

**Tomasz Falborski, Witold Knabe,
Aleksander Perliński, Elżbieta Urbańska-Galewska**

WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA STALOWYCH KONSTRUKCJI PRĘTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU

Autodesk Robot Structural Analysis

Gdańsk 2024

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Piotr Iwicki

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Wioleta Lipska-Kamińska

ZDJĘCIE NA OKŁADCE

Aleksander Perliński

Wydanie I – 2019

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2024

ISBN 978-83-7348-763-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dodruk I wyd. Ark. wyd. 10,1, ark. druku 9,5, 1264/1188

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
Definicje	7
1. Podstawy modelowania i analizowania konstrukcji stalowych (<i>Elżbieta Urbańska-Galewska</i>)	9
1.1. Modele obliczeniowe	10
1.1.1. Modele materiałowe	10
1.1.2. Modele obliczeniowe konstrukcji	12
1.1.3. Wrażliwość konstrukcji na efekty II rzędu	13
1.2. Rodzaje analiz konstrukcji stalowych	14
1.3. Charakterystyka ustrojów prętowych	18
1.4. Imperfekcje	20
1.4.1. Klasyfikacja imperfekcji [14]	20
1.4.2. Nośność pręta rzeczywistego	22
1.5. Imperfekcje w normowych modelach obliczeniowych	24
1.5.1. Imperfekcje lokalne pojedynczych prętów	25
1.5.2. Imperfekcje globalne układów ramowych	27
1.5.3. Imperfekcje globalne w analizie stężeń	28
1.6. Zakres stosowania analizy I i II rzędu	31
2. Wprowadzenie do analiz numerycznych konstrukcji stalowych (<i>Tomasz Falborski</i>)	36
2.1. Przykład obliczeniowy 1: słup wspornikowy	36
2.2. Przykład obliczeniowy 2: słup obustronnie przegubowy	48
2.3. Przykład obliczeniowy 3: rama portalowa	50
3. Wymiarowanie ram portalowych z uwzględnieniem imperfekcji globalnych (<i>Aleksander Perliński</i>)	54
3.1. Sposoby wprowadzania imperfekcji przechyłowych w programach inżynierskich	54
3.1.1. Zastosowanie offsetu	54
3.1.2. Zastosowanie imperfekcji przechyłowej bezpośrednio w geometrii modelu konstrukcji	55
3.1.3. Zastosowanie obciążenia zastępczego	55
3.2. Przykład obliczeniowy 1: sposoby wprowadzania imperfekcji przechyłowych	55
3.2.1. Rozwiązanie – metoda 1: zastosowanie offsetu	56

3.2.2. Rozwiązanie – metoda 2: zastosowanie imperfekcji przechyłowej bezpośrednio w geometrii modelu konstrukcji	64
3.2.3. Rozwiązanie – metoda 3: zastosowanie obciążenia zastępczego	66
3.3. Przykład obliczeniowy 2: rama jednonawowa	70
3.3.1. Obliczenia statyczne i wymiarowanie słupa – analiza bez uwzględniania imperfekcji	71
3.3.2. Obliczenia statyczne i wymiarowanie słupa – analiza z uwzględnieniem globalnej imperfekcji przechyłowej	82
3.4. Przykład obliczeniowy 3: rama trójnawowa, trzykondygnacyjna	90
3.4.1. Obliczenia statyczne i wymiarowanie słupów – analiza bez uwzględniania imperfekcji	90
3.4.2. Obliczenia statyczne i wymiarowanie słupów – analiza z uwzględnieniem globalnej imperfekcji przechyłowej	102
4. Analiza słupa złożonego z przewiązkami (<i>Witold Knabe</i>)	111
4.1. Obliczanie elementów osiowo ściskanych, podpartych przegubowo na końcach	111
4.2. Przykład obliczeniowy: słup złożony z przewiązkami – model ramowy	112
4.2.1. Przyjęcie przekrojów i materiału słupa	113
4.2.2. Węzły konstrukcji	114
4.2.3. Zdefiniowanie prętów gałęzi słupa	115
4.2.4. Przyjęcie podpór	117
4.2.5. Przyjęcie obciążenia	117
4.2.6. Wprowadzenie wstępnych imperfekcji słupa	118
4.2.7. Obliczenia konstrukcji	120
4.2.8. Siły wewnętrzne i wymiarowanie gałęzi słupa	120
4.2.9. Podsumowanie	121
5. Obliczenia statyczne układów stężeń (<i>Tomasz Falborski</i>).....	122
5.1. Przykład obliczeniowy 1: tężnik połaciowy poprzeczny	122
5.1.1. Definicja modelu obliczeniowego w programie ARSA 2016	123
5.1.2. Oddziaływania na tężnik połaciowy poprzeczny	132
5.1.3. Wyniki obliczeń	137
5.1.4. Obliczenia z wykorzystaniem imperfekcji geometrycznych	138
5.2. Przykład obliczeniowy 2: tężnik pionowy ścienny	141
5.2.1. Definicja modelu obliczeniowego w programie ARSA 2016	141
5.2.2. Oddziaływania na tężnik pionowy ścienny	143
5.2.3. Wyniki obliczeń	146
5.2.4. Obliczenia z wykorzystaniem imperfekcji geometrycznych	146

WSTĘP

Nowoczesne metody projektowania konstrukcji stalowych w coraz większym stopniu wykorzystują zaawansowane metody modelowania i analizowania układów konstrukcyjnych z wykorzystaniem komercyjnych programów komputerowych. Poprawne korzystanie z nowoczesnych narzędzi projektowych wymaga jednak od użytkowników tychże programów dobrej znajomości podstaw modelowania konstrukcji. Niniejsze opracowanie nie tylko ma na celu przybliżenie podstawowej wiedzy w tym zakresie, ale również, dzięki licznym przykładom, może stanowić istotną pomoc w rozwiązywaniu zadań z dziedziny analiz wyboczeniowych oraz wykonywaniu obliczeń statycznych stalowych konstrukcji prętowych z zastosowaniem analizy II rzędu.

DEFINICJE

Analiza globalna – wyznaczenie spójnego zestawu sił wewnętrznych i momentów zginających lub naprężeń w konstrukcji, które są w równowadze z określonym zestawem oddziaływań na konstrukcję, zależnie od jej właściwości geometrycznych, konstrukcyjnych i materiałowych.

Analiza konstrukcji – procedura lub algorytm służące do wyznaczenia efektów oddziaływań w każdym punkcie konstrukcji; analizę konstrukcji można przeprowadzić na trzech poziomach, stosując modele analizy globalnej, analizy elementu konstrukcji i analizy lokalnej wg [15].

Analiza I rzędu [15] – analiza geometrycznie liniowa, w której zakłada się zasadę zeszywnienia, tzn. warunki równowagi konstrukcji określa się z uwzględnieniem nieodkształconej geometrii konstrukcji, a więc bez deformacji wstępnych i deformacji powstałych pod wpływem oddziaływań (mechanicznych/termicznych).

Analiza II rzędu – analiza geometrycznie nieliniowa, uwzględniająca zmianę sztywności konstrukcji w czasie jej deformacji; zmienność sztywności jest efektem zarówno nieliniowości geometrycznej (odkształceń powstających w czasie obciążania konstrukcji), jak i nieliniowości materiałowej.

Efekty II rzędu – dodatkowe siły wewnętrzne powstające na skutek nieosiowego działania sił ściskających na pręty, które nie są prostoliniowe lub których końce przemieściły się względem siebie pod wpływem działania obciążenia; efekty II rzędu powinny być uwzględniane w obliczeniach statycznych, jeżeli powodują znaczący przyrost wartości sił wewnętrznych lub przemieszczeń.

Globalna analiza plastyczna – analiza, w której obok nieliniowych właściwości materiału uwzględniana jest plastyczna redystrybucja sił wewnętrznych na skutek uplastycznienia poszczególnych przekrojów konstrukcji (przeguby plastyczne).

Globalna analiza sprężysta – analiza, w której charakterystyka materiału σ - ϵ pozostaje liniowa niezależnie od poziomu naprężeń.

Siły wewnętrzne – siły pojawiające się wewnątrz ciała pod wpływem działania sił zewnętrznych; należą do nich siły osiowe (ściskające, rozciągające), siły poprzeczne, momenty zginające i skręcające.

Sztywność konstrukcji – zdolność układu konstrukcyjnego do przeciwstawiania się oddziaływaniom zewnętrznym (obciążeniom) poprzez zachowanie kształtu/geometrii; miarą sztywności są wywołane obciążeniami przemieszczenia konstrukcji.

Układ prętowy/ramowy – część konstrukcji lub cała konstrukcja obejmująca zestaw bezpośrednio połączonych elementów konstrukcyjnych zaprojektowanych w celu współdziałania i przenoszenia obciążeń; termin ten odnosi się zarówno do układów (ram) o węzłach sztywnych, jak i do układów kratowych, obejmuje układy płaskie i przestrzenne.

Układ ramowy nieprzechyłowy (niewrażliwy na efekty II rzędu) – konstrukcja ramowa o dostatecznie dużej sztywności w płaszczyźnie sił poziomych, pozwalającej na pominięcie w analizie globalnej wpływu efektów II rzędu.

Układ ramowy przechyłowy (wrażliwy na efekty II rzędu) – konstrukcja ramowa, która pod wpływem obciążenia przemieszcza się, generując efekty II rzędu, których wpływ na nośność należy sprawdzić.

Układ ramowy samostateczny – konstrukcja ramowa z węzłami sztywnymi, niestężona; układ samostateczny może być zarówno wrażliwy, jak i niewrażliwy na efekty II rzędu.

Typ układu prętowego/ramowego – termin ten jest używany w celu rozróżnienia układów, które (w odniesieniu do sztywności połączeń) traktuje się jako:

- niepełnościągłe (*semi-continuous*) – cechy konstrukcyjne prętów i węzłów wymagają formalnego uwzględnienia w analizie globalnej;
- ciągłe (*continuous*) – uwzględnienia w analizie globalnej wymagają tylko cechy prętów;
- proste/przegubowe (*simple/pinned*) – nie jest wymagane, aby węzły przenosiły momenty.

Węzeł nominalnie przegubowy – węzeł, który ma zapewnioną odpowiednią swobodę obrotu i przenosi siły wewnętrzne, nie generując znaczących momentów zginających, które mogłyby niekorzystnie oddziaływać na elementy lub całą konstrukcję.

Węzeł podatny – węzeł, który nie spełnia kryteriów węzła sztywnego lub węzła nominalnie przegubowego; jest zdolny do przenoszenia sił wewnętrznych i momentów zginających, jednocześnie cechując się znaczącym obrotem analizowanego pręta w węźle.

Węzeł sztywny – węzeł o sztywności obrotowej wystarczającej do przeniesienia momentu zginającego zapewniającego pełną ciągłość łączonych prętów.

Zasada superpozycji – obowiązuje w mechanice liniowej i przyjmuje, że wpływy poszczególnych obciążeń są od siebie niezależne, a efekt ich działania w postaci odkształceń lub sił wewnętrznych może być wyznaczony jako suma efektów wywołanych ich wpływem oddzielnie.

Związki konstytutywne – matematyczne zapisy zależności pomiędzy tensorem naprężenia i odkształcenia; mogą opisywać również inne związki, takie jak np. zachowanie materiału w zależności od wartości temperatury.