

RM-STAL

WERSJA 3.2x-

**WYMIAROWANIE PRĘTÓW
KONSTRUKCJI STALOWYCH
WEDŁUG PN-90/B-03200
w konwersacji z programem RM-WIN**

INSTRUKCJA UŻYTKOWANIA MODUŁU



**BIURO KOMPUTEROWEGO
WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA**

OPOLE - LIPIEC 2007

SPIS TREŚCI

WSTĘP	1
PRZEZNACZENIE MODUŁU RM-STAL	3
WYMAGANIA ODNOŚNIE SPRZĘTU ORAZ ŚRODOWISKA PROGRAMOWEGO	5
PODSTAWOWE CECHY UŻYTKOWE MODUŁU RM-STAL	7
INSTALACJA MODUŁU W KOMPUTERZE	9
MERYTORYCZNY ZAKRES WYMIAROWANIA	11
OGÓLNA KONCEPCJA DZIAŁANIA MODUŁU	11
ZASADY UŻYTKOWANIA	13
URUCHOMIENIE MODUŁU	13
ELEMENTY STEROWANIA OKNA DIALOGOWEGO PN-90/B-03200	17
KONTEKSTY WYMIAROWANIA	20
Cechy przekroju	20
Siły przekrojowe	21
Stateczność miejscowa	23
Oslabienia otworami	23
Nośność na rozciąganie	24
Długości wybożeniowe	25
Nośność na ściskanie	29
Zwichrzenie	31
Nośność (Stateczność) przy zginaniu	32
Nośność przy ściskaniu ze zginaniem	33
Nośność na ścinanie	35
Nośność na zginanie ze ścinaniem	35
Środek pod obciążeniem skupionym	36
Środek w złożonym stanie naprężenia	38
Stan graniczny użytkowania	39
Łączniki - smukłości zastępcze	40
Nośność łączników	41
TWORZENIE DOKUMENTACJI WYMIAROWANIA - WYDRUKI	43
UWAGI OGÓLNE	43
TWORZENIE DOKUMENTU	43
Bezpośredni sposób tworzenia dokumentu	43
Pośredni sposób tworzenia dokumentu	44
Wydruk tabelaryczny	46
WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE WYMIAROWANIA	49
PRĘTY O ZMIENNYM PRZEKROJU (PRĘTY NIEPRYZMATYCZNE)	49
PRZEKROJE O POCHYLONYCH, GŁÓWNYCH OSIACH BEZWŁADNOŚCI	51
PRĘTY O PRZEKROJACH Z KSZTAŁTOWNIKÓW GIĘTYCH	52
ARCHIWIZACJA PARAMETRÓW WYMIAROWANIA	53
PRZYKŁADY	P-1

WSTĘP

Niniejsze opracowanie zawiera informacje na temat użytkowania modułu o skrótowej nazwie **RM-STAL** (wersja 3.2x-) opracowanego przez **Biuro Komputerowego Wspomagania Projektowania CADSIS**, stanowiącego integralną część składową pakietu programów do analizy statyczno-wytrzymałościowej i wymiarowania płaskich konstrukcji prętowych.

Informacje podane w niniejszej instrukcji dotyczą:

- **przeznaczenia modułu RM-STAL**
- **wymagań odnośnie sprzętu oraz środowiska programowego**
- **podstawowych cech użytkowych modułu**
- **instalacji modułu w komputerze**
- **merytorycznego zakresu wymiarowania**
- **zasad użytkowania modułu**
- **tworzenia dokumentacji zadania**
- **wskazówek na temat wymiarowania**
- **przykładów**

Większość informacji zawartych w niniejszej instrukcji jest dostępna również poprzez system pomocy dla programu RM-WIN. Sposób korzystanie z tego systemu pomocy jest typowy dla aplikacji środowiska Windows.

Przy opracowaniu instrukcji kierowano się założeniem, że użytkownik posiada wystarczającą wiedzę i doświadczenie w zakresie obliczeń statycznych oraz projektowania konstrukcji stalowych. Dlatego używane w instrukcji słownictwo, oznaczenia i pojęcia dotyczące tej tematyki nie są bliżej wyjaśniane. W przypadku jakichkolwiek wątpliwości z tym związanych, należy sięgnąć do odpowiedniej literatury fachowej.

PRZEZNACZENIE MODUŁU RM-STAL

Moduł RM-STAL jest zintegrowanym składnikiem pakietu programów oznaczonych skrótową nazwą RM, przeznaczonych do analizy statyczno-wytrzymałościowej oraz wymiarowania płaskich konstrukcji prętowych o dowolnym schemacie statycznym.

Moduł RM-STAL służy do wymiarowania prętów stalowych ściśle wg postanowień oraz zaleceń normy **PN-90/B-03200 - Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie**, a zakres wymiarowania jest sprecyzowany w dalszej części instrukcji.

Integralność modułu RM-STAL polega na interakcyjnym komunikowaniu się z programem głównym RM-WIN pakietu za pomocą systemowego mechanizmu dynamicznej wymiany danych DDE (ang. Dynamic Data Exchange. Oznacza to również, że nie może on być używany jako autonomiczny program użytkowy, ponieważ dane dotyczące wymiarowania są dostarczane do modułu przez program główny pakietu.

WYMAGANIA ODNOŚNIE SPRZĘTU ORAZ ŚRODOWISKA PROGRAMOWEGO

Dla prawidłowego funkcjonowania modułu RM-STAL oraz wykorzystania jego możliwości użytkownik powinien posiadać:

- Komputer typu IBM-PC/386/486/PENTIUM wyposażony w polskojęzyczny system Windows w wersji 98/NT/2000/XP/Vista32.
- Główny program komputerowy pakietu RM-WIN do analizy statycznej i wytrzymałościowej płaskich konstrukcji prętowych w wersji od 6.0.
- Zaawansowany edytor tekstu dla Windows (najlepiej MS Word) zdolny do importowania tekstu kodowanego w formacie RTF (ang. Rich Text Format).
- Podstawową wiedzę na temat użytkowania programów w środowisku Windows.

PODSTAWOWE CECHY UŻYTKOWE MODUŁU RM-STAL

Moduł RM-STAL nie jest samodzielnym programem komputerowym czyli nie może być uruchamiany bezpośrednio z poziomu systemu Windows. Jest on ładowany do pamięci i uruchamiany przez program główny RM-WIN w momencie uaktywnienia opcji **Wyniki/Stal-PN-90/B-03200** tego programu

Działanie modułu opiera się na mechanizmie dynamicznej wymiany danych (ang. Dynamic Data Exchange - DDE) z programem głównym RM-WIN. Polega to na tym, że program główny RM-WIN przekazuje wszystkie potrzebne dane (pochodzące z analizy statycznej) do wymiarowania pręta modułowi RM-STAL oraz konwersacyjne wykonuje obliczenia statyczne na żądanie modułu, a wynikające z dokonywanych zmian w procesie wymiarowania.

Do podstawowych atutów modułu RM-STAL należy zaliczyć:

- ✓ pełną zgodność z wymaganiami i zaleceniami normy **PN-90/B-03200**,
- ✓ wymiarowanie dowolnie złożonych przekrojów jednogąźziowych,
- ✓ automatyczne wyznaczanie niektórych wielkości normowych wynikających ze stanu sił przekrojowych w pręcie oraz typu jego przekroju,
- ✓ automatyczne wskazywanie najbardziej miarodajnego warunku nośności pręta,
- ✓ wizualne sygnalizowanie przekroczenia warunków nośności pręta,
- ✓ automatyczne wyszukiwanie pręta o najniekorzystniejszym warunku nośności,
- ✓ wyznaczanie najniekorzystniejszej kombinacji obciążeń ze względu na nośność wybranego pręta,
- ✓ powielanie danych wymiarowania z jednego pręta do danych innych prętów za pomocą operacji "kopiuj" i "wklej"
- ✓ prostotę posługiwania się jego opcjami i funkcjami,
- ✓ graficzną wizualizację danych i wyników obliczeń,
- ✓ generowanie diagramu stopni wykorzystania nośności prętów konstrukcji,
- ✓ całkowitą swobodę tworzenia dokumentacji graficzno-tekstowej dzięki korzystaniu z gotowych arkuszy, opracowanych w konwencji obliczeń ręcznych, automatycznie przesyłanych do zaawansowanych edytorów tekstu (**WORD, WORKS, AMIPRO, WORD PERFECT**).

Dzięki tym cechom moduł RM-STAL stanowi wyjątkowo sprawne i efektywne narzędzie warsztatu projektanta konstrukcji w zakresie wymiarowania elementów konstrukcji stalowych.

INSTALACJA MODUŁU W KOMPUTERZE

W skład modułu RM-STAL wchodzi następujące pliki:

- plik wykonawczy o nazwie **rm-stal.exe**,
- pliki o rozszerzeniu **rtf** stanowiące arkusze (szablony) dla poszczególnych normowych *kontekstów wymiarowania* pręta.

Wszystkie pliki modułu są dostarczane na odrębnej dyskietce o nazwie "RM-STAL" kompletu instalacyjnego pakietu RM lub - łącznie z innymi składnikami pakietu - na płycie kompaktowej.

W przypadku, gdy moduł RM-STAL jest dostarczony wraz z programem głównym RM-WIN, to jego instalacji dokonuje program instalujący program główny. Aby zapewnić prawidłowe działanie modułu RM-STAL należy go zainstalować w tym samym katalogu dyskowym, w którym został zainstalowany program główny RM-WIN.

Instalacja modułu dokonywana jest z płyty kompaktowej, a więc wymaga czytnika CD i odbywa się automatycznie po włożeniu płyty do czytnika.

Po pomyślnym zakończeniu instalacji do głównego katalogu pakietu RM-WIN zostanie dołączony plik **rm-stal.exe**, a ponadto utworzony zostanie dodatkowy podkatalog o nazwie **ARKUSZE** zawierający pliki ***.rtf** będące wzorcami źródłowymi dla opcji tworzenia dokumentacji procesu wymiarowania.

Użytkowanie modułu RM-STAL wymaga obecności w porcie komunikacyjnym komputera (LPT lub USB) autoryzowanego przez Biuro "CadSiS" klucza zabezpieczającego przed nieuprawnionym kopiowaniem. W przeciwnym razie na ekranie pojawi się komunikat o braku klucza, a użytkowanie modułu nie będzie możliwe.

MERYTORYCZNY ZAKRES WYMIAROWANIA

Ogólna koncepcja działania modułu

Przedmiotem procesu wymiarowania dokonywanego przy pomocy modułu RM-STAL jest dowolny pręt konstrukcji (zdefiniowanej w programie głównym RM-WIN) o przekroju jednogałęziowym lub wielogałęziowym, o stałych lub liniowo zmiennych wzdłuż osi pręta wymiarach, któremu został przypisany materiał z grupy "stal". Oznacza to, że przedmiotem wymiarowania mogą być pręty o następujących typach przekrojów:

- ✓ przekroje **składane jednokształtownikowe** wszystkich typów możliwych do zdefiniowania w module RM-WIN,
- ✓ przekroje **wielogałęziowe** zdefiniowane jako przekrój „stalowy – wiele”,
- ✓ przekroje **składane wielokształtownikowe** zbudowane z wielu kształtowników połączonych ze sobą spawami, z wyjątkiem przekrojów zawierających rurę,
- ✓ przekroje **wielomateriałowe**, jeśli tzw. *materiałem podstawowym* przekroju jest "stal",
- ✓ przekroje zawierające otwory wprowadzane w trybie definiowania przekroju modułu RM-WIN.

Dla przekrojów składających się z kilku kształtowników wykonanych z różnych gatunków stali, przyjmowany jest jeden rodzaj stali określony przez *materiał podstawowy* przekroju. Podczas wymiarowania prętów stalowych elementy będące otworami oraz te, którym przypisano inny materiał niż stal, są pomijane.

W dalszej części niniejszej instrukcji pod pojęciem przekroju **jednogałęziowego** należy rozumieć, oprócz przekrojów składających się z jednego kształtownika (składane *jednokształtownikowe*), również przekroje składające się z wielu kształtowników (składane *wielokształtownikowe*), w których wszystkie kształtowniki są ze sobą połączone spawami. Aby *wielokształtownikowe* przekroje składane mogłyby być dopuszczone do wymiarowania, muszą one spełniać następujące warunki:

- Nie mogą zawierać żadnego pojedynczego kształtownika, który nie jest połączony co najmniej jednym spawem z pozostałymi kształtownikami przekroju.
- Nie mogą zawierać kształtowników typu "rura" i "trójkąt" ponieważ dla tego typu kształtowników norma nie precyzuje sposobu określania smukłości ścianek, co jest konieczne dla ustalenia klasy przekroju.
- Poszczególne kształtowniki nie mogą się wzajemnie przenikać powierzchniami.

W przeciwnym razie wymiarowanie pręta nie będzie możliwe, a na ekranie monitora pojawi się komunikat: "Nieodpowiedni przekrój pręta"

Uwaga: Dla osiągnięcia właściwego powiązania poszczególnych kształtowników w jednogałęziowym przekroju *wielokształtownikowym* należy posłużyć funkcjami trybu deklarowania przekroju składanego (opcja: **Przekroje-Lista Przekrojów...-Edytuj...** programu głównego). W tym

celu - dla precyzyjnego wzajemnego konfigurowania kształtowników - zaleca się operowanie lokalnym układem odniesienia, znacznikiem punktów konturu kształtownika aktywnego oraz współrzędnymi tego znacznika w układzie lokalnym.

Podstawą wszelkich obliczeń związanych z wymiarowaniem pręta są:

- charakterystyka przekroju pręta określana w programie głównym,
- schemat i geometria pręta oraz jego uwarunkowanie kinematyczne wynikające z jego powiązania z innymi prętami konstrukcji, określane w programie głównym,
- wyniki obliczeń statycznych dla obliczeniowych i charakterystycznych wartości obciążeń dostarczanych przez program główny dla kombinacji aktywnych (włączonych do obliczeń) grup obciążeń,
- równania i wyrażenia wynikające wprost z postanowień i zaleceń normy PN-90/B-03200.

Zasada działania modułu RM-STAL polega na operowaniu tzw. *kontekstami wymiarowania* właściwymi dla konkretnej sytuacji pręta. Każdy z *kontekstów* odnosi się do konkretnego punktu normy, a jego nazwa robocza nawiązuje do tytułu odpowiadającego mu punktu normy. Poniżej wymieniono nazwy wszystkich *kontekstów wymiarowania*, którymi można operować w procesie wymiarowania:

- **Cechy przekroju**
- **Siły przekrojowe**
- **Stateczność miejscowa**
- **Oslabienia otworami**
- **Nośność na rozciąganie**
- **Długości wyboczeniowe**
- **Nośność na ściskanie**
- **Zwichrzenie**
- **Nośność (Stateczność) przy zginaniu**
- **Nośność przy ścisaniu ze zginaniem**
- **Nośność na ścinanie**
- **Nośność na zginanie ze ścinaniem**
- **Środek pod obciążeniem skupionym**
- **Środek w złożonym stanie naprężenia**
- **Stan graniczny użytkowania**
- **Łączniki - smukłości zastępcze**
- **Nośność łączników**

Jest oczywiste, że nie wszystkie *konteksty wymiarowania* są dostępne zawsze, lecz tylko te, które są właściwe dla wybranego pręta, a wynikające z jego stanu pracy statycznej, uwarunkowań kinematycznych i typu przekroju. Lista kontekstów jest ustalana przez moduł automatycznie

Obliczenia wykonywane przez moduł RM-STAL nie obejmują takich elementów konstrukcji jak: połączenia, wzmocnienia przekrojów (żebra), styki i oparcia oraz zagadnień związanych ze zmęczeniem materiału i dynamiki.

ZASADY UŻYTKOWANIA

Użytkowanie modułu RM-STAL do wymiarowania prętów stalowych opiera się na podobnych zasadach jakie obowiązują przy innych opcjach programu głównego RM-WIN. Realizuje on zadania jako jedna z podopcji opcji **Wyniki** programu głównego. W odróżnieniu od innych opcji, moduł RM-STAL współpracuje z programem głównym przy pomocy mechanizmu dynamicznej wymiany danych, co polega na interaktywnym przekazywaniu danych i wykonywaniu poleceń poprzez kanały łączności ustanawiane pomiędzy modułem RM-STAL, a programem głównym RM-WN.

Uruchomienie modułu

Moduł RM-STAL jest uruchamiany przez program główny, a dostępny jest wówczas, gdy możliwe jest wykonanie obliczeń dla zadania, a więc gdy zadanie to jest poprawnie zdefiniowane.

Po zdefiniowaniu schematu statycznego ustroju tzn. jego geometrii, listy przekrojów i obciążeń, można przejść do wymiarowania prętów. W tym celu należy wybrać z menu głównego programu RM-WIN opcję **Wyniki**, a po wyświetleniu listy podopcji, wybrać pozycję **Stal - PN-90/B-03200**.

Jeśli ustrój jest poprawnie zdefiniowany, to program główny wykonuje obliczenia dla aktualnej kombinacji aktywnych grup obciążeń, a następnie tworzy okno robocze (typu MDI) opcji wymiarowania i ustanawia kanały łączności z modułem RM-STAL.

W oknie roboczym opcji wymiarowania **Stal - PN-90/B-03200** rysowany jest schemat ustroju wraz z wykresami aktualnej siły przekrojowej, numerami prętów i węzłów oraz numerów przekrojów przypisanych poszczególnym prętom ustroju.

Wymiarowanie prętów stalowych przy użyciu modułu RM-STAL opiera się na wynikach analizy statycznej przeprowadzonej dla obliczeniowych oraz charakterystycznych wartości obciążeń (*wartości obliczeniowe* - dla wszystkich warunków stanu granicznego nośności, *wartości charakterystyczne* - dla warunków stanu granicznego użytkowania). Oznacza to, że obliczenia przeprowadzane są niezależnie od stanu klauzuli **Wyniki/Obciążenia obliczeniowe**, a wykres sił przekrojowych wyświetlanych w oknie opcji odpowiadają obciążeniom obliczeniowym.

Oprócz standardowych funkcji - dostępnych z poziomu okna roboczego opcji - takich jak:



- wyświetlanie / gaszenie obciążeń,






- wyświetlanie / gaszenie numeracji prętów i węzłów,

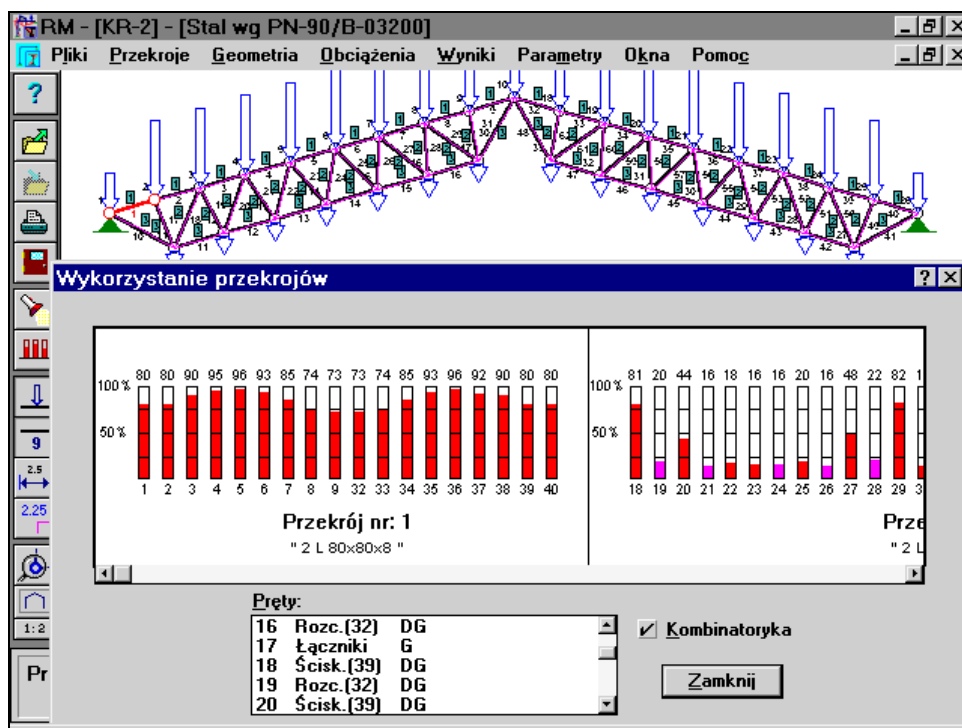


- wyświetlanie / gaszenie linii wymiarowych geometrii ustroju,



- wyświetlanie / gaszenie wartości rzędnych charakterystycznych wykresów sił przekrojowych,

-  - umieszczanie w schowku systemu Windows struktur danych związanych z wymiarowaniem aktywnego pręta, z myślą kopiowania tych danych do do danych innych prętów.
-  - kopiowanie ze schowka - uprzednio w nim umieszczonej - struktury danych związanej z wymiarowaniem pręta do danych wymiarowania aktywnego pręta, czyli powielanie danych wymiarowania na pręty o podobnych warunkach i parametrach wymiarowania.
-  - wyświetlanie diagramu stopnia wykorzystania poszczególnych prętów ustroju. Wywołanie tej funkcji polega na kliknięciu na przypisanemu jej przycisku paska narzędzi lub użyciu klawisza <Ins>, co spowoduje uruchomienie procedury generowania diagramu stopni wykorzystania prętów (zadeklarowanych jako stalowe) w aspekcie normowych warunków nośności.



Rys. 1.

W trakcie wykonywania procedury na ekranie monitora wyświetlane jest okno informujące o stopniu zaawansowania obliczeń. W pierwszej kolejności wyznaczane są długości wyboczeniowe poszczególnych prętów, a następnie, dla każdego pręta osobno, sprawdzane są wszystkie - właściwe dla pręta - warunki nośności w celu ustalenia najbardziej niekorzystnej relacji warunku nośności. Czas wykonania niezbędnych obliczeń zależy będzie od liczby prętów podlegających wymiarowaniu oraz od stanu statycznej pracy poszczególnych prętów (liczba obciążeń na pręcie, rodzaj przekroju, rozkład sił przekrojowych).

Po wykonaniu obliczeń na tle okna roboczego opcji wyświetlane jest okno dialogowe **Wykorzystanie przekrojów** zawierające słupkowy diagram stopnia wykorzystania prętów (Rys. 1.), składający się z sekcji skupiających pręty o tym samym przekroju. Każda sekcja zawiera - wyskalowane procentowo - pionowe słupki, wypełnione *kolorem elementów wyróżnionych* lub *kolorem wykresów* (określanymi w opcji **Parametry-Kolory**), stopień wypełnienia słupka odpowiada stopniu wykorzystania pręta.

Wypełnienie słupka *kolorem elementów wyróżnionych* oznacza, że siła osiowa działająca w pręcie jest ściskająca, natomiast *kolor wykresów* odpowiada przypadkowi siły rozciągającej. Taka konwencja nie ma tutaj większego znaczenia, a zastała tu przyjęta dla zachowania zgodności zasad przyjętych dla diagramu stopnia wykorzystania prętów generowanego w opcji **Wyniki-Naprężenia**, a bazującym na klasycznym (naprężeniowym) warunku nośności pręta.

Sekcje diagramu są ułożone poziomo i sekwencyjnie według numerów przekrojów z *listy przekrojów zadania*, a przy większej liczbie przekrojów lub prętów mogą być przewijane w oknie, w którym są wyświetlane. Do tego celu służy poziomy pasek (belka) przewijania, którego elementy sterujące nie wymagają omówienia. Oprócz tego, przesuwania sekcji diagramu można dokonywać za pomocą klawiszy-strzałek (ewentualnie w kombinacji z klawiszem <Ctrl>) oraz <Home>, <End>. <PgUp>, <PgDn>.

Liczby umieszczone u dołu słupka diagramu są numerami prętów, którym one odpowiadają, natomiast górne liczby wyrażają stopień wykorzystania nośności pręta w procentach. Dla polepszenia czytelności diagramu słupki zostały wyposażone w skalę, której jednostką jest odcinek odpowiadający 25% nośności pręta.

Należy mieć na uwadze fakt, że jeśli użytkownik nie określił wcześniej parametrów wymiarowania (materiał, uźebrowania, długości wyboczeń, wymiary łączników dla przekrojów wielogałęziowych i itd.) dla poszczególnych prętów, to do obliczeń przyjmowane są ich wartości domyślne. A więc w szczególnych sytuacjach projektowania (np. w przypadku prętów o przekrojach wielogałęziowych) wskazane jest wcześniej wyspecyfikowanie niektórych parametrów wymiarowania (np. wymiary łączników) zanim zostanie użyta funkcja wyświetlana diagramu stopnia wykorzystania nośności prętów.

Lista **Pręty** zawiera wykaz prętów stalowych ustroju z podaniem decydującego o nośności pręta warunku normowego. W przypadku, gdy nośności prętów wyznaczone zostały na podstawie obwiedni wielkości statycznych pręta, dodatkowo lista zawiera specyfikację najniekorzystniejszej ze względu na nośność pręta kombinacji obciążeń. Wówczas podwójne kliknięcie lewym przyciskiem myszy na wybranym elemencie listy powoduje uaktywnienie tych grup obciążeń, które stanowią najniekorzystniejszy ich układ dla wybranego pręta.

Przełącznik **Kombinatoryka** decyduje o sposobie wyznaczanie nośności prętów ustroju. Domyślnie przełącznik ten jest wyłączony i oznacza to, że nośności prętów wyznaczone są dla wielkości statycznych pochodzących od obciążeń aktywnych grup, które wyświetlone są w oknie statusu programu. Przełącznik ten jest dostępny tylko wówczas, gdy dla danego zadania wyliczona została kombinatoryka obciążeń. Włączenie przełącznika **Kombinatoryka** powoduje wyznaczenie nośności poszczególnych prętów ustroju dla najniekorzystniejszej dla danego pręta kombinacji obciążeń.

Wyniki obliczeń, związane z diagramem stopni wykorzystania nośności prętów, są pamiętane do momentu zamknięcia okna roboczego opcji wymiarowania. Każda zmiana danych odnośnie geometrii ustroju, przekrojów i obciążenia powoduje, że wyniki muszą być zaktualizowane. Jeśli natomiast zmiany dokonywane w module RM-STAL dotyczą wyłącznie parametrów wymiarowania danego pręta, to obliczenia ograniczają się do tego pręta, którego zmiany dotyczą.

Dla udokumentowania stopni wykorzystania nośności prętów ustroju można posłużyć się opcją wydruku okna dialogowego, która jest dostępna poprzez menu systemowe tego okna (przycisk umieszczony w lewym, górnym rogu okna) lub w opcji **Pliki/Drukuj** programu RM-Win.



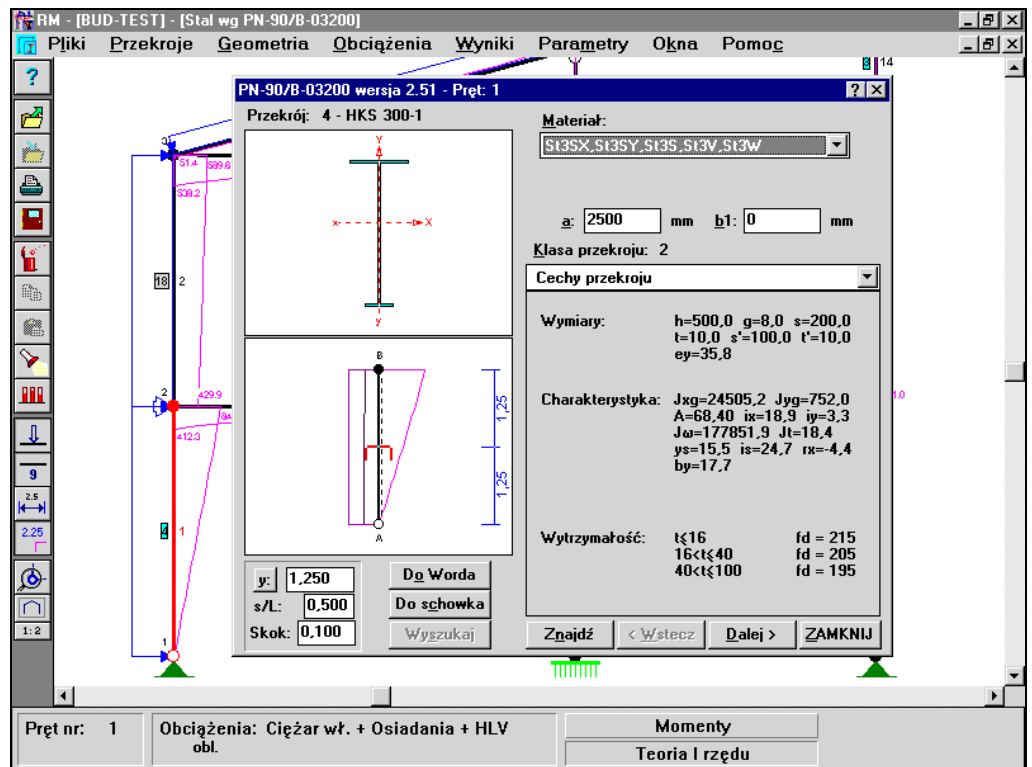
-automatyczne wyszukiwanie pręta, którego stopień wykorzystania jest największy spośród wszystkich prętów podlegających wymiarowaniu w module RM-STAL. Wywołanie tej funkcji polega na kliknięciu na przypisanemu jej przycisku paska narzędzi lub użyciu kombinacji klawiszy **<Ctrl>+<Enter>**, co spowoduje wywołanie procedury wyszukiwania pręta, którego stopień wykorzystania jest największy.

Procedura wyszukiwania jest realizowana w kontekście dodatkowych warunków wyszukiwania, a określonych w klauzuli **Wyszukiwanie dla prętów** w oknie dialogowym **Parametry opcji**, które jest udostępniane poprzez menu aplikacji (**Parametry-Parametry opcji**) lub bezpośrednio - klawisz **<F10>**.

Efektem końcowym procedury wyszukiwania jest wywołanie modułu RM-STAL dla ustalonego pręta i wskazanie - w *oknie kontekstów wymiarowania - kontekstu wymiarowania*, który decyduje o stopniu wykorzystania nośności pręta.

Proces wymiarowania dotyczy zawsze tylko jednego pręta, a konkretnie tego, który jest wyróżniony kolorem wyróżnienia. Podwójne kliknięcie lewym przyciskiem myszy na pręcie wyróżnionym lub użycie klawisza **<Enter>** spowoduje uruchomienie modułu RM-STAL i pojawienie się okna dialogowego wymiarowania (Rys.2.).

Pomyślne wykonanie tej operacji jest możliwe tylko wówczas, gdy do pręta przydzielony jest dozwolony przekrój, a przypisany mu materiał jest rodzaju „stal”. W przeciwnym razie uruchomienie modułu nie będzie możliwe.



Rys. 2.

Elementy sterowania okna dialogowego PN-90/B-03200

Okno dialogu modułu RM-STAL zawiera następujące elementy służące do sterowania funkcjami procesu wymiarowania pręta:

Okno przekroju pręta opatrzone u góry nazwą przekroju (nadaną podczas jego edycji w opcji **Przekroje** programu RM-WIN), a zawierające wyskalowany rysunek przekroju, który został przypisany prętowi w opcji **Geometria-Pręty**. Jeśli pręt został wcześniej zadeklarowany jako o przekroju zmiennym wzdłuż swojej osi, to w oknie rysowane są oba przekroje (początkowy i końcowy) oraz przekrój wynikający z położenia znacznika przekroju w *oknie schematu pręta*. Okno przekroju pręta, po jego uaktywnieniu (poprzez kliknięcie przyciskiem myszy w obszarze okna lub sekwencyjnie przy pomocy klawisza **<Tab>**) może odbierać następujące polecenia:

- Zmiana skali rysunku (tzw. zoom), czyli

Powiększenie, co polega na

- użyciu klawisza **<F9>** - pojawi się w oknie kursor-lupa,
- zaznaczeniu lewego-górnego rogu obszaru powiększania (kliknięcie przyciskiem myszy) - pojawi się prostokąt zoom'owania,
- zaznaczeniu prawego-dolnego rogu obszaru powiększania (kliknięcie przyciskiem myszy) - wybrany obszar zostanie powiększony do rozmiarów okna przekroju.

Dwukrotne pomniejszenie, co polega na użyciu kombinacji klawiszy <Shift>+<F9>.

Centrowanie, czyli dostosowanie skali rysunku przekroju tak, aby w całości mieścił się w oknie, co polega na użyciu kombinacji klawiszy <Ctrl>+<F9>.

- Zmiana rozmiarów przekroju, np. podyktowana warunkami wymiarowania. W tym celu należy dwukrotnie kliknąć przyciskiem myszy lub w stanie aktywności okna użyć klawisza <Enter>. W zależności od rodzaju przekroju pojawi się okno dialogowe, w którym można dokonać zmiany nominału kształtownika lub jego wymiarów. Dla prętów o zmiennym przekroju jako pierwszy pojawia się dialog dotyczący przekroju na początku pręta (węzeł A), a następnie dialog dotyczący przekroju na końcu pręta (węzeł B).

Okno schematu pręta zawierające rysunek schematu pręta wraz z aktualnym rozkładem sił przekrojowych. Dodatkowo na rysunku pręta wyświetlany jest znacznik położenia przekroju oraz linie wymiarowe ułatwiające odczytywanie liczbowych wartości odległości znacznika od końców pręta. Większość *kontekstów wymiarowania* ma charakter lokalny, co oznacza, że wyświetlane w oknie kontekstu wielkości odnoszą się do konkretnego przekroju pręta, wskazywanego przez znacznik. Okno schematu pręta, po jego uaktywnieniu (poprzez kliknięcie przyciskiem myszy w obszarze okna lub sekwencyjnie przy pomocy klawisza <Tab>) może odbierać następujące polecenia:

- Zmiana skali rysunku (tzw. zoom), czyli Powiększenie, co polega na
 - użyciu klawisza <F9> - pojawi się w oknie kursor-lupa,
 - zaznaczeniu lewego-górnego rogu obszaru powiększania (kliknięcie przyciskiem myszy) - pojawi się prostokąt zoom'owania,
 - zaznaczeniu prawego-dolnego rogu obszaru powiększania (kliknięcie przyciskiem myszy) - wybrany obszar zostanie powiększony do rozmiarów okna schematu.

Dwukrotne pomniejszenie, co polega na użyciu kombinacji klawiszy <Shift>+<F9>.

Centrowanie, czyli dostosowanie skali rysunku przekroju tak, aby w całości mieścił się w oknie, co polega na użyciu kombinacji klawiszy <Ctrl>+<F9>.

- Zmiana położenia znacznika przekroju, co polega na:
 - uchwyceniu znacznika kursorem myszy przez zbliżenie kursora myszy do znacznika przekroju i wciśnięcie lewego przycisku,
 - nasunięcie znacznika ruchem myszy na zamierzoną pozycję na osi pręta, lub przy pomocy klawiszy-strzałek nasunąć znacznik przekroju na zamierzoną pozycję na osi pręta, ewentualnie dostosowując wartość skoku znacznika w polu edycyjnym *Skok*.

Okno kontekstów wymiarowania, w którym wyświetlane są informacje związane z aktualnym *kontekstem wymiarowania*. Zawartość tego okna zmienia się wraz ze zmianą *kontekstu*, co może być dokonywane za pośrednictwem **Listy kontekstów wymiarowania** lub przycisków **Wstecz** i **Dalej**.

Lista materiałów (Materiał) zawiera normowe symbole gatunków stali konstrukcyjnej, które są pogrupowane według ich cech mechanicznych. Lista służy do przydzielenia gatunku stali do pręta, co jest konieczne wówczas, gdy nazwa przydzielonego wcześniej - w opcji **Przekroje** programu głównego - materiału z biblioteki materiałów nie pokrywa się z nazwą żadnego normowego gatunku stali z listy.

Lista kontekstów wymiarowania zawiera nazwy *kontekstów wymiarowania* i jest ściśle związana z **Oknem kontekstów wymiarowania**. Liczba *kontekstów* oraz ich merytoryczny skład zależy od stanu sił przekrojowych w pręcie i typu przekroju

Przyciski Wstecz i **Dalej** służą do sekwencyjnego przełączania pomiędzy poszczególnymi *kontekstami wymiarowania*.

Przycisk Wyszukaj służy do automatycznego wyznaczenia przekroju pręta, dla którego warunek lub wielkość, stowarzyszone z aktualnym *kontekstem wymiarowania*, są najbardziej niekorzystne z punktu widzenia wymagań normowych. Jego użycie powoduje wykonanie procedury wyszukiwania, której efektem końcowym jest wskazanie przekroju (ustawienie znacznika przekroju) oraz uaktualnienie pól liczbowych lub relacji zawartych w **Oknie kontekstów wymiarowania**. Dla tzw. *kontekstów wymiarowania* o charakterze globalnym przycisk ten jest nieaktywny, tzn. wielkość lub warunek stowarzyszony z tym kontekstem nie ma związku z położeniem znacznika przekroju.

Obok przycisku **Wyszukaj** umieszczony jest przełącznik, którego włączenie powoduje, że przy zmianie kontekstu wymiarowania - dokonywanej przy pomocy przycisków **<Wstecz i Dalej>** - przejściu do innego kontekstu wymiarowania towarzyszy automatyczne wyszukanie przekroju pręta (z jednoczesnym ustawieniem *znacznika przekroju*), w którym warunek związany z nowym kontekstem jest najniekorzystniejszy.

Przycisk Znajdź uruchamia procedurę ustalenia *kontekstu wymiarowania*, dla którego stowarzyszony warunek normowy jest najniekorzystniejszy. Efektem działania tej procedury jest wyświetlenie w **Oknie kontekstów wymiarowania** wyszukanego *kontekstu* oraz ewentualne ustawienie znacznika przekroju (jeśli wyszukany kontekst ma charakter lokalny).

Przycisk (x:y:s:) służy do wybierania sposobu rysowania linii wymiarowych określających położenie znacznika przekroju, a mianowicie: **x:** - poziomo, **y:** - pionowo **s:** - równoległe do osi pręta. Możliwość ta - z oczywistych względów - dotyczy prętów nachylonych ukośnie. Z przyciskiem tym stowarzyszone jest pole edycyjne, które zawiera odległość znacznika przekroju od węzła początkowego (A) pręta i odległość ta może być zadana (wpisana) bezpośrednio, każda zmiana tej wartości powoduje uaktualnienie położenia znacznika przekroju.

Pola edycyjne

- a:** - zawierające odległość między ewentualnymi usztywnieniami poprzecznymi ścianek przekroju pręta (żebami poprzecznymi). Domyślnie wielkość ta jest równa długości pręta, co oznacza, że usztywnień (zeber) nie ma,
- b1:** - udostępniane wyłącznie dla pręta o przekroju zawierającym dwuteownik spawany, a określające położenie usztywnień podłużnych środkowego (zeber podłużnych) względem pasa ściskanego przekroju dwuteowego. Wymiar **b1** jest mierzony od dolnej krawędzi pasa górnego przekroju.

Konteksty wymiarowania

Cechy przekroju

- Odniesienie:** Nie związany z normą.
- Komentarz:** Ten *kontekst wymiarowania* obejmuje wielkości ściśle związane z charakterystyką geometryczną i wytrzymałościową oraz materiałową przekroju pręta, przekazywaną do modułu RM-STAL przez program główny RM-WIN w ramach konwersacji i ma charakter wyłącznie informacyjny.
- W przypadku pręta o przekroju zmiennym wzdłuż osi, wyświetlana w *Oknie kontekstów* charakterystyka odpowiada przekrojowi wynikającemu z położenia znacznika przekroju *Okna schematu pręta*.
- W oznaczeniu głównych osi centralnych przekroju $x-X$, $y-Y$ obowiązuje zasada, że osią $x-X$ jest zawsze oś większego momentu bezwładności.
- Zakres:** Wszystkie przypadki.
- Elementy sterowania:** Brak.
- Funkcja Wyszukaj:** Nieaktywna.
- Uwagi:** Przy definiowaniu oraz ewentualnych zmianach wymiarów przekroju pręta należy unikać deklarowania zbyt smukłych ścianek, tzn. takich, dla których smukłość względna $\bar{\lambda}_p > 3,0$, a więc wykraczająca poza zakres stosowalności krzywych normowych dla współczynników niestateczności miejscowej. W przypadku gdy to ograniczenie nie jest spełnione - na ekranie monitora będzie pojawiał się permanentnie stosowny komunikat ostrzegawczy, a wyniki obliczeń dla poszczególnych kontekstów wymiarowania mogą być niewiarygodne.

Siły przekrojowe

- Odniesienie:** Nie związany z normą.
- Komentarz:** Obejmuje informacje dotyczące stanu statycznej pracy pręta, czyli rozkładu sił przekrojowych wzdłuż pręta, przekazywanych przez program główny RM-WIN w ramach konwersacji oraz wartości ekstremalnych naprężeń normalnych w obrębie aktualnego przekroju, obliczanych przez moduł RM-STAL na podstawie wartości siły osiowej i momentów zginających. Wyświetlane wartości wyznaczane są zawsze dla obciążeń obliczeniowych. Umożliwia również ustalenie najniekorzystniejszej kombinacji grup obciążeń działających w płaszczyźnie ustroju.
- Oprócz tego, istnieje możliwość uwzględnienia przestrzennej pracy pręta poprzez podania wartości przywęzłowych momentów zginających oraz ewentualnego obciążenia równomiernie rozłożonego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ustroju.
- Zakres:** Wszystkie przypadki.
- Elementy sterowania:** Przycisk **Wyznacz niekorzystne** umożliwia ustalenie najniekorzystniejszej ze względu na nośność pręta kombinacji grup obciążeń działających w płaszczyźnie ustroju. Przycisk ten jest dostępny tylko wówczas, gdy dla danego zadania wyliczona została kombinatoryka obciążeń. Najniekorzystniejsza kombinacja obciążeń dla pręta ustalana jest spośród kombinacji dających następujące wielkości dla pręta: $\max\{|\sigma|\}$, $\max\{M\}$, $\min\{M\}$, $\max\{|Q|\}$, $\max\{N\}$, $\min\{N\}$, $\max\{f/L\}$, $\max\{|U^A_x|\}$, $\max\{|U^B_x|\}$ (f/L - deformacja pręta; U^A_x , U^B_x - przemieszczenia poziome węzłów). Użycie tego przycisku powoduje ustawienie aktywnych grup obciążeń na podstawie kombinacji najniekorzystniejszej. Przycisk **Wyznacz niekorzystne** jest aktywny tylko wtedy, gdy wcześniej została wykonana obliczenia dla kombinatoryki grup obciążeń (włączona klauzula **Kombinatoryka** w opcji **Wyniki**).
- Pola edycyjne określające rozkład sił przekrojowych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ustroju, a mianowicie:
- Ma:** - do wpisania wartości momentu zginającego, w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ustroju, w węźle A pręta.

Mb: - do wpisania wartości momentu zginającego, w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ustroju, w węźle *B* pręta.

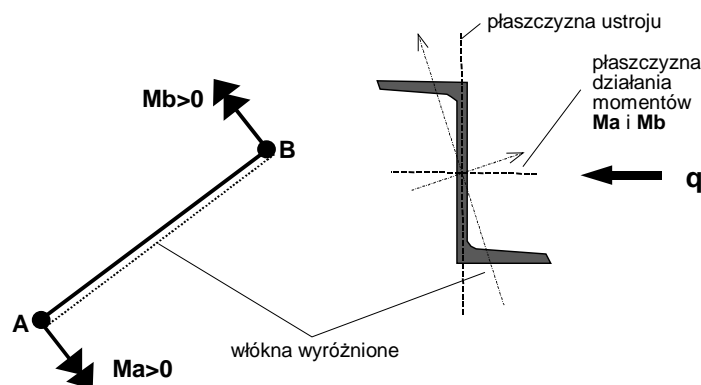
q: - wartość obciążenia równomiernie rozłożonego na całej długości pręta, działającego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ustroju.

γ_f : - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla obciążeń.

Wielkości **Ma**, **Mb**, **q** pochodzą od obciążeń charakterystycznych.

Należy tu przypomnieć zasadę, jaka obowiązuje przy określaniu orientacji przekroju przypisanego prętowi, a mianowicie, że dolne włókna przekroju widzianego w *Oknie przekroju* są zawsze skojarzone z wyróżnioną stroną pręta (linia przerywana) w oknie schematu pręta, a przekrój jest przekrojem o tzw. normalnej dodatniej, tzn. widziany z pozycji węzła *B* w kierunku węzła *A*.

Znakowanie momentów **Ma** i **Mb** wyjaśnia Rys.3., natomiast dodatnia wartość obciążenia **q** oznacza, że działa ono od prawej strony przekroju widzianego w *Oknie przekroju*.



Rys. 3.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój o największej, bezwzględnie wartości naprężeń normalnych wyznaczanych klasycznie na podstawie wartości siły osiowej i momentów zginających w obu kierunkach. Efektem działania tej funkcji jest ustawienie znacznika przekroju w *Oknie schematu pręta* na przekroju wyszukany oraz wyświetlenie w grupie **Naprężenia Okna kontekstów wymiarowania** wartości ekstremalnych naprężeń normalnych σ_c i σ_t .

Stateczność miejscowa

- Odniesienie:** Zagadnienia związane z punktem 4.2. normy.
- Komentarz:** Dotyczy określenia współczynników redukcji nośności przekroju klasy 4. W *Oknie kontekstów wymiarowania* wyświetlane są wartości dotyczące:
- warunku (9) stateczności ścianki w jednoosiowym stanie naprężenia.
 - cech przekroju w stanie nadkrytycznym - A_o , W_{ecx} , W_{ecy} ,
 - wartości dodatkowych momentów zginających, wynikających z przesunięcia środka ciężkości przekroju współpracującego względem środka ciężkości przekroju nominalnego.
 - współczynników redukcji nośności: ψ_o - na ściskanie, ψ_x , ψ_y - na zginanie w obu kierunkach.
- Zakres:** Tylko pręty o jednogałęziowym przekroju klasy 4.
- Elementy sterowania:** Grupa przełączników wyboru do deklarowania trybu dla jakiego stanu pracy przekroju mają być wyznaczone współczynniki redukcji nośności:
- **krytycznym,**
 - **nadkrytycznym,**
 - **nadkrytycznym ograniczonym.**
- Dla przekrojów, w których występują wyłącznie ścianki jednostronnie umocowane aktywny jest tylko przełącznik stowarzyszony z wymiarowaniem w stanie **krytycznym** (np. teowniki, kątowniki).
- Funkcja Wyszukaj:** Wyszukuje przekrój pręta, w którym relacja warunku (9) jest najniekorzystniejsza.

Oslabienia otworami

- Odniesienie:** Punkt 4.1.2. - Osłabienia elementu otworami na łączniki
- Komentarz:** Obejmuje aspekt wymiarowania związany z ewentualnymi osłabieniami przekroju otworami na łączniki, w powiązaniu z warunkiem dla złożonego stanu naprężenia (Tabela 5 - poz. 4). Oprócz elementów sterowania, *Okno kontekstów wymiarowania* zawiera następujące informacje:
- A pole powierzchni przekroju brutto,
 ψ_{oc} wskaźnik osłabienia przekroju przy ścisaniu,

- σ_e wartość maksymalnego naprężenia normalnego w przekroju w powiązaniu z warunkami nośności zawartymi w Tabeli 5 (poz. 1 i 2),
- A_v pola powierzchni czynnego przekroju brutto na ścinanie odpowiednio w kierunkach X i Y ,
- A_{vo} pola powierzchni osłabień otworami przekroju brutto na ścinanie odpowiednio w kierunkach X i Y ,
- ψ_{ov} wskaźniki osłabienia przekroju na ścinanie odpowiednio w kierunkach X i Y ,
- τ_e wartości naprężeń stycznych z uwzględnieniem osłabień odpowiednio w kierunkach X i Y oraz ostateczny warunek nośności na ścinanie (Tabela 5 - poz. 3)

Relację warunku nośności przekroju osłabionego w złożonym stanie naprężenia (Tabela 5 - poz.4).

Zakres: Wszystkie przypadki.

Elementy sterowania: Elementami sterowania są:

Przełącznik Otwory powiększ. - dla wyboru opcji zastosowania wskaźnika osłabienia przekroju ψ_{oc} - w przypadku występowania otworów powiększonych w strefie ściskanej elementu.

Pole edycyjne Położenie: - pozwala określić miejsca występowania osłabień przekroju. Miejsca te określa się w postaci ciągu współrzędnych oddzielonych odstępami liczonych od węzła „A” wzdłuż osi pręta. Program domyślnie przyjmuje, że osłabienia występują na początku i na końcu pręta.

Lista Ścianki: - zawiera listę ścianek przekroju, na których mogą występować otwory. W celu zadania osłabienia występującego na wybranej ściance należy podwójnie kliknąć na związonym z tą ścianką elemencie listy i wprowadzić pole powierzchni, w centymetrach, otworów przypadających na daną ściankę.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój pręta, w którym relacja warunku (Tabela 5 - poz.4) jest najniekorzystniejsza. Przy stosowaniu tej funkcji należy mieć na uwadze fakt, że funkcja uwzględnia osłabienia otworami tylko w przekrojach określonych w polu edycyjnym **Położenie**. W pozostałych przekrojach osłabienia nie są uwzględniane.

Nośność na rozciąganie

Odniesienie: Punkt 4.3. - Elementy rozciągane.

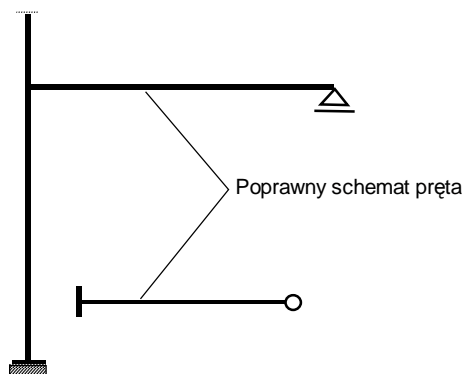
- Komentarz:** Odnosi się do wszystkich prętów (niezależnie od ich stanu wytrzymałościowego, a więc również ściskanych) w związku z punktem 4.4.1b. normy. Przy sprawdzaniu warunku nośności pręta na rozciąganie uwzględniane są deklaracje dokonane w *kontekście osłabienia otworami*. Przy czym dla prętów nierozciąganych osłabienia otworami są brane pod uwagę tylko wówczas, gdy w kontekście osłabienia otworami został włączony przełącznik **Otwory powiększ**. Okno kontekstów wymiarowania zawiera:
- A pole przekroju pręta brutto,
 - A_{ψ} sprowadzone pole przekroju,
 - N wartość siły osiowej w działającej w przekroju pręta.
 - N_{Rt} nośność pręta na rozciąganie.
- Relację warunku (31) lub (32).
- Zakres:** Wszystkie przypadki.
- Elementy sterowania:** Elementami sterowania są:
- Przełącznik **Połączenie mimośrod.** - dla wyboru opcji połączenia mimośrodowego pręta.
 - Przełącznik **Jeden łącznik** - dla wyboru wariantu liczby łączników (jeden lub więcej) - pod warunkiem włączenia przełącznika **Połączenie mimośrod.**
- Oba przełączniki dotyczą połączeń mimośrodowych tylko przekrojów typu: ceownik, teownik lub kątownik (p.4.3.1b. normy).
- Funkcja Wyszukaj:** Wyszukuje przekrój pręta, w którym relacja warunku (31) lub (32) jest najniekorzystniejsza.

Długości wyboczeniowe

- Odniesienie:** Punkt 4.4. - Elementy ściskane, Rozdz. 2 - Załącznik 1
- Komentarz:** Służy do określania współczynników długości wyboczeniowych pręta w związku z koniecznością wyznaczenia smukłości względnej pręta dla wyboczenia giętnego oraz dla wyboczenia skrętnego (p.4.4.3. normy). Współczynniki długości wyboczeniowych dla wyboczenia giętnego pręta są wyznaczane na podstawie tzw. stopni podatności węzłów na obrót oraz na przechył pręta (rozdziały 1. i 2. Załącznika 1 normy).
Możliwe są trzy sposoby określania stopni podatności węzłów dla wyboczenia w płaszczyźnie układu (κ_a - węzła A, κ_b - węzła B, κ_v - na przechył pręta)

1. **Normowy** - ściśle wg zaleceń zawartych w rozdziale 2 Załącznika 1 normy - zalecany w przypadkach, gdy uwarunkowania pręta w pełni odpowiadają przypadkom opisanym w normie.
2. **Mechaniczny** - zgodny z klasyczną teorią stateczności pręta przy wyboczeniu giętym. W tym przypadku współczynniki podatności węzłów wyznaczane są na podstawie rzeczywistych sztywności węzłów pręta w sposób opisany instrukcji obsługi modułu **rm-win**. Metoda ta jest zalecana w sytuacji, gdy uwarunkowania pręta wykraczają poza przypadki opisane w normie lub gdy w szczególnej sytuacji zalecenia normy są zbyt rygorystyczne, a rzeczywista forma utraty stateczności układu nie odpowiada przyjętej w normie.
3. **Ręczny** - polegający na bezpośrednim zadaniu przez użytkownika wartości stopni podatności pręta, np. obliczonych we własnym zakresie.

Dla **normowego** sposobu wyznaczania współczynników podatności układu na obrót węzłów istotny jest zarówno sposób połączenia prętów przylegających jak i ich warunki na przeciwległych (dalekich) końcach. Ważne jest, aby schemat pręta przylegającego odpowiadał rzeczywistym warunkom kinematycznym na przeciwległym końcu. Jeśli np. przylegający pręt jest sztywno połączony z wymiarowanym prętem, a na przeciwległym końcu jest podparty przegubowo, to jego schemat powinien być sztywno-przegubowy (Rys.4.). Odpowiedniego deklaruwania właściwych schematów statycznych prętów należy dokonać w opcji **Geometria-Pręty** programu głównego RM-WIN.



Rys. 4.

Sprawdzenie czy układ jest *przesuwny* ze względu na wyboczenie analizowanego pręta odbywa się poprzez wyznaczenie podatności układu na przesuw w kierunku prostopadłym do pręta. Następnie przyjmowana jest podatności $\kappa_v = 1$ dla układów przesuwnych i $\kappa_v = 0$ - dla nieprzesuwnych.

Powyższe uwagi nie dotyczą wyznaczania współczynników podatności węzłów w sposób *mechaniczny*.

Dla określenia współczynnika długości wyboczeniowej pręta przy jego wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ustroju, wartości stopni podatności muszą być zadane przez użytkownika, a domyślnie są one inicjowane przez program jako równe odpowiednio $\kappa_a = 1$, $\kappa_b = 1$, $\kappa_v = 0$, co odpowiada schematowi pręta dwustronnie przegubowego bez możliwości przechyłu.

Wartości stopni podatności muszą się zawierać w granicach od **0** do **1**, co wynika z ich definicji, a mianowicie:

$$\kappa = \frac{K_c}{K_c + K_o} \quad - \text{ dla stopni podatności węzłów, gdzie}$$

K_c = (moment bezwładności przekroju / długość obliczeniowa pręta) jest sztywnością pręta, a K_o jest sztywnością zamocowania pręta na obrót węzła oraz

$$\kappa = \frac{K_c}{K_c + K_v} \quad - \text{ dla stopnia podatności na przesuw, gdzie } K_v$$

jest sztywnością zamocowania pręta na przesuw.

Jeśli pręt nie ma oporu na obrót w węźle (przegub), a więc $K_o = 0$ lub na przesuw (obustronnie przegubowy), a więc $K_v = 0$, to wartości stopni podatności są równe **1**, natomiast gdy pręt jest całkowicie zamocowany w węźle (sztywne zamocowanie), a więc $K_o = \infty$ lub nieprzesuwny (węzły pręta nieprzesuwne), a więc $K_v = \infty$, to stopnie podatności są równe **0**.

Na podstawie stopni podatności węzłów wyznaczany jest współczynnik długości wyboczeniowej μ jako rozwiązanie zagadnienia wyboczenia pręta podpartego sprężystości o zadanych wartościach podatności sprężyn. Metoda ta jest w pełni zgodna z diagramami zawartymi na Rys. Z1-3 normy dla $\kappa_v = 1$ i $\kappa_v = 0$.

Współczynnik długości wyboczeniowej oraz obliczeniowa długość pręta dla wyboczenia skrętnego nie są przez moduł RM-STAL wyznaczane (ze względu na płaskość zagadnienia, czyli bez uwzględnienia skręcania), a więc muszą być bezpośrednio podane przez użytkownika na

podstawie odrębnej analizy. Domyślnie współczynnik długości wyboczeniowej dla wyboczenia skrętnego jest równy **1**, a długość obliczeniowa w tym względzie jest równa długości teoretycznej pręta, jak dla wyboczenia giętnego (czyli równa odległości między węzłami pręta).

Długość obliczeniowa pręta L_o może być w tym kontekście zmieniona stosownie do rzeczywistych warunków podparcia pręta i to niezależnie w obu kierunkach. Dzięki temu można np. dokonać zmniejszenia długości obliczeniowej pręta biorąc pod uwagę odległość w świetle podparć, połączeń lub dodatkowych stężeń albo zwiększenia długości pręta np. przy braku stężeń pasa górnego kratownicy w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ustroju.

W oknie kontekstów wymiarowania wyświetlane są:

κ_a - stopień podatności pręta na obrót węzła *A*,

κ_b - stopień podatności pręta na obrót węzła *B*,

κ_p - stopień podatności pręta na przesuw,

L_o - długość obliczeniowa pręta,

μ - współczynnik długości wyboczeniowej,

dla wyboczenia giętnego pręta odpowiednio w płaszczyźnie ustroju i płaszczyźnie prostopadłej oraz

μ_ω - współczynnik długości wyboczeniowej dla wyboczenia skrętnego lub giętnoskrętnego (zwichrzenia),

L_ω - długość obliczeniowa pręta ze względu na wyboczenie skrętne lub giętnoskrętne (zwichrzenie).

Zakres: Pręty, w których występuje ściskająca siła osiowa.

Elementy sterowania: Elementami sterowania są:

Pary edycyjne pól liczbowych:

κ_a : - stopień podatności pręta na obrót węzła *A*,

κ_b : - stopień podatności pręta na obrót węzła *B*,

κ_p : - stopień podatności pręta na przesuw,

L_o : - długość obliczeniowa pręta,

dla wyboczenia giętnego pręta odpowiednio w płaszczyźnie ustroju i płaszczyźnie prostopadłej.

Edycyjne pole liczbowe:

μ_ω : - współczynnik długości wyboczeniowej dla wyboczenia skrętnego lub giętnoskrętnego (zwichrzenia),

L_{ω} : - długość obliczeniowa pręta ze względu na wyboczenie skrętne lub giętnoskrętne (zwichrzenie).

Przełączniki wyboru:

wg PN - dla obliczeń stopni podatności węzłów dla wyboczenia pręta w płaszczyźnie układu ściśle wg wymagań i zaleceń normy PN-90/B-03200 (Załącznik 1).

wg mechaniki - dla obliczeń stopni podatności według rzeczywistych sztywności węzłów pręta,

zadane - współczynnik długości wyboczeniowej wyznaczany jest dla określonych przez użytkownika stopni podatności węzłów pręta.

Funkcja Wyszukaj: Nieaktywna.

Uwagi: Przy zmianie wymiarów lub nominału katalogowego przekroju oraz przy zmianie schematu statycznego układu aktualizowane są wartości stopni podatności pręta dla wyboczenie w płaszczyźnie ustroju wyznaczone w sposób *normowy* lub *mechaniczny*. Przy *mechanicznym* sposobie wyznaczania tych podatności dodatkowo aktualizacja następuje przy każdej zmianie obciążeń ustroju.

Powyższe uwagi nie dotyczą *ręcznego* sposobu określania współczynników podatności węzłów dla wyboczenia pręta w płaszczyźnie układu i w płaszczyźnie prostopadłej do układu.

Nośność na ściskanie

Odniesienie: Punkt 4.4.5. - Nośność (stateczność) elementów ściskanych.

Komentarz: Ten *kontekst* wymiarowania dotyczy warunku (39) nośności elementu (pręta) na ściskanie, którego stateczność analizowana jest w aspekcie wyboczenia:

- giętnego w obu kierunkach - dla wszystkich typów przekrojów,
- skrętnego - dla otwartych przekrojów jednoząłazowych,
- giętno-skrętnego - dla przekrojów ceowych, kątownikowych i teowych.

Przy czym do warunku nośności brany jest najniekorzystniejszy przypadek wyboczenia.

W *Oknie kontekstów wymiarowania* wyświetlane są:

- A - pole powierzchni przekroju brutto,
 - ψ - współczynnik redukcji nośności przekroju przy ścisaniu (dla przekrojów klasy 1,2,3 $\psi = 1$)
 - N_{Re} - nośność obliczeniowa przekroju przy osiowym ścisaniu pręta,
 - N - wartość siły osiowej działającej w przekroju wskazywanym przez znacznik przekroju w oknie schematu pręta,
- oraz
- l_w - długości wyboczeniowa pręta,
 - λ - smukłości pręta dla obu kierunków wyboczenia,
 - $\bar{\lambda}$ - smukłości względne pręta dla obu kierunków wyboczenia,
 - N_{cr} - siły krytyczne dla obu kierunków wyboczenia,
 - $N_{cr,z}$ - siła krytyczna dla wyboczenia skrętnego,
 - φ - minimalna wartość współczynnika niestateczności ogólnej,

Relacja warunku nośności pręta na ścisanie.

Zakres:

Pręty, w których działa ścisająca siła osiowa.

Elementy sterowania:

Listy wyboru **Krzywe** - umożliwiają dobór krzywych niestateczności ogólnej (odpowiednio w płaszczyznach wyboczenia **X**: i **Y**:) w sytuacji gdy ustalone przez program krzywe nie odpowiadają warunkom analizowanego zadania. Konieczność doboru krzywych przez użytkownika może mieć miejsce w przypadku wymiarowania tzw. przekrojów **jednogałęziowych składanych** z kilku kształtowników, dla których program domyślnie przyjmuje krzywe niekorzystne "c". Wynika to z tego, że program nie dokonuje identyfikacji kształtu przekroju składanego, np. program nie rozpozna faktu, że użytkownik "złożył" dwuteownik z pojedynczych blach. Dlatego przy tworzeniu listy przekrojów należy unikać "składania" przekrojów typowych, a więc takich, które mogą być deklarowane jako jednokształtownikowe.

Domyślnie, listy te nie są aktywne i w celu ich uaktywnienia należy włączyć przełącznik **Zadane**.

Przełącznik **wyżarzanie**. - określa sposób doboru krzywych niestateczności ogólnej dla spawanych przekrojów skrzynkowych i dwuteowych.

Funkcja Wyszukaj:

Wyszukuje przekrój pręta, w którym warunek nośności pręta na ścisanie jest najbardziej niekorzystny.

Zwicherungie

- Odniesienie:** Punkty 4.5.3., 4.5.4. oraz punkty 3.2. i 3.3 Załącznika 1.
- Komentarz:** Pozwala na wyspecyfikowanie wielkości potrzebnych do wyznaczenia momentu krytycznego przy zwicherungiu, które są wykorzystywane przy sprawdzaniu warunku nośności (stateczności) przy zginaniu.
- Wielkości krytyczne są wyznaczane ze wzorów (Z1-4) do (Z1-9) na podstawie współczynników długości wyboczeniowych określonych w kontekście **Długości wyboczeniowe** oraz wielkości tablicowych A_1 , A_2 i B , określających schemat pręta na zwicherungie, które użytkownik powinien zadać, posługując się Tablicą Z1-2. Ponadto, można dodatkowo określić współrzędną punktu przyłożenia obciążenia a_o względem środka ciężkości przekroju, co ma wpływ na wartość momentu krytycznego. Wielkość ta jest zawsze związana z kierunkiem osi y - Y , czyli z osią mniejszego momentu bezwładności. Oznacza to, że znak wartości a_o należy przyjmować tak jak dla współrzędnej y punktu przyłożenia obciążenia.
- Domyślnie wielkości, o których tu mowa, są wyzerowane, co oznacza, że pręt jest zabezpieczony przed zwicherungiem, czyli smukłość względna na zwicherungie jest równa zero, a obciążenia przyłożone są do osi geometrycznej pręta.
- Okno kontekstów wymiarowania zawiera następujące informacje:
- μ_y - współczynnik długości wyboczeniowej dla wyboczenia giętnego z płaszczyzny y - Y , określany w kontekście **długości wyboczeniowe**,
 - μ_ω - współczynnik długości wyboczeniowej dla wyboczenia giętno-skrętnego, określany w *kontekście długości wyboczeniowe*,
 - β_x - współczynnik momentu dla zginania momentem M_x zależny od rozkładu momentów zginających, określany w *kontekście nośność przy ściskaniu ze zginaniem*,
 - A_1 , A_2 , B - wielkości tablicowe (Tablica Z1-2) zależne od schematu pręta na zwicherungie,
 - a_o - współrzędna środka przyłożenia obciążenia względem środka ciężkości przekroju, a odmierzana na osi y - Y przekroju pręta,
 - $N_{cr,z}$ - siła krytyczna dla wyboczenia skrętnego,

$N_{cr,y}$ - siła krytyczna dla wyboczenia giętnego w płaszczyźnie mniejszego momentu bezwładności,

M_{cr} - obliczony moment krytyczny dla wyboczenia giętno-skrętnego, który - w przypadku zerowej smukłości - jest liczbą równą 1×10^{30} .

$\bar{\lambda}_L$ - smukłość względna pręta na zwichrzenie,

Zakres: Pręty o przekrojach jednogałęziowych otwartych, zginane w płaszczyźnie większego momentu bezwładności przekroju.

Elementy sterowania: Edycyjne pola liczbowe dla:

A1:, A2:, B: - dla podania wartości liczbowych współczynników tablicowych **A1, A2, B**,

ao: - współrzędna przyłożenia obciążenia na osi y-Y,

Przycisk:

Tablica Z1-2 - umożliwia ustalenie wielkości **A1, A2 i B** dla normowych przypadków schematu i obciążenia pręta na podstawie tablicy zawartej w załączniku 1 normy. Po naciśnięciu tego przycisku na ekranie wyświetlane jest okno, w którym można dokonać wyboru odpowiedniej pozycji tablicy Z1-2. Zaakceptowanie wyboru przy pomocy przycisku **OK** powoduje przeniesienie wielkości **A1, A2 i B** do kontekstu wymiarowania *zwichrzenie*.

Jeżeli z tablicy Z1-2 wybrany zostanie przypadek momentów stałych lub zmiennych liniowo, wówczas będzie następować automatyczna aktualizacja wielkości A1, A2 i B na podstawie współczynnika β przy każdej zmianie rozkładu momentów zginających. Uwaga ta nie dotyczy pozostałych przypadków zwichrzenia oraz sytuacji, gdy którakolwiek z wielkości A1, A2 i B zostanie zmieniona ręcznie.

Funkcja Wyszukaj: Nieaktywna.

Nośność (Stateczność) przy zginaniu

Odniesienie: Punkt 4.6.2.

Komentarz: Ten *kontekst wymiarowania* łączy się bezpośrednio z warunkiem nośności (54) i ma również ścisły związek z *kontekstem Zwichrzenie*. Jeśli warunki statyczne i kinematyczne pręta nie odpowiadają żadnemu przypadkowi określone w normie, to uwzględnienie zwichrzenia może być dokonane w tym kontekście przez bezpośrednie podanie wartości smukłości względnej przy zwichrzeniu otrzymanej na drodze odrębnej analizy.

Część informacyjna *okna kontekstów wymiarowania* zawiera:

ψ - współczynniki redukcji nośności przekroju na zginanie,

M_R - nośności przekroju na zginanie,

M - wartości momentów zginających w przekroju wskazywanym przez znacznik przekroju pręta,

N_R - nośność przekroju na ściskanie,

N - wartość siły osiowej w przekroju wskazywanym przez znacznik przekroju pręta,

ϕ_L - współczynnik zwichrzenia,

Relację warunku nośności (54).

Zakres: Pręty zginane.

Elementy sterowania: Edycyjne pole liczbowe λ : dla podania wartości smukłości względnej na zwichrzenie,

Przełącznik wyboru **Spawanie zmech.**, od którego zależy wybór krzywej niestateczności (krzywa „a” lub „a₀”).

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój, dla którego warunek nośności *kontekstu* jest najniekorzystniejszy.

Nośność przy ścisaniu ze zginaniem

Odniesienie: Punkt 4.6.

Komentarz: Łączy się bezpośrednio z warunkiem nośności (58), który jest sprawdzany w obu płaszczyznach głównych przekroju. Współczynniki momentów zginających β_x i β_y są wyznaczane przez program na podstawie rozkładu momentów zginających w obu płaszczyznach, według zasad określonych w Tabeli 12, ale - jeśli tego wymaga szczególna sytuacja - to mogą być one przez użytkownika zmienione. Sposób wyznaczania współczynników β jest zależny od warunków połączenia pręta w węzłach (pręt zamocowany; pręt o warunkach przesuwnych). Warunki te są określone poprzez współczynniki podatności węzłów, które wyznaczane są w kontekście *Długości wyboczeniowe*.

Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:

Δ - składniki poprawkowe warunków nośności w obu kierunkach,

$\bar{\lambda}$ - smukłości względne dla wyboczenia giętnego w obu kierunkach,

- φ - współczynniki wybozeniowe dla obu kierunków,
 M_R - nośności przekroju na zginanie w obu kierunkach,
 M_{max} - maksymalne momenty zginające wyznaczone na podstawie ich rozkładów wzdłuż osi pręta.
 N_{RC} - nośność przekroju na ściskanie,
 $\bar{\lambda}_L$ - smukłość względna przy zwichrzeniu, ustalana w *kontekście zwichrzenie* lub zadawana bezpośrednio w *kontekście nośność (stateczność) przy zginaniu*,
 l_I - rozstaw stężeń zabezpieczających przekrój przed obrotem. Wielkość ta pozwala na uwzględnienie stateczności giętno-skrętnej przekrojów otwartych bez osi symetrii - zgodnie z punktem 4.6.2b. normy.
 φ_L - współczynnik zwichrzenia,

Relacje warunków nośności kontekstu dla obu kierunków.

Zakres: Pręty zginane przy udziale siły ściskającej.

Elementy sterowania: Edycyjne pola liczbowe dla podania wartości współczynników momentów β (jeśli ich wartości obliczone automatycznie przez program nie odpowiadają szczególnym warunkom pracy pręta). Aby przywrócić automatyczny tryb wyznaczania wartości tych współczynników, należy je wyzerować.

Przełącznik **Uwzględniaj przy wyszukiwaniu**, który pojawia się w *oknie kontekstów* w przypadku wymiarowania pręta o zmiennym przekroju. Pozwala on na wyłączenie warunku (58) z listy kontekstów, tak aby nie był on brany pod uwagę (patrz: "Wskazówki dotyczące wymiarowania") w procedurach ustalania najbardziej niekorzystnego warunku nośności wymiarowanego pręta.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój, dla którego warunki nośności *kontekstu* (warunek 58 normy) są najniekorzystniejsze.

Wyszukiwanie przekroju - w tym przypadku - nie dotyczy bezpośrednio wprost relacji warunku 58 normy, ponieważ warunek ten ma charakter globalny, lecz polega na ustaleniu nośności przekroju na zginanie w sytuacji, gdy rozkład momentów zginających jest dwuznakowy, a przekrój pręta ma różną nośność dla momentów dodatnich i ujemnych, co ma miejsce w przypadku przekroju klasy 4. Niestety, norma nie określa jednoznacznie jak w

takich przypadkach należy ustalać nośność przekroju na zginanie. W związku z tym przyjęto zasadę, że w przypadku jednoznakowego rozkładu momentów zginających nośność przekroju wyznaczana jest odpowiednio do znaku momentu, natomiast w przypadku rozkładu dwuznakowego - dla znaku dającego bardziej niekorzystną relację warunku 58.

Nośność na ścinanie

Odniesienie:	Punkt 4.2.3.
Komentarz:	<p>W tym kontekście wymiarowania sprawdzana jest nośność pręta wynikająca z nośności ścianek ścinanych jego przekroju.</p> <p>Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:</p> <p>φ_{ν} - współczynniki niestateczności przy ścinaniu w obu kierunkach wyznaczone na podstawie względnych smukłości ścianek czynnych na ścinanie,</p> <p>A_{ν} - pola przekrojów czynnych przy ścinaniu (Tablica 7),</p> <p>V_R - nośność przekroju na ścinanie w obu kierunkach,</p> <p>V - siły poprzeczne działające w przekroju w obu kierunkach.</p>
Zakres:	Pręty o przekrojach wyszczególnionych w Tablicy 7, w których działa siła poprzeczna.
Elementy sterowania:	Brak.
Funkcja Wyszukaj:	Wyszukuje przekrój, dla którego warunki nośności kontekstu są najniekorzystniejsze.

Nośność na zginanie ze ścinaniem

Odniesienie:	Punkt 4.5.6.
Komentarz:	<p>Obejmuje obliczenia związane ze sprawdzaniem warunków nośności określonych wzorami (55) i (56).</p> <p>Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:</p> <p>M_R - nośności obliczeniowe przekroju na zginanie w obu kierunkach,</p> <p>$M_{R,\nu}$ - zredukowane nośności obliczeniowe przekroju na zginanie z uwzględnieniem działania siły poprzecznej - w obu kierunkach,</p>

- M - wartości momentów zginających działających w przekroju - w obu kierunkach,
- V_R - nośności obliczeniowe przekroju na ścinanie w obu kierunkach
- V_o - wartości odniesienia dla sił poprzecznych, powyżej których uwzględniana jest redukcja nośności obliczeniowej przekroju na zginanie,
- V - wartości sił poprzecznych w przekroju pręta w obu kierunkach,
- N_R - nośność obliczeniowa przekroju na ściskanie lub rozciąganie,
- N - wartość siły osiowej działającej w przekroju pręta, Relacja warunku (55) oraz relacje warunku (56) w obu kierunkach.

Zakres: Pręty zginane, w których działa siła poprzeczna.

Elementy sterowania: Brak.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój, dla którego warunki nośności *kontekstu* są najniekorzystniejsze.

Środek pod obciążeniem skupionym

Odniesienie: Punkt 4.2.4. dla przekrojów spawanych lub punkt 6.4.1. dla elementów walcowanych.

Komentarz: Dotyczy sprawdzenia warunku nośności środka przekroju obciążonego siłą skupioną. Sprawdzeniu tego warunku towarzyszy przeszukanie obciążeń w celu ustalenia najniekorzystniejszej działającej siły skupionej. Jeśli pręt nie jest obciążony żadną siłą skupioną, to do warunku nośności brane są poprzeczne siły przywęzłowe. Dodatkowo należy określić szerokość c na jakiej rozłożona jest siła skupiona. Dla pręta o spawanym przekroju dwuteowym można również określić odstęp między żebrami krótkimi a_I .

Dla ustrojów typu belka ciągła jako przywęzłowe siły skupione działające w płaszczyźnie ustroju, zamiast siły poprzecznej, brana jest reakcja podporowa. Zachodzi to, gdy spełnione są następujące warunki:

- w danym węźle rozpatrywany pręt połączony jest tylko z jednym prętem,
- pręt sąsiedni jest współliniowy z rozpatrywanym i posiada tę samą orientację,

- pręt sąsiedni ma przekrój o tym samym numerze co pręt rozpatrywany,
- jedna z głównych osi bezwładności przekroju leży w płaszczyźnie ustroju,
- węzeł jest podparty.

Powyższe warunki badane są oddzielnie dla obu węzłów pręta.

Dla przekrojów zawierających więcej niż jeden średnik, rozdział siły skupionej na poszczególne średniki odbywa się na podstawie ich grubości oraz ich orientacji względem kierunku działania siły. Dla końców pręta obciążonego w dwóch płaszczyznach, zamiast reakcji w węzłach pręta, do obliczeń brana jest ich wypadkowa, a rozdział siły skupionej zależy od orientacji średników względem tej wypadkowej.

Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:

- c_o - szerokość na jaką rozkłada się obciążenie skupione działające na średnik,
- PRC,red - zredukowana nośność średnika pod obciążeniem skupionym,
- P - wartość siły skupionej, która jest ustalana przez program poprzez przeszukanie sił skupionych przypisanych do pręta w opcji **Obciążenia-Definiowanie** programu głównego oraz przywęzłowych sił poprzecznych.

Relację warunku nośności średnika pod obciążeniem skupionym.

Zakres:

Pręty o przekrojach posiadających średnik i obciążonych siłami skupionymi.

Elementy sterowania: Edycyjne pola liczbowe:

- c - długość linii rozkładu obciążenia skupionego działającego na zewnętrznej powierzchni przekroju,
- $a1$ - odległość między żebrami krótkimi (jeśli takie są projektowane) - domyślnie wielkość ta jest równa długości pręta, co oznacza, że nie ma żeber krótkich.

Przełącznik **zebra lub zebra krótkie** określa czy w miejscu działania siły skupionej występują zebra. Jeżeli

przełącznik jest zaznaczony, to wartość siły skupionej jest wyzerowana.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje punkt przyłożenia obciążenia skupionego, dla którego warunek nośności *kontekstu* jest najniekorzystniejszy. Jeśli na pręcie nie zadano obciążeń skupionych, to brane są pod uwagę przywęzłowe siły poprzeczne w pręcie,

Środek w złożonym stanie naprężenia

Odniesienie: Punkt 4.2.5.

Komentarz: Obejmuje zagadnienie stateczności środka w złożonym stanie naprężenia, co polega na sprawdzeniu warunku (24).

Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:

ϕ_p - współczynnik niestateczności środka wyznaczony na podstawie jego smukłości względnej,

N_w - część siły podłużnej przypadającej na środek,

N_{RW} - nośność obliczeniowa środka przy ściskaniu,

M_w - część momentu zginającego w przekroju przypadającego na środek,

M_{RW} - nośność obliczeniowa środka na zginanie,

P - wartość obciążenia skupionego (jeśli działa w danym przekroju),

P_R - nośność obliczeniowa środka obciążonego siłą skupioną,

V - wartość siły poprzecznej w przekroju,

V_R - nośność obliczeniowa przekroju przy ścinaniu siłą poprzeczną,

Relację warunku (24) nośności środka w złożonym stanie naprężenia.

Zakres: Pręty o dwuteowym przekroju spawanym klasy 4.

Elementy sterowania: Przełącznik wyboru **Żebra krótkie**, dla ewentualnego wybrania opcji obliczeń, dla których nie uwzględnia się sił skupionych działających na środek, tzn. projektowane jest jego wzmocnienie żebrami krótkimi.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje przekrój pręta, w którym relacja warunku nośności środka w złożonym stanie naprężenia (24) jest najniekorzystniejsza,

Stan graniczny użytkowania

- Odniesienie:** Punkt 3.3.
- Komentarz:** Dotyczy sprawdzania warunków stanu granicznego użytkowania w zakresie ugięć pręta i przemieszczeń poziomych węzłów. Szczególną cechą tego kontekstu wymiarowania jest to, że przemieszczenia służące do sprawdzania warunków SGU wyznaczone są zawsze wg teorii I-go rzędu dla charakterystycznych wartości obciążeń. Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:
- a - największe ugięcie osi pręt,
 - a_{gr} - graniczna wartość ugięcia pręta,
 - h - wysokość poziomu jednego z dwóch węzłów A lub B, dla którego jest większa wartość stosunku u/h (wysokość ta liczona jest od najniższej położonego węzła układu),
 - U - przemieszczenie poziome węzła, dla którego wyznaczono wysokość h ,
 - U_{gr} - graniczna wartość przemieszczenia poziomego węzła,
- Relację warunków stanu granicznego użytkowania.
- Zakres:** Wszystkie przypadki.
- Elementy sterowania:** Przełącznik wyboru: **Ugięcia liczone od cięciwy pręta**, umożliwia wyznaczenie ugięć pręta z pominięciem jego ruchu sztywnego, tzn. z pominięciem przemieszczeń jego węzłów. Wyłączenie tego przełącznika powoduje wyznaczenia ugięć, jako całkowite przemieszczenia prostopadłe do pręta. Przełącznik ten jest niedostępny, gdy zadane jest zginanie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny układu, a pręt w tym kierunku jest prętem przesuwным ($\kappa v > 0,1$).
- Edycyjne pola liczbowe:
- L - długości porównawcze, służące do określenia granicznej wartości ugięć pręta jako iloczynów granicznych wartości względnych i długości porównawczych L w obu płaszczyznach. Konieczność podania większej wartości L niż teoretyczna długość pręta może zaistnieć np.: dla wspornika (gdy zdefiniowany pręt stanowi tylko część elementu konstrukcji); dla kratownic (gdy wskazane jest dokonanie porównania wielkości maksymalnego przemieszczenia pionowego pręta do rozpiętości kratownicy).

Listy ograniczeń normowych: zawierają graniczne wartości względne, ograniczające ugięcia pręta oraz przemieszczenia poziome węzłów. Służą one do ustalenia granicznych wartości przemieszczeń.

Funkcja Wyszukaj: Nieaktywna,

Łączniki - smukłości zastępcze

Odniesienie: Punkt 4.7.

Komentarz: Grupuje dane i wyniki obliczeń dotyczące smukłości i współczynników redukcji nośności elementów łączących (przewiązki lub skratowania) gałęzie prętów o typowych przekrojach wielogałęziowych. Dla większości przekrojów wielogałęziowych możliwy jest wybór typu łącznika i w zależności od tego wyboru (przewiązki lub skratowania) należy określić jego wymiary (w przypadku przewiązek) lub katalogowy rozmiar kształtownika (w przypadku skratowania) oraz wymiar określający ich rozmieszczenie wzdłuż pręta.

Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:

λ_w - smukłość gałęzi,

λ_m - smukłość zastępcza pręta przy wyboczeniu względem osi nieprzecinającej materiał,

Współczynniki:

φ_p - niestateczności miejscowej gałęzi przekroju,

φ_l - współczynnik wyboczeniowy dla pojedynczej gałęzi między przewiązkami lub węzłami skratowania,

Współczynniki redukcji nośności:

ψ_o - na ściskanie,

ψ_x - na zginanie względem osi x - X ,

ψ_y - na zginanie względem osi y - Y ,

Zakres: Pręty o typowych (generowanych) przekrojach wielogałęziowych.

Elementy sterowania: Grupa przełączników wyboru: **Przewiązki / Skratowanie L / Skratowanie U** przy pomocy których dokonuje się wyboru rodzaju łącznika gałęzi przekroju.

Z przełącznikiem **Przewiązki** związane są liczbowe pola edycyjne określające:

b: - szerokość przewiązki,

g: - grubość przewiązki,

L1: - osiowy rozstaw przewiązek wzdłuż pręta.

Z przełącznikiem **Skratowanie L** związane są:

Lista kątowników dla wyboru nominału kątownika katalogowego dla łącznika,

L1: - długość pola skratowania.

Z przełącznikiem **Skratowanie U** związane są:

Lista ceowników dla wyboru nominału ceownika katalogowego dla łącznika,

L1: - długość pola skratowania.

Dodatkowo, przy wyborze łączników jako skratowanie, udostępniany jest przełącznik wyboru **Skratowanie 8b**, dla wskazania, że chodzi o skratowanie odpowiadające schematowi *b*) na Rys.8 normy. Dodatkowo przyjęto, że skratowania mają zawsze pręty poziome.

Funkcja Wyszukaj: Nieaktywna,

Nośność łączników

Odniesienie: Punkt 4.7.3. oraz 4.4.5. - dla skratowań.

Komentarz: W zależności od zadeklarowanego typu łączników (przewiązki lub skratowania) sprawdzane są relacje wyznaczonych sił w łącznikach do ich nośności. Przy czym o nośności przewiązek decydują moment zginający i siła poprzeczna, natomiast w prętach skratowania - ściskająca siła osiowa wyznaczana na podstawie obliczeniowej siły poprzecznej działającej w pręcie.

Część informacyjna okna kontekstów wymiarowania zawiera:

Dla przewiązek:

Q - obliczeniowa siła poprzeczna,

M_Q - moment zginający w przewiązce,

V_Q - siła poprzeczna w przewiązce,

M_R - nośność obliczeniowa przewiązki przy zginaniu,

V_R - nośność obliczeniowa przewiązki przy ścinaniu,

Relacje warunków nośności przewiązek na zginanie i ścinanie.

Dla skratowań:

A - pole przekroju krzyżulca skratowania,

N_{RC} - nośność obliczeniowa krzyżulców skratowania,

Q - obliczeniowa siła poprzeczna,

N -wartość ściskającej siły osiowej w krzyżulcu skratowania,

λ - smukłość krzyżulca skratowania,

$\bar{\lambda}$ - smukłość względna krzyżulca skratowania,

φ - współczynnik wyboczeniowy dla krzyżulca skratowania,

Relację warunku nośności krzyżulca skratowania na ściskanie

Zakres: Pręty o typowych (generowanych) przekrojach wielogłazkowych.

Elementy sterowania: Brak.

Funkcja Wyszukaj: Wyszukuje położenie przekroju, w którym relacje warunków nośności dla łączników byłyby najniekorzystniejsze.

Tworzenie dokumentacji wymiarowania - wydruki

Uwagi ogólne

Koncepcję tworzenia dokumentacji wymiarowania prętów konstrukcji oparto na wykorzystaniu zaawansowanych edytorów tekstu dla Windows, takich jak: MS WORD 6.0PL, MS WORD 7.0PL, AMI-PRO 3.1PL, MS WORKS, WORD PERFECT, które są zdolne akceptować (importować ze schowka) dane zapisane w formacie RTF (ang. Reach Text Format). A więc warunkiem koniecznym dla sporządzania wydruków jest posiadanie, zainstalowanego w systemie Windows, takiego edytora. Najlepszym rozwiązaniem w tym względzie jest zainstalowanie edytora MS WORD 6.0PL, dla którego zrealizowano w module RM-STAL funkcję bezpośredniego przekazywania dokumentu.

Idea współpracy modułu RM-STAL z *edytorem* polega na korzystaniu z gotowych plików wzorcowych (umieszczanych w podkatalogu ARKUSZE podczas instalowania modułu RM-STAL). Pliki wzorcowe (*arkusze*) są przygotowane przez autorów programu w edytorze MS WORD 6.0PL (w formacie RTF) i stanowią bazę dla tworzenia dokumentacji wymiarowania. Treść merytoryczna poszczególnych *arkuszy* jest ściśle dostosowana do ogólnej strategii procesu wymiarowania w module RM-STAL i w związku z tym - przy ewentualnych zmianach zawartości *arkuszy*, podejmowanych przez użytkownika, należy się raczej ograniczyć do operacji związanych z formatowaniem tekstów. Bowiem *arkusze* - oprócz akapitów zwykłego tekstu zawierają sekcje ze specjalnymi polami, w miejsce których podstawiane są przez moduł RM-STAL różne wartości liczbowe, wyrażenia, relacje i rysunki.

Tworzenie dokumentu

Tworzenie dokumentu jest możliwe na każdym etapie wymiarowania, a więc od momentu uruchomienia modułu RM-STAL. W tym celu przewidziano trzy sposoby tworzenia dokumentacji:

- **Bezpośredni** - polegający na przesyłaniu fragmentów dokumentu do edytora MS WORD,
- **Pośredni** - polegający na przesłaniu całego (poskładanego z arkuszy) dokumentu do schowka, z zamiarem „wklejenia” go do *edytora*,
- **Wydruk tabelaryczny** - będący zestawieniem wybranych warunków nośności dla wszystkich prętów układu.

Bezpośredni sposób tworzenia dokumentu

Warunkiem koniecznym tworzenia dokumentu w tym trybie jest uprzednie uruchomienie edytora MS WORD. Jeśli edytor nie został uruchomiony przed uruchomieniem modułu RM-STAL, to można tego dokonać bez potrzeby wychodzenia z aplikacji RM-WIN. W tym celu należy:

1. Przełączyć się na **Menedżer programów** - sekwencyjnie przy pomocy klawiszy **<Alt> + <Tab>** lub za pośrednictwem okna dialogowego **Aplikacje aktywne** menedżera programów - klawisze **<Ctrl> + <Esc>**.
2. Uruchomić edytor MS WORD.
3. Ewentualnie otworzyć właściwy dokument, do którego mają być przekazywane *arkusze wynikowe* wymiarowania. Jeśli tworzony dokument ma być nowym dokumentem, to wskazane jest dokonanie wstępnego sformatowania układu strony.
4. Powrócić do modułu RM-STAL - sekwencyjnie przy pomocy klawiszy **<Alt> + <Tab>** lub za pośrednictwem okna dialogowego **Aplikacje aktywne Menedżera programów** - klawisze **<Ctrl> + <Esc>**.

Od tego momentu można przekazywać fragmenty dokumentu do edytora MS WORD, co polega na używaniu przycisku **Do Worda** okna dialogowego modułu RM-STAL. Obowiązują przy tym następujące zasady:

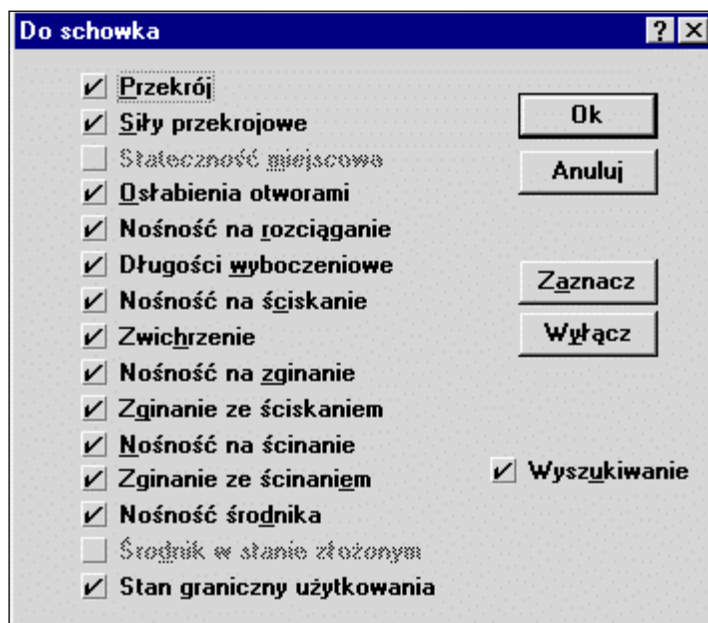
- Przesyłany *arkusz* jest ściśle związany z aktualnym kontekstem wymiarowania, tzn. jeśli np. aktualnym *kontekstem* wymiarowania jest *kontekst Cechy przekroju*, to użycie przycisku **Do Worda** spowoduje przesłanie - do aktywnego dokumentu edytora MS WORD - *arkuszy wynikowych* związanych z tym *kontekstem*. Przed przesłaniem *arkuszy* wykonywane są obliczenia związane z aktualnym *kontekstem*, w wyniki podstawiane są w odpowiednie pola *wynikowe arkuszy*.
- Przesyłany *arkusz* jest zawsze umieszczany w aktywnym dokumencie edytora MS WORD w miejsce wskazywane przez kursor tego dokumentu. Oznacza to, że dokument wymiarowania może być składany swobodnie.
- Wszelkie czynności związane z nadaniem dokumentowi formy edytorskiej muszą być przeprowadzane w edytorze, co pozostaje w gestii użytkownika.

Pośredni sposób tworzenia dokumentu

Tworzenie dokumentu w tym trybie odbywa się za pośrednictwem schowka i powinien być używany przy współpracy modułu RM-STAL z innymi edytorami niż MS WORD. Czynności jakie należy wykonać dzielą się na dwa etapy:

1. Przekazanie do schowka dokumentu poskładanego z arkuszy wynikowych, co wymaga:
 - użycia przycisku **Do schowka** okna dialogowego modułu RM-STAL, co spowoduje wyświetlenie okna dialogowego przełączników wyboru zawartości dokumentu (Rys.5.),
 - wyspecyfikowania zawartości przekazywanego dokumentu za pomocą przełączników wyboru okna dialogowego z ewentualną klauzulą automatycznego wyszukiwania po przecie najniekorzystniejszych relacji warunków nośności.
 - przesłania dokumentu do schowka - przycisk **OK** okna dialogowego wyboru.

2. Przełączenie **Menedżera programów** na aplikację edytora lub - jeśli edytor nie został uruchomiony - uruchomienie edytora.
3. Zastosowanie funkcji edytora „wklejania” ze schowka.
4. Przetworzenie dokumentu w edytorze i wydruk.



Rys. 5.

Uwagi: Po złożeniu dokumentu przez moduł RM-STAL następuje przekazanie go do schowka. Od tego momentu kontrolę nad dalszym procesem przejmuje system Windows. W przypadku komputera o małej pamięci lub przy większej liczbie uruchomionych aplikacji, ładowanie dokumentu do schowka wymagać będzie dłuższego czasu, co może sprawiać wrażenie zawieszenia się systemu Windows. Należy jednak odczekać aż do momentu zamknięcia przez system okna dialogowego przełączników wyboru.

Pośredni sposób tworzenia dokumentu wymiarowania dotyczy również edytora MS WORD.

Jeśli przełącznik **Wyszukiwanie** okna dialogowego przełączników wyboru jest włączony to w trakcie przed dołączeniem kolejnego arkusza wynikowego do dokumentu, dokonywane jest automatyczne wyszukiwanie po przecie dla wyznaczenia najniekorzystniejszej relacji warunków nośności w poszczególnych kontekstach wymiarowania. Jeśli przełącznik ten jest wyłączony, to aspekt wymiarowania dotyczy przekroju wskazywanego przez znacznik przekroju w oknie schematu pręta. Odnosi się to, rzecz jasna, do tych kontekstów wymiarowania, których warunki nośności są lokalne, a więc zależne od przekroju.

Wydruk tabelaryczny

Tryb ten umożliwia tworzenie dokumentu w postaci tabelarycznych zestawień nośności wszystkich prętów układu. Może być on szczególnie przydatny dla udokumentowania obliczeń układów zbudowanych w dużej liczbie prętów, np. kratownice. Dla każdego warunku nośności objętego zakresem obliczeń RM-Stal, tworzona jest oddzielna tabela. Oprócz tego możliwe jest wydrukowanie tabeli zawierającej najniekorzystniejsze warunki nośności, tzn. warunki, które decydują o nośności pręta.

Moduł RM-Stal umożliwia wydrukowanie zestawień tabelarycznych dla następujących warunków nośności:

- **Warunki najniekorzystniejsze** - oprócz określenie rodzaju najniekorzystniejszego warunku nośności i stopnia wykorzystania nośności, zawiera diagram nośności prętów.
- **Stateczności miejscowa** - dotyczy punktu 4.2.2 normy i zawiera określenie klasy przekroju.
- **Nośności na zginanie** - dotyczy warunku (52) i (54) normy.
- **Zginanie ze ścinaniem** - dotyczy warunku (55) normy.
- **Nośność na ścinanie** - dotyczy punktu 4.2.3 normy.
- **Ścinanie z siłą osiową** - dotyczy warunku (56) normy.
- **Nośność na rozciąganie** - dotyczy punktu 4.3 normy.
- **Nośność na ściskanie** - dotyczy punktu 4.4 normy.
- **Ściskanie ze zginaniem** - dotyczy punktu 4.6 normy. Znaczenie wielkości n_x , m_x i m_y jest następujące:

$$n_x = \frac{N}{\varphi_x N_{RC}}, \quad n_y = \frac{N}{\varphi_y N_{RC}}, \quad m_x = \frac{\beta_x M_{x \max}}{\varphi_L M_{Rx}}, \quad m_y = \frac{\beta_y M_{y \max}}{M_{Ry}}.$$

- **Oslabienia otworami** - dotyczy punktu 4.1.2 normy.
- **Nośność środnika** - dotyczy punktu 4.2.4 i 6.4.1 normy.
- **Środnik w złożonym stanie naprężeń** - dotyczy warunku (24) normy dla przekrojów klasy 4.
- **Nośność łączników** - dostępny tylko dla przekrojów wielogązgowych.
- **Stan graniczny użytkowania** - dotyczy punktu 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 normy.
- **Długości wyboczeniowe** - tabela zawierające informacje dotyczące długości wyboczeniowych przyjętych do obliczeń.

Uwaga: Tabele, ze względu na swój skrótowy i syntetyczny charakter, nie zawierają wszystkich wielkości dotyczących wymiarowania poszczególnych prętów układu.

W celu sporządzenia tabelarycznego wydruku wymiarowania stali należy:

- wywołać opcję **Pliki/Drukuj**,
- zaznaczyć przełącznik **Stal**,
- używając przycisku **Opcje** określić zakres wydruku, tzn. określić, które tabele mają zostać wydrukowane.

Tabele związane z wymiarowaniem stali dołączane są do wydruku tworzonego przez RM-Win, zawierającego dane o ustroju oraz wyniki obliczeń statycznych.

*Uwagi: Uaktywnienie przełącznika **Stal** powoduje automatyczne ustawienie i zablokowanie przełącznika **Obciążenia obliczeniowe**. Oznacza to, że wszystkie warunki stanu granicznego nośności wyznaczone są na podstawie obliczeniowych wartości obciążeń, natomiast warunki stanu granicznego użytkowania - dla wartości charakterystycznych.*

WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE WYMIAROWANIA

W tej części instrukcji omówione zostaną wybrane aspekty wymiarowania konstrukcji stalowych przy użyciu modułu RM-STAL.

Pręty o zmiennym przekroju (pręty niepryzmatyczne)

W programie głównym pakietu RM-WIN istnieje możliwość deklarowania prętów o liniowo zmieniających się wzdłuż pręta wymiarach przekroju (*patrz instrukcja RM-WIN*) oraz dokonywania obliczeń statycznych dla takich prętów. Ponieważ ściskane pręty o zmiennym przekroju nie mogą być wymiarowane na podstawie PN-90/B-03200, poniżej przedstawiona zostanie propozycja algorytmu (uzupełnienie algorytmu normowego) umożliwiającego sprawdzanie stateczności takich prętów.

Propozycja ta polega na sprawdzeniu stateczności technicznej pręta w oparciu o obliczenia wg teorii II rzędu w połączeniu z jawnym określeniem imperfekcji pręta. Została ona opracowana na podstawie literatury opisującej zagadnienia stateczności prętów ściskanych [1], [2].

Zgodnie z literaturą, sprawdzanie stateczności prętów niepryzmatycznych metodą współczynnika wybozeniowego jest niedopuszczalne, a jedyną możliwą metodą jest analiza oparta na teorii II rzędu.

W związku z tym proponuje się sprawdzanie stateczności prętów ściskanych o zmiennym przekroju na podstawie następującego warunku:

$$\frac{N_{(x)}}{N_{RC(x)}} + \frac{M_{(x)}}{M_{R(x)}} \leq 1,$$

w którym:

- $N_{(x)}, M_{(x)}$ - siła osiowa i moment zginający w przekroju o współrzędnej x wyznaczone wg teorii II-go rzędu z udziałem imperfekcji geometrycznych,
 $N_{RC(x)}, M_{R(x)}$ - nośność na ściskanie i na zginanie przekroju o współrzędnej x .

Powyższy warunek odpowiada warunkowi (54) normy dla $\varphi_L = 1$ przy jednokierunkowym zginaniu.

Podstawowe znaczenie dla oceny stateczności wg proponowanej metody mają wartości imperfekcji geometrycznych, które uwzględniają oprócz odchyłek od prostoliniowości pręta i jego wstępnego przechyłu, również naprężenia spawalnicze oraz naprężenia resztkowe powstałe w procesie walcowania. Wszystkie te imperfekcje uwzględniane są w postaci zastępczych imperfekcji geometrycznych jako wstępne wygięcie osi pręta oraz jako wstępne pochylenie pręta. Imperfekcje w postaci pochylenia pręta, mają znaczenie dla układów przesuwnych i można je przyjmować zgodnie z **PN-90/B-03200** p. 5.4.2.

Ponieważ polska norma nie określa wartości imperfekcji w postaci wygięcia pręta, konieczne jest odwołanie się do norm europejskich oraz do propozycji polskiego dokumentu krajowego NAD-PN. Poniżej przedstawiony sposób przyjmowania wartości tej imperfekcji zaczerpnięto z pracy [2] oraz normy DIN 18800 T.2 [3]:

Wstępną strzałkę wygięcia (w_o) można przyjmować o wartości:

Krzywa wybo- czeniowa	wg EC3	wg NAD-PN	wg DIN 18800 T.2
<i>a</i>	$0,21 (\bar{\lambda} - 0,2) k$	$0,17 \bar{\lambda} k$	$l_w / 500$
<i>b</i>	$0,34 (\bar{\lambda} - 0,2) k$	$0,28 \bar{\lambda} k$	$l_w / 250$
<i>c</i>	$0,49 (\bar{\lambda} - 0,2) k$	$0,39 \bar{\lambda} k$	$l_w / 200$
<i>d</i>	$0,76 (\bar{\lambda} - 0,2) k$	$0,61 \bar{\lambda} k$	$l_w / 140$

gdzie:

$k = W/A$ - promień rdzenia przekroju wyrażonym jako stosunek wskaźnika wytrzymałości przekroju (W) do jego pola powierzchni (A),

$\bar{\lambda}$ - smukłość względna pręta,

l_w - długość wybo-
czeniowa pręta.

Powyższa tabela zawiera wartości w_o dla czterech krzywych wybo-
czeniowych używanych w normach europejskich. Krzywe te - na podstawie DIN 18800 T.2. -
dobierane są podobnie jak w PN-90/B-03200, z następującymi różnicami:

- dla spawanych przekrojów skrzynkowych, gdy smukłości blach prostopadłych do kierunku wybo-
czenia $h/t < 30$, przyjmuje się krzywą „c”,
- dla dwuteowników walcowanych, gdy $t > 40$ dla wybo-
czenia w obu kierun-
kach przyjmuje się krzywą „d”
- dla dwuteowników spawanych, gdy $t > 40$ dla wybo-
czenia względem osi x
przyjmuje się krzywą „c”, a względem osi y - krzywą „d”.

W związku z tym w celu sprawdzenia stateczności niepryzmatycznego pręta
ściskanego lub ściiskanego i zginanego przy użyciu pakietu RM-WIN i RM-
STAL należy:

1. Zdefiniować zadanie w module RM-WIN, tzn. określić schemat statyczny
układu, jego obciążenia oraz przekroje prętów (pręty o zmiennym przekroju
muszą mieć przydzielone po dwa przekroje).
2. Określić wartości imperfekcji geometrycznych w opcji **Geometria-
Imperfekcje** programu RM-WIN dla poszczególnych prętów układu. Przyj-
mowanie znaków wartości imperfekcji polega na takim ich dobraniu, aby
uzyskany rozkład imperfekcji był zgodny z przewidywaną formą utraty sta-
teczności układu, tzn. stanowić będzie najniekorzystniejszy przypadek imper-
fekcji. Na przykład dla wspornika imperfekcje w_o i $f_o/L = \psi_o$ powinny
mieć przeciwne znaki. Przyjmując wartość wstępnego wygięcia pręta wg DIN
18800, dla wspornika o długości do 5 m wg krzywej wybo-
czeniowej „b”, otrzyma się:

$$w_0/L = \mu/250 = 0,008 \quad f_0/L = 1/200 = 0,005$$

3. Włączyć obliczenia wg teorii II rzędu (opcja **Wyniki-Teoria II rzędu**).
4. Przejść do opcji **Wyniki/Stal wg PN-90/B-03200**, wybrać pręt o zmiennym przekroju i wywołać moduł wymiarowania.
5. Wybrać kontekst wymiarowania **Nośność (Stateczność) przy zginaniu** i dokonać wyszukiwania przekroju, dla którego warunek (54) jest najniekorzystniejszy. Jeżeli warunek (54) jest spełniony we wszystkich przekrojach pręta, można przyjąć, że stateczność pręta niepryzmatycznego jest zachowana.

Uwaga: Nie należy uwzględniać plastycznej rezerwy nośności przekroju na zginanie dla przekrojów klasy 1 i 2, ponieważ przedstawiona powyżej metoda analizy nie dotyczy zagadnienia stateczności pozasprężystej pręta. W związku z tym przelącznik **Obciążenia statyczne** powinien być wyłączony.

Należy zauważyć, że przedstawiony sposób sprawdzania stateczności prętów pozwala na badanie stateczności giętej dla wyboczenia w płaszczyźnie układu. Oznacza to, że w celu sprawdzenia stateczności pręta dla wyboczenia w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu, należy dokonać dodatkowej analizy. Polegać ona może na zdefiniowaniu odrębnego pręta o warunkach węzłowych odpowiadających rzeczywistym warunkom węzłowym dla pręta przy zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu. Przekroje przydzielone do tego pręta powinny być obrócone o 90°. Po właściwym obciążeniu pręta można sprawdzić jego stateczność w opisany wcześniej sposób.

Literatura:

- [1] Stanisław Weiss, Marian Giżejowski: Stateczność konstrukcji metalowych. Arkady Warszawa 1991.
- [2] Zbigniew Mendera: Częściowe współczynniki bezpieczeństwa i modele obliczeniowe konstrukcji stalowych na tle Eurokodu 3. Inżynieria i Budownictwo. Nr 11/95 s.577-582.
- [3] DIN 18800 Teil 2. Stahlbauten. Stabilitätsfälle. Knicken von Stäben und Stabwerken.

Przekroje o pochylonych, głównych osiach bezwładności

Spośród przekrojów, które mogą być wymiarowane przy użyciu modułu RM-STAL występują przekroje o pochylonych osiach głównych. Do takich przekrojów należą pojedyncze kątowniki i zetowniki oraz wszystkie pozostałe przekroje, dla których oś pionowa jest osią większego momentu bezwładności (oś X).

Program główny pakietu RM-WIN wyznacza siły przekrojowe i współczynniki podatności węzłów pręta, w płaszczyźnie układu. Wielkości dotyczące pracy pręta w drugim kierunku (prostopadłym do płaszczyzny układu) można określić bezpośrednio w module RM-STAL. W związku z tym, dla przekrojów o osiach pochylonych, zachodzi konieczność sprowadzenia wymienionych wielkości do kierunków określonych poprzez główne osie bezwładności przekroju.

Sposób przekształcania sił przekrojowych nie wymaga szerszego komentarza, gdyż odpowiada on zwykłej transformacji wektorów przy obrocie układu współrzędnych, wyrażonej następująco:

$$M_x = -M_u \cos(\alpha) + M_p \sin(\alpha)$$

$$M_y = M_u \sin(\alpha) + M_p \cos(\alpha)$$

$$Q_y = Q_u \cos(\alpha) + Q_p \sin(\alpha)$$

$$Q_x = -Q_u \sin(\alpha) + Q_p \cos(\alpha)$$

gdzie α jest kątem nachylenia osi przekroju, wielkości z indeksem „u” są wielkościami dotyczącymi zginania w płaszczyźnie układu, natomiast z indeksem „p” dotyczą zginania w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu.

Współczynniki podatności węzłów potrzebne do wyznaczenia długości wybo-
czeniowych pręta transformowane są według następującej reguły:

$$\kappa_x = \kappa_u \cos^2(\alpha) + \kappa_p \sin^2(\alpha)$$

$$\kappa_y = \kappa_u \sin^2(\alpha) + \kappa_p \cos^2(\alpha)$$

gdzie:

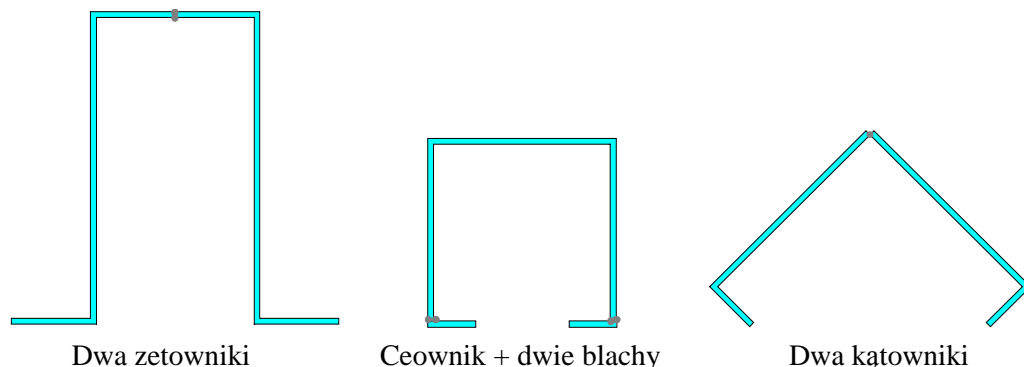
- κ_x, κ_y - współczynniki podatności węzła dla wybo-
czenia względem osi
głównych przekroju,
- κ_u, κ_p - współczynniki podatności węzła dla wybo-
czenia w płasz-
czyźnie układu i w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny
układu.

Przy pomocy powyższej formuły przekształcane są poszczególne współczyn-
niki podatności węzłów, tzn. κ_a, κ_b i κ_v . Dzięki tak przyjętej transformacji, dla
osi nachylonych pod kątem 45° , następuje postulowane przez normę uśrednienie
długości wybo-
czeniowych.

Pręty o przekrojach z kształtowników giętych

Mimo, że opcja **Przekroje** programu głównego RM-WIN, służąca do kre-
owania przekrojów prętów zadania zawiera jedynie katalogi standardowych
kształtowników giętych, to - dzięki rozszerzeniu zakresu wymiarowania na tzw.
jednogałęziowe przekroje składane z wielu kształtowników - możliwe jest rów-
nież wymiarowanie prętów o niestandardowych przekrojach giętych. W takich
przypadkach należy posługiwać się dostępnymi w opcji **Przekroje** odpowiedni-
mi typami giętych kształtowników standardowych oraz kształtowników o wy-
miarach deklarowanych przez użytkownika. Na przykład tzw. kątowniki trójgięte
można wykreować przez odpowiednie złożenie dwóch kątowników (patrz Przy-
kład 11). Przy "składaniu" przekroju giętego należy pamiętać o zapewnieniu cią-
głości poszczególnych elementów składowych (kształtowników) tak, aby całość
stanowiła przekrój jednogałęziowy. Chociaż koncepcja składania przekroju z
pojedynczych blach (prostokątów) wydaje się tu najbardziej naturalna, to użycie
innych kształtowników (jeśli jest to w konkretnym przypadku możliwe) znacznie

ułatwia kreowanie zamierzonego przekroju oraz ułatwia procedurom obliczeniowym modułu identyfikację przekroju oraz wyznaczanie charakterystyki geometrycznej i wytrzymałościowej. Poniżej pokazano sposoby modelowania przekrojów giętych.



Archiwizacja parametrów wymiarowania

Wszystkie wielkości związane z wymiarowaniem pręta (wartości zadawane przez użytkownika w edycyjnych polach liczbowych, ustawienia opcji wymiarowania na przełącznikach) mogą być zapisane w odrębnym pliku dyskowym o takiej samej nazwie jak zadanie zdefiniowane w programie głównym i rozszerzeniu ".rmw".

Plik ten jest tworzony automatycznie w aktualnym katalogu zadań przy pomocy opcji dotyczących zapisu zadania z poziomu programu głównego RM-WIN (opcja **Pliki.- Zapisz/Zapisz jako...**), a warunkiem jego utworzenia jest dokonanie jakichkolwiek zmian parametrów wymiarowania w module RM-STAL. Parametry wymiarowania są zapamiętywane w formie rekordów, oddzielnie dla każdego pręta ustroju. Po uruchomieniu modułu RM-STAL dla danego pręta sprawdzane jest, czy parametry wymiarowania nie zostały wcześniej zapisane w pliku. Jeśli tak, to są one z tego pliku odczytywane, w przeciwnym razie są inicjowane domyślnie.

Przy archiwizowaniu zadań w pamięci zewnętrznej (dyskietki) z poziomu systemu operacyjnego należy mieć również na uwadze plik zadania o rozszerzeniu ".rmw".

Plik, o którym tu mowa, jest aktualizowany przez program główny RM-WIN. Ma to miejsce ilekroć dokonywane są zmiany w opcjach programu głównego, a dotyczące:

- geometrii pręta (położenie węzłów, dzielenie pręta),
- schematu pręta,
- przypisania innego rodzaju przekroju,
- usunięcia pręta,

W takich sytuacjach parametry wymiarowania są usuwane z pliku archiwalnego, a więc po wywołaniu modułu RM-STAL dla zmodyfikowanego pręta wszystkie parametry wymiarowania są inicjowane na nowo.

PRZYKŁADY

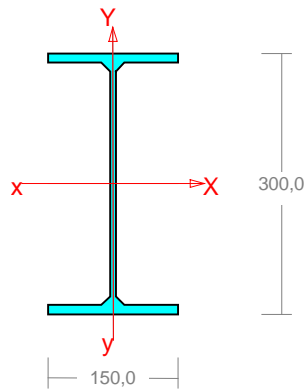
Poniżej przytoczono wydruki wyników wymiarowania dla kilku zadań, zaczerpniętych z ogólnie dostępnych źródeł. Wydruki zostały utworzone przy współpracy z edytorem MS WORD 7.0 PL.

Przykład 1

Temat: Nośność jednogałęziowego słupa ściskanego.

Źródło: *J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych osiowo według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 1/91, Przykład 1.*

Przekrój:



Wymiary przekroju:

I 300 PE $h=300,0$ $g=7,1$ $s=150,0$
 $t=10,7$ $r=0,0$.

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$J_{xg}=8360,0$ $J_{yg}=604,0$ $A=53,80$

$i_x=12,5$ $i_y=3,4$

$J_w=125934,1$ $J_t=18,8$ $i_s=12,9$.

Materiał: **18G2**.

Wytrzymałość $f_d=305$ MPa dla $g=10,7$.

Siły przekrojowe:

$x_a = 0,000$; $x_b = 4,200$.

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$N = -450,00$ kN,

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = -83,64$ MPa $\sigma_c = -83,64$ MPa.

Stateczność lokalna.

$x_a = 0,000$; $x_b = 4,200$.

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **4**.

Rozstaw poprzecznych usztywnień ścianki $a = 4200,0$ mm.

Warunek stateczności ścianki dla ścianki najbardziej narażonej na jej utratę (9):

$$\sigma_c / \varphi_p f_d = 0,297 < 1$$

Przyjęto, że przekrój wymiarowany będzie w stanie **krytycznym**.

Współczynniki redukcji nośności przekroju:

- dla ściskania: $\psi_o = \varphi_p = 0,925$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$$\chi_1 = 1,000 \quad \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla} \\ l_0 = 4,200$$

$$l_w = 1,000 \times 4,200 = 4,200 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 1,000 \quad \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla} \\ l_0 = 4,200$$

$$l_w = 1,000 \times 4,200 = 4,200 \text{ m}$$

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_\omega = 1,000$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega 0} = 4,200 \text{ m}$. Długość wyboczeniowa $l_\omega = 4,200 \text{ m}$.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 8360,0}{4,200^2} 10^{-2} = 9588,73 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 604,0}{4,200^2} 10^{-2} = 692,77 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_\omega}{l_\omega^2} + GJ_T \right) =$$

$$\frac{1}{12,9^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 125934,1}{4,200^2} 10^{-2} + 80 \times 18,8 \times 10^2 \right) = 1771,62 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 4,200.$$

$$N_{RC} = \psi A f_d = 0,925 \times 53,8 \times 305 \times 10^{-1} = 1517,83 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

$$\text{- dla } N_x \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_x} = 1,15 \times \sqrt{1517,83 / 9588,73} = 0,459 \Rightarrow \varphi = 0,978$$

$$\text{- dla } N_y \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_y} = 1,15 \times \sqrt{1517,83 / 692,77} = 1,709 \Rightarrow \varphi = 0,309$$

$$\text{- dla } N_z \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_z} = 1,15 \times \sqrt{1517,83 / 1771,62} = 1,064 \Rightarrow \varphi = 0,526$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,309$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

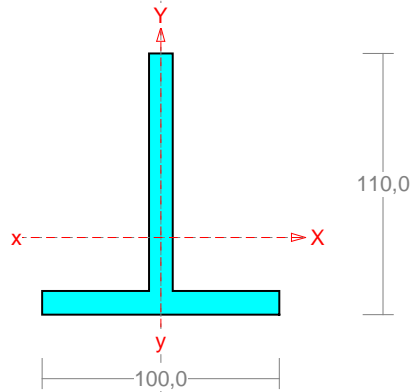
$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{450,00}{0,309 \times 1517,83} = 0,959 < 1$$

Przykład 2

Temat: Nośność górnego pasa wiązara dachowego na ściskanie.

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych osiowo według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 1/91, Przykład 2.

Przekrój:



Wymiary przekroju:

$$T\ 110 \times 100\ h=110,0\ s=100,0$$

$$g=10,0\ t=10,0\ ey=32,5.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_{xg}=235,4\ J_{yg}=84,2\ A=20,00$$

$$i_x=3,4\ i_y=2,1$$

$$J_w=0,0\ J_t=7,0$$

$$y_s=-2,9\ i_s=4,9\ r_x=2,2\ b_y=-4,0.$$

Materiał: **18G2**.

Wytrzymałość **fd=305 MPa** dla **g=10,0**.

Siły przekrojowe:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 3,015.$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$N = -120,00\ \text{kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = -60,00\ \text{MPa}$ $\sigma_c = -60,00\ \text{MPa}$.

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_o = 3,015$$

$$l_w = 1,000 \times 3,015 = 3,015\ \text{m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_o = 3,015$$

$$l_w = 1,000 \times 3,015 = 3,015\ \text{m}$$

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_\omega = 1,000$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega\omega} = 3,015\ \text{m}$.
Długość wyboczeniowa $l_\omega = 3,015\ \text{m}$.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 235,4}{3,015^2} 10^{-2} = 523,98\ \text{kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 84,2}{3,015^2} 10^{-2} = 187,34\ \text{kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_{\omega}}{l_{\omega}^2} + GJ_T \right) = \frac{1}{4,9^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 0,0}{3,015^2} 10^{-2} + 80 \times 7,0 \times 10^2 \right) = 2306,51 \text{ kN}$$

$$N_{yz} = \frac{N_y + N_z - \sqrt{(N_y + N_z)^2 - 4N_y N_z (1 - \mu y_s^2 / i_s^2)}}{2(1 - \mu y_s^2 / i_s^2)} =$$

$$\frac{187,34 + 2306,51 - \sqrt{(187,34 + 2306,51)^2 - 4 \times 187,34 \times 2306,51 \times (1 - 1,000 \times 2,9^2 / 4,9^2)}}{2 \times (1 - 1,000 \times 2,9^2 / 4,9^2)} = 182,00 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,015$.

$$N_{RC} = \psi A f_d = 1,000 \times 20,0 \times 305 \times 10^{-1} = 610,00 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

$$\text{- dla } N_x \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_x} = 1,15 \times \sqrt{610,00 / 523,98} = 1,246 \Rightarrow \varphi = 0,438$$

$$\text{- dla } N_y \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_y} = 1,15 \times \sqrt{610,00 / 187,34} = 2,084 \Rightarrow \varphi = 0,202$$

$$\text{- dla } N_{yz} \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_{yz}} = 1,15 \times \sqrt{610,00 / 182,00} = 2,105 \Rightarrow \varphi = 0,198$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,198$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

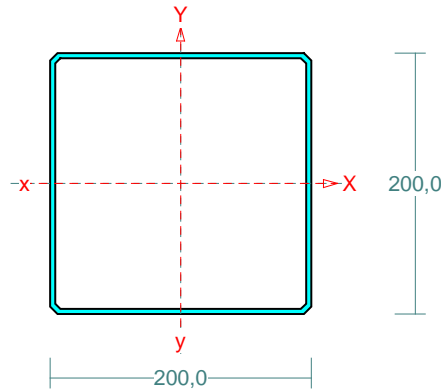
$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{120,00}{0,198 \times 610,00} = 0,994 < 1$$

Przykład 3

Temat: Nośność słupa ramy - przekrój rurowy, kwadratowy.

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych osiowo według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 1/91, Przykład 3.

Przekrój:



Wymiary przekroju:

$$H\ 200 \times 200 \times 4.0 \quad h=200,0 \quad s=200,0$$

$$g=4,0 \quad t=4,0$$

$$r=0,0 \quad v_x=3,9 \quad v_y=3,9.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_{xg}=1940,3 \quad J_{yg}=1940,3$$

$$A=30,70 \quad i_x=8,0 \quad i_y=8,0.$$

Materiał: **St3SX**

Wytrzymałość **fd=215 MPa** dla **g=4,0**.

Siły przekrojowe:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 3,600./$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$N = -430,00 \text{ kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = -140,07 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -140,07 \text{ MPa}$.

Stateczność lokalna:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 3,600.$$

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **4**.

W przekroju występują naprężenia spawalnicze.

Rura była walcowana na gorąco.

Rozstaw poprzecznych usztywnień ścianki $a = 3600,0 \text{ mm}$.

Warunek stateczności ścianki dla ścianki najbardziej narażonej na jej utratę (9):

$$\sigma_c / \varphi_p f_d = 0,852 < 1$$

Przyjęto, że przekrój wymiarowany będzie w stanie **krytycznym**.

Współczynniki redukcji nośności przekroju:

$$\text{- dla ściskania:} \quad \psi_o = \varphi_p = 0,764$$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto następujące podatności węzłów:

$$\chi_1 = 0,500, \chi_2 = 0,410 \quad \text{węzły przesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 1,393 \quad \text{dla } l_o = 3,600$$

$$l_w = 1,393 \times 3,600 = 5,015 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_o = 3,600$$

$$l_w = 1,000 \times 3,600 = 3,600 \text{ m}$$

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 1940,3}{5,015^2} 10^{-2} = 1561,06 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 1940,3}{3,600^2} 10^{-2} = 3029,16 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,600$.

$$N_{RC} = \psi A f_d = 0,764 \times 30,7 \times 215 \times 10^{-1} = 504,28 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

$$\text{- dla } N_x \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_x} = 1,15 \times \sqrt{504,28 / 1561,06} = 0,656 \Rightarrow \varphi = 0,866$$

$$\text{- dla } N_y \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_y} = 1,15 \times \sqrt{504,28 / 3029,16} = 0,471 \Rightarrow \varphi = 0,948$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,866$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

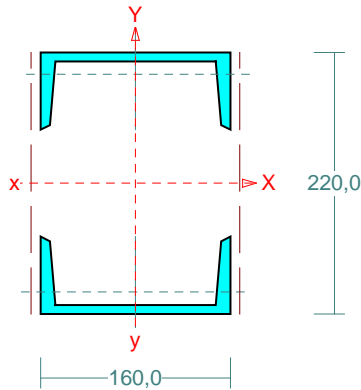
$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{430,00}{0,866 \times 504,28} = 0,985 < 1$$

Przykład 4

Temat: Nośność na ściskanie słupa wielogałęziowego.

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych osiowo według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 1/91, Przykład 4.

Przekrój:



Wymiary przekroju:

$$2 \text{ U } 160 \quad h=160,0 \quad s=65,0 \quad g=7,5 \\ t=10,5 \quad r=0,0 \quad e_x=18,4.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_{xg}=4198,1 \quad J_{yg}=1850,0 \quad A=48,00 \\ i_x=9,4 \quad i_y=6,2.$$

Materiał: **St3SX**

Wytrzymałość **fd=215 MPa** dla **g=10,5**.

Siły przekrojowe:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 6,000.$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$N = -150,00 \text{ kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = -31,25 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -31,25 \text{ MPa}$.

Połączenie gałęzi.

Przyjęto, że gałęzie połączone są przewiązkami o szerokości $b = 100,0 \text{ mm}$ i grubości $g = 8,0 \text{ mm}$ w odstępach $l_1 = 650,0 \text{ mm}$, wykonanymi ze stali St3SX.

Smukłość gałęzi:

$$\lambda_v = \lambda_1 = l_1 / i_1 = 650,0 / 18,9 = 34,39 \\ \lambda_p = 84 \sqrt{215 / f_d} = 84 \times \sqrt{215 / 215} = 84,00$$

Współczynniki redukcji nośności:

Współczynnik niestateczności dla ścianki przy ścisaniu wynosi $\varphi_p = 1,000$.

Współczynnik niestateczności gałęzi wynosi:

$$\bar{\lambda} = \lambda_1 / \lambda_p = 34,39 / 84,00 = 0,409 \Rightarrow \varphi_1 = 0,912.$$

W związku z tym współczynniki redukcji nośności wynoszą:

$$\text{- dla ściskania:} \quad \psi_0 = 0,912$$

Smukłość zastępcza pręta:

- dla wybożenia w płaszczyźnie prostopadłej do osi X

$$\lambda = l_{wx} / i_x = 12000,0 / 93,5 = 128,31$$

$$\lambda_m = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_v^2} \quad m / 2 = \sqrt{128,31^2 + 34,39^2} = 132,84$$

$$\bar{\lambda}_m = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \sqrt{\psi_0} = \frac{132,84}{84,00} \times \sqrt{0,912} = 1,510$$

Nośność przewiązek.

Przewiązki prostopadłe do osi X:

$$Q = 1,2 V = 1,2 \times 0,00 = 0,00 \text{ kN} \quad Q \geq 0,012 A f_d = 0,012 \times 48,00 \times 215 \times 10^{-1} = 12,38 \text{ kN}$$

Przyjęto $Q = 12,38 \text{ kN}$

$$V_Q = \frac{Q l_1}{n(m-1)a} = \frac{12,38 \times 650,0}{2 \times (2-1) \times 183,2} = 21,97 \text{ kN} \quad M_Q = \frac{Q l_1}{m n} = \frac{12,38 \times 0,7}{2 \times 2} = 2,01 \text{ kNm}$$

$$V_R = 0,58 \varphi_{pv} A_v f_d = 0,58 \times 1,000 \times 0,9 \times 100,0 \times 8,0 \times 215 \times 10^{-3} = 89,78 \text{ kN}$$

$$M_R = W f_d = 8,0 \times 100,0^2 / 6 \times 215 \times 10^{-6} = 2,87 \text{ kNm}$$

$$V_Q = 21,97 < 89,78 = V_R \quad M_Q = 2,01 < 2,87 = M_R$$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg zasad mechaniki:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły przesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 2,000 \quad \text{dla } l_0 = 6,000$$

$$l_w = 2,000 \times 6,000 = 12,000 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły przesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 2,000 \quad \text{dla } l_0 = 6,000$$

$$l_w = 2,000 \times 6,000 = 12,000 \text{ m}$$

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 4198,1}{12,000^2} 10^{-2} = 589,85 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 1850,0}{12,000^2} 10^{-2} = 259,93 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$x_a = 0,000; x_b = 6,000.$

$$N_{RC} = \psi A f_d = 0,912 \times 48,0 \times 215 \times 10^{-1} = 941,18 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

$$\lambda_p = 84 \sqrt{215 / f_d} = 84 \times \sqrt{215 / 215} = 84,00$$

- dla wyboczenia prostopadłego do osi X:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_m = 1,510 \Rightarrow \varphi = 0,378$$

- dla wyboczenia prostopadłego do osi Y:

$$\lambda_y = l_{wy} / i_y = 12000,0 / 62,1 = 193,29$$

$$\bar{\lambda} = \lambda_y / \lambda_p = 193,29 / 84,00 = 2,301 \Rightarrow \varphi = 0,170$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,170$

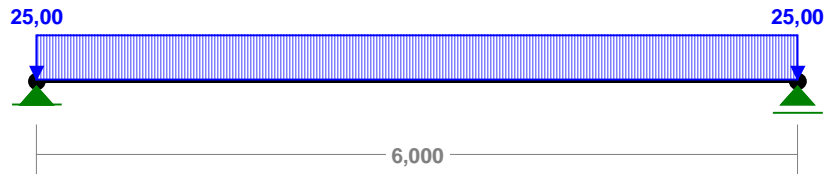
Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{150,00}{0,170 \times 941,18} = 0,937 < 1$$

Przykład 5

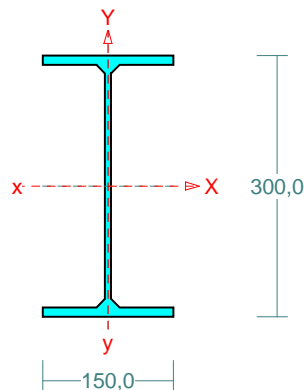
Temat: Nośność na zginanie belki wolnopodpartej.

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów zginanych według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 2/91, Przykład 1.



Schemat statyczny belki

Przekrój:



Wymiary przekroju:

I 300 PE $h=300,0$

$g=7,1$ $s=150,0$ $t=10,7$ $r=0,0$.

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$J_xg=8360,0$ $J_yg=604,0$ $A=53,80$

$i_x=12,5$ $i_y=3,4$

$J_w=125934,1$ $J_t=18,8$ $i_s=12,9$.

Materiał: **St3SX**

Wytrzymałość **$f_d=215$ MPa** dla **$g=10,7$** .

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **1**.

Siły przekrojowe:

$x_a = 3,000$; $x_b = 3,000$.

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$M_x = -112,50$ kNm, $V_y = 0,00$ kN, $N = 0,00$ kN,

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 201,85$ MPa $\sigma_c = -201,85$ MPa.

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$\chi_1 = 1,000$, $\chi_2 = 1,000$ węzły nieprzesuwne $\Rightarrow \mu = 1,000$ dla $l_0 = 6,000$

$l_w = 1,000 \times 6,000 = 6,000$ m

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$\chi_1 = 1,000$, $\chi_2 = 1,000$ węzły nieprzesuwne $\Rightarrow \mu = 1,000$ dla $l_0 = 2,000$

$l_w = 1,000 \times 2,000 = 2,000$ m

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_\omega = 1,000$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega\omega} = 2,000$ m. Długość wyboczeniowa $l_\omega = 2,000$ m.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 8360,0}{6,000^2} 10^{-2} = 4698,48 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 604,0}{2,000^2} 10^{-2} = 3055,14 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_{\omega}}{l_w^2} + GJ_T \right) =$$

$$\frac{1}{12,9^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 125934,1}{2,000^2} 10^{-2} + 80 \times 18,8 \times 10^2 \right) = 4727,81 \text{ kN}$$

Zwicherungie:

Dla dwuteownika walcowanego rozstaw stężeń zabezpieczających przekrój przed obrotem $l_1 = l_{ow} = 2000 \text{ mm}$:

$$\frac{35 i_y}{\beta} \sqrt{215 / f_d} = \frac{35 \times 33}{1,000} \times \sqrt{215 / 215} = 1173 < 2000 = l_1$$

Pręt nie jest zabezpieczony przed zwicherungiem.

Współrzędna punktu przyłożenia obciążenia $a_o = 0,00 \text{ cm}$. Różnica współrzędnych środka ścinania i punktu przyłożenia siły $a_s = 0,00 \text{ cm}$. Przyjęto następujące wartości parametrów zwicherungia: $A_1 = 1,000$, $A_2 = 0,000$, $B = 1,000$.

$$A_o = A_1 b_y + A_2 a_s = 1,000 \times 0,00 + 0,000 \times 0,00 = 0,000$$

$$M_{cr} = \pm A_o N_y + \sqrt{(A_o N_y)^2 + B^2 i_s^2 N_y N_z} =$$

$$0,000 \times 3055,14 + \sqrt{(0,000 \times 3055,14)^2 + 1,000^2 \times 0,129^2 \times 3055,14 \times 4727,81} = 490,57$$

Smukłość względna dla zwicherungia wynosi:

$$\bar{\lambda}_L = 1,15 \sqrt{M_R / M_{cr}} = 1,15 \times \sqrt{127,45 / 490,57} = 0,586$$

Nośność przekroju na zginanie:

$$x_a = 3,000; \quad x_b = 3,000.$$

- względem osi X

$$M_R = \alpha_p W f_d = 1,064 \times 557,3 \times 215 \times 10^{-3} = 127,45 \text{ kNm}$$

Współczynnik zwicherungia dla $\lambda_L = 0,586$ wynosi $\varphi_L = 0,974$

Warunek nośności (54):

$$\frac{M_x}{\varphi_L M_{R_x}} = \frac{112,50}{0,974 \times 127,45} = 0,906 < 1$$

Nośność przekroju na ścinanie:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 6,000.$$

- wzdłuż osi Y

$$V_R = 0,58 A_V f_d = 0,58 \times 19,8 \times 215 \times 10^{-1} = 246,66 \text{ kN}$$

$$V_O = 0,6 V_R = 148,00 \text{ kN}$$

Warunek nośności dla ścinania wzdłuż osi Y:

$$V = 75,00 < 246,66 = V_R$$

Nośność przekroju zginanego, w którym działa siła poprzeczna:

$$x_a = 3,000; \quad x_b = 3,000.$$

- dla zginania względem osi X: $V_y = 0,00 < 148,00 = V_o$

$$M_{R,V} = M_R = 127,45 \text{ kNm}$$

Warunek nośności (55):

$$\frac{M_x}{M_{R_x,V}} = \frac{112,50}{127,45} = 0,883 < 1$$

Nośność środka pod obciążeniem skupionym:

$x_a = 0,000$; $x_b = 6,000$.

Przyjęto szerokość rozkładu obciążenia skupionego $c = 0,0$ mm.

Naprężenia ściskające w środku wynoszą $\sigma_c = 0,00$ MPa. Współczynnik redukcji nośności wynosi:

$$\eta_c = 1,000$$

Nośność środka na siłę skupioną:

$$P_{R,W} = c_o t_w \eta_c f_d = 53,5 \times 7,1 \times 1,000 \times 215 \times 10^{-3} = 81,67 \text{ kN}$$

Warunek nośności środka:

$$P = 75,00 < 81,67 = P_{R,W}$$

Stan graniczny użytkowania:

Ugięcia względem osi Y liczone od cięciwy pręta wynoszą:

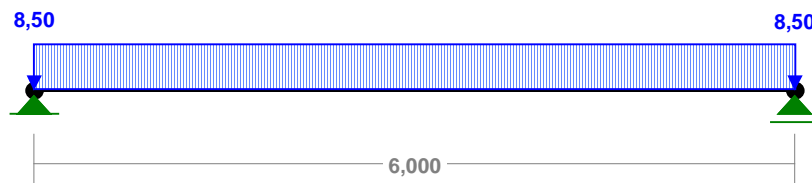
$$a_{\max} = 24,6 \text{ mm} \quad a_{\text{gr}} = l / 250 = 6000 / 250 = 24,0 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 24,6 > 24,0 = a_{\text{gr}}$$

Przykład 6

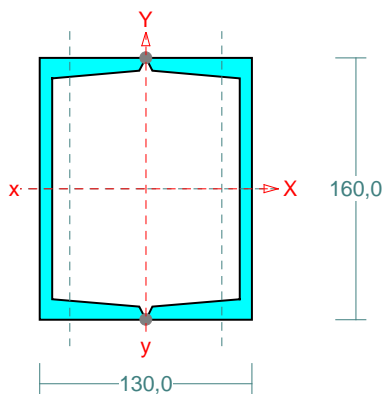
Temat: Nośność spawanej belki wolnopodpartej na zginanie

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów zginanych według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 2/91, Przykład 2.



Schemat statyczny belki

Przekrój:



Wymiary przekroju:

U 160 h=160,0 s=65,0

g=7,5 t=10,5 r=10,5 ex=18,4.

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$J_{xg}=1850,0$ $J_{yg}=1212,9$ $A=48,00$

$i_x=6,2$ $i_y=5,0$.

Materiał: **St3SX**

Wytrzymałość **fd=215 MPa** dla **g=10,5**.

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **1**.

Siły przekrojowe:

$x_a = 3,000$; $x_b = 3,000$.

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

Obciążenia działające prostopadłe do płaszczyzny układu: momenty przywęzłowe $M_a = 4,00$ i $M_b = 4,00$ kNm, obciążenie rozłożone na całej długości pręta $q = 0,00$ kN/m. Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla tych obciążeń wynosi $\gamma_f = 1,000$.

$M_x = -38,25$ kNm, $V_y = 0,00$ kN, $N = 0,00$ kN,

$M_y = 4,00$ kNm, $V_x = 0,00$ kN.

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 186,84$ MPa $\sigma_c = -186,84$ MPa.

Zwicherungie:

Dla przekroju rurowego lub skrzynkowego rozstaw stężeń zabezpieczających przekrój przed obrotem $l_1 = l_w = 6000$ mm:

$$100 b_o \sqrt{215 / f_d} = 100 \times 122,5 \times \sqrt{215 / 215} = 12250 > 6000 = l_1$$

Pręt jest zabezpieczony przed zwicherungiem.

Nośność przekroju na zginanie:

$x_a = 3,000$; $x_b = 3,000$.

- względem osi X: $M_R = \alpha_p W f_d = 1,087 \times 231,3 \times 215 \times 10^{-3} = 54,05 \text{ kNm}$
 - względem osi Y: $M_R = \alpha_p W f_d = 1,099 \times 186,6 \times 215 \times 10^{-3} = 44,11 \text{ kNm}$
- Współczynnik zwężenia dla $\lambda_L = 0,000$ wynosi $\phi_L = 1,000$
- Warunek nośności (54):

$$\frac{M_x}{\phi_L M_{Rx}} + \frac{M_y}{M_{Ry}} = \frac{38,25}{1,000 \times 54,05} + \frac{4,00}{44,11} = 0,798 < 1$$

Nośność przekroju na ścinanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 6,000$.

- wzdłuż osi Y: $V_R = 0,58 A_V f_d = 0,58 \times 24,0 \times 215 \times 10^{-1} = 299,28 \text{ kN}$
 $V_O = 0,3 V_R = 89,78 \text{ kN}$
- wzdłuż osi X: $V_R = 0,58 A_V f_d = 0,58 \times 24,1 \times 215 \times 10^{-1} = 301,15 \text{ kN}$
 $V_O = 0,3 V_R = 90,35 \text{ kN}$

Warunki nośności:

- ścinanie wzdłuż osi Y: $V = 25,50 < 299,28 = V_R$
- ścinanie wzdłuż osi X: $V = 0,00 < 301,15 = V_R$

Nośność przekroju zginanego, w którym działa siła poprzeczna:

$x_a = 3,000$; $x_b = 3,000$.

- dla zginania względem osi X: $V_y = 0,00 < 89,78 = V_O$

$$M_{R,V} = M_R = 54,05 \text{ kNm}$$

- dla zginania względem osi Y: $V_x = 0,00 < 90,35 = V_O$

$$M_{R,V} = M_R = 44,11 \text{ kNm}$$

Warunek nośności (55):

$$\frac{M_x}{M_{Rx,V}} + \frac{M_y}{M_{Ry,V}} = \frac{38,25}{54,05} + \frac{4,00}{44,11} = 0,798 < 1$$

Stan graniczny użytkowania:

Ugięcia względem osi Y liczone od cięciwy pręta wynoszą:

$$a_{\max} = 37,8 \text{ mm}, a_{\text{gr}} = l / 150 = 6000 / 150 = 40,0 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 37,8 < 40,0 = a_{\text{gr}}$$

Ugięcia względem osi X liczone od cięciwy pręta wynoszą:

$$a_{\max} = 7,2 \text{ mm}, a_{\text{gr}} = l / 350 = 6000 / 350 = 17,1 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 7,2 < 17,1 = a_{\text{gr}}$$

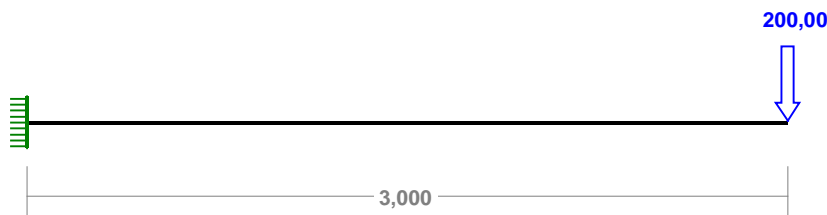
Największe ugięcie wypadkowe wynosi:

$$a = \sqrt{7,2^2 + 37,8^2} = 38,5$$

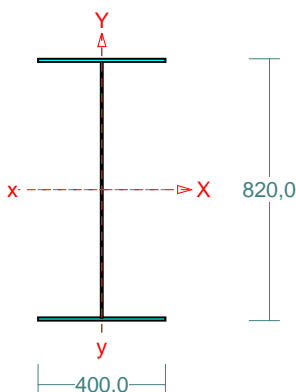
Przykład 7

Temat: Nośność belki wspornikowej na zginanie

Źródło: J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów zginanych według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 2/91, Przykład 3.



Schemat statyczny belki

Przekrój:

Wymiary przekroju:

$$S\ 820 \times 400\ h=820,0\ g=6,0$$

$$s=400,0\ t=10,0.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_{xg}=156826,7\ J_{yg}=10668,1\ A=128,00$$

$$i_x=35,0\ i_y=9,1$$

$$J_w=1,750E+07\ J_t=32,5\ i_s=36,2.$$

Materiał: **St4VX**.

Wytrzymałość **$f_d=235$ MPa dla $g=10,0$.**

Siły przekrojowe:

$$x_a = 0,000; x_b = 3,000.$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$M_x = 600,00\ \text{kNm},\ V_y = 200,00\ \text{kN},\ N = 0,00\ \text{kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 156,86$ MPa $\sigma_c = -156,86$ MPa.

Stateczność lokalna.

$$x_a = 0,000; x_b = 3,000.$$

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **4**.

Rozstaw poprzecznych usztywnień ścianki $a = 750,0$ mm.

Warunek stateczności ścianki dla ścianki najbardziej narażonej na jej utratę (9):

$$\sigma_c / \varphi_p f_d = 0,965 < 1$$

Przyjęto, że przekrój wymiarowany będzie w stanie **nadkrytycznym ograniczonym**.

Współczynniki redukcji nośności przekroju:

- dla zginana względem osi X:

$$\varphi_p = 0,803\ W_{ec} = 3286,05\ W_c = 3825,04\ \text{cm}^3$$

$$\psi_x = \varphi_p W_{ec} / W_c = 0,803 \times 3286,05 / 3825,04 = 0,690$$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg zasad mechaniki:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły przesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 2,000 \quad \text{dla } l_0 = 3,000$$

$$l_w = 2,000 \times 3,000 = 6,000 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły przesuwne} \quad \Rightarrow \mu = 2,000 \quad \text{dla } l_0 = 3,000$$

$$l_w = 2,000 \times 3,000 = 6,000 \text{ m}$$

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_\omega = 2,000$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega\omega} = 3,000 \text{ m}$. Długość wyboczeniowa $l_\omega = 6,000 \text{ m}$.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 156826,7}{6,000^2} 10^{-2} = 88139,59 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 10668,1}{6,000^2} 10^{-2} = 5995,68 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_\omega}{l_\omega^2} + GJ_T \right) =$$

$$\frac{1}{36,2^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 1,75 \times 10^7}{6,000^2} 10^{-2} + 80 \times 32,5 \times 10^2 \right) = 7713,16 \text{ kN}$$

Zwicherungie:

Współrzędna punktu przyłożenia obciążenia $a_o = 41,00 \text{ cm}$. Różnica współrzędnych środka ścinania i punktu przyłożenia siły $a_s = 41,00 \text{ cm}$. Przyjęto następujące wartości parametrów zwicherungia: $A_1 = 0,000$, $A_2 = 1,100$, $B = 2,560$.

$$A_o = A_1 b_y + A_2 a_s = 0,000 \times 0,00 + 1,100 \times 41,00 = 45,100$$

$$M_{cr} = \pm A_o N_y + \sqrt{(A_o N_y)^2 + B^2 i_s^2 N_y N_z} =$$

$$0,451 \times 5995,68 + \sqrt{(0,451 \times 5995,68)^2 + 2,560^2 \times 0,362^2 \times 5995,68 \times 7713,16} = 9557,58$$

Smukłość względna dla zwicherungia wynosi:

$$\bar{\lambda}_L = 1,15 \sqrt{M_R / M_{cr}} = 1,15 \times \sqrt{620,23 / 9557,58} = 0,293$$

Nośność przekroju na zginanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,000$.

- względem osi X

$$M_R = \psi W_c f_d = 0,690 \times 3825,0 \times 235 \times 10^{-3} = 620,23 \text{ kNm}$$

Współczynnik zwicherungia dla $\lambda_L = 0,293$ wynosi $\varphi_L = 0,996$

Warunek nośności (54):

$$\frac{M_x}{\varphi_L M_{Rx}} = \frac{600,00}{0,996 \times 620,23} = 0,971 < 1$$

Nośność przekroju na ścinanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,000$.

- wzdłuż osi Y

$$V_R = 0,58 \varphi_{pv} A_V f_d = 0,58 \times 0,640 \times 48,0 \times 235 \times 10^{-1} = 418,43 \text{ kN}$$

$$V_O = 0,3 V_R = 125,53 \text{ kN}$$

Warunek nośności dla ścinania wzdłuż osi Y:

$$V = 200,00 < 418,43 = V_R$$

Nośność przekroju zginanego, w którym działa siła poprzeczna:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,000$.

- dla zginania względem osi X: $V_y = 200,00 > 125,53 = V_o$

$$M_{R,V} = M_R \left[1 - \frac{I_{(V)}}{I} \left(\frac{V}{V_R} \right)^2 \right] = 620,23 \times \left[1 - \frac{25600,0}{156826,7} \left(\frac{200,0}{418,4} \right)^2 \right] = 597,10 \text{ kNm}$$

Warunek nośności (55):

$$\frac{M_x}{M_{R_x,V}} = \frac{600,00}{597,10} = 1,005 > 1$$

Nośność środnika pod obciążeniem skupionym:

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,000$.

Przyjęto szerokość rozkładu obciążenia skupionego $c = 0,0$ mm. Dodatkowe usztywnienie środnika przyjęto o rozstawie $a_1 = 750,0$ mm.

$$k_c = \left(15 + 25 \frac{c_o}{h_w} \right) \sqrt{\frac{t_f}{t_w} \frac{215}{f_d}} = \left(15 + 25 \times \frac{20,0}{800,0} \right) \times \sqrt{\frac{10,0 \times 215}{6,0 \times 235}} = 19,294$$

$$k_c \leq c_o / t_w = 20,0 / 6,0 = 3,333$$

Przyjęto $k_c = 3,333$

Warunek dodatkowy:

$$k_c \leq 20 \sqrt{\frac{215}{f_d}} = 20 \times \sqrt{\frac{215}{235}} = 19,130$$

Siła może zmieniać położenie na przecie.

Naprężenia ściskające w środniku wynoszą $\sigma_c = 153,04$ MPa. Współczynnik redukcji nośności wynosi:

$$\eta_c = 1,25 - 0,5 \sigma_c / f_d = 1,25 - 0,5 \times 153,04 / 235 = 0,924$$

Nośność środnika na siłę skupioną:

$$P_{R,c} = k_c t_w^2 \eta_c f_d = 3,333 \times (6,0)^2 \times 0,924 \times 235 \times 10^{-3} = 26,07 \text{ kN}$$

Warunek nośności środnika:

$$P = 0,00 < 26,07 = P_{R,c}$$

Złożony stan środnika

$x_a = 0,000$; $x_b = 3,000$.

Siły przekrojowe przypadające na środnik i nośności środnika:

N_w	= 0,00	N_{Rw}	= 611,38	kN
M_w	= 97,94	M_{Rw}	= 103,78	kNm
V	= 200,00	V_R	= 418,43	kN
P	= 0,00	P_{Rc}	= 26,07	kN

Przyjęto, że zastosowane zostaną żebra w miejscu występowania siły skupionej ($P = 0$).

Współczynnik niestateczności ścianki wynosi: $\varphi_p = 0,803$.

Warunek nośności środka:

$$\left(\frac{N_w}{N_{Rw}} + \frac{M_w}{M_{Rw}} + \frac{P}{P_{Rc}}\right)^2 - 3\varphi_p \left(\frac{N_w}{N_{Rw}} + \frac{M_w}{M_{Rw}}\right) \frac{P}{P_{Rc}} + \left(\frac{V}{V_R}\right)^2 =$$
$$\left(\frac{0,00}{611,38} + \frac{97,94}{103,78} + \frac{0,00}{26,07}\right)^2 - 3 \times 0,803 \times \left(\frac{0,00}{611,38} + \frac{97,94}{103,78}\right) \frac{0,00}{26,07} + \left(\frac{200,00}{418,43}\right)^2 = 1,119 > 1$$

Stan graniczny użytkowania:

Ugięcia względem osi Y liczone od cięciwy pręta wynoszą:

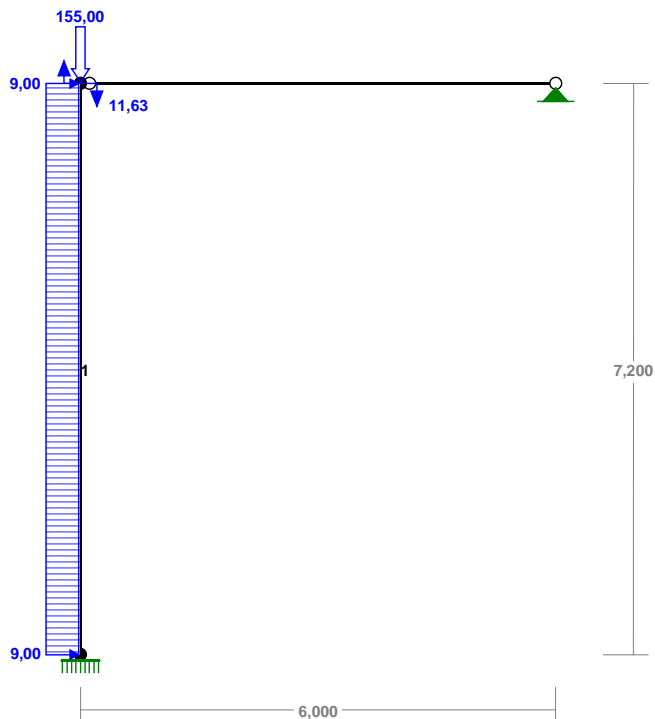
$$a_{\max} = 1,1 \text{ mm}, \quad a_{\text{gr}} = l / 350 = 3000 / 350 = 8,6 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 1,1 < 8,6 = a_{\text{gr}}$$

Przykład 8

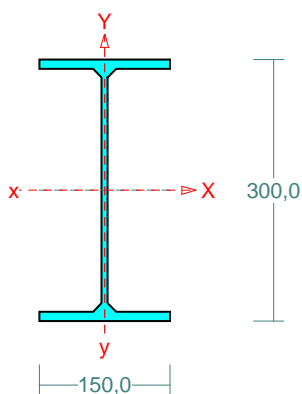
Temat: Nośność słupa ściskanego i zginanego

Źródło: *J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych i zginanych według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 3/91, Przykład 1.*



Schemat statyczny słupa

Przekrój:



Wymiary przekroju:

I 300 PE $h=300,0$ $g=7,1$ $s=150,0$
 $t=10,7$ $r=0,0$.

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$J_{xg}=8360,0$ $J_{yg}=604,0$ $A=53,80$

$i_x=12,5$ $i_y=3,4$

$J_w=125934,1$ $J_t=18,8$ $i_s=12,9$.

Materiał: **St3SY**.

Wytrzymałość **$f_d=215$ MPa dla $g=10,7$.**

Siły przekrojowe:

$x_a = 0,000$; $x_b = 7,200$.

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **AB**

$$M_x = 52,6 \text{ kNm}, \quad V_y = 38,1 \text{ kN}, \quad N = -155,0 \text{ kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 65,7 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -123,3 \text{ MPa}$.

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto następujące podatności węzłów:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 1,000 \quad \chi_v = 0,235 \quad \Rightarrow \quad \mu = 1,397 \quad \text{dla } l_0 = 7,200 \\ l_w = 1,397 \times 7,200 = 10,058 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 0,000, \chi_2 = 0,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 0,500 \quad \text{dla } l_0 = 7,200 \\ l_w = 0,500 \times 7,200 = 3,600 \text{ m}$$

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_{\omega} = 0,500$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega} = 7,200 \text{ m}$.
Długość wyboczeniowa $l_{\omega} = 3,600 \text{ m}$.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 8360,0}{10,058^2} 10^{-2} = 1671,9 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 604,0}{3,600^2} 10^{-2} = 942,9 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_{\omega}}{l_{\omega}^2} + GJ_T \right) =$$

$$\frac{1}{12,9^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 125934,1}{3,600^2} 10^{-2} + 80 \times 18,8 \times 10^2 \right) = 2084,7 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 7,200$.

$$N_{RC} = \psi A f_d = 1,000 \times 53,8 \times 215 \times 10^{-1} = 1156,7 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

$$\text{- dla } N_x \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_x} = 1,15 \times \sqrt{1156,7 / 1671,9} = 0,961 \Rightarrow \varphi = 0,735$$

$$\text{- dla } N_y \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_y} = 1,15 \times \sqrt{1156,7 / 942,9} = 1,279 \Rightarrow \varphi = 0,484$$

$$\text{- dla } N_z \quad \bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_z} = 1,15 \times \sqrt{1156,7 / 2084,7} = 0,857 \Rightarrow \varphi = 0,646$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,484$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{155,0}{0,484 \times 1156,7} = 0,277 < 1$$

Zwicherungie:

Dla dwuteownika walcowanego rozstaw stężeń zabezpieczających przekrój przed obrotem $l_1 = l_{\omega} = 7200 \text{ mm}$:

$$\frac{35 i_y}{\beta} \sqrt{215 / f_d} = \frac{35 \times 33}{1,000} \times \sqrt{215 / 215} = 1173 < 7200 = l_1$$

Pręt nie jest zabezpieczony przed zwicherungiem.

Współrzędna punktu przyłożenia obciążenia $a_o = 0,00$ cm. Różnica współrzędnych środka ścinania i punktu przyłożenia siły $a_s = 0,00$ cm. Przyjęto następujące wartości parametrów zwichrzenia: $A_1 = 1,000$, $A_2 = 0,000$, $B = 1,000$.

$$A_o = A_1 b_y + A_2 a_s = 1,000 \times 0,00 + 0,000 \times 0,00 = 0,000$$

$$M_{cr} = \pm A_o N_y + \sqrt{(A_o N_y)^2 + B^2 i_s^2 N_y N_z} =$$

$$0,000 \times 942,9 + \sqrt{(0,000 \times 942,9)^2 + 1,000^2 \times 0,129^2 \times 942,9 \times 2084,7} = 181,0$$

Smukłość względna dla zwichrzenia wynosi:

$$\bar{\lambda}_L = 1,15 \sqrt{M_R / M_{cr}} = 1,15 \times \sqrt{119,8 / 181,0} = 0,936$$

Nośność przekroju na zginanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 7,200$.

- względem osi X:

$$M_R = \psi W_c f_d = 1,000 \times 557,3 \times 215 \times 10^{-3} = 119,8 \text{ kNm}$$

Współczynnik zwichrzenia dla $\bar{\lambda}_L = 0,936$ wynosi $\phi_L = 0,805$

Warunek nośności (54):

$$\frac{N}{N_{Rc}} + \frac{M_x}{\phi_L M_{Rx}} = \frac{155,0}{1156,7} + \frac{52,6}{0,805 \times 119,8} = 0,680 < 1$$

Nośność (stateczność) pręta ściskanego i zginanego:

Składnik poprawkowy:

$$M_{x \max} = 52,6 \text{ kNm} \quad \beta_x = 1,000$$

$$\Delta_x = 1,25 \phi_x \bar{\lambda}_x^2 \frac{\beta_x M_{x \max}}{M_{Rx}} \frac{N}{N_{Rc}} = 1,25 \times 0,735 \times 0,961^2 \frac{1,000 \times 52,6}{119,8} \times \frac{155,0}{1156,7} = 0,050$$

$$\Delta_x = 0,050 \quad M_{y \max} = 0 \quad \Delta_y = 0$$

Warunki nośności (58):

- dla wyboczenia względem osi X:

$$\frac{N}{\phi_x N_{Rc}} + \frac{\beta_x M_{x \max}}{\phi_L M_{Rx}} = \frac{155,0}{0,735 \times 1156,7} + \frac{1,000 \times 52,6}{0,805 \times 119,8} = 0,728 < 0,950 = 1 - 0,050$$

- dla wyboczenia względem osi Y:

$$\frac{N}{\phi_y N_{Rc}} + \frac{\beta_y M_{y \max}}{\phi_L M_{Ry}} = \frac{155,0}{0,484 \times 1156,7} + \frac{1,000 \times 52,6}{0,805 \times 119,8} = 0,823 < 1,000 = 1 - 0,000$$

Nośność przekroju na ścinanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 7,200$.

- wzdłuż osi Y

$$V_R = 0,58 A_V f_d = 0,58 \times 19,8 \times 215 \times 10^{-1} = 246,7 \text{ kN}$$

$$V_O = 0,3 V_R = 74,0 \text{ kN}$$

Warunek nośności dla ścinania wzdłuż osi Y:

$$V = 38,1 < 246,7 = V_R$$

Nośność przekroju zginanego, w którym działa siła poprzeczna:

$x_a = 0,000$; $x_b = 7,200$.

- dla zginania względem osi X: $V_y = 38,1 < 74,0 = V_o$

$$M_{R,V} = M_R = 119,8 \text{ kNm}$$

Warunek nośności (55):

$$\frac{N}{N_{Rc}} + \frac{M_x}{M_{R_{x,V}}} = \frac{155,0}{1156,7} + \frac{52,6}{119,8} = 0,573 < 1$$

Nośność przekroju na ścinanie z uwzględnieniem siły osiowej:

$x_a = 0,000$, $x_b = 7,200$.

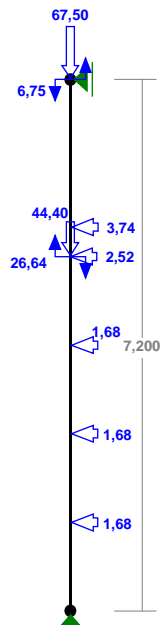
- dla ścinania wzdłuż osi Y:

$$V = 38,1 < 244,4 = 246,7 \times \sqrt{1 - (155,0 / 1156,7)^2} = V_R \sqrt{1 - (N / N_{Rc})^2} = V_{R,N}$$

Przykład 9

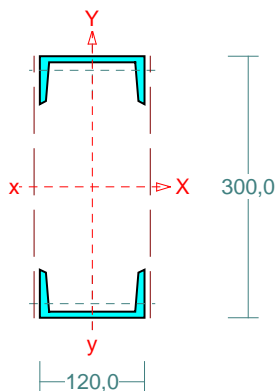
Temat: Nośność słupa wielogałęziowego - ściskanego i zginanego

Źródło: *J. Augustyn, J. Bródka, J. Łaguna, Obliczanie prętów ściskanych i zginanych według PN-90/B-03200, Inżynieria i Budownictwo Nr 3/91, Przykład 3.*



Schemat statyczny słupa

Przekrój:



Wymiary przekroju:

U 120 h=120,0 s=55,0

g=7,0 t=9,0 r=0,0 ex=16,0.

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$J_{xg}=6191,4$ $J_{yg}=728,0$ $A=34,00$

$i_x=13,5$ $i_y=4,6$.

Materiał: **St3SY**.

Wytrzymałość **fd=215 MPa** dla **g=9,0**.

Siły przekrojowe:

$x_a = 4,800$; $x_b = 2,400$.

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **AHVW**

$M_x = 26,3$ kNm, $V_y = -3,0$ kN, $N = -111,9$ kN,

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 30,8$ MPa $\sigma_c = -96,7$ MPa.

Połączenie gałęzi:

Przyjęto, że gałęzie połączone są przewiązkami o szerokości $b = 100,0$ mm i grubości $g = 8,0$ mm w odstępach $l_1 = 570,0$ mm, wykonanymi ze stali St3SY. Smukłość gałęzi:

$$\lambda_v = \lambda_1 = l_1 / i_1 = 570,0 / 15,9 = 35,85$$

$$\lambda_p = 84 \sqrt{215 / f_d} = 84 \times \sqrt{215 / 215} = 84,00$$

Współczynniki redukcji nośności:

Współczynnik niestateczności dla ścianki przy ściskaniu wynosi $\varphi_p = 1,000$.

Współczynnik niestateczności gałęzi wynosi:

$$\bar{\lambda} = \lambda_1 / \lambda_p = 35,85 / 84,00 = 0,427 \Rightarrow \varphi_1 = 0,903.$$

W związku z tym współczynniki redukcji nośności wynoszą:

$$\text{- dla zginania względem osi X: } \psi_x = 0,903$$

$$\text{- dla ściskania: } \psi_o = 0,903$$

Smukłość zastępcza pręta:

- dla wyboczenia w płaszczyźnie prostopadłej do osi X

$$\lambda = l_{wx} / i_x = 7200,0 / 134,9 = 53,36$$

$$\lambda_m = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_v^2} \cdot m / 2 = \sqrt{53,36^2 + 35,85^2} = 64,28$$

$$\bar{\lambda}_m = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \sqrt{\psi_o} = \frac{64,28}{84,00} \times \sqrt{0,903} = 0,727$$

Nośność przewiązek.

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 7,200.$$

Przewiązki prostopadłe do osi X:

$$Q = 1,2 \quad V = 1,2 \times 8,0 = 9,6 \text{ kN}$$

$$Q \geq 0,012 A f_d = 0,012 \times 34,00 \times 215 \times 10^{-1} = 8,8 \text{ kN}$$

Przyjęto $Q = 9,6$ kN

$$V_Q = \frac{Q l_1}{n(m-1)a} = \frac{9,6 \times 570,0}{2 \times (2-1) \times 268,0} = 10,2 \text{ kN}$$

$$M_Q = \frac{Q l_1}{m n} = \frac{9,6 \times 0,6}{2 \times 2} = 1,4 \text{ kNm}$$

$$V_R = 0,58 \varphi_{pv} A_v f_d = 0,58 \times 1,000 \times 0,9 \times 100,0 \times 8,0 \times 215 \times 10^{-3} = 89,8 \text{ kN}$$

$$M_R = W f_d = 8,0 \times 100,0^2 / 6 \times 215 \times 10^{-6} = 2,9 \text{ kNm}$$

$$V_Q = 10,2 < 89,8 = V_R \quad M_Q = 1,4 < 2,9 = M_R$$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_o = 7,200$$

$$l_w = 1,000 \times 7,200 = 7,200 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_o = 7,200$$

$$l_w = 1,000 \times 7,200 = 7,200 \text{ m}$$

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 6191,4}{7,200^2} 10^{-2} = 2416,5 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 728,0}{7,200^2} 10^{-2} = 284,1 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 7,200.$$

$$N_{RC} = \psi A f_d = 0,903 \times 34,0 \times 215 \times 10^{-1} = 660,1 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wybożeniowych:

$$\lambda_p = 84 \sqrt{215 / f_d} = 84 \times \sqrt{215 / 215} = 84,00$$

- dla wybożenia prostopadłego do osi X:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_m = 0,727 \Rightarrow \varphi = 0,825$$

- dla wybożenia prostopadłego do osi Y:

$$\lambda_y = l_{wy} / i_y = 7200,0 / 46,3 = 155,60$$

$$\bar{\lambda} = \lambda_y / \lambda_p = 155,60 / 84,00 = 1,852 \Rightarrow \varphi = 0,246$$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,246$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{111,9}{0,246 \times 660,1} = 0,689 < 1$$

Nośność przekroju na zginanie:

$$x_a = 4,800; \quad x_b = 2,400.$$

- względem osi X: $M_R = \psi W_c f_d = 0,903 \times 412,8 \times 215 \times 10^{-3} = 80,1 \text{ kNm}$

Współczynnik zwiczerzenia dla $\lambda_L = 0,000$ wynosi $\varphi_L = 1,000$

Warunek nośności (54):

$$\frac{N}{N_{RC}} + \frac{M_x}{\varphi_L M_{Rx}} = \frac{111,9}{660,1} + \frac{26,3}{1,000 \times 80,1} = 0,498 < 1$$

Nośność (stateczność) pręta ściskanego i zginanego:

Składnik poprawkowy:

$$M_{x \max} = 26,3 \text{ kNm} \quad \beta_x = 0,946$$

$$\Delta_x = 1,25 \varphi_x \bar{\lambda}_x^2 \frac{\beta_x M_{x \max}}{M_{Rx}} \frac{N}{N_{RC}} = 1,25 \times 0,825 \times 0,727^2 \frac{0,946 \times 26,3}{80,1} \times \frac{111,9}{660,1} = 0,029$$

$$\Delta_x = 0,029 \quad M_{y \max} = 0 \quad \Delta_y = 0$$

Warunki nośności (58):

- dla wybożenia względem osi X:

$$\frac{N}{\varphi_x N_{RC}} + \frac{\beta_x M_{x \max}}{\varphi_L M_{Rx}} = \frac{111,9}{0,825 \times 660,1} + \frac{0,946 \times 26,3}{1,000 \times 80,1} = 0,516 < 0,971 = 1 - 0,029$$

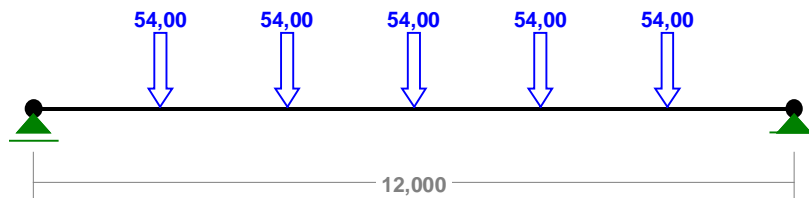
- dla wybożenia względem osi Y:

$$\frac{N}{\varphi_y N_{RC}} + \frac{\beta_x M_{x \max}}{\varphi_L M_{Rx}} = \frac{111,9}{0,246 \times 660,1} + \frac{0,946 \times 26,3}{1,000 \times 80,1} = 1,000 < 1,000 = 1 - 0,000$$

Przykład 10

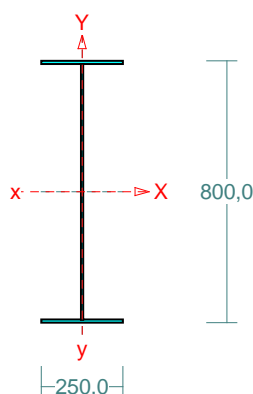
Temat: Blachownica spawana o przekroju klasy 4

Źródło: J. Bródka, Przykład obliczania blachownicy spawanej o przekroju klasy 4, Konstrukcje Stalowe Nr 3, luty 1995.



Schemat statyczny blachownicy

Przekrój:



Wymiary przekroju:

$$h=800,0 \quad g=7,0 \quad s=250,0 \quad t=10,0.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_xg=105698,9 \quad J_yg=2606,4 \quad A=104,60$$

$$i_x=31,8 \quad i_y=5,0$$

$$J_w=4063151,0, \quad J_t=25,7 \quad i_s=32,2.$$

Materiał: **St3S**.

Wytrzymałość **fd=215 MPa** dla **g=10,0**.

Siły przekrojowe:

$$x_a = 6,000; \quad x_b = 6,000.$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$M_x = -500,8 \text{ kNm}, \quad V_y = 27,0 \text{ kN}, \quad N = 0,0 \text{ kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = 189,5 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -189,5 \text{ MPa}$.

Stateczność lokalna:

$$x_a = 6,000; \quad x_b = 6,000.$$

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy **4**.

Rozstaw poprzecznych usztywnień ścianki $a = 2000,0 \text{ mm}$.

Warunek stateczności ścianki dla ścianki najbardziej narażonej na jej utratę (9):

$$\sigma_c / \varphi_p f_d = 0,895 < 1$$

Przyjęto, że przekrój wymiarowany będzie w stanie **nadkrytycznym ograniczonym**.

Współczynniki redukcji nośności przekroju:

- dla zginana względem osi X:

$$\varphi_p = 1,000 \quad W_{ec} = 2609,3 \quad W_c = 2642,5 \text{ cm}^3$$

$$\psi_x = \varphi_p W_{ec} / W_c = 1,000 \times 2609,3 / 2642,5 = 0,987$$

Długości wyboczeniowe pręta:

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_0 = 12,000$$

$$l_w = 1,000 \times 12,000 = 12,000 \text{ m}$$

- przy wyboczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_0 = 12,000$$

$$l_w = 1,000 \times 12,000 = 12,000 \text{ m}$$

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej $\mu_\omega = 1,000$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega\omega} = 2,000 \text{ m}$. Długość wyboczeniowa $l_\omega = 2,000 \text{ m}$.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 105698,9}{12,000^2} 10^{-2} = 14851,2 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 2606,4}{12,000^2} 10^{-2} = 366,2 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_\omega}{l_\omega^2} + GJ_T \right) =$$

$$\frac{1}{32,2^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 4,06 \times 10^6}{2,000^2} 10^{-2} + 80 \times 25,7 \times 10^2 \right) = 20047,6 \text{ kN}$$

Zwicherungie:

Współrzędna punktu przyłożenia obciążenia $a_o = 0,00 \text{ cm}$. Różnica współrzędnych środka ścinania i punktu przyłożenia siły $a_s = 0,00 \text{ cm}$. Przyjęto następujące wartości parametrów zwicherungia: $A_1 = 0,000$, $A_2 = 0,000$, $B = 1,000$.

$$A_o = A_1 b_y + A_2 a_s = 0,000 \times 0,00 + 0,000 \times 0,00 = 0,000$$

$$M_{cr} = \pm A_o N_y + \sqrt{(A_o N_y)^2 + B^2 i_s^2 N_y N_z} =$$

$$0,000 \times 366,2 + \sqrt{(0,000 \times 366,2)^2 + 1,000^2 \times 0,322^2 \times 366,2 \times 20047,6} = 871,9$$

Smukłość względna dla zwicherungia wynosi:

$$\bar{\lambda}_L = 1,15 \sqrt{M_R / M_{cr}} = 1,15 \times \sqrt{560,7 / 871,9} = 0,922$$

Nośność przekroju na zginanie:

$$x_a = 6,000; \quad x_b = 6,000.$$

- względem osi X

$$M_R = \psi W_c f_d = 0,987 \times 2642,5 \times 215 \times 10^{-3} = 560,7 \text{ kNm}$$

Współczynnik zwicherungia dla $\lambda_L = 0,922$, przy założeniu spawania zmechanizowanego, wynosi $\varphi_L = 0,815$

Warunek nośności (54):

$$\frac{M_x}{\varphi_L M_{Rx}} = \frac{500,8}{0,815 \times 560,7} = 1,096 > 1$$

Nośność przekroju na ścinanie:

$x_a = 0,000$; $x_b = 12,000$.

- wzdłuż osi Y

$$V_R = 0,58 \varphi_{pv} A_v f_d = 0,58 \times 0,628 \times 54,6 \times 215 \times 10^{-1} = 427,7 \text{ kN}$$

$$V_O = 0,3 V_R = 128,3 \text{ kN}$$

Warunek nośności dla ścinania wzdłuż osi Y:

$$V = 139,9 < 427,7 = V_R$$

Nośność przekroju zginanego, w którym działa siła poprzeczna:

$x_a = 6,000$; $x_b = 6,000$.

- dla zginania względem osi X:

$$V_y = 27,0 < 128,3 = V_o, \quad M_{R,V} = M_R = 560,7 \text{ kNm}$$

Warunek nośności (55):

$$\frac{M_x}{M_{R_x,V}} = \frac{500,8}{560,7} = 0,893 < 1$$

Nośność środka pod obciążeniem skupionym:

$x_a = 0,000$; $x_b = 12,000$.

Przyjęto szerokość rozkładu obciążenia skupionego $c = 180,0$ mm. Dodatkowe usztywnienie środka przyjęto o rozstawie $a_1 = 2000,0$ mm.

$$k_c = \left(15 + 25 \frac{c_o}{h_w}\right) \sqrt{\frac{t_f}{t_w} \frac{215}{f_d}} = \left(15 + 25 \times \frac{200,0}{780,0}\right) \times \sqrt{\frac{10,0 \times 215}{7,0 \times 215}} = 25,590$$

$$k_c \leq c_o / t_w = 200,0 / 7,0 = 28,571$$

Przyjęto $k_c = 25,590$

Warunek dodatkowy:

$$k_c \leq 20 \sqrt{\frac{215}{f_d}} = 20 \times \sqrt{\frac{215}{215}} = 20,000$$

Siła nie może zmieniać położenie na przecię.

Naprężenia ściskające w środku wynoszą $\sigma_c = 0,0$ MPa. Współczynnik redukcji nośności wynosi: $\eta_c = 1,000$

Nośność środka na siłę skupioną:

$$P_{R,c} = k_c t_w^2 \eta_c f_d = 25,590 \times (7,0)^2 \times 1,000 \times 215 \times 10^{-3} = 269,6 \text{ kN}$$

Warunek nośności środka:

$$P = 139,9 < 269,6 = P_{R,c}$$

Złożony stan środka

$x_a = 6,250$; $x_b = 5,750$.

Siły przekrojowe przypadające na środek i nośności środka:

$N_w = 0,0$	$N_{Rw} = 844,0$	kN
$M_w = 129,4$	$M_{Rw} = 150,6$	kNm
$V = -27,2$	$V_R = 427,7$	kN
$P = 0,0$	$P_{Rc} = 269,6$	kN

Współczynnik niestateczności ścianki wynosi: $\varphi_p = 0,960$.

Warunek nośności środka:

$$\left(\frac{N_w}{N_{Rw}} + \frac{M_w}{M_{Rw}} + \frac{P}{P_{Rc}}\right)^2 - 3 \varphi_p \left(\frac{N_w}{N_{Rw}} + \frac{M_w}{M_{Rw}}\right) \frac{P}{P_{Rc}} + \left(\frac{V}{V_R}\right)^2 =$$

$$\left(\frac{0,0}{844,0} + \frac{129,4}{150,6} + \frac{0,0}{269,6}\right)^2 - 3 \times 0,960 \times \left(\frac{0,0}{844,0} + \frac{129,4}{150,6}\right) \frac{0,0}{269,6} + \left(\frac{27,2}{427,7}\right)^2 = 0,742 < 1$$

Stan graniczny użytkowania:

Ugięcia względem osi Y liczone od cięciwy pręta wynoszą:

$$a_{\max} = 33,9 \text{ mm}, a_{\text{gr}} = l / 350 = 12000 / 350 = 34,3 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = 33,9 < 34,3 = a_{\text{gr}}$$

Przykład 11

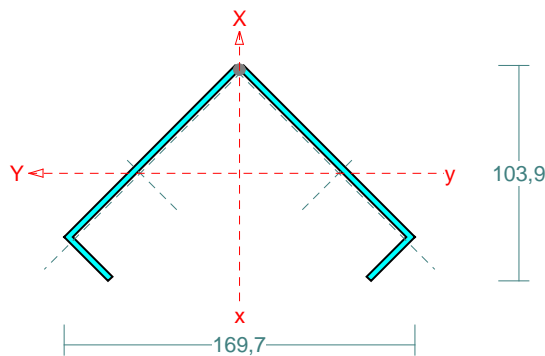
Temat: Ściskanie osiowe słupa z kątownika giętego.

Źródło: Z. Boretti, W. Bogucki, S. Gajowniczek, W. Hryniewiecka, Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych, ARKADY 1997. Przykład 3-6, str. 56.

Uwagi: Przykład ten stanowi ilustrację wykorzystania modułu RM-STAL do wymiarowania prętów projektowanych z elementów giętych. Opcja **Przekroje** programu głównego umożliwia kreowanie tzw. przekroju **składanego jednogłęziowego**, co może być wykorzystane do modelowania dowolnego kształtownika giętego.

W poniższym przykładzie geometria rzeczywistego przekroju słupa (w formie kątownika trójgiętego 120×120×30×3) została przybliżona jednogłęziowym przekrojem uzyskanym przez odpowiednie złożenie dwóch kątowników 117×30×3 deklarowanych przez użytkownika. Wielkości geometryczne (wysokość: $h=2,50$ m, współczynniki wybozczeniowe: $\mu_x = 1$, $\mu_y = 1$, $\mu_w = 0,5$), statyczne (siła osiowa $N=61,2$ kN) i materiałowe (stal St3SY) dla słupa przyjęto jak w cytowanym źródle.

Przekrój:



Wymiary przekroju:

$$h=117,0 \quad s=30,0$$

$$g=3,0 \quad e_x=4,3 \quad e_y=47,8.$$

Charakterystyka geometryczna przekroju:

$$J_{xg}=251,2 \quad J_{yg}=74,7 \quad A=8,64$$

$$i_x=5,4 \quad i_y=2,9 \quad J_w=478,5 \quad J_t=0,3$$

$$x_s=6,0 \quad i_s=8,6 \quad r_y=-7,0 \quad b_x=9,5.$$

Materiał: **St3SY**.

Wytrzymałość **fd=215** MPa dla **g=3,0**.

Przekrój spełnia warunki przekroju klasy 2.

Siły przekrojowe:

$$x_a = 0,000; \quad x_b = 2,500.$$

Obciążenia działające w płaszczyźnie układu: **A**

$$N = -61,2 \text{ kN},$$

Naprężenia w skrajnych włóknach: $\sigma_t = -70,8$ MPa $\sigma_c = -70,8$ MPa.

Długości wybozczeniowe pręta:

- przy wybozczeniu w płaszczyźnie układu przyjęto podatności węzłów ustalone wg załącznika 1 normy:

$$\chi_1 = 1,000, \quad \chi_2 = 1,000 \quad \text{węzły nieprzesuwne} \Rightarrow \mu = 1,000 \quad \text{dla } l_0 = 2,500$$

$$l_w = 1,000 \times 2,500 = 2,500 \text{ m}$$

- przy wybozczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny układu:

$\chi_1 = 1,000, \chi_2 = 1,000$ węzły nieprzesuwne $\Rightarrow \mu = 1,000$ dla $l_0 = 2,500$

$l_w = 1,000 \times 2,500 = 2,500$ m

- dla wyboczenia skrętnego przyjęto współczynnik długości wyboczeniowej

$\mu_{\omega} = 0,500$. Rozstaw stężeń zabezpieczających przed obrotem $l_{\omega} = 2,500$ m.

Długość wyboczeniowa $l_{\omega} = 1,250$ m.

Siły krytyczne:

$$N_x = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 251,2}{2,500^2} 10^{-2} = 813,2 \text{ kN}$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EJ}{l_w^2} = \frac{3,14^2 \times 205 \times 74,7}{2,500^2} 10^{-2} = 241,8 \text{ kN}$$

$$N_z = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_{\omega}}{l_{\omega}^2} + GJ_T \right) = \frac{1}{8,6^2} \left(\frac{3,14^2 \times 205 \times 478,5}{1,250^2} 10^{-2} + 80 \times 0,3 \times 10^2 \right) = 115,9 \text{ kN}$$

$$N_{xz} = \frac{N_x + N_z - \sqrt{(N_x + N_z)^2 - 4N_x N_z (1 - \mu y_s^2 / i_s^2)}}{2(1 - \mu y_s^2 / i_s^2)} =$$

$$\frac{813,2 + 115,9 - \sqrt{(813,2 + 115,9)^2 - 4 \times 813,2 \times 115,9 \times (1 - 0,707 \times 6,0^2 / 8,6^2)}}{2 \times (1 - 0,707 \times 6,0^2 / 8,6^2)} = 110,0 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie:

$x_a = 0,000; x_b = 2,500$.

$$N_{RC} = A f_d = 8,6 \times 215 \times 10^{-1} = 185,8 \text{ kN}$$

Określenie współczynników wyboczeniowych:

- dla N_x $\bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_x} = 1,15 \times \sqrt{185,8 / 813,2} = 0,552 \Rightarrow \varphi = 0,836$

- dla N_y $\bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_y} = 1,15 \times \sqrt{185,8 / 241,8} = 1,012 \Rightarrow \varphi = 0,554$

- dla N_{xz} $\bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{N_{RC} / N_{xz}} = 1,15 \times \sqrt{185,8 / 110,0} = 1,494 \Rightarrow \varphi = 0,342$

Przyjęto: $\varphi = \varphi_{\min} = 0,342$

Warunek nośności pręta na ściskanie (39):

$$\frac{N}{\varphi N_{RC}} = \frac{61,2}{0,342 \times 185,8} = 0,963 < 1$$

NOŚNOŚĆ PRĘTÓW:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Przekój:	Pręt:	Warunek nośności:	Wykorzystanie:
1	1	Nośność przy ściskaniu ze zgin	35,7%
	2	Nośność przy ściskaniu ze zgin	65,4%
	3	Nośność przy ściskaniu ze zgin	65,4%
	4	Nośność przy ściskaniu ze zgin	35,2%
	5	Stan graniczny użytkowania	67,5%
2	6	Nośność na rozciąganie (32)	29,0%
	7	Nośność na rozciąganie (32)	24,4%
	8	Nośność na rozciąganie (32)	24,4%
	10	Nośność na rozciąganie (32)	52,8%
3	11	Nośność na ściskanie (39)	37,1%
	12	Nośność na rozciąganie (32)	52,8%
	13	Nośność na ściskanie (39)	21,8%
	9	Nośność przy ściskaniu ze zgin	24,2%
	14	Nośność na ściskanie (39)	82,6%
	15	Nośność łączników	35,4%
	16	Nośność łączników	38,4%
17	Nośność na ściskanie (39)	82,3%	

STATECZNOŚĆ MIEJSCOWA:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	Kl:	Stan:	ψ_0 :	ψ_x :	ψ_y :	ΔM_x :	ΔM_y :	War. (9):
1	2							
2	2							
3	2							
4	2							
9	4	krytyczny	0,983	1,000	0,983			
11	4	krytyczny	0,945	0,945	1,000			
13	4	krytyczny	0,923	0,923	1,000			
14	4	krytyczny	0,946	1,000	0,946			
17	4	krytyczny	0,935	1,000	0,935			

NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE (54):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	x/L:	ϕ_L :	M_x :	M_{rx} :	M_y :	M_{ry} :	N/Nr:	SW:
1	0,500	1,000	3,6	10,3	0,0	5,9	0,004	0,354
2	0,500	1,000	3,6	10,3	0,0	5,9	0,263	0,613
3	0,500	1,000	3,6	10,3	0,0	5,9	0,263	0,613
4	0,500	1,000	3,6	10,3	0,0	5,9	0,000	0,350
9	0,500	1,000	-0,6	3,2	0,0	2,7	0,043	0,236

ZGINANIE ZE ŚCINANIEM (55):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	x/L:	M_x :	M_{rvx} :	M_y :	M_{rvy} :	N/Nr:	SW:
-------	------	---------	-------------	---------	-------------	-------	-----

1	0,500	3,6	10,3	0,0	5,9	0,004	0,354
2	0,500	3,6	10,3	0,0	5,9	0,263	0,613
3	0,500	3,6	10,3	0,0	5,9	0,263	0,613
4	0,500	3,6	10,3	0,0	5,9	0,000	0,350
9	0,500	-0,6	3,2	0,0	2,7	0,043	0,236

NOŚNOŚĆ NA ŚCINANIE:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	x/L:	Vy:	Vry:	ϕ_{vy} :	Vx:	Vrx:	ϕ_{vx} :	SW:
1	0,000	-12,0	124,5	1,000	0,0	173,6	1,000	0,096
2	0,000	-12,0	124,5	1,000	0,0	173,6	1,000	0,096
3	0,000	-12,0	124,5	1,000	0,0	173,6	1,000	0,096
4	0,000	-12,0	124,5	1,000	0,0	173,6	1,000	0,096
9	0,000	2,5	87,0	1,000	0,0	55,0	1,000	0,029

ŚCINANIE Z SIŁĄ OSIOWĄ (56):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	x/L:	Vy:	Vyr,n:	Vx:	Vxr,n:	N/Nr:	SW:
1	1,000	12,0	124,5	0,0	173,6	0,006	0,096
2	1,000	12,0	120,1	0,0	167,4	0,265	0,100
3	1,000	12,0	120,1	0,0	167,4	0,265	0,100
4	0,000	-12,0	124,5	0,0	173,6	0,002	0,096
9	0,000	2,5	86,9	0,0	54,9	0,043	0,029

NOŚNOŚĆ NA ROZCIĄGANIE (32):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	A[cm ²]:	A ψ [cm ²]:	N[kN]:	Nrt[kN]:	SW:	
1	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	-3,5	423,2	0,008
2	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	-150,7	423,2	0,356
3	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	-150,7	423,2	0,356
4	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	1,0	423,2	0,002
5	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	122,9	525,8	0,234
6	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	122,9	423,2	0,290
7	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	103,1	423,2	0,244
8	Zam.mimośrod.	34,50	25,65	103,1	423,2	0,244
9	Zam.mimośrod.	16,62	15,55	-12,2	272,2	0,045
10	Zam.mimośrod.	6,16	5,42	50,0	94,8	0,528
11	Zam.mimośrod.	6,16	5,42	-24,1	94,8	0,254
12	Zam.mimośrod.	6,16	5,42	50,0	94,8	0,528
13	Zam.mimośrod.	6,16	5,42	-12,0	94,8	0,127
14	Zam.mimośrod.	16,62	15,55	-163,4	272,2	0,600
15	Zam.mimośrod.	16,62	15,55	35,6	272,2	0,131
16	Zam.mimośrod.	16,62	15,55	68,0	272,2	0,250
17	Zam.mimośrod.	16,62	15,55	-151,9	272,2	0,558

NOŚNOŚĆ NA ŚCIŚKANIE (39):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	lwx:	lwy:	$\bar{\lambda}$:	φ :	ψ :	N[kN]:	Nrc[kN]:	SW:
1	1,204	1,204	0,552	0,836	1,000	-3,5	569,3	0,007
2	1,204	1,204	0,552	0,836	1,000	-150,7	569,3	0,317
3	1,204	1,204	0,552	0,836	1,000	-150,7	569,3	0,317
4	1,204	1,204	0,552	0,836	1,000	1,0	569,3	0,002
9	1,000	1,000	0,455	0,890	0,983	-12,2	285,9	0,048
11	1,200	1,200	0,869	0,638	0,945	-24,1	101,9	0,371
13	1,400	1,400	1,014	0,554	0,923	-12,0	99,5	0,218
14	1,628	1,628	0,740	0,719	0,946	-163,4	275,1	0,826
17	1,769	1,769	0,804	0,679	0,935	-151,9	271,9	0,823

$\bar{\lambda}$ - miarodajna smukłość względna (λ/λ_p)

ŚCISKANIE ZE ZGINANIEM (58):

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	nx:	ny:	φ_L :	mx:	my:	Δx :	Δy :	SW:
1	0,003	0,003	1,000	0,350	0,000	0,000	0,000	0,357
2	0,272	0,300	1,000	0,350	0,000	0,009	0,000	0,654
3	0,272	0,300	1,000	0,350	0,000	0,009	0,000	0,654
4	0,002	0,002	1,000	0,350	0,000	0,000	0,000	0,352
9	0,048	0,046	1,000	0,193	0,000	0,002	0,000	0,242

nx, ny, mx, my - składniki warunku (58)

OSŁABIENIA OTWORAMI:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	Ao:	ψ_o :	ψ_{vy} :	ψ_{vx} :	σ_e/f_d :	τ_y/f_{dt} :	τ_x/f_{dt} :	σ_r/f_d :	SW:
1	0,00	1,000	1,000	1,000	0,345	0,000	0,000	0,345	0,345
2	0,00	1,000	1,000	1,000	0,388	0,000	0,000	0,388	0,388
3	0,00	1,000	1,000	1,000	0,388	0,000	0,000	0,388	0,388
4	0,00	1,000	1,000	1,000	0,350	0,000	0,000	0,350	0,350
5	0,00	1,000	1,000	1,000	0,174	0,000	0,000	0,174	0,174
6	0,00	1,000	1,000	1,000	0,216	0,000	0,000	0,216	0,216
7	0,00	1,000	1,000	1,000	0,181	0,000	0,000	0,181	0,181
8	0,00	1,000	1,000	1,000	0,181	0,000	0,000	0,181	0,181
9	0,00	1,000	1,000	1,000	0,151	0,000	0,000	0,151	0,151
10	0,00	1,000	1,000	1,000	0,464	0,000	0,000	0,464	0,464
11	0,00	1,000	1,000	1,000	0,223	0,000	0,000	0,223	0,223
12	0,00	1,000	1,000	1,000	0,464	0,000	0,000	0,464	0,464
13	0,00	1,000	1,000	1,000	0,112	0,000	0,000	0,112	0,112
14	0,00	1,000	1,000	1,000	0,562	0,000	0,000	0,562	0,562
15	0,00	1,000	1,000	1,000	0,123	0,000	0,000	0,123	0,123
16	0,00	1,000	1,000	1,000	0,234	0,000	0,000	0,234	0,234
17	0,00	1,000	1,000	1,000	0,522	0,000	0,000	0,522	0,522

Ao -powierzchnia otworów; $f_{dt}=0,58 \cdot f_d$

NOŚNOŚĆ PRZEWIAZEK:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	Q[kN]:	Mq[kNm]:	Mr[kNm]:	Vq[kN]:	Vr[kN]:	SW:
9	3,5	0,3	2,9	19,5	89,8	0,217
10	1,3	0,1	2,9	7,1	89,8	0,079

11	1,3	0,2	2,9	7,8	89,8	0,086
12	1,3	0,2	2,9	8,4	89,8	0,094
13	1,3	0,2	2,9	9,0	89,8	0,101
14	3,5	0,6	2,9	31,7	89,8	0,354
15	3,5	0,6	2,9	31,7	89,8	0,354
16	3,5	0,6	2,9	34,5	89,8	0,384
17	3,5	0,6	2,9	34,5	89,8	0,384

STAN GRANICZNY UŻYTKOWANIA:

T.I rzędu

Obciążenia char.: AB

Pręt:	Rodzaj:	Ogranicz.:	L(H*):	agr[mm]:	a[mm]:	SW:
1	Ugięcie Y	L/350	1204,2	3,4	0,4	0,112
2	Ugięcie Y	L/350	1204,2	3,4	0,4	0,112
3	Ugięcie Y	L/350	1204,2	3,4	0,4	0,112
4	Ugięcie Y	L/350	1204,2	3,4	0,4	0,112
5	Ugięcie Y	L/350	1200,0	3,4	2,3	0,675
6	Ugięcie Y	L/350	1200,0	3,4	0,0	0,000
7	Ugięcie Y	L/350	1200,0	3,4	0,0	0,000
8	Ugięcie Y	L/350	1200,0	3,4	0,0	0,000
9	Ugięcie Y	L/350	1000,0	2,9	0,3	0,120
10	Ugięcie X	L/350	1100,0	3,1	0,0	0,000
11	Ugięcie X	L/350	1200,0	3,4	0,0	0,000
12	Ugięcie X	L/350	1300,0	3,7	0,0	0,000
13	Ugięcie X	L/350	1400,0	4,0	0,0	0,000
14	Ugięcie Y	L/350	1627,9	4,7	0,0	0,000
15	Ugięcie Y	L/350	1627,9	4,7	0,0	0,000
16	Ugięcie Y	L/350	1769,2	5,1	0,0	0,000
17	Ugięcie Y	L/350	1769,2	5,1	0,0	0,000

*) H - wysokość poziomego węzła

DŁUGOŚCI WYBOCZENIOWE:

T.I rzędu

Obciążenia obl.: AB

Pręt:	μ_x :	μ_y :	μ_ω :	Lox:	Loy:	Lo ω :	λ_x :	λ_y :
1	1,000	1,000	1,000	1,204	1,204	1,204	26,91	47,15
2	1,000	1,000	1,000	1,204	1,204	1,204	26,91	47,15
3	1,000	1,000	1,000	1,204	1,204	1,204	26,91	47,15
4	1,000	1,000	1,000	1,204	1,204	1,204	26,91	47,15
5	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	1,200	26,81	46,99
6	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	1,200	26,81	46,99
7	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	1,200	26,81	46,99
8	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	1,200	26,81	46,99
9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	42,32	43,92
10	1,000	1,000	1,000	1,100	1,100	1,100	50,64	74,17
11	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	1,200	55,24	80,91
12	1,000	1,000	1,000	1,300	1,300	1,300	59,84	87,65
13	1,000	1,000	1,000	1,400	1,400	1,400	64,44	94,39
14	1,000	1,000	1,000	1,628	1,628	1,628	68,90	71,49
15	1,000	1,000	1,000	1,628	1,628	1,628	68,89	71,49
16	1,000	1,000	1,000	1,769	1,769	1,769	74,87	77,70
17	1,000	1,000	1,000	1,769	1,769	1,769	74,86	77,70