

Spis treści

Stosowane oznaczenia	VIII
1. Wprowadzenie	1
2. Teoria pierwszego rzędu	6
2.1. Pręty cienkościennie o przekroju otwartym	8
2.1.1. Charakterystyki geometryczne przekroju cienkościennego	13
2.1.2. Środek zginania (ścinania, skręcania)	14
2.1.3. Wycinkowy moment bezwładności i wycinkowe momenty statyczne	16
2.1.4. Przykładowe obliczenia charakterystyk przekroju cienkościennego	17
2.1.5. Równania różniczkowe równowagi pręta	24
2.1.6. Odkształcenia i naprężenia normalne, siły przekrojowe	27
2.1.7. Naprężenia styczne, siły przekrojowe	30
2.1.8. Naprężeniowe warunki nośności	33
2.2. Przykłady obliczeń elementów cienkościennych	33
3. Imperfekcje	56
3.1. Wprowadzenie	56
3.2. Imperfekcje globalne układu ramowego	58
3.3. Łukowe imperfekcje lokalne	60
3.4. Stężenia dachowe – przepisy normowe	64
3.5. Naprężenia i odkształcenia spawalnicze – informacje ogólne	66
3.5.1. Naprężenia spawalnicze	66
3.5.2. Wpływ naprężeń spawalniczych na nośność i stateczność elementów	68
3.5.3. Odkształcenia spawalnicze	73
4. Teoria drugiego rzędu	77
4.1. Efekt $P-\Delta$ w ramach, globalne wstępne imperfekcje przechyłowe	82
4.1.1. Uwzględnianie efektów przechyłowych analizą I rzędu	83
4.1.2. Możliwość pomijania imperfekcji przechyłowych w analizie ram	88
4.2. Efekt $P-\Delta$ dla pręta	111
4.2.1. Wydłużenie prętów	112
4.2.2. Wpływ obrotu cięciwy pręta na wartości sił przywęzłowych	113
4.3. Efekt $P-\delta$ dla pręta	114
4.3.1. Wpływ odkształceń giętnych na osiową sztywność pręta	114
4.3.2. Algorytm postępowania przy obciążeniu siłą osiową i obciążeniem poprzecznym	120
4.3.3. Wpływ ściskania na sztywność giętną pręta	124
4.3.4. Wytyżenie pręta według teorii II rzędu (z efektem $P-\delta$)	126
4.3.5. Wytyżenie elementów wzmacnianych według teorii II rzędu	129

5. Metoda elementów skończonych	138
5.1. Informacje ogólne	138
5.2. Podstawowe elementy skończone stosowane w konstrukcjach prętowych	141
5.3. Sterowanie rozwiązaniem układu równań	145
5.4. Tensor odkształceń Greena–Lagrange’a i drugi tensor naprężeń Pioli–Kirchhoffa	146
5.5. Wstępnie zdeformowany płaski element ramowy	148
5.5.1. Związki geometryczne	148
5.5.2. Związki fizyczne	151
5.5.3. Funkcje kształtu i funkcje wybierające	151
5.5.4. Przyrostowe równania równowagi	152
5.6. Poziomy analiz	162
6. Węzły	165
6.1. Wprowadzenie	165
6.2. Węzły typu belka–słup	170
6.2.1. Węzły typu belka–słup w globalnej analizie sprężystej	171
6.2.2. Węzły typu belka–słup w globalnych analizach sztywno i sprężyste plastycznych	173
6.2.3. Modele empiryczne	174
6.2.4. Modelowanie sztywności węzła metodą składnikową według [N3]	179
6.2.5. Modelowanie sztywności węzła przy obciążeniach przemiennych	181
6.3. Sztywność połączeń zakładkowych	182
6.3.1. Modelowanie połączeń zakładkowych [85], [86]	184
6.3.2. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych	187
6.4. Nośność węzłów typu belka–słup według [N3]	192
6.5. Zdolność do obrotu	201
7. Analiza stalowych konstrukcji prętowych	204
7.1. Analiza stateczności konstrukcji w inżynierskich programach komputerowych	207
7.1.1. Zagadnienie własne w analizie stateczności	209
7.1.2. Liniowa analiza wyboczeniowa (LBA), mnożnik obciążenia krytycznego	213
7.1.3. Jakość wyników MES w zakresie obciążeń bifurkacyjnych	217
7.1.4. Praktyczne wykorzystanie analizy LBA	228
7.1.5. Mnożniki obciążenia krytycznego i długości wyboczeniowe elementów	229
7.1.6. Wpływ przestrzennej współpracy konstrukcji i zróżnicowania obciążenia na α_{cr}	234
7.1.7. Analiza stateczności pojedynczego pręta za pomocą programu LTBeamN	237
7.1.8. Metoda uproszczona obliczania wartości obciążenia krytycznego	243

7.2. Kryteria wyboru rodzaju analizy według [N1]	244
7.2.1. Analiza I rzędu	244
7.2.2. Analiza II rzędu z globalną imperfekcją przechyłową i lokalnymi imperfekcjami łukowymi	246
7.2.3. Analiza II rzędu układów ramowych z globalną imperfekcją przechyłową	248
7.2.4. Efekty przechyłowe ujęte w analizie I rzędu	249
7.2.5. Analiza metodą ogólną według punktu 6.3.4 w [N1]	249
7.2.6. Globalna analiza plastyczna	257
7.3. Kryteria wyboru rodzaju analizy według projektu [N2]	257
7.3.1. Kryteria wrażliwości na efekty II rzędu	258
7.3.2. Klasyfikacja metod analizy układów prętowych	260
8. Modelowanie stężeń dachowych	264
8.1. Geneza obciążenia stabilizującego	267
8.2. Obciążenie stabilizujące w węzłach górnego pasa wiazara	276
8.3. Obciążenie stabilizujące w węzłach dolnego pasa wiazara	281
8.4. Zastępcze obciążenie imperfekcyjne konstrukcji dachu	289
8.5. Podsumowanie	298
Literatura	303

Stosowane oznaczenia

Symbole łacińskie

b_i	– szerokość i -tej ścianki przekroju, długość linii środkowej i -tej ścianki
d	– droga po dendrycie przekroju (linii środkowej przekroju); długość pręta tężnika
$e_{0,y}, e_{0,z}$	– strzałka wstępnej imperfekcji łukowej osi pręta w kierunku osi y i z
$f_{0,y}, f_{0,z}$	– strzałka wstępnego wygięcia osi pręta w kierunku osi y i z
f_y	– granica plastyczności stali
h_j	– wysokość kondygnacji
h_k	– wysokość teoretyczna wiaźara w kalenicy
h_0	– rozstaw osiowy pasów dwuteownika; wysokość teoretyczna wiaźara przy podporze
i	– indeks albo promień bezwładności
k	– giętno-skrętna charakterystyka przekroju [1/cm]
k, k_{sw}	– współczynnik amplifikacji ze względu na efekty przechyłowe
k_{11}, k_{12}	– współczynniki sztywności śrub na ścinanie i docisk w metodzie składnikowej [m]
$k_{11}, k'_{12}, k''_{12}$	– składowe sztywności śrub na ścinanie i docisk w podanych połączeniach zakładkowych [kN/m]
m_s, m_y, m_z	– obciążenie pręta momentem rozłożonym, spowodowane obciążeniem zewnętrznym pobocznicą pręta do środka zginania [kNm/m]
s	– współrzędna drogi d mierzonej po dendrycie przekroju (linii środkowej przekroju)
$t, t(s), t_i$	– grubość ścianki przekroju, grubość ścianki przekroju uzależniona od współrzędnej s , grubość i -tej ścianki przekroju
l	– długość pręta
p	– obciążenie poprzeczne pręta

$p_{l,x}, p_{p,x}$	– wypadkowe naprężeń stycznych rozłożonych na płaszczyznach brzegowych – lewej i prawej – elementu cienkościennego
q_i	– składowe przemieszczeń w MES
q_x, q_y, q_z	– obciążenie rozłożone pręta, sprowadzone obciążenie zewnętrzne pobocznic pręta przyłożone do środka zginania równoległe do osi x, y oraz z [kN/m]
$q_x(x)$	– wypadkowa obciążeń podłużnych działających na całym dendrycie przekroju
u_x	– w prętach o przekroju zwartym przemieszczenie wzdłuż osi pręta,
u_x	– w prętach o przekroju cienkościennym przemieszczenie wzdłuż osi pręta punktów o zerowych wartościach współrzędnych wycinkowych
$u_{i,j}$	– przemieszczenie górnego węzła słupa i na kondygnacji j w układzie ramowym
$u_{0,y}, u_{0,z}$	– wstępne przemieszczenia w kierunku osi y i z
u_y, u_z	– sprężyste przemieszczenia w kierunku osi y i z
y_0	– wstępne wygięcie osi pręta w kierunku osi y
y_S, z_S	– współrzędne środka zginania (ścinania, skręcania) w układzie głównych centralnych osi bezwładności
A	– pole przekroju [cm ²]; wybrany punkt na przekroju
B_ω	– bimoment [kNm ²]
C	– współczynnik używany w modelach empirycznych węzłów podatnych (parametr regresji)
C_1, C_2, C_3	– stałe dopasowania krzywej
C_1, C_2, C_3, C_4	– stałe całkowania
E	– moduł Younga
$E_{i,j}$	– elementy tensora Greena–Lagrange’a
$\bar{EI}_\omega$	– wycinkowa sztywność spaczenia przekroju, gdzie
	$\bar{E} = \frac{E}{1-\nu^2}$
G	– moduł Kirchhoffa
H	– całkowita wysokość teoretyczna ramy
H_{Ed}	– suma obciążeń poziomych ramy w wartości obliczeniowej [kN]

$H_{Ed,eq,i,j}$	– równoważne, obliczeniowe obciążenie (przechyłowe) dla słupa w rzędzie i na poziomie rygla j [kN]
$H_{Ed,eq,j}$	– równoważne, obliczeniowe obciążenie (przechyłowe) na poziomie rygla j ($H_{Ed,eq,j} = \sum H_{Ed,eq,i,j}$) [kN]
$H_{Ed,w,eq,i,j}$	– suma obciążenia wiatrem i równoważnego obciążenia przechyłowego w górnym węźle słupa w rzędzie i , na poziomie rygla j [kN]
$H_{Ed,j}$	– sumaryczne obliczeniowe obciążenie poziome, łącznie z równoważnymi siłami od imperfekcji, przenoszone przez kondygnację j [kN]
H_f	– fikcyjne obciążenie poziome [kN]
I_T	– moment bezwładności swobodnego skręcania [cm ⁴]
I_ω	– wycinkowy moment bezwładności [cm ⁶]
K	– parametr (mnożnik momentu) w modelu empirycznym węzła Frye’a i Morrisa
K_{st}	– pozioma sztywność kondygnacji [kN/m]
$K_{s,\varphi} = \left \frac{B_\omega}{\varphi_s} \right $	– sztywność zamocowania pręta na spaczenie
L	– rozpiętość
M	– punkt początkowy przy obliczaniu charakterystyk giętno-skrętnych; moment zginający
M_f	– bipara momentów (para o przeciwnym zwrocie) zginających pasy dwuteownika w ich płaszczyźnie [kNm]
$M_{j,Ed}, M_{j,Rd}$	– obciążenie obliczeniowe i nośność zginanego węzła belki ze słupem [kNm]
$M_y, M_z, M_y(x), M_z(x)$	– momenty zginające [kNm]
M_ω	– moment giętno-skrętny [kNm]
M_s	– moment swobodnego skręcania [kNm]
M_s	– zewnętrzny moment skręcający [kNm]
$N, N(x)$	– siła osiowa [kN]
N_{Ed}	– siła osiowa o wartości obliczeniowej (kombinacyjnej) [kN]
N_{cr}	– obciążenie krytyczne pręta, siła krytyczna [kN]
N_i	– wielomiany Lagrange’a
$N_{i,x}, N_{i,\xi}$	– funkcje kształtu we współrzędnych kartezjańskich i naturalnych
R	– reakcja [kN]

S	– środek zginania (ścinania, skręcania)
S_{ω}	– wycinkowy moment statyczny [cm^4]
S_y, S_z	– momenty statyczne względem osi y i osi z [cm^3]
$S_{x,j}, S_{y,j}, S_{z,j}$	– składowe sił w prętach dźwigara kratowego oddziałujące na węzeł [kN]
$T_{i,j}^{(2)}$	– elementy drugiego tensora naprężeń Pioli–Kirchhoffa
V_y, V_z	– siły poprzeczne w przekroju [kN], definiowane jako pochodne momentów zginających
V_{Ed}	– suma obciążeń pionowych ramy o wartości obliczeniowej [kN]
$V_{Ed,j}$	– sumaryczne obliczeniowe obciążenie pionowe przenoszone przez kondygnację j [kN]
W	– wskaźnik zginania [cm^3]; siła wypadkowa [kN]
W_j	– obciążenie wiatrem na poziomie ryglu j [kN]

Symbole greckie

α_{cr}	– mnożnik obciążenia krytycznego
$\alpha_{cr,sw}$	– mnożnik obciążenia krytycznego odpowiadający przechyłowej postaci wyboczenia
$\alpha_{cr,ns}$	– mnożnik obciążenia krytycznego odpowiadający nieprzechyłowej postaci wyboczenia
β	– współczynnik korygujący moment bezwładności swobodnego skręcania z uwagi na wyokrąglenia przekroju; współczynnik sterujący wartością siły osiowej
β_{α}	– funkcje (stałe) materiałowe używane w opisie Lagrange’a
$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}$	– częściowe współczynniki bezpieczeństwa wg PN-EN 1990
δ	– przesuw w węźle zakładkowym lub nakładkowym przy działaniu siły podłużnej; wstępne i sprężyste wygięcie pręta związane z efektem $P-\delta$
$\delta_{H,Ed,j}$	– wzajemne przemieszczenia poziome góry kondygnacji j względem dołu kondygnacji
ε	– odkształcenie (ogólnie); przyjęta wartość tolerancji dla residuum w metodzie przyrostowej
$\varepsilon_s(x,s)$	– odkształcenie punktów powierzchni środkowej przekroju cienkościennego

λ, μ	– stałe Lamego
λ_i	– mnożnik obciążenia krytycznego dla i -tej postaci wyboczenia (stosowany alternatywnie do $\alpha_{cr,i}$)
$\bar{\lambda}$	– smukłość względna pręta przy wyboczeniu giętnym
μ	– współczynnik długości wyboczeniowej; stosunek sztywności początkowej do sztywności siecznej węzła doczołowego
μ	– współczynnik Poissona
ρ	– krzywizna pręta
σ_ω	– naprężenie normalne od bimomentu (wycinkowe naprężenie normalne)
$\sigma_{0,p}$	– naprężenie normalne od siły osiowej
σ_x	– całkowite naprężenie normalne w danym punkcie
τ_s	– naprężenia styczne od momentu swobodnego skręcania
τ_ω	– naprężenia styczne od momentu giętno-skrętnego
$\varphi_S(x)$	– kąt skręcania osi pręta przechodzącej przez środki zginania (ścinania, skręcania)
$\varphi'_S(x)$	– miara spaczenia przekroju
ϕ	– wstępny przechył układu ramowego [rad]
ϕ_j	– wstępny przechył kondygnacji j układu ramowego [rad]
σ_ω	– naprężenia normalne od bimomentu [MPa]
ω_S	– współrzędna wycinkowa (główne pole wycinkowe) [cm ²]
Δ	– przesuw węzła w analizie efektu $P-\Delta$; wartość imperfekcji wykonawczej wg PN-EN 1090-2; przyrost wartości
Δ', Δ''	– przemieszczenia poziome węzła I i II rzędu
Δu	– przyrost przemieszczenia
Δl	– przyrost długości

Rozdział 1

Wprowadzenie

W klasycznej mechanice budowli konstrukcje prętowe składają się z prętów połączonych w węzłach w sposób przegubowy, sztywny lub przesuwne, przy czym za węzeł uznaje się miejsce geometryczne przecięcia się ich osi, a w przypadku gdy osie prętów nie przecinają się w jednym punkcie, to dowolne miejsce w obszarze konstrukcji węzła. Rzeczywista konstrukcja prętowa różni się od teoretycznej z uwagi na wymiary węzła, jego odkształcalność, wstępne przechyły, wstępne giętne i skrętne odkształcenia osi, mimośrodowość w połączeniach prętów w węzłach, mimośrodowość w przekazywaniu obciążeń, a także imperfekcje materiałowe. Różnice te wpływają na stan deformacji konstrukcji i rozkład sił wewnętrznych. W Eurokodach te wieloźródłowe imperfekcje układów prętowych ze względów praktycznych zastąpiono umownymi imperfekcjami geometrycznymi, takimi jak wstępne wygięcie elementów ściskanych czy wstępny przechył układów ramowych.

Zgodnie z normą [N1] analiza statyczna układów prętowych powinna być oparta na modelach obliczeniowych, które z wystarczającą dokładnością odzwierciedlają zachowanie się rzeczywistej konstrukcji w określonym stanie granicznym. Modele te powinny ujmować właściwości materiału, właściwości elementów konstrukcyjnych i ich przekrojów poprzecznych, właściwości wewnętrznych węzłów konstrukcji i węzłów podporowych, a w uzasadnionych przypadkach także interakcję konstrukcji z podłożem gruntowym. O wyborze modelu obliczeniowego może również decydować geometria konstrukcji i geometria jej elementów składowych.

Modele obliczeniowe mogą być geometrycznie i fizycznie liniowe lub nieliniowe, a także geometrycznie nieliniowe przy liniowych związkach konstytutywnych lub też fizycznie nieliniowe, a geometrycznie liniowe. Mogą one też ujmować wpływ imperfekcji geometrycznych pojedynczych elementów takich jak wstępne ich wygięcie czy skrócenie oraz imperfekcji globalnej całej konstrukcji jak na przykład wstępny przechył ramy.

Nieliniowość geometryczna (kinematyczna) pojawia się wówczas, gdy konstrukcja prętowa cechuje się dużymi odkształceniami lub dużymi przemieszczeniami albo też dużymi odkształceniami i przemieszczeniami jednocześnie, przy

czym duże przemieszczenia konstrukcji mogą występować zarówno przy małych, jak i dużych obrotach przekrojów elementów. Przykładami takiej konstrukcji są kratownica Misesa, kopuła mało wyniosła lub wielokondygnacyjna rama przechyłowa.

Drugim obszarem jakościowych zmian w analizie statyczno-wytrzymałościowej ustrojów prętowych jest rekomendowany w Eurokodach model fizyczny materiału nieliniowo-sprężysto-plastycznego oraz szerokie wykorzystanie w obliczeniach inżynierskich twierdzeń teorii plastyczności. Nieliniowość fizyczna może wystąpić zarówno przy małych, jak i dużych odkształceniach i przemieszczeniach. Wynika ona głównie z fizycznych właściwości materiału, przy nieliniowych związkach konstytutywnych. Materiały mogą być nieliniowo-sprężyste, plastyczne i sprężysto-plastyczne. Podatność węzłów na obrót lub/i przesuw traktuje się w kategoriach węzła z materiału fizycznie nieliniowego. W podatnych węzłach mogą dodatkowo wystąpić luzy w połączeniach, które ujawniają się przy określonych siłach wewnętrznych, a po ich pokonaniu następuje tzw. zakleszczenie się węzła i jego charakterystyka jest monotonicznie narastająca do określonego poziomu, po czym następuje duży przyrost deformacji przy niewielkim wzroście sił wewnętrznych.

W rozwiązaniach nieliniowych stosuje się różne uproszczenia, które z reguły przyspieszają obliczenia statyczne, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich dokładności. Przykładowo, w Metodzie Elementów Skończonych (MES) przy małych obrotach przekrojów przyjmuje się uproszczone formuły tensora odkształceń i tensora naprężeń, co ogranicza zakres ich stosowania przy równoczesnym uproszczeniu macierzy sztywności elementu i macierzy sztywności całego układu. Skraca to czas obliczeń. Ograniczenia mogą dotyczyć też ugięć. Przy małych ugięciach znacznie upraszcza się budowę tensora odkształceń i naprężeń.

W programach inżynierskich opartych na MES zazwyczaj stosuje się całkowity opis Lagrange’a (TL), w którym odkształcenia i przemieszczenia odnosi się do konfiguracji nieodkształconej opisanej w układzie początkowym X, Y, Z lub w przypadku konstrukcji quasi-osiowo-symetrycznych w układzie Θ, R, Z . Stosuje się przy tym tensor odkształceń Greena–Lagrange’a i drugi tensor naprężeń Pioli–Kirchhoffa.

W przypadku dużych uproszczeń rozwiązanie nieliniowe MES może być zgodne z rozwiązaniem drugiego rzędu uzyskanym metodą przemieszczeń. W równaniach zginania teorii drugiego rzędu uwzględnia się zazwyczaj wpływ ściskania i wygięcia pręta (wstępnego i sprężystego) na osiową i giętą jego deformację, a w równaniu skręcania wpływ siły osiowej i obciążeń poprzecznych oraz wstępnego i sprężystego skręcenia – na skrętną deformację pręta. W uza-

sadnionych przypadkach, przy mniejszym wpływie efektów drugiego rzędu na zachowanie się układu, dopuszcza się iteracyjne rozwiązanie pierwszego rzędu z korektą współrzędnych układu o sprężyste przemieszczenia z poprzedniego kroku obliczeń.

W przypadku obliczeniowych modeli nieliniowych (fizycznie lub/i geometrycznie), w tym modeli drugiego rzędu, nie obowiązuje zasada superpozycji efektów oddziaływań, a obliczenia wykonuje się dla zadanej kombinacji obciążeń.

W monografii przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem stalowych konstrukcji prętowych. Szeroko omówiono możliwości stosowania teorii pierwszego i drugiego rzędu oraz teorii nieliniowej do analizy globalnej konstrukcji. W monografii nie zajmowano się problematyką związaną z niestatecznością miejscową ścianek pod działaniem naprężeń normalnych i stycznych.

W zakresie teorii pierwszego rzędu w rozdziale 2 szczególną uwagę zwrócono na statykę elementów cienkościennych. Przedstawiono wzory i przykład obliczania charakterystyk geometrycznych przekrojów takich prętów, wybrane zagadnienia ze statyki prętów cienkościennych o przekroju otwartym oraz przykład, w którym pręt rozciągany może być jednocześnie prętem skręcanym w wyniku tego rozciągania. Przedstawiono również przykład belki podsuwnicowej, w którym potraktowano ją jak element cienkościenny i wskazano różnicę między takim podejściem a uproszczonym rozwiązaniem, w którym belkę traktuje się jak element złożony z pionowej belki i poziomego tężnika hamownego oraz ujęciem w Eurokodzie [N7], gdzie moment skręcający belkę rozkłada się na parę sił poziomych działających na pasy.

W rozdziale 3 przedstawiono odchyłki, jakie mogą wystąpić w stalowych konstrukcjach prętowych oraz omówiono wprowadzone normą [N1] zastępcze imperfekcje geometryczne – globalne i lokalne ujmujące wpływy tych przypadkowych odchyłek. Opisano normowe ujęcie imperfekcji globalnych, tj. wstępnego przechyłu układów ramowych i wstępną, łukową imperfekcję stężeń oraz imperfekcje lokalne, którymi są wstępne imperfekcje łukowe elementów ściskanych narażonych na wyboczenie giętne.

W rozdziale 4 scharakteryzowano teorię drugiego rzędu w ujęciu przemieszczeniowym elementów ze wstępnymi, giętymi i skrętnymi imperfekcjami. Przedstawiono pełne równania zginania i skręcania oraz ich uproszczone warianty stosowane w inżynierskich programach komputerowych. Omówiono efekty drugiego rzędu: efekt $P-\Delta$ dla ram i pojedynczego pręta, który jest rozumiany jako wpływ zmiany nachylenia cięciwy pręta na wartości sił przywęzłowych oraz efekt $P-\delta$ dla pręta, a w nim wpływ ściskania wstępnie wygiętego pręta na jego sztyw-

ność osiową i giętą. Przedstawiono zasady wymiarowania elementów ściskanych i zginanych wg teorii drugiego rzędu. Dokonano porównania wyężenia prętów ściskanych wg wzorów normowych i wg teorii drugiego rzędu, w zależności od ich smukłości.

W zakresie nieliniowej teorii MES w rozdziale 5 przedstawiono wstępnie zdeformowaną płaską belkę Timoshenki. Na jej przykładzie omówiono stosowane uproszczenia, przydatne w rozwiązaniach komputerowych funkcje kształtu i funkcje wybierające dla elementu wielowęzłowego we współrzędnych naturalnych, przyrostowe równania równowagi, kwadratury Gaussa i zasadę doboru punktów Gaussa oraz dokładność rozwiązania. Na przykładzie łuku o małej sztywności porównano ścieżki równowagi uzyskane z rozwiązania liniowego, wg teorii drugiego rzędu w ujęciu przemieszczeniowym i rozwiązania nieliniowego przy różnorodnych uproszczeniach. Analizowano wpływ liczby węzłów elementu na zbieżność wyników, a w tym omówiono tzw. blokadę efektu ścinania. Przedstawiono możliwości budowy ścieżki równowagi przy sterowaniu obciążeniem i przemieszczeniem.

Następny rozdział monografii dotyczy węzłów w konstrukcjach prętowych. Omówiono w nim różne modele węzłów, za pomocą których można znacznie przyspieszyć obliczenia wstępne czy wykonać analizy optymalizacyjne. Przedstawiono model zachowania się węzła w przypadku konstrukcji obciążonych przemiennie, dla którego charakterystyki węzłów $M-\phi$ i $N-\delta$ przyjmują postać pętli histerezy. W rozdziale tym zamieszczono algorytm obliczania węzła belki ze słupem, w którym omówiono przypadek jego zniszczenia na skutek zerwania śrub jednego szeregu. Wtedy przy braku możliwości plastycznej redystrybucji sił między poszczególnymi szeregami może być potrzebna redukcja nośności węzła zgodnie z wymaganiami zawartymi w pkt 6.2.4.2 normy [N3]. Zamieszczono wzory dotyczące sztywności różnych połączeń zakładkowych, wynikające ze sztywności części składowych złączy. Przedstawiono przykład zachowania się wieży telefonii komórkowej z podatnymi węzłami, w którym wykazano, że po uwzględnieniu podatności na przesuw montażowych styków krawężników sprężysty obrót krawężnika z anteną radiolinii będzie większy od $0,5^\circ$, co zakłóci prawidłowy przekaz sygnałów radiowych między stacjami bazowymi.

W kolejnym rozdziale monografii zawarto normowe przepisy dotyczące wyboru rodzaju analizy statycznej i wyboru imperfekcji geometrycznych w zależności od wartości mnożnika obciążenia krytycznego oraz warunki nośności (stateczności) elementów przyporządkowane danej analizie. Przedstawiono obecnie obowiązujące przepisy wg [N1] i podejście proponowane w projekcie nowelizacji tej normy [N2]. Szeroko omówiono możliwości inżynierskich programów

komputerowych w zakresie wyznaczania mnożnika obciążenia krytycznego i długości wyboczeniowych ściskanych elementów konstrukcji prętowych. Przedstawiono przy tym przykłady dotyczące wpływu rozkładu obciążenia i sztywności węzłów na wartości mnożnika obciążenia krytycznego i długości wyboczeniowe elementów ściskanych.

W ostatnim rozdziale pracy szeroko omówiono imperfekcje w elementach konstrukcji dachów hal oraz genezę pojawiania się obciążeń stabilizujących i zasady ich obliczania wynikające ze statycznej równowagi węzłów zdeformowanego układu. Zaproponowano przy tym możliwe pod względem statycznym uproszczenia wzorów na obciążenie stabilizujące.

Monografia była pisana z myślą, by jak najlepiej służyła projektantom konstrukcji stalowych oraz studentom na kierunku budownictwo wyższych uczelni. Zawarto w niej wiele przydatnych wskazówek, które ułatwią zrozumienie wpływu efektów drugiego rzędu i efektów nieliniowych, a także imperfekcji geometrycznych na stan przemieszczeń i sił wewnętrznych w układzie prętowym. Stanie się przez to łatwiejszy wybór rodzaju globalnej analizy i wprowadzenia do niej różnych uproszczeń. Łatwiejsze stanie się również korzystanie z różnych programów komputerowych do analiz konstrukcji stalowych i jej elementów. W monografii wskazano też bogatą literaturę, która może być pomocna w dalszym poszerzaniu wiedzy.

W opisie układów prętowych i pojedynczych elementów o przekroju zwanym zastosowano prawoskrętne układy współrzędnych prostokątnych, tak jak to ma miejsce w algorytmach programów komputerowych. W przypadku układów płaskich i przekrojów trzecią oś znakowano następująco: przy zwrocie do oka na rysunku naniesiono kółko z kropką w środku, a przy zwrocie do kartki kółko ze znakiem x. Z kolei w przypadku opisu elementów o przekroju cienkościennym zastosowano układy lewoskrętne jak w podstawowej literaturze z tego zakresu [7], [53], [67], [80], co miało na celu ułatwienie czytelnikowi korzystania z licznych wzorów zawartych w tych pozycjach.