

**Wykłady opracowano na podstawie książek:**

**Antoni Biegus**

**Probabilistyczna analiza konstrukcji**

**PWN 1999**

**Szczepan Woliński, Krystyna Wróbel**

**Niezawodność konstrukcji budowlanych**

**Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej**

**2001**

## 5. Bezpieczeństwo i nośność graniczna prętowych systemów konstrukcyjnych

W analizie wyężenia budowlanych prętowych systemów konstrukcyjnych wyróżnia się **elementy sprawcze** (krytyczne): przekroje elementów, pręty (belki, słupy) oraz **węzły**.

**Elementy sprawcze** są to takie części składowe ustroju nośnego, w których wskutek przyrostu obciążeń dochodzi do wyczerpania ich nośności, prowadzącego do **zmiany systemu konstrukcyjnego w ustrój geometrycznie zmienny** (łańcuch kinematyczny).

W analizie bezpieczeństwa ustroju nośnego należy uwzględnić jego niezawodnościową budowę strukturalną, tj. wpływ właściwości systemu konstrukcyjnego (schematu statycznego, liczby i wzajemnych relacji elementów sprawczych) na niezawodność i bezpieczeństwo ustroju.

**Normy i przepisy projektowania nie uwzględniają wpływu liczby elementów w konstrukcji oraz sposobu ich zespolenia.**

**W deterministycznym ujęciu normowym, statycznie niewyznaczalne i statycznie wyznaczalne układy konstrukcyjne o różnej liczebności elementów sprawczych, w których stopień wykorzystania nośności najbardziej wyťažonych elementów jest identyczny, mają to samo bezpieczeństwo.**

**Prawdopodobieństwo awarii może się zwiększać ze wzrostem liczby elementów.**

Podobnie jest szacowane bezpieczeństwo połączenia elementu w styku, na przykład na jeden łącznik i wiele łączników: w ujęciu deterministycznym, jeśli nośności styków są identyczne, to ich bezpieczeństwo jest takie samo, mimo iż skutki losowego uszkodzenia jednego łącznika w obu przypadkach są różne.

Analizy niezawodności w ujęciu probabilistycznym konstrukcji o różnej liczbie elementów sprawczych, ustrojów statycznie wyznaczalnych i statycznie niewyznaczalnych wykazują, że bezpieczeństwo ich jest różne i zależy od sposobu sprzężenia elementów w system, budowy strukturalnej systemu (wzajemnych relacji i powiązań elementów sprawczych).

**Bezpieczeństwo ustroju prętowego można opisać jako prawdopodobieństwo niewystąpienia żadnego z kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia konstrukcji.**

Mechanizmy zniszczenia prętowego ustroju nośnego wyznacza się na podstawie geometrycznych i fizycznych cech konstrukcji oraz charakterystyki oddziałujących na nią zbiorów obciążeń.

## Oszacowanie bezpieczeństwa prętowego systemu

**konstrukcyjnego** wykonuje się, przyjmując następujące założenia:

- w konstrukcji można wydzielić elementy sprawcze (krytyczne);
- znane są zbiory losowych obciążeń oddziałujących na ustrój;
- nośność elementów sprawczych (krytycznych - decydujących o bezpieczeństwie) jest losowa;
- znane są modele ścieżek równowagi statycznej ŚRS (zależności: obciążenie-przemieszczenie; obciążenie-odkształcenie) elementów sprawczych oraz ich nośności graniczne;
- zidentyfikowane są minimalne zbiory krytyczne (MZK) elementów sprawczych (których wyczerpanie nośności zamienia ustrój w mechanizm).

Przyjmuje się, że znane są ŚRS oraz parametry rozkładów losowych nośności granicznych elementów sprawczych, np. nośności plastycznej dla pręta rozciąganego; momentu plastycznego dla przekroju zginanego; obciążenia krytycznego dla pręta ściskanego.

Model niezawodnościowy ustroju będzie się wyznaczać na podstawie analizy kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia (KDMZ) szkieletu nośnego.

**Każdemu mechanizmowi zniszczenia konstrukcji prętowej będzie się przyporządkowywać minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych (MKZ).**

**Bezpieczeństwo konstrukcji prętowej rozumiane jest jako prawdopodobieństwo niewystąpienia żadnego z analizowanych minimalnych krytycznych zbiorów elementów sprawczych ustroju.**

W przypadku prętowych systemów konstrukcyjnych minimalne krytyczne zbiory (MKZ) są stowarzyszone z ich kinematycznie dopuszczalnymi mechanizmami zniszczenia (KDMZ).

Metody kinematyczne (analiza KDMZ) służą do określenia minimalnych krytycznych zbiorów elementów sprawczych ustroju, do wyznaczenia zaś nośności granicznej konstrukcji służą metody statyki budowli.

W celu uszeregowania ważności elementów sprawczych w systemie konstrukcyjnym (ich roli i oddziaływania na nośność ustroju) wprowadzono pojęcie **wagi elementu  $a_i$**  – **stosunek siły wewnętrznej w elemencie do obciążenia zewnętrznego, stanowiącego miarę nośności granicznej systemu.**

**Założono, że zarówno losowe nośności graniczne elementów sprawczych, jak i losowe obciążenia mogą być opisane rozkładem normalnym.**

### 5.2.1. Nośność graniczna przekrojów prętów

W prętowych ustrojach nośnych można wyróżnić ich części – elementami sprawczymi (krytycznymi), których wyczerpanie nośności może wpływać na nośność całej konstrukcji.

Mogą to być przekroje elementów, w których można spodziewać się ich ekstremalnego wyteżenia, węzły (miejsca połączeń prętów), styki warsztatowe lub montażowe, jak również pręty.

**Analiza nośności granicznej konstrukcji jest uwarunkowana ścieżkami równowagi statycznej oraz nośnością graniczną elementów sprawczych.**

**Proporcje geometryczne ściskanych części składowych przekrojów poprzecznych elementów zginanych, ściskanych, zginanych i ściskanych sprawiają, iż w granicznych stanach wyteżenia ich ścieżki równowagi mogą się zasadniczo różnić.**



## **Podstawowe typy przekrojów poprzecznych prętów to: krępe, grubościennie i cienkościennie.**

Za cienkościennie uważa się elementy konstrukcyjne, w których występująca lokalna utrata stateczności części składowych profilu zmniejsza ich nośność poniżej granicznego wyężenia sprężystego.

Przekroje grubościennie to profile, w których nie występuje lokalna utrata stateczności ściskanych ścianek (nie wpływa na wyczerpanie ich nośności).

W zależności od smukłości części składowych przekrojów mogą one osiągać częściowe lub pełne uplastycznienie w granicznym stanie wyężenia.

Przekroje krępe (lub zwarte) nie wymagają badania lokalnej utraty stateczności.

Klasyfikacja przekrojów prętów została usystematyzowana w normach projektowania konstrukcji stalowych według stanów granicznych.

W Eurokodzie 3, jak i normie PN-90/B-03200 projektowania konstrukcji stalowych wprowadzono **pojęcie klas przekrojów poprzecznych elementów**.

Podstawowym kryterium zaliczania przekroju do poszczególnych klas (klasyfikacji) jest smukłość ścianki elementów składowych (półek, środków) kształtownika.

Zarówno w Eurokodzie 3, jak i normie podzielono **profile na 4 klasy, przy czym przekroje klasy 1, 2, 3 są zaliczane do grubościennych, klasy 4 do cienkościennych**.

**Do wyznaczania nośności każdej z badanych klas profili (w związku z ich różną ścieżką równowagi statycznej), stosuje się inne procedury obliczeniowe.**

Podział profili na 4 klasy pozwala na dostosowanie (uzgodnienie) modeli fizycznych do modeli obliczeniowych elementów konstrukcyjnych.

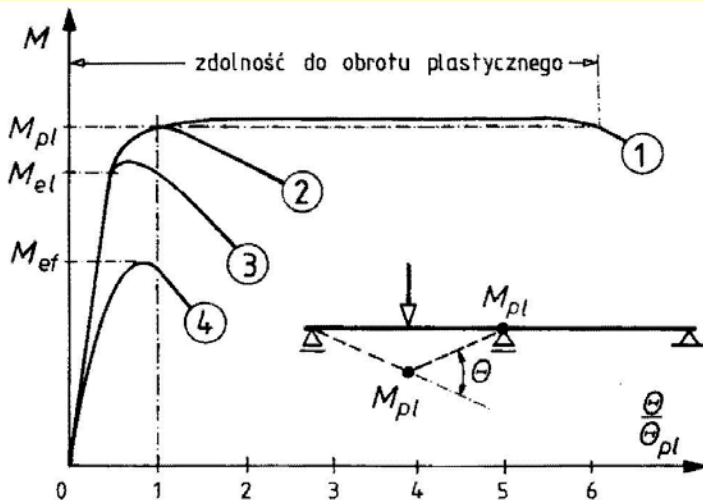
Aby pręty można było obliczać zgodnie z zasadami formułowanymi w mechanice konstrukcji, narzuca się ich przekrojom poprzecznym takie wymogi wymiarowe, aby **analizę wyężenia konstrukcji można było prowadzić w stanie plastycznym, sprężystym bądź nadkrytycznym.**

**Służą do tego warunki zapewnienia zdolności przekroju prętów do obrotu.**

Wprowadzenie klas przekrojów umożliwia ściśle powiązanie modeli z metodami obliczania konstrukcji.

**Na rys. 5.1 pokazano wykresy ścieżek równowagi statycznej elementów zginanych o przekrojach klasy 1, 2, 3 i 4, w których wyróżnić można fazę sprężystą i fazę plastyczną.**

**Na osi poziomej naniesiono bezwymiarową rzędną kąta obrotu przekroju zginanego do kąta obrotu w stanie uplastycznienia, na osi pionowej zaś nośności mierzone momentem zginającym: plastycznym  $M_{pl}$  sprężystym  $M_{el}$  efektywnym  $M_{ef}$ .**



Rys. 5.1. Ścieżki równowagi statycznej elementów zginanych o przekrojach klasy 1, 2, 3, 4

**Przekroje klasy 1** mogą osiągnąć nośność uogólnionego przegubu plastycznego, a w stanie pełnego uplastycznienia przy zginaniu wykazują zdolność do obrotu, niezbędną do plastycznej redystrybucji momentów zginających w ustroju.

**Przekroje klasy 2** mogą osiągać nośność uogólnionego przegubu plastycznego, lecz wskutek miejscowej niestateczności ścianek w fazie plastycznej wykazują ograniczoną zdolność do obrotu, uniemożliwiającą redystrybucję momentów zginających w ustrojach statycznie niewyznaczalnych.

**Przekroje klasy 3** charakteryzują się tym, że ich nośność jest ograniczona początkiem uplastycznienia się strefy ściskanej.

**Przekroje klasy 4** są wrażliwe na miejscową utratę stateczności i gdy wzrasta ich wyężenie nie zachowują pierwotnego kształtu przekroju poprzecznego, a ponadto osiągają one nośność krytyczną przy naprężeniach mniejszych niż granica plastyczności.

Nadkrytyczną nośność przekrojów takich kształtowników oblicza się przy zredukowanej sztywności giętej przekroju.

## **Klasę przekroju ustala się w zależności od wrażliwości (odporności) elementu na miejscową utratę stateczności.**

Wrażliwość przekroju na lokalne wyboczenie zależy od warunków podparcia, rozkładu naprężeń oraz smukłości ściskanych ścianek profilu  $\lambda = b/t$  (gdzie:  $b$  - szerokość ścianki;  $t$  grubość ścianki).

Wprowadzenie klasyfikacji przekrojów poprzecznych prętów, w ujęciu współcześnie obowiązujących norm projektowania konstrukcji stalowych, wyznacza możliwości prowadzenia obliczania sił wewnętrznych (w Eurokodzie 3: według globalnej analizy sprężystej lub globalnej analizy plastycznej), a także projektowania (wyznaczania nośności) elementów w zakresie sprężystym lub plastycznym.

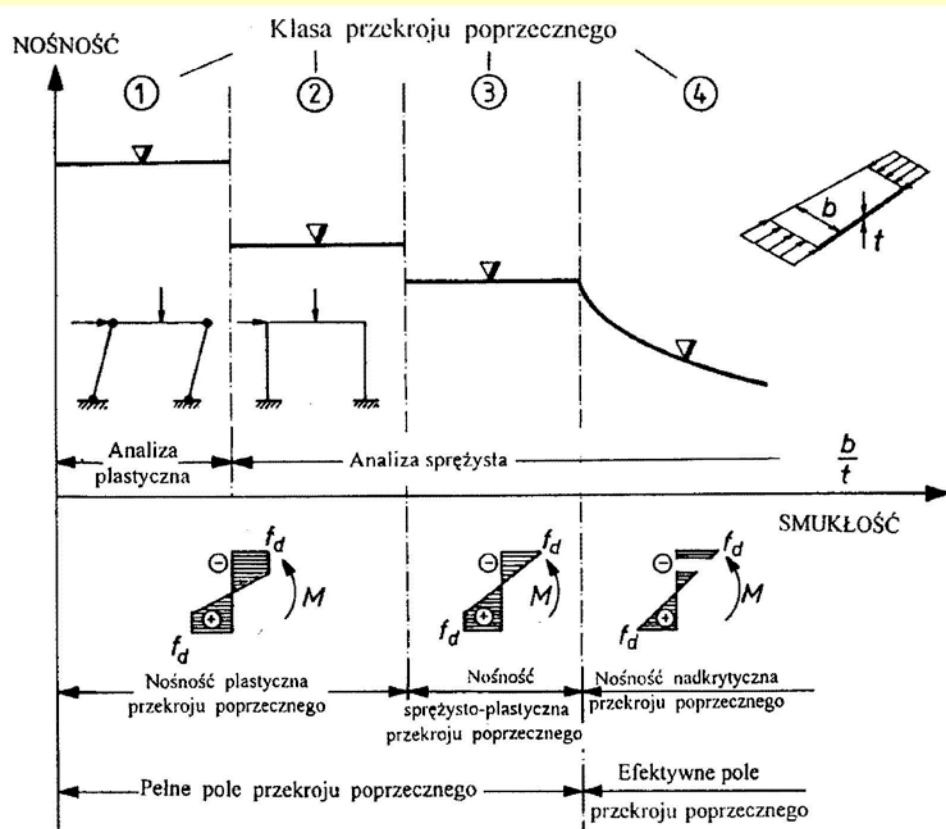
Wyznaczenie sił wewnętrznych w ustroju według analizy plastycznej jest uwarunkowane w normach między innymi wymaganiami co do kształtu (sztywności) przekroju poprzecznego (klasy przekroju), w którym mogą powstać przeguby plastyczne.

**Według Eurokodu 3 analizę plastyczną wyznaczania sił wewnętrznych można prowadzić dla konstrukcji o przekrojach poprzecznych prętów klasy 1**, gdyż charakteryzuje je zdolność do obrotu uplastycznionego przekroju (rys. 5.1), umożliwiającą redystrybucję sił wewnętrznych w ustroju przy równoczesnym zachowaniu nośności uplastycznionych przekrojów.

**Analizę sprężystą wyznaczania sił wewnętrznych natomiast można prowadzić dla ustrojów, których przekroje poprzeczne prętów są klasy 2, 3 i 4.**

Rys. 5.2 – graficzną interpretację omawianych zagadnień.





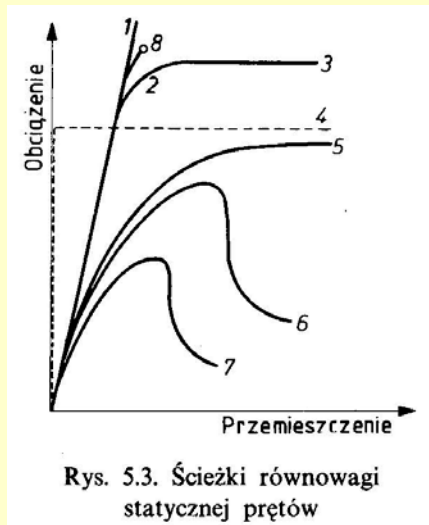
Rys. 5.2. Nośności i metody analizy konstrukcji w funkcji klas przekrojów poprzecznych prętów

## 5.2.2. Ścieżki równowagi statycznej prętów

Ścieżki równowagi statycznej (ŚRS) konstrukcji są generowane przez ŚRS prętów i ŚRS węzłów.

**Kształt ścieżek równowagi statycznej (ŚRS) prętów**, zależy od wielu okoliczności: wytrzymałości materiału, geometrii ścianek, imperfekcji geometrycznych, sprężystości połączeń prętów w węzłach, charakterystyk geometrycznych i sztywnościowych, rodzaju obciążenia (stałego, zmęczeniowego, udarowego, dynamicznego) i rodzaju wyłączenia (ściskanie, rozciąganie, zginanie).

Na rys. 5.3 pokazano ścieżki równowagi statycznej prętów w zależności od poziomu analizy oraz właściwości materiału, rodzaju obciążenia i klasy (geometrii) przekroju poprzecznego.



**Przedstawione ścieżki równowagi statycznej prętów sporządzono w umownych współrzędnych obciążenie-przeszczenie (np. dla pręta rozciąganego: siła osiowa  $N$  - wydłużenie  $\Delta l$ ; dla pręta zginanego: moment zginający  $M$  - ugięcie  $y$ ; dla pręta ściskanego: siła osiowa  $N$  - wygięcie osi pręta  $y$  lub skrócenie  $\Delta l$ ).**

**ŚRS niezależnie od rodzaju wyężenia mają podobny kształt.**

**Identyfikując modele matematyczne zachowania się prętów, najczęściej przypisuje się im następujące właściwości:**

- geometrycznie i materiałowo liniowe,
- geometrycznie nieliniowe,
- materiałowo nieliniowe,
- geometrycznie i materiałowo nieliniowe,
- uwzględnia się utratę stateczności i kruche pękanie.

**Na rys. 5.3 linią 1 oznaczono liniowo-sprężystą ŚRS pręta.**

Sprężysta nośność graniczna pręta jest wyznaczana z warunku, iż ekstremalne naprężenia w przekroju są równe granicy proporcjonalności materiału.

Taki model można przyjąć na przykład dla grubościennego pręta: rozciąganego osiowo; zginanego zabezpieczonego przed zwichrzeniem; skręcanego, w sprężystym zakresie wyężenia materiału. Sztywność giętna  $EJ$  i podłużna  $EA$  pręta, dla modelu liniowo-sprężystego nie zmienia się ze wzrostem jego wyężenia.

**Linia 2 na rys. 5.3** oznaczono nieliniową ŚRS pręta z uwzględnieniem ograniczonych plastycznych właściwości materiału.

**W przypadku wykorzystania pełnego uplastycznienia przekroju ŚRS opisuje linia 3.** Taki model ścieżki równowagi statycznej, można przypisać zginanym prętom o przekrojach klasy 1 i 2, zbudowanych z materiału sprężysto-plastycznego.

W ścieżce równowagi statycznej zginanego pręta grubościennego można wyróżnić fazy: liniowo-sprężystą (sztywność przekroju  $EJ = \text{const}$ ), nieliniowo-sprężysto-plastyczną (sztywność przekroju częściowo ulega redukcji) oraz liniowo-plastyczną (sztywność przekroju  $EJ = 0$ ).

**Przerywaną linią 4 na rys. 5.3** oznaczono ŚRS ściskanego pręta idealnego (bez imperfekcji geometrycznych), który ulega wyboczeniu ogólnemu (model eulerowski).

**Ścieżka równowagi statycznej oznaczona linią 5 opisuje przypadek wyężenia pręta z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej.**

**Taki model zachowania się pręta można przypisać ściskanim prętom rzeczywistym z imperfekcjami (geometrycznymi, strukturalnymi, technologicznymi), prętom ściskanim i zginanym (z uwzględnieniem teorii drugiego rzędu). W tym przypadku występuje nieliniowość sprężysta ze względu na geometrię.**

**ŚRS uwzględniającą oprócz nieliniowości geometrycznej pręta plastyczne właściwości materiału opisuje krzywa 6 (rys. 5.3).**

**Krzywa 7 (rys. 5.3) charakteryzuje zachowanie się pręta cienkościennego (ściskanego, zginanego), gdy o wyczerpaniu jego nośności decyduje lokalna utrata stateczności ściskanej ścianki przekroju poprzecznego.**

Ścieżka równowagi statycznej jest nieliniowo-sprężysta ze względu na redukcję sztywności giętnej  $EJ$  i podłużnej  $EA$  przekroju pręta, które są malejącymi funkcjami wyteżenia.

**Kółkiem oznaczono na linii 8 (rys. 5.3) kruche wyczerpanie nośności pręta** zbudowanego z materiału o sprężysto-kruchym modelu  $\sigma(\varepsilon)$ .

W takim przypadku zmiana stanu równowagi z bezpiecznej w awaryjną zachodzi w sposób nagły, a element traci swą nośność i nie jest zdolny do przenoszenia występujących w nim sił wewnętrznych.

### 5.2.3. Ścieżki równowagi statycznej węzłów

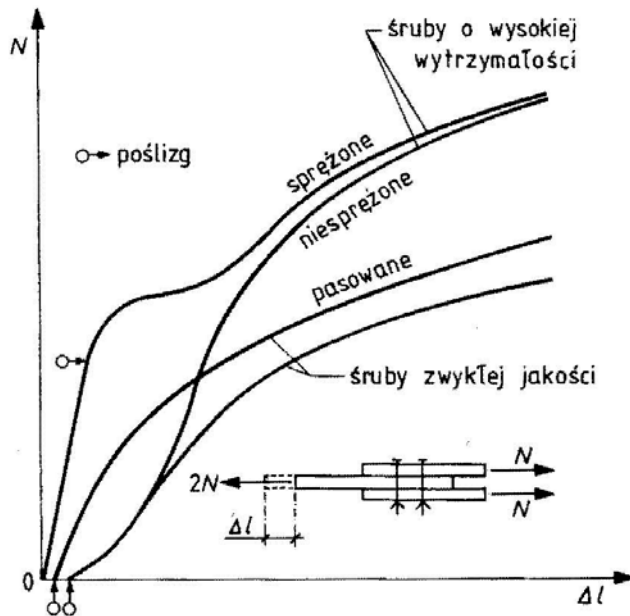
Przemieszczenia konstrukcji złożonej z prętów połączonych w węzłach są generowane zarówno przez ŚRS prętów, jak i ŚRS węzłów.

Ścieżki równowagi statycznej węzłów i styków mogą być liniowe bądź nieliniowe.

Jedną z przyczyn nieliniowości charakterystyk jest występowanie na przykład luzów w połączeniach styków śrubowych lub odkształceń blach (ścianek, półek) w obrębie połączenia.

**Na rys. 5.4. pokazano ścieżki równowagi statycznej (charakterystyki odkształcalności) zakładkowych połączeń śrubowych.**





Rys. 5.4. Ścieżki równowagi śrubowych połączeń zakładkowych

Z analizy tych wykresów wynika, iż w szerokim zakresie wyężenia połączeń ich **ŚRS opisują nieliniowe związki obciążenie odkształcenie.**

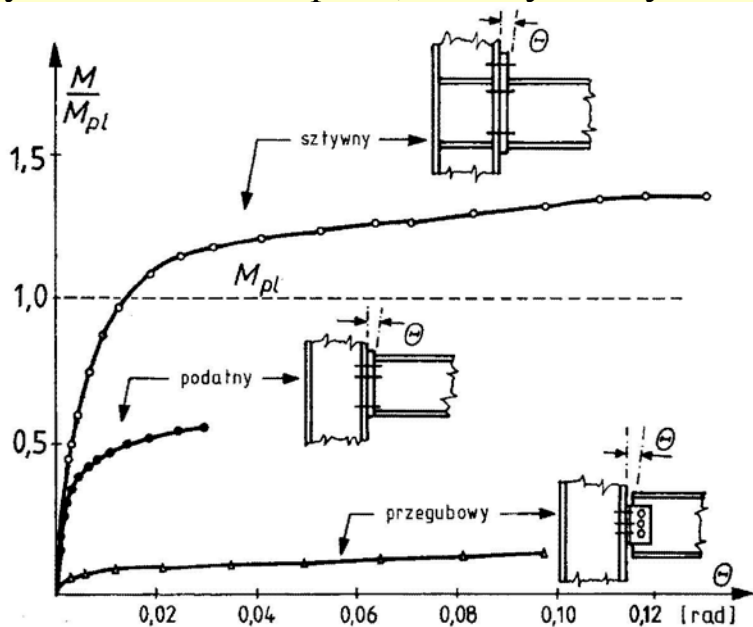
Są one następstwem luzów w połączeniach, poślizgu po pokonaniu sił tarcia, odkształcalności łączników oraz składowych części połączenia i lokalnej koncentracji naprężeń w sprężysto-plastycznej fazie wyężenia materiału.

**Połączenia elementów konstrukcji stalowych w zdecydowanej większości wypadków modelowane są w analizie statycznej jako przegubowe lub w pełni utwierdzone, czyli sztywne.**

Stosowane w praktyce połączenia nie spełniają w ścisły sposób wymagań określonych w odniesieniu do węzłów sztywnych lub przegubowych, a ich właściwości przybliżają się do wymagań ekstremalnych.

**Rzeczywiste węzły i styki są połączeniami podatnymi.**

Na rys. 5.5 pokazano wyniki badań doświadczalnych doczołowych styków belek ze słupami, o różnych sztywnościach złączy.



Rys. 5.5. Ścieżki równowagi śrubowych styków o różnych sztywnościach

Przedstawione na rys. 5.5 przykłady połączeń należy traktować umownie, gdyż o podatności węzłów decyduje nie tylko typ styku, ale liczba śrub, uźebrowania, grubości elementów złącza.

**Ścieżki równowagi statycznej połączeń podatnych są zwykle nieliniowe.**

Znajomość ścieżek równowagi statycznej połączeń umożliwia uwzględnienie w przyjmowanych schematach obliczeniowych wyznaczania sił wewnętrznych precyzyjniejszych modeli, opisujących sztywności i przemieszczenia węzłów i styków.

Badania doświadczalne izolowanych węzłów ram umożliwiają: sporządzenie ścieżek równowagi statycznej

Takie badania są jednak bardzo kosztowne.

Dlatego też na podstawie wykonanych badań do analiz teoretycznych są stosowane modele aproksymujące krzywe  $M(\theta)$ , prognozujące podatności węzłów.

**Eurokod definiując układy prętowe rozróżnia w aspekcie połączeń układy: o węzłach podatnych, sztywnych oraz przegubowych.**

Połączenia nominalnie przegubowe powinny być tak zaprojektowane, aby nie przenosiły znacznych momentów zginających, które mogłyby niekorzystnie oddziaływać na elementy konstrukcji.

Zdolność do obrotu połączeń nominalnie przegubowych powinna być wystarczająca do powstania w warunkach obciążeń obliczeniowych wszystkich uwzględnianych w analizie stanu granicznego konstrukcji przegubów plastycznych.

Nośność połączenia nominalnie przegubowego  $M_R$  powinna spełniać warunek  $M_R < 0,25M_{pl}$  ( $M_{pl}$  - nośność plastyczna łączonego elementu).

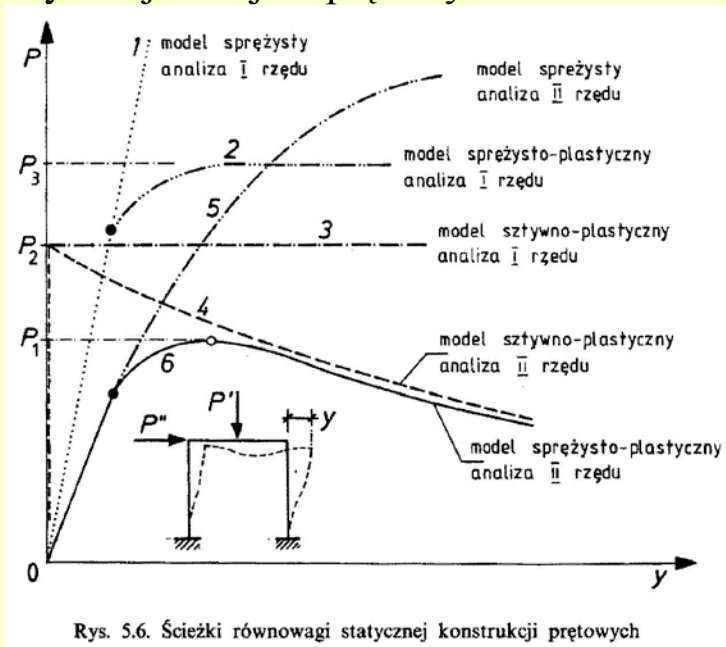
Połączenia sztywne powinny być tak zaprojektowane, aby ich odkształcenia nie miały istotnego wpływu na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji ani na jej globalne odkształcenia.

Połączenia nie spełniające wymagań dotyczących połączeń sztywnych lub nominalnie przegubowych należy traktować jako podatne.

Zdolność do obrotu połączenia o niepełnej nośności, występującego w miejscu potencjalnego przegubu plastycznego, powinna być wystarczająca do powstania w warunkach granicznych obciążeń niezbędnego przegubu plastycznego.

## 5.2.4. Ścieżki równowagi statycznej konstrukcji prętowych

Na rys. 5.6 przedstawiono w sposób poglądowy różne ścieżki równowagi statycznej ustrojów prętowych.



Rys. 5.6. Ścieżki równowagi statycznej konstrukcji prętowych

Na rys. 5.6 opisano poszczególne ścieżki równowagi statycznej, podając przyjęte modele materiałowe (sprężysty, sprężysto-plastyczny, sztywno-plastyczny) oraz metody analizy konstrukcji (według teorii I lub II rzędu).

**Analiza sprężysta I rzędu** jest oparta na sprężystych, liniowych związkach  $\sigma(\varepsilon)$ , w których pomija się geometryczne nieliniowości i związane z tym problemy stateczności.

Według tej metody odkształcenia są proporcjonalne do przyłożonych obciążeń, a zasada superpozycji jest przyjmowana do oceny sił wewnętrznych w konstrukcji oraz wyężenia przekrojów.

Nośność sprężysta konstrukcji w tym modelu jest limitowana formalnie granicą proporcjonalności materiału.



**Metoda analizy plastycznej I rzędu** posługuje się podobnymi uproszczeniami, jak w modelu analizy sprężystej, lecz uwzględnia nieliniowe związki materiału w granicznym stanie wyteżenia przekroju.

Metoda ta opiera się na znajomości zachowania się konstrukcji oraz korzyści ekonomicznych wynikających z plastycznej wydłużalności stali i dopuszcza się do częściowego lub całkowitego uplastycznienia prętów lub węzłów.

Ścieżkę równowagi statycznej tego modelu analizy konstrukcji oznaczono krzywą 2 na rys. 5.6.

Analiza plastyczna umożliwia oszacowanie nośności plastycznej konstrukcji, wyznaczenie kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia (KDMZ) oraz miejsc występowania przekrojów "krytycznych" ustroju.

Te dwie metody nie uwzględniają możliwości utraty stateczności ogólnej prętów lub całego ustroju oraz miejscowej elementów przekrojów poprzecznych prętów.

Dlatego też **wyniki analiz sprężystych lub plastycznych I rzędu należy uzupełniać o analizę stateczności sprężystej lub niesprężystej.**

Na rys. 5.6 pokazano rozdwojenie ścieżek równowagi wskutek utraty stateczności konstrukcji  $P(y)$  przy założeniu **modelu analizy według teorii I rzędu (linia 3 na rys. 5.6) i teorii II rzędu (krzywa 4 na rys. 5.6)**, stosowanych do systemów budowanych z materiałów sprężystych i sprężysto- plastycznych.

W dość często spotykanych układach konstrukcyjnych analiza sprężysta I rzędu może prowadzić do błędnej oceny sił wewnętrznych oraz przemieszczeń.

Ma to miejsce wtedy, gdy występuje wpływ przemieszczeń na siły wewnętrzne w ustroju.

Należy wówczas w szacowaniu nośności konstrukcji uwzględnić nieliniowość geometryczną ustroju i wyznaczać siły przekrojowe z uwzględnieniem zginania II rzędu.

**Nieliniową ścieżkę równowagi statycznej przy założeniu sprężystego modelu wyężenia materiału i analizie konstrukcji według teorii II rzędu oznaczono na rys. 5.6 krzywą 5.**

Teorię I rzędu można stosować w globalnej analizie statycznej dla układów stężonych i układów nieprzechyłowych.

Wtedy dodatkowo należy uwzględnić (w sposób pośredni) efekty II rzędu.

**W metodzie analizy konstrukcji według zanikającej sztywności przyjmuje się sprężysto-plastyczny model wyężenia materiału, teorię II rzędu przy wyznaczaniu sił wewnętrznych oraz uwzględnia się aktualne charakterystyki sztywnościowe pod narastającym obciążeniem w odniesieniu do stref plastycznych przekrojów prętów.**

W modelu tym uwzględnia się nieliniowość materiałową i geometryczną, stąd też ścieżka równowagi statycznej konstrukcji jest nieliniowa. **Oznaczono ją na rys. 5.6 ciągłą krzywą 6.**

**Taki model stanowi najlepszą aproksymację rzeczywistego wyężenia konstrukcji, ale i zarazem najtrudniejszą w obliczeniach technicznych.**

Ustroje zarówno statycznie wyznaczalne, jak i statycznie niewyznaczalne, zbudowane z prętów o przekrojach klasy 1 i 2, niewrażliwych na lokalną utratę stateczności, których ŚRS materiału można opisać modelem sprężysto-plastycznym charakteryzuje zdolność do plastycznego wyrównywania sił w przekrojach (klasy 1 i 2).

Przyrost obciążeń w konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych zbudowanych prętów o przekrojach klasy 1 może być przenoszony przez przekroje dotychczas nieuplastycznione.

Dlatego też w modelu obliczeniowym statycznie niewyznaczalnych konstrukcji o przekrojach klasy 1 można dopuścić do powstania zbioru przegubów plastycznych, zmieniających ustrój w łańcuch kinematyczny.

ŚRS takich konstrukcji można opisać modelem nieliniowo-sprężysto-plastycznym.