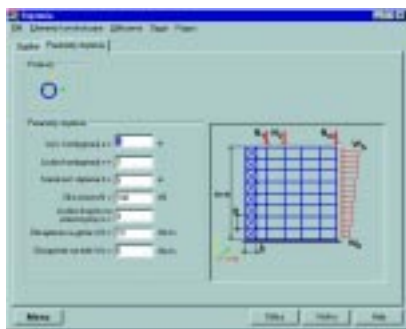
- ⊕ schematy proste (rys. 3)
- ⊕ schematy z elementami dochodzącymi (rys. 4)

Określamy przekrój słupa (walcowany, spawany, złożony), długość, działające obciążenia i w efekcie uzyskujemy stopień wyętwienia przekroju i informację, jaki rodzaj oddziaływania jest najbardziej krytyczny dla analizowanego słupa.

## STĘŻENIA

Program pozwala analizować stężenia pionowe lub poziome przy założeniu dwóch rodzajów pracy elementów stężających:

- tylko rozciąganie (czyli stężenia typu ciągnowego),
- rozciąganie i ściskanie.



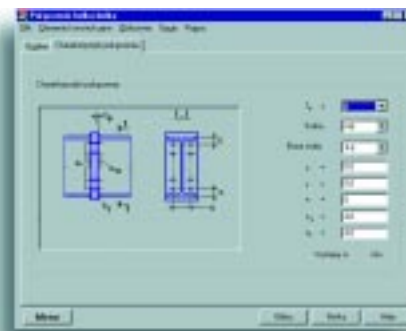
Rys. 5

Po wybraniu rodzaju przekroju, należy podać parametry konstrukcji dla której analizujemy stężenia (rys. 5).

Podobnie jak dla słupów belek otrzymujemy stopień wyętwienia przekroju i informację, jaki rodzaj oddziaływania jest najbardziej krytyczny dla analizowanego przypadku.

## POŁĄCZENIA BELKA-BELKA

Moduł pozwala dokonać szybkiej weryfikacji połączenia doczołowego śrubowego dwóch belek. I znowu działanie jest bardzo proste. Wybieramy przekrój belek i podajemy parametry analizowanego połączenia (rys. 6). W efekcie uzyskujemy stopień wyętwienia połączenia i informację o warunkach krytycznych.



Rys. 6

## POŁĄCZENIA BELKA-SŁUP

Możemy zweryfikować połączenia spawane lub śrubowe, z uwzględnieniem trzech rodzajów żeber usztywniających. Po wskazaniu przekrojów dla belki i słupa oraz typu połączenia (rys.7) podajemy wartości sił w połączeniu i uzyskujemy rezultaty jak dla połączenia belka-belka.

## WYTRZYMAŁOŚĆ PRZEKROJU

Pozwala analizować przekrój walcowany, spawany lub złożony pod kątem jego nośności, różnych stanów naprężeń i w zależności od charakteru pracy elementu. W wyniku obliczeń możemy uzyskać

- ⊕ wartość krytycznego momentu zginającego (rys. 8),
- ⊕ wyętwienie przekroju dla różnych stanów naprężeń,
- ⊕ krzywe interakcji, pozwalające określić wyętwienie i warunek krytyczny dla różnych proporcji sił wewnętrznych (rys. 9).



Rys. 7

## WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZENIA

Moduł pozwala zweryfikować wytrzymałość śrub w konkretnym połączeniu śrubowym lub spoin w połączeniu spawanym. Jego główną zaletą jest duża różnorodność analizowanych połączeń.

## OBCIĄŻENIA BELEK

Uzyskujemy wykresy sił wewnętrznych od różnych rodzajów obciążenia oraz wykres sił wewnętrznych w stanie granicznym dla wszystkich obciążeń wg ENV (rys. 10).



Rys. 8

## MOMENT KRYTYCZNY

Przekrój



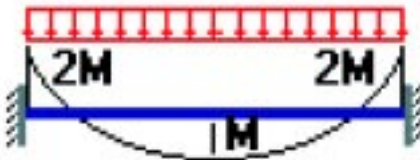
Profile: HEA 100  
Charakterystyki profilu

Parametr	Wartość	
A	Powierzchnia przekroju brutto	21,236 cm <sup>2</sup>
A <sub>v,y</sub>	Powierzchnia ścinania względem osi Y	16,0 cm <sup>2</sup>
A <sub>v,z</sub>	Powierzchnia ścinania względem osi Z	7,556 cm <sup>2</sup>
I <sub>y</sub>	Moment bezwładności względem osi Y	349,2 cm <sup>4</sup>
I <sub>z</sub>	Moment bezwładności względem osi Z	133,8 cm <sup>4</sup>
I <sub>t</sub>	Moment bezwładności na skręcanie	5,237 cm <sup>4</sup>
I <sub>w</sub>	Wycinkowy moment bezwładności	2590,368 cm <sup>6</sup>
i <sub>y</sub>	Promień bezwładności względem osi Y	4,055 cm
i <sub>z</sub>	Promień bezwładności względem osi Z	2,51 cm
W <sub>y+</sub>	Max. wskaźnik wytrzymałości wzgl. osi Y	72,75 cm <sup>3</sup>
W <sub>y-</sub>	Min. wskaźnik wytrzymałości wzgl. osi Y	72,75 cm <sup>3</sup>
W <sub>z+</sub>	Max. wskaźnik wytrzymałości wzgl. osi Z	26,76 cm <sup>3</sup>
W <sub>z-</sub>	Min. wskaźnik wytrzymałości wzgl. osi Z	26,76 cm <sup>3</sup>
W <sub>pl,y</sub>	Plastyczny wskaźnik wytrzymałości względem osi Y	83,013 cm <sup>3</sup>
W <sub>pl,z</sub>	Plastyczny wskaźnik wytrzymałości względem osi Z	41,14 cm <sup>3</sup>

Długość pręta 10,0 m

### Moment krytyczny

Typ wykresu



Wysokość punktu przyłożenia obciążenia 0,0 mm  
Stosunek l/L dla półki ściskanej 0,5

Moment krytyczny na wyboczenie dla zginania w płaszczyźnie oraz odpowiadająca mu podatność określone są w Aneksie F normy ENV 1993-1-1 przy pomocy wzoru:

$$M_{cr} = C_1 (p^2 EI_z) / (kL)^2 \{ [(k/k_w)^2 (I_w/I_z) + (kL)^2 GI_c / (p^2 EI_z) + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \}$$

gdzie:

I<sub>z</sub>, I<sub>t</sub>, I<sub>w</sub> - charakterystyki geometryczne przekroju;  
C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> - współczynniki, których wartości definiowane są w zależności od kształtu wykresu, momentu oraz od długości nie podpartej strefy ściskanej [Tabela F. 1.1.];

G = 0.5E/(1+n) - moduł sprężystości przy ścinaniu;  
k - współczynnik ściskania w nie podpartej części pasa;  
k<sub>w</sub> - współczynnik dla paczenia;

$$z_g = z_{ac} - z_j;$$

$$z_j = z_s - Sz(y_2 + z_2) dA;$$

z<sub>ac</sub> - współrzędna punktu przyłożenia obciążenia bocznego, określana w stosunku do środka ciężkości, przyjmująca wartości dodatnie w przypadku przemieszczenia w kierunku ściskanego pasa;

z<sub>s</sub> - współrzędna środka ścinania

Obliczenia dały następujący wynik:

$$M_{cr} = 13,281767 \text{ kN*m}$$

## MOMENT KRYTYCZNY

Wyznaczanie krytycznego momentu zginającego dla belek stalowych. Obok przedstawiam przykładową notę obliczeniową tej opcji.



Rys. 9

## SIŁA OSIOWA

Analiza wytrzymałości i stateczności ze względu na siłę osiową ściskającą lub rozciągającą. Rezultatem obliczeń jest wartość wyteżenia i warunek krytyczny dla analizowanego elementu (rys. 11).



Rys. 10

## CHARAKTERYSTYKI PRZEKROJU

Moduł pozwala obliczyć i uzyskać w formie notki wartości charakterystyk geometrycznych i wytrzymałościowych dla profili walcowanych i spawanych.

**Dariusz Kasznia**  
RoboBAT Kraków



Rys. 11