

## Badania ram z węzłami podatnymi – weryfikacja doświadczalna modeli

Badania obejmowały swym zakresem stalowe ramy z węzłami podatnymi, opisane szczegółowo w [1]. W rozważaniach teoretycznych prowadzono zaawansowaną analizę układów, korzystając z opracowanej koncepcji powłokowego modelu węzła, w którym bryły elementów połączenia sprowadzono do ich powierzchni środkowych. Uzyskano w ten sposób model, nazwany przez autorów 2D, w którym znacznej redukcji uległa liczba stopni swobody w modelowanej konstrukcji, co pozwoliło na urealnienie niezbędnego czasu obliczeń. Analizę prowadzono na komputerze Cray w Politechnice Warszawskiej.

Wykonano obliczenia modeli ram płaskich z węzłami podatnymi. Węzły miały blachę czołową i różniły się między sobą liczbą łączników i ich rozmieszczeniem [2]. W celach porównawczych wykonano obliczenia ramy płaskiej z węzłami spawanymi. W modelach zróżnicowano również sposób podparcia układu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy oraz założono różne programy obciążenia – ściskanie lub rozciąganie.

Teoretycznie ukształtowane modele zweryfikowano doświadczalnie, przeprowadzając testy na 17 elementach badawczych w skali technicznej. Stanowisko badawcze i procedury prowadzenia badań opisano szczegółowo w [3]. Charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe, typ i wielkość węzłów, średnicę śrub oraz ich klasę i rozmieszczenie przyjęto identyczne jak w obliczeniach teoretycznych. Starano się zrealizować praktycznie wszystkie założenia przyjęte w modelowaniu. Symulowano również dokładnie zróżnicowane warunki brzegowe (usztynienia).

W trakcie eksperymentu mierzono wielkości, które można było określić analitycznie, prowadząc analizę z wykorzystaniem zaproponowanych koncepcji zaawansowanych modeli konstrukcji i węzłów. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie wyników otrzymanych teoretycznie i doświadczalnie. Głównym przedmiotem porównań były ścieżki równowagi. Weryfikację doświadczalną prowadzono w celu oceny dopuszczalności założeń przyjętych przy upraszczaniu modeli zaawansowanych oraz oszacowania możliwości doprowadzenia do zbieżności ocen analitycznych i doświadczalnych.

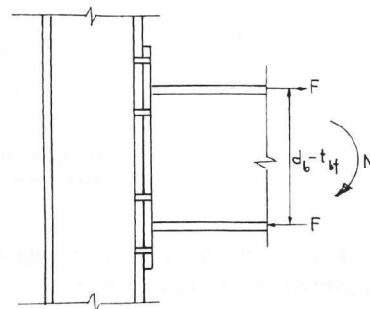
Ograniczona z konieczności liczba elementów badawczych poddanych testom, przy dość dużej liczbie zjawisk poddanych obserwacji, nadaje weryfikacji doświadczalnej charakter jakościowy.

### Uproszczony model konstrukcji z węzłami podatnymi

W inżynierskim modelowaniu ram z węzłami podatnymi przyjęto model prętowy, w którym węzły podatne zastąpiono sprężyną o odpowiednio dobranej charakterystyce  $M - \phi$ . Parametry charakterystyki węzła określono z prostych modeli odkształce-

nia elementów składowych węzła. Nośność ram z usztynieniami w płaszczyźnie prostopadłej do badanych konstrukcji wynika z nośności granicznej węzła. Nośność ramy bez usztynień bocznych oszacowano uwzględniając interakcję sprężystej formy utraty stateczności rygla z płaszczyzny układu oraz plastycznej formy zniszczenia w płaskim stanie zginania układu. Uwzględniono warunki brzegowe rygla w dwóch przypadkach granicznych – pełnego utwierdzenia oraz podparcia „widelkowego”.

• **Siła graniczna w plastycznej formie zniszczenia złącza.** W zależności od sztywności blachy czołowej, pasa słupa oraz elementów usztynniających złącze (żebra, nakładki), mogą wystąpić różne formy plastycznego mechanizmu zniszczenia. Możliwe formy plastycznego mechanizmu ruchu określono według [4]. Obciążenia graniczne odpowiadające różnym formom powstania załomów plastycznych przyjmują w poszczególnych mechanizmach postać (oznaczenie sił według rys. 1):



Rys. 1. Przyjęte oznaczenia sił w połączeniu podatnym na przykładzie węzła śrubowego z osmioma łącznikami symetrycznie rozmieszczonymi w połączeniu

– mechanizm A

$$F_u = 4A_{bo}f_{yb} - \frac{b_{ep}t_{ep}^2f_{yep}}{2,4c_t} \geq 2,8A_{bo}f_{yb}, \quad (1)$$

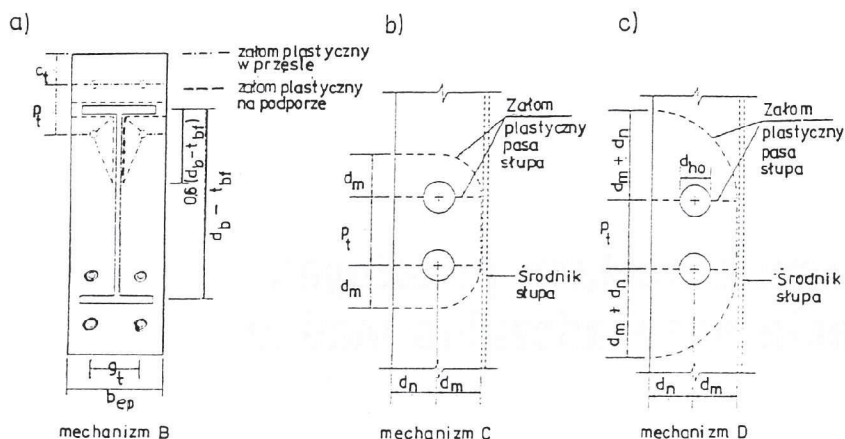
– mechanizm B (rys. 2a)

$$F_u = \frac{f_{yep}t_{ep}^2}{4} \left[ \frac{8b_{ep}}{p_t - t_{bf}} + \frac{4,8(d_b - t_{bf})}{g_t - t_{bw}} \right], \quad (2)$$

– mechanizmy C÷F (oznaczenia podano na rys. 2b,c); mechanizmy zniszczenia przedstawiono na rys. 3, a odpowiadające im siły graniczne  $F_u$  – w tabl. 1.

Przedstawione zależności umożliwiają oszacowanie obciążenia granicznego statycznie wyznaczalnych ram płaskich, gdy są one skutecznie zabezpieczone przed możliwością przestrzennej utraty stateczności. Ponieważ o nośności połączeń śrubowych decyduje odkształcalność blach czołowych, nośność węzła obliczono uwzględniając mechanizm B zniszczenia, tj. ze wzoru (2). We wzorze tym wprowadzono dodatkowo korektę parametrów  $p_t$  oraz  $g_t$ , uwzględniając fakt, że rzeczywista linia załomów nie przebiega w linii pokrywającej się z teoretycznymi środkami otworów na śruby, lecz przebiega na krawędzi otworów.





Rys. 2. Przyjęte postacie linii załomów plastycznych w blachach czolowych rygła i w przylegającym pasie słupa połączenia podatnego

sprężycie zamocowany na końcach ze względu na zginanie w płaszczyźnie mniejszej sztywności i ze względu na deplanację.

Obszar stanów statecznych, w dowolnych warunkach podparcia rygła w płaszczyźnie zwichrzenia, opisany jest równaniem

$$\left(\frac{M}{M_{cr}}\right)^2 = \left(1 - \frac{N}{N_{ygr}}\right) \left(1 - \frac{N}{N_{zcr}}\right), \quad (6)$$

gdzie:

$$N_{ygr} = \frac{\pi^2 E I_y}{(\mu_y L)^2}, \quad N_{zcr} = \frac{1}{i_o^2} \left[ G I_T + \frac{\pi^2 E I_\omega}{(\mu_\omega L)^2} \right], \quad (7)$$

$$M_{cr} = i_o \sqrt{N_{ygr} N_{zcr}}, \quad i_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}.$$

Równanie (6) przekształcić można do postaci

$$\bar{\lambda}^4 + b \bar{\lambda}^2 + c = 0; \quad c = -\bar{\lambda}_L^4 + \chi_N^2 \bar{\lambda}_y^2 \bar{\lambda}_z^2, \quad (8)$$

$$b = -\chi_N \bar{\lambda}_o^2,$$

z którego wyznacza się smukłość

$$\bar{\lambda} = \sqrt{M_{pl} / M}.$$

W równaniu powyższym oznaczono

$$\bar{\lambda}_L = \sqrt{M_{pl} / M_{cr}}, \quad \bar{\lambda}_y = \sqrt{N_{pl} / N_{ygr}}, \quad (9)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{N_{pl} / N_{zcr}},$$

$$\bar{\lambda}_o = \sqrt{\bar{\lambda}_y^2 + \bar{\lambda}_z^2}, \quad \chi_N = \frac{N / N_{pl}}{M / M_{pl}}. \quad (10)$$

Interakcję sprężystego zwichrzenia rygła oraz plastycznej formy zniszczenia uwzględnia się na podstawie smukłości  $\bar{\lambda}$  wg zasad PN-90/B-03200 [6] (bez częściowych współczynników bezpieczeństwa) zakładając, że parametr imperfekcji  $n$  dla  $0 \leq \chi_N \leq 1$  jest funkcją bezwymiarowych parametrów  $N/N_{pl}$  i  $M/M_{pl}$

$$n = 2,05 + 0,45(1 - \chi_N), \quad \chi_N = \frac{N / N_{pl}}{M / M_{pl}}. \quad (11)$$

W tabelicy 2 zestawiono wyniki obliczeń, przyjmując dwa skrajne przypadki zamocowania rygła, tj.  $\mu_y = \mu_\omega = 0,5$  (oszacowanie górne) oraz  $\mu_y = \mu_\omega = 1,0$  (oszacowanie dolne). Zakłada się, że węzły ramy są o pełnej nośności, a bezwymiarowe parametry siły osiowej i momentu zginającego:

$$N/N_{pl} = 0,045, \quad M/M_{pl} = 0,543, \quad (12)$$

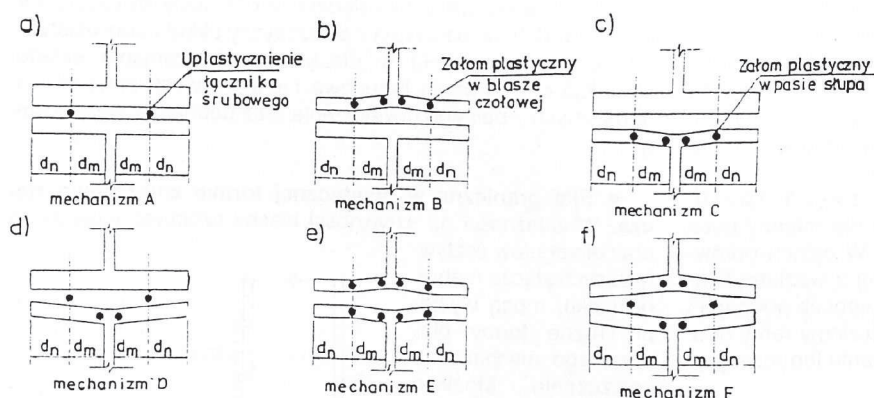
co daje

$$\chi_N = \frac{N / N_{pl}}{M / M_{pl}} = 0,083. \quad (13)$$

Z porównania wyników widać, że obciążenie graniczne silnie zależy od warunków podparcia rygła. W rzeczywistości warunki brzegowe rygła są pośrednie między podparciem ze swobodą obrotu i deplanacji oraz przypadkiem pełnego zamocowania.

#### Zakres badań weryfikacyjnych

W pracy [3] przedstawiono program i zakres badań doświadczalnych zachowania się ram z węzłami podatnymi, które objęły ramy usztywnione poprzecznie oraz ramy nie zabezpieczone skutecznie przed wystąpieniem przestrzennej formy utraty sta-



Rys. 3. Schematyczne oznaczenie uplastycznionych składników węzła w rozważanych modelach zniszczenia A - F połączenia podatnego

- W przypadku węzłów z czterema łącznikami śrubowymi w strefie rozwarcia połączenia:

$$F_u = \frac{0,286 \cdot 6^2}{4} \left[ \frac{8 \cdot 80}{33 - 6,3} + \frac{4,8(120 - 6,3)}{33 - 4,4} \right] = 111,3 \text{ kN}, \quad (3)$$

$$M_u = 111,3 \cdot (120 - 6,3) = 12,7 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

- W przypadku węzłów z dwoma łącznikami śrubowymi po wewnętrznej stronie rozciąganego pasa rygła:

$$F_u = \frac{0,286 \cdot 6^2}{4} \left[ \frac{4 \cdot 80}{33 - 6,3} + \frac{4,8(120 - 6,3)}{33 - 4,4} \right] = 80,0 \text{ kN}, \quad (4)$$

$$M_u = 80,0 \cdot (120 - 6,3) = 9,1 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

- Węzły z dwoma łącznikami śrubowymi po zewnętrznej stronie rozciąganego pasa rygła:

$$F_u = \frac{0,286 \cdot 6^2}{4} \frac{6 \cdot 80}{33 - 6,3} = 46,3 \text{ kN}, \quad (5)$$

$$M_u = 46,3 \cdot (120 - 6,3) = 5,3 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

• **Modele zniszczenia w przestrzennej formie utraty stateczności.** W ramach z rozciąganiem ryglami bez usztywnień bocznych przestrzenna forma utraty stateczności ujawnia się przy obciążeniu bardzo bliskim obciążenia granicznego ram z ryglami usztywnionymi poprzecznie. Znacznie większą wrażliwość układu na wystąpienie przestrzennej formy utraty stateczności zaobserwować można w ramach, w których ściskane rygły nie są usztywnione poprzecznie. Ocena obciążenia krytycznego przestrzennej utraty stateczności polega na wyodrębnieniu rygła z układu oraz przyjęciu, że jest on



**Tablica 1**  
Nośność graniczna węzła odpowiadająca różnym mechanizmom zniszczenia

Typ połączenia	Mechanizm	Siła w pasie słupa w stanie granicznym
Środek i pas słupa bez wzmocnienia	C	$F_u = \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \pi + \frac{2d_n + p_t - d_{ho}}{d_m} \right\}$
	D	$F_u = \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \pi + \frac{0,5p_t}{d_m + d_n} \right\} + \frac{4A_{bo}\sigma_{yb}d_n}{(d_m + d_n)}$
	E	$F_u = \frac{\sigma_{ycl} t_{cl}^2 b_m}{d_m}$ $b_m = 8d_m + 2,5d_n$ gdy $p_t > 4d_m + 1,25d_n$ $b_m = p_t + 4d_m + 1,25d_n$ gdy $p_t \leq 4d_m + 1,25d_n$
	F	$F_u = \frac{\sigma_{ycl} t_{cl}^2 b_m + 8A_{bo}\sigma_{yb}d_n}{2(d_m + d_n)}$ $b_m = 8d_m + 2,5d_n$ gdy $p_t > 4d_m + 1,25d_n$ $b_m = p_t + 4d_m + 1,25d_n$ gdy $p_t \leq 4d_m + 1,25d_n$
Środek słupa wzmocniony żebrami	C	$F_u = \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \left( \frac{2}{p_t - t_s} + \frac{1}{w} \right) (2d_m + 2d_{ho}) \right\} + \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \frac{p_t - t_s + 2w - d_{ho}}{d_m} \right\}$ $w = \sqrt{d_m(d_m + d_n - 0,5d_{ho})}$
Pas słupa wzmocniony nakładką	C	$P_u = \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \pi + \frac{p_t + 2d_n - d_{ho}}{d_m} \right\} + \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \frac{p_{ts} + 2d_n - 4d_{ho} + 2}{2d_m} \right\}$
	D	$P_u = \sigma_{ycl} t_{cl}^2 \left\{ \frac{p_t + 2w}{2(d_m + d_n)} + \frac{2(d_m + d_n)}{w} \right\} + \frac{4A_{bo}\sigma_{yb}d_n + \sigma_{ys} t_s^2 (d_m + d_n)}{(d_m + d_n) + \frac{\sigma_{ys} t_s^2 (d_m + d_n)}{w}}$ $w = (d_m + d_n) \left[ 2 + \frac{\sigma_{ys} t_s^2}{\sigma_{ycl} t_{cl}^2} \right]^{0,5}$

**Tablica 2**  
Porównanie momentów granicznych przestrzennej utraty stateczności rygla

Warunki podparcia	Momenty i siły krytyczne niezależnych form utraty stateczności rygla			Smukłości względne rygla					Momenty graniczne przestrzennej utraty stateczności rygla kN·m
	$M_{cr}$ kN·m	$N_{ycr}$ kN	$N_{zcr}$ kN	$\bar{\lambda}_L$	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_o$	$\bar{\lambda}$	
Zamocowanie ( $\mu_y = \mu_w = 0,5$ )	23,3	248,8	1089,3	0,86	1,23	0,59	1,37	0,91	25,8
Swoboda obrotu i deplanacji ( $\mu_y = \mu_w = 1,0$ )	9,9	62,2	609,5	1,33	2,47	0,79	2,59	1,43	14,5

teczności układu traktowanego jako ustrój prętowy. Program badań doświadczalnych obejmował (tabl. 3):

– 7 ram stężonych poprzecznie, których rygle poddane były rozciąganiu, oraz 4 ramy z ryglami rozciąganymi, które nie były stężone poprzecznie na odcinku między węzłami połączenia rygla ze słupami,

– 4 ramy stężone poprzecznie, których rygle poddane były ściskaniu, oraz 2 ramy z ryglami ściskanymi, które nie były stężone poprzecznie na odcinku między węzłami połączenia rygla ze słupami.

**Tablica 3**  
Plan badań – numeracja elementów doświadczalnych

Szczegóły połączenia	Rodzaj połączenia			
	śrubowe			spawane
Schemat obciążeń i usztywnienia				
	2*, 3, 4	7, 8	5, 6	9
	10	11	12	13
	14	–	–	15
	1*, 16	–	–	17

\* Nr 1, 2 dotyczą pilotowej serii badań.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych zostały przedstawione w pracy [1] i stanowią materiał do weryfikacji opracowanych modeli teoretycznych.

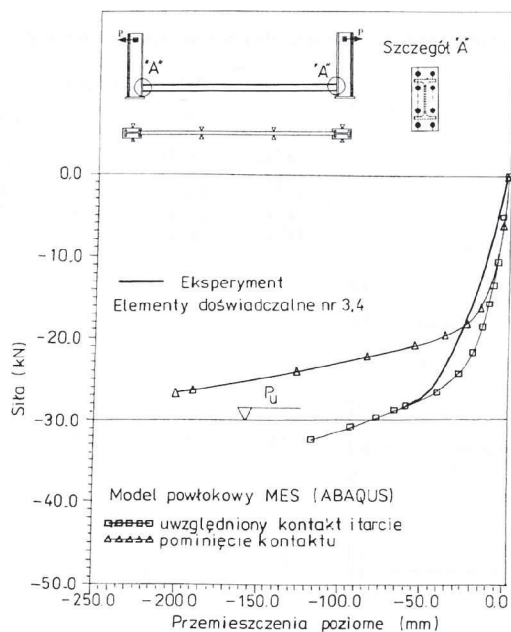
Badania teoretyczne zachowania się ram z węzłami podatnymi przedstawiono w pracy [2]. Opracowano zaawansowane modele analizowanych konstrukcji, które wykorzystują powłokowe elementy skończone i program ABAQUS jako narzędzie realizacji obliczeń.

Porównanie zakresów: przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz modelowania teoretycznego wskazuje, że modelowanie teoretyczne nie obejmuje wszystkich przypadków ram badanych doświadczalnie. Z uwagi na bardzo czasochłonną analizę numeryczną problemu zaawansowanego modelowania badanych ram programem ABAQUS, ograniczono się do weryfikacji obciążenia granicznego ram: a) poprzecznie stężonych z ryglami rozciąganymi, b) poprzecznie nie stężonych z ryglami ściskanymi.

#### Wyniki badań weryfikacyjnych

● **Analiza form zniszczenia.** Badane doświadczalnie modele ram, w których rozciągane rygle były poprzecznie stężone w odstępie co 1/3 rozpiętości, ulegały zniszczeniu w wyniku dylatacyjnej formy miejscowej utraty stateczności płytowych elementów przekroju rygla, w zakresie zaawansowanych odkształceń plastycznych [1]. Opracowany w [2] model teoretyczny opisu zachowania się badanych ram, wykorzystujący powłokowe elementy skończone, umożliwił weryfikację stopnia czułości tych układów na „płytowe” i „prętowe” formy utraty stateczności. W ramach stężonych poprzecznie dominujące fazy utraty stateczności są związane z lokalną utratą stateczności elementów płytowych przekroju poprzecznego rygla w przedziale między słupem podporowym ramy oraz pierwszym usztywnieniem, usytuowanym w odległości 1/3 rozpiętości rygla, mierzonej od tego słupa. W ramach nie stężonych poprzecznie, gdy prętowe usztywnienia boczne zostały usunięte, dominują „prętowe” formy utraty stateczności, związane z giętno-skrętną postacią wyboczenia rygla z płaszczyzny układu. Opracowany powłokowy





Rys. 4. Porównanie „uśrednionej” ścieżki równowagi elementów doświadczalnych nr 3 i 4 ze ścieżkami równowagi otrzymanymi z programu ABAQUS dla powłokowego modelu konstrukcji

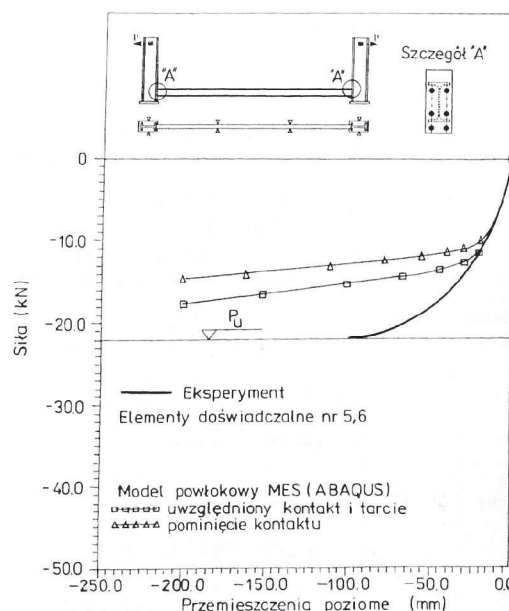
model badanych konstrukcji umożliwił precyzyjne badanie wrażliwości układu na różne formy utraty stateczności, uwzględniające proste formy „płytkowe” lub „prętowe”, a także formy złożone, w których „płytkowe” stany pokrytych deformacji elementów układu są „nałożone” na „prętowe” stany odkształceń, charakteryzujące się zachowaniem sztywnego konturu poprzecznego przekroju prętów konstrukcji. Wyniki badań doświadczalnych przedstawione w [1] potwierdzają w tym zakresie wyniki analizy teoretycznej wartości własnych i wektorów własnych badanych ram spawanych, wyznaczonych w wypadku powłokowego modelu badanych konstrukcji w [2].

W przypadku węzłów śrubowych powłokowy model MES, przyjęty do badania zachowania się ram z ryglami rozciągany, może być wykorzystywany, gdy równanie równowagi układu zdystryktowanego można zbudować dla jego stanu nieodkształconego. Geometrycznie liniowa analiza ram z węzłami śrubowymi o zróżnicowanej liczbie i konfiguracji łączników w połączeniu wykazała, że aż do zniszczenia łączniki śrubowe pracują w zakresie liniowym, a uplastycznieniu ulegają jedynie blachy czołowe połączeń rygli ze słupami. Koncentracja stref plastycznych w płytach czołowych połączeń śrubowych rygli ze słupami wskazuje, że nośność układu można, w sposób uproszczony, wyznaczyć na podstawie nośności węzła, ocenianego metodą załomów plastycznych, które tworzą się w blachach czołowych oraz w płytowych elementach przywęzłowego przekroju pasów słupa. Jest to bardzo korzystna forma zniszczenia układu, gdyż zapewnia osiągnięcie zdolności do obrotu, wymaganej z punktu widzenia plastycznego wyrównania momentów w układzie prętowym poddanym odkształceniom niesprężystym. W praktycznym projektowaniu ram z węzłami podatnymi należy unikać takich sytuacji projektowych, w których nośność układu wynika z warunku uplastycznienia łączników, a nie z „ciągłości” płytowych elementów składowych węzła. Forma zniszczenia związana z uplastycznieniem łączników śrubowych jest zaliczana do stanu opisanego przez „kruchą” formę wyczerpania nośności układu, która jest mniej korzystna z punktu widzenia niezawodności układu.

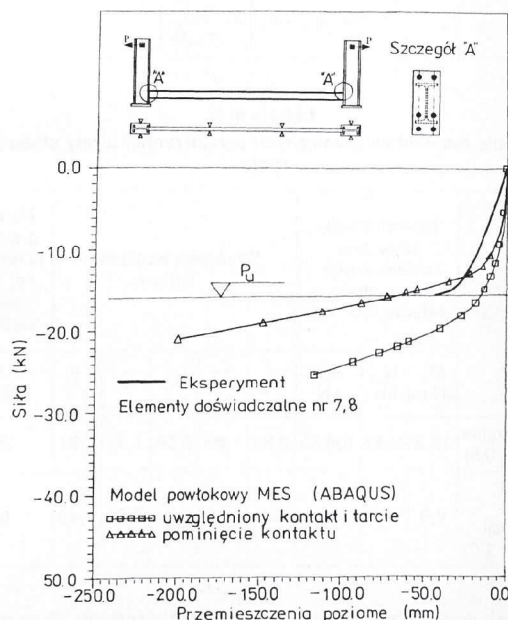
• **Analiza obciążenia granicznego ram stężonych poprzecznie.** Analizowano ramy, których rozciągane rygle stężo-

ne są poprzecznie w odstępach co 1/3 rozpiętości. Rozpatrzono cztery warianty wykonania połączenia rygla ramy ze słupem.

Na rysunku 4 przedstawiono „uśrednioną” ścieżkę równowagi elementów doświadczalnych nr 3 i 4, którą porównano ze ścieżkami równowagi ocenianymi programem ABAQUS w powłokowych modelach MES badanych konstrukcji. Rozpatrzono dwa warianty modeli: gdy efekty kontaktu i tarcia zostały uwzględnio-



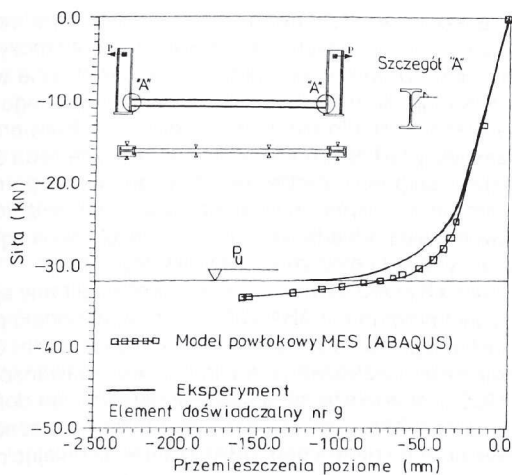
Rys. 5. Porównanie „uśrednionej” ścieżki równowagi elementów doświadczalnych nr 5 i 6 ze ścieżkami równowagi otrzymanymi z programu ABAQUS dla powłokowego modelu konstrukcji



Rys. 6. Porównanie „uśrednionej” ścieżki równowagi elementów doświadczalnych nr 7 i 8 ze ścieżkami równowagi otrzymanymi z programu ABAQUS dla powłokowego modelu konstrukcji

ne oraz gdy efekty te zostały pominięte. Z porównania wynika, że doświadczalnie wyznaczona ścieżka równowagi w stanie sprężystym, tj. poniżej 2/3 doświadczalnie oszacowanej nośności granicznej, przebiega poniżej ścieżek uzyskanych z modelowaniem teoretycznym. W zakresie niesprężystych odkształceń zachodzą-





Rys. 7. Porównanie doświadczalnie uzyskanej ścieżki równowagi ramy nr 9 ze ścieżką równowagi otrzymaną z programu ABAQUS dla powłokowego modelu konstrukcji

cych w elementach złącza z ośmioma łącznikami śrubowymi, „doświadczalna” ścieżka równowagi przybliża się do ścieżki równowagi wyznaczonej programem ABAQUS w modelu powłokowym, przy założeniu, że kontakt i tarcie między elementami składowymi złącza są uwzględnione. Wyraźnie widać, że ścieżka równowagi wyznaczone programem ABAQUS w przypadku, gdy pomija się kontakt między elementami składowymi złącza, daje wyniki zbyt konserwatywne. Obciążenie graniczne w tym przypadku wynosi około 70% obciążenia granicznego wyznaczonego doświadczalnie oraz teoretycznie z modelu powłokowego MES w przypadku, gdy jest uwzględniony kontakt i tarcie.

Na rysunku 5 przedstawiono „uśrednioną” ścieżkę równowagi elementów doświadczalnych nr 5 i 6, którą porównano ze ścieżkami równowagi ocenianymi programem ABAQUS w powłokowych modelach MES badanych konstrukcji. Rozpatrzono dwa warianty modeli teoretycznych (por. rys. 1). Z porównania wynika, że doświadczalnie wyznaczona ścieżka równowagi pokrywa się w zakresie sprężystym ze ścieżkami „teoretycznymi” wyznaczonymi z wykorzystaniem obydwu rozpatrywanych modeli powłokowych. Obciążenie graniczne oszacowane doświadczalnie jest o ponad 40% większe od wyznaczonego teoretycznie w przypadku, gdy kontakt i tarcie jest uwzględnione, oraz o blisko 60% wyższe od wyznaczonego teoretycznie w przypadku, gdy kontakt między elementami składowymi złącza jest pominięty.

Na rysunku 6 przedstawiono „uśrednioną” ścieżkę równowagi elementów doświadczalnych nr 7 i 8, którą porównano ze ścieżkami równowagi ocenianymi programem ABAQUS w powłokowych modelach MES badanych konstrukcji. Z porównania wynika, że doświadczalnie wyznaczona ścieżka równowagi leży praktycznie w całym zakresie odkształceń poniżej ścieżek wyznaczonych teoretycznie. W rezultacie teoretycznie wyznaczone obciążenie graniczne układu jest o blisko 40% zawyżone w przypadku, gdy uwzględnia się kontakt i tarcie, oraz o ponad 20% zaniżone, gdy efekt kontaktu zostanie pominięty.

Na rysunku 7 przedstawiono ścieżkę równowagi elementu doświadczalnego nr 9 – modelu ramy spawanej. Porównano ścieżkę równowagi wyznaczoną doświadczalnie ze ścieżką teoretyczną, wyznaczoną programem ABAQUS w powłokowym modelu badanej konstrukcji. W zakresie sprężystej pracy układu występuje bardzo dobra zgodność obu porównywanych ścieżek równowagi. W miarę rozwoju odkształceń plastycznych w połączeniu, „doświadczalna” ścieżka równowagi odchyła się od ścieżki wyznaczonej teoretycznie. Występuje dość duża różnica w ocenie przemieszczeń układu, przy czym oszacowane teoretycznie przemieszczenia są niższe niż w rzeczywistości nawet

Tablica 4  
Porównanie obciążenia granicznego ram poprzecznie stężonych (z ryglami rozciągany) badanych doświadczalnie i analizowanych teoretycznie

Schemat statyczny i obciążenie	Opis sposobu modelowania	Obciążenie graniczne $P_u$ [kN] węzła			
	eksperyment	30,0 31,0	16,0 16,5	22,0 21,5	32,0
	model MES uwzględniony kontakt i tarcie	30,0	20,0	15,0	33,5
	pominięcie kontaktu	22,0	14,5	13,0	
	model uproszczony	22,0 (1,40)	9,5 (1,70)	16,0 (1,40)	–
	uplastycznienie pręta	–	–	–	31,5 (1,05)

do około 50%. Mimo tak dużych różnic w ocenie sztywności układu w zakresie sprężysto-plastycznej pracy połączeń, obciążenie graniczne układu ocenione teoretycznie tylko nieznacznie przewyższa obciążenie wyznaczone doświadczalnie.



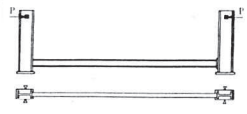
Wyniki analizy obciążenia granicznego ram usztywnionych poprzecznie w odstępie co 1/3 rozpiętości ryglu, w której rygiel jest rozciągany, zostały przedstawione w tabl. 4. Oprócz uwzględnienia zaawansowanych modeli MES konstrukcji zamieszczono również obciążenia graniczne oszacowane przy wykorzystaniu prostych modeli plastycznego zniszczenia elementów konstrukcji. W wierszach odpowiadających obciążeniom granicznym oszacowanym teoretycznie z uproszczonych modeli konstrukcji podano (w nawiasach) odpowiednie relacje siły granicznej wyznaczonej doświadczalnie do siły granicznej określonej przy zastosowaniu uproszczonego modelu teoretycznego.

Z porównania wyników uzyskanych teoretycznie przy zastosowaniu modeli uproszczonych z wynikami uzyskanymi w doświadczeniach wynika, że relacja momentu granicznego uzyskanego doświadczalnie do momentu teoretycznego wynosi 1,4 w połączeniach z czterema śrubami symetrycznie rozmieszczonymi po obu stronach rozciągane go pasa ryglu oraz w połączeniach z dwiema śrubami usytuowanymi po wewnętrznej stronie rozciągane go pasa ryglu. Jak wykazały badania doświadczalne, połączenia te charakteryzują się pełną zdolnością do obrotu wymaganą z punktu widzenia plastycznej redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji. W chwili ujawnienia się stanu granicznego w elementach doświadczalnych z tymi węzłami nie wystąpiły oznaki sygnalizujące pojawienie się odkształceń o wartości odpowiadającej maksymalnej wydłużalności stali. Stosunek momentu granicznego uzyskanego z doświadczeń do momentu określonego teoretycznie wynosi 1,7 w połączeniach z dwiema śrubami umieszczonymi po zewnętrznej stronie rozciągane go pasa ryglu. Duża wartość tej relacji wskazuje, że stal w blachach czołowych połączenia osiąga, w chwili wystąpienia stanu granicznego układu, maksymalną odkształcalność. Fakt ten potwierdzony został doświadczalnie, gdyż we wszystkich przypadkach, w których występował tego typu węzeł, zaobserwowano, że stan graniczny układu ujawnił się w formie pęknięcia blachy czołowej w pobliżu spoin lub pęknięcia spoiny, w przypadku gdy



Tablica 5

Porównanie obciążenia granicznego ram nie stężonych poprzecznie (z ryglami ściskowymi) badanych doświadczalnie i analizowanych teoretycznie

Schemat statyczny i obciążenie	Opis sposobu modelowania	Obciążenie graniczne $P_u$ [kN] węzła	
			
	eksperyment	17,0	17,0
	model MES	–	21,5
	model uproszczony	zamocowanie	25,8 (0,65)
	swoboda obrotu i deplancji	14,5 (1,15)	

nie wykazuje ona wystarczającego przetopu. Nośność graniczna ram stężonych, obliczona z wykorzystania linii załomów w blasze czołowej, jest znacznie mniejsza niż określona z modelu powłokowego analizowanego programem ABAQUS.

• **Analiza obciążenia granicznego ram nie stężonych poprzecznie.** Analizowano układy ze ściskowymi ryglami nie stężonymi poprzecznie między węzłami. Rozpatrzono dwa warianty połączenia rygla ramy ze słupem: śrubowe z 8 łącznikami (element doświadczalny nr 16) oraz spawane (element doświadczalny nr 17). Wyniki zestawiono w tabl. 5.

Modele teoretyczne dotyczą zaawansowanego modelowania programem ABAQUS z wykorzystaniem powłokowych elementów skończonych oraz modelowania inżynierskiego, w którym stosuje się zasadę normową kojarzenia sprężystych i plastycznych form zniszczenia elementów konstrukcji. W wierszach odpowiadających obciążeniu granicznemu w modelowaniu uproszczonym, w nawiasach podano relacje pomiędzy obciążeniem granicznym wyznaczonym doświadczalnie a obciążeniem granicznym oszacowanym teoretycznie. Z porównania wynika, że

obciążenie graniczne oszacowane przy uproszczonym modelowaniu daje bezpieczne i ekonomiczne wyznaczenie rzeczywistej nośności układu wówczas, gdy przyjmuje się swobodne warunki podparcia rygla do oceny jego obciążenia krytycznego związanego z przestrzenną formą utraty stateczności. Potwierdza to dotychczasową praktykę projektowania, w której zakłada się, że poszczególne segmenty prętów układów ramowych, pomiędzy usztywnieniami bocznymi, można traktować jako wyizolowane odcinki swobodnie podparte na końcach ze względu na zginanie z płaszczyzny układu oraz ze względu na deplancję.

Na rysunku 8 przedstawiono ścieżki równowagi ramy spawanej określonej programem ABAQUS przy użyciu modelu powłokowego opisanego za pomocą elementów skończonych. Obciążenie graniczne, oszacowane na podstawie zaawansowanej analizy MES, jest większe od obciążenia określonego doświadczalnie o ponad 20%. Teoretyczne obciążenie graniczne tego układu wyznaczono programem ABAQUS uwzględniając nieidealny model konstrukcji, w którym maksymalna rzędna imperfekcji geometrycznej jest równa grubości średnicy rygla. Ponieważ rygiel jest wykonany z IPE 120, nałożona na geometrię ramy idealnej imperfekcja jest znacznie mniejsza niż imperfekcje rzeczywiste, występujące w konstrukcjach w stanie nieobciążonym. Lepsze oszacowanie obciążenia granicznego można by uzyskać przyjmując bardziej realistyczną wartość początkowych imperfekcji geometrycznych.

Z badań doświadczalnych wynika, że obciążenie graniczne modelu z węzłami śrubowymi, przy ośmiu symetrycznie rozmieszczonych łącznikach, jest praktycznie identyczne z obciążeniem granicznym modelu z węzłami spawanymi. Taka sama wartość obciążenia granicznego w obu przypadkach wynikać może z tego, że oba typy węzłów charakteryzują się podobną charakterystyką  $M - \phi$  w płaszczyźnie zginania ramy.

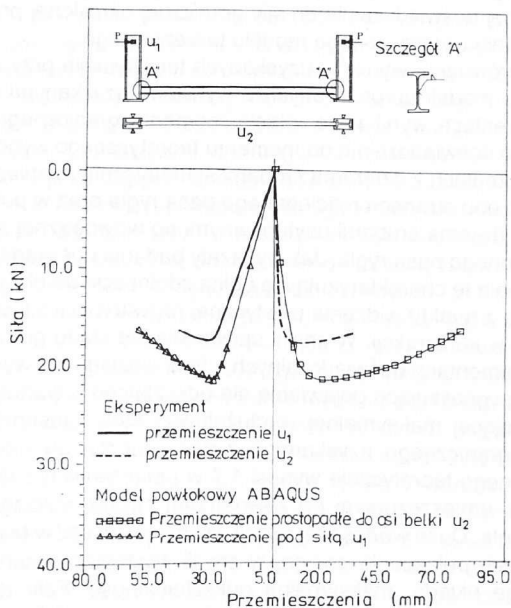
Obciążenie graniczne uzyskane z modelu powłokowego, analizowanego programem ABAQUS, leży między przypadkami granicznymi z uproszczonych modeli prętowych, przy czym jest bliższe obciążeniu, które oszacowano przy założeniu utwierdzenia rygla w słupie.

### Wnioski praktyczne do projektowania

**W przypadku ram usztywnionych** największą nośność stwierdzono w konstrukcjach z węzłami o największej liczbie łączników – 8 śrub. Wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem modelu zaawansowanego i uproszczonego dają oszacowania zbliżone od oszacowań doświadczalnych. Najbardziej zbliżone do doświadczalnych są wyniki analizy wykonanej z wykorzystaniem modelu zaawansowanego, w którym uwzględniono zjawiska kontaktowe zachodzące w węzłach, a przede wszystkim tarcie. Model powłokowy MES z uwzględnieniem tarcia między elementami złączy powinien być brany pod uwagę w weryfikacji modeli uproszczonych zaleconych przy praktycznym wdrożeniu. Kształt modelu opracowanego w badaniach jest zbyt zachowawczy. Powinno się w nim wprowadzić zmiany prowadzące do uzyskiwania oszacowań bliższych rzeczywistej pracy układów z węzłami podatnymi.

W przypadku węzłów o mniejszej liczbie łączników – 6 śrub, zdecydowanie zaniżone oszacowania teoretyczne nośności granicznej uzyskano w rozwiązaniach, w których pominięto dwie śruby w strefie rozciąganej węzła, umieszczone na zewnątrz przekroju rygla. Wartości uzyskane teoretycznie w modelowaniu zaawansowanym w przypadku, gdy uwzględnia się kontakt i tarcie oraz gdy pomija się te czynniki, są jednak względnie bliskie. Wskazuje to na potrzebę jedynie niewielkiej korekty modelu uproszczonego.

We wszystkich przypadkach uzyskano potwierdzenie przydatności opracowanej koncepcji zaawansowanego modelu MES. Wyniki badań doświadczalnych wskazują też na konieczność uwzględnienia podatności węzłów w modelowaniu usztywnionych ram stalowych. Należy oczywiście wziąć pod uwagę



Rys. 8. Doświadczalnie uzyskane ścieżki równowagi ramy nr 17 przy odkształceniu  $u_1$  w płaszczyźnie układu oraz  $u_2$  z płaszczyzny układu i ich porównanie ze ścieżkami równowagi otrzymanymi programem ABAQUS dla powłokowego modelu konstrukcji



fakt występowania kontaktu i takich zjawisk kontaktowych, jak m. in. tarcie między elementami złączy.

W przypadku ram nie stężonych poprzecznie uzyskane wyniki doświadczalne wykazały dość dobrą zgodność z oszacowaniami obliczeniowymi, w których wykorzystano model uproszczony sformułowany przy założeniu swobody obrotu i deplanacji przekrojów układu. Zaawansowana analiza ramy z węzłami spawanymi daje oszacowania nośności granicznej konstrukcji wyższe od uzyskanego doświadczalnie. Wyższe oszacowanie teoretyczne nośności granicznej daje także zastosowanie modelu uproszczonego, z pełnym zamocowaniem rygli w węzłach ograniczających.

Uzyskanie w oszacowaniach teoretycznych większej nośności granicznej od otrzymanej w doświadczeniach wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych badań nad koncepcją modeli, zarówno zaawansowanych, jak i uproszczonych, stalowych ram z węzłami podatnymi nie usztywnionych poprzecznie.

### Uwagi końcowe

Z porównania wyników badań teoretycznych prowadzonych przy założeniu zaawansowanego modelu powłokowego i wykorzystaniu możliwości opracowania numerycznego, jakie tworzy program komputerowy ABAQUS, wynika, że obecny stan wiedzy o zachowaniu się konstrukcji i ich węzłów pod obciążeniem oraz istniejące opracowania numeryczne umożliwiają dokładne modelowanie konstrukcji i ich węzłów. Najważniejsze wnioski sformułowano niżej.

- Uwzględnienie zjawisk kontaktowych (m. in. tarcia na powierzchniach przylegania) oraz nieliniowa fizycznie i geometrycznie analiza bez wątplenia przybliży wyniki teoretyczne, uzyskane przy założonych modelach, do wyników uzyskanych praktycznie w przypadku zrealizowanych konstrukcji.

- W opisywanych badaniach przyjęto, że rzeczywiste zachowanie się konstrukcji symuluje zaawansowany model powłokowy (2D). Stanowi on uproszczoną wersję modelu bryłowego (3D). Na takie uproszczenie zdecydowano się biorąc pod uwagę złożoność modelu bryłowego, trudności w jego opisie matematycznym i numerycznym oraz niewystarczającej jeszcze do rozwiązania tego typu zadań poziom automatycznej techniki obliczeniowej.

- Przyjęte modele powłokowe prowadzą do znacznej redukcji liczby stopni swobody konstrukcji, umożliwiając tym samym realne prowadzenie analizy teoretycznej i wydają się wystarczająco dokładne do weryfikacji uproszczonych modeli przyjmowanych w praktycznym projektowaniu.

- Badania teoretyczne ram z węzłami podatnymi (śrubowymi), w których istotnym elementem jest blacha kontaktowa, wykazały zarówno w rozważaniach teoretycznych, jak i porównawczej części doświadczalnej, że koncentracja odkształceń plastycznych w węzłach występuje w linii śrub w blasze czołowej.

Świadczą o tym przedstawione w [1] zdjęcia z badań doświadczalnych oraz strefy wyężenia oszacowane przy wykorzystaniu programu ABAQUS w [2].

- Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że podatność węzłów i występujące w związku z nią zjawiska kontaktowe mają zauważalny wpływ na rzeczywistą nośność i odkształcalność układu. Pomijanie go w analitycznych oszacowaniach może prowadzić do znacznych odchyłeń pomiędzy wynikami uzyskanymi w trakcie projektowania i rzeczywistą nośnością i odkształcalnością konstrukcji po jej zrealizowaniu. Odchylenia te prowadzą na ogół do nieefektywnego ekonomicznie projektowania lub zmniejszenia tkwiącego w konstrukcji „zapasu bezpieczeństwa”, a w skrajnych przypadkach do ukształtowania konstrukcji wręcz niebezpiecznych.

- Ocena wpływu podatności węzłów na nośność i odkształcalność konstrukcji była dotychczas stosowana przez niektórych projektantów na zasadzie intuicyjnego wyczucia. Takie podejście stwarza niebezpieczeństwo dużej pomyłki. Stąd niezwykle ważne jest prowadzenie badań w omawianej dziedzinie dających, zweryfikowane praktycznie, podstawy teoretyczne do obiektywnego analizowania wpływu podatności węzłów i roli jaką w nim odegrają zjawiska kontaktowe.

- Prezentowane badania mają charakter raczej poznawczy. Praktyczne wykorzystanie uzyskanych wyników wiąże się z koniecznością zrealizowania szerszego programu badań, zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych, pozwalających na lepsze poznanie „ilościowe” skutków działania określonych w prezentowanych badaniach zjawisk dotyczących m. in. kontaktu i związanego z nim tarcia, rozwoju stref plastycznych, zmiany schematów statycznych itd. Rozszerzone badania powinny również potwierdzić przydatność w zaawansowanej analizie układów opracowanych koncepcji modeli konstrukcji i węzłów, a także znaleźć zastosowanie w weryfikacji modeli przyjmowanych w normie EC3 [5], w związku z jej wdrożeniem w Polsce.

### PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] *Giżejowski M.*: Badania doświadczalne ram z węzłami podatnymi. Raport końcowy z projektu KBN nr 7 T07E 052 10. Politechnika Warszawska 1998 (praca niepublikowana).
- [2] *Giżejowski M., Postek E.*: Modelowanie zachowania się ram z węzłami podatnymi. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/1999.
- [3] *Giżejowski M., Karczewski J., Sotomski W., Wierzbicki S., Witkowski J.*: Badania doświadczalne ram z węzłami podatnymi – program badań, elementy próbne i stanowisko badawcze. Raport końcowy z projektu KBN nr 7 T07E 052 10, Politechnika Warszawska 1998 (praca niepublikowana).
- [4] *Hasan R., Kishi N., Chen W. F., Matsuoka K. G.*:  $M - \theta$ , Relationship of End-Plate Connections. Proc. 4th Pacific Structural Steel Conference, Vol. 2 Structural Connections, Singapore 1995.
- [5] *Kozłowski A.*: Obliczanie nośności, sztywności i zdolności do obrotu węzłów konstrukcji stalowych według EC3. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/1998.
- [6] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.

## Nowe normy

**PN-EN 490:2000** Dachówki i kształtki dachowe cementowe – Charakterystyka wyrobu

**PN-EN 518:2000** Drewno konstrukcyjne – Sortowanie. Wymagania w odniesieniu do norm dotyczących sortowania wytrzymałościowego metoda wizualna

**PN-EN 519:2000** Drewno konstrukcyjne – Sortowanie. Wymagania dla tarcicy sortowanej wytrzymałościowo metoda maszynowa oraz dla maszyn sortujących

**PN-EN 844-2:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia – Terminy ogólne dotyczące drewna okrągłego

**PN-EN 844-5:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia – Terminy dotyczące wymiarów drewna okrągłego

**PN-EN 844-7:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia – Terminy dotyczące anatomicznej budowy drewna

**PN-EN 844-8:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia – Terminy dotyczące cech drewna okrągłego

**PN-EN 1303:2000** Okucia budowlane – Wkładki bębnekowe do zamków – Wymagania i metody badań

**PN-EN 1310:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Metody pomiaru cech

**PN-EN 1311:2000** Drewno okrągłe i tarcica – Metody pomiaru biologicznej degradacji

**PN-EN 1504-1:2000** Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, kontrola jakości i ocena zgodności – Definicje

**PN-EN 1527:2000** Okucia budowlane – Okucia do drzwi przesuwanych i drzwi składanych – Wymagania i metody badań

**PN-EN ISO 12543-1:2000** Szkło w budownictwie –

Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Definicje i opis części składowych

**PN-EN ISO 12543-2:2000** Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Bezpieczne szkło warstwowe

**PN-EN ISO 12543-3:2000** Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Szkło warstwowe

**PN-EN ISO 12543-4:2000** Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Metody badań odporności

**PN-ISO 2394:2000** Ogólne zasady niezawodności konstrukcji budowlanych

**PN-ISO 6707-2:2000** Budownictwo – Terminologia – Terminy stosowane w umowach

BPK