

Sztywność węzłów spawanych typu T z rur prostokątnych

M. Broniewicz

J. Szlendak

Politechnika Białostocka

1. WPROWADZENIE

Konstrukcje z rur prostokątnych poza doskonałymi właściwościami wytrzymałościowymi prętów charakteryzują się również łatwością wykonywania połączeń. Elementy z rur prostokątnych są szeroko używane w konstrukcjach szkieletowych budynków wysokościowych, masztach, wieżach, mostach, itp. W latach siedemdziesiątych przeprowadzono wiele programów badawczych mających na celu oszacowanie nośności wyizolowanych węzłów typu T, X, K, N i KT. W następstwie tych badań, powstało wiele teorii dotyczących określania nośności węzłów z rur prostokątnych obciążonych siłą osiową (Redwood, R. G. [1], Mang, F. [2], Wardenier, J. [3]), lub momentem zginającym (Szlendak, J. [4]).

Różnorodność węzłów z rur prostokątnych i wiele sposobów ich zniszczenia, doprowadziło do powstania skomplikowanych kryteriów projektowych, które musiały być znacznie uproszczone w celu dostosowania ich do celów projektowych.

Jednakże, oszacowanie sztywności węzłów z rur prostokątnych było jak dotychczas przedmiotem niewielu prac badawczych. Węzły ram z rur prostokątnych są z reguły połączeniami podatnymi ze względu na to, że preferowane technologie ich wykonania tzn. bezpośrednie spawanie rura do rury wprowadza znaczne obciążenie od rygla na stosunkowo smukłą ściankę rury słupa. Charakterystyki moment-obrót węzła są najczęściej nieliniowe a węzły pracują już przy niewielkich obciążeniach w obszarze plastycznej pracy materiału. Technologia ta pomimo powyższych niedociągnięć jest preferowana, głównie w krajach wysoko rozwiniętych, ze względu na niewielkie nakłady robocizny. Uzyskanie połączenia wymaga tylko prostego cięcia rur i wykonania standardowych spoin przez co wykorzystuje się naturalne cechy rur prostokątnych jakimi są płaskie ścianki.

Wspomniany wyżej charakter pracy połączeń utrudnia prosta ocenę zarówno ich nośności jak i sztywności. Jest on zupełnie inny niż w dotychczasowych tradycyjnych połączeniach między elementami, których spoiny pracują na ścinanie a pręty w okolicy węzła można uznać za krępe. Do oceny nośności połączeń pomiędzy rurami prostokątnymi z dużym powodzeniem zastosowano teorię linii załomów, natomiast ocena sztywności staje się w chwili obecnej głównym przedmiotem badań. Prawidłowa ocena sztywności węzłów umożliwia przeprowadzenie poprawnych obliczeń statycznych ram oraz ocenę I i II stanu granicznego konstrukcji i jej elementów.

Spośród czterech węzłów ram o układzie ortogonalnym prętów, do analizy przyjęto węzeł słupa zewnętrznego ramy z ryglem pośredniej kondygnacji i nazwano go węzłem typu T. Jest to węzeł o budowie i rozwiązaniu konstrukcyjnym, który można uznać za węzeł pierwotny, gdyż budowę i właściwości pozostałych trzech węzłów można odnieść do węzła typu T, rozpatrując dla nich tylko zagadnienia uzupełniające. Węzeł typu T ma więc znaczenie podstawowe do oceny nośności i sztywności połączeń ramowych układów konstrukcyjnych o węzłach podatnych.

2. PRZEGLĄD BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Szerokie badania nad węzłami ram z rur prostokątnych przeprowadzono w latach 80-tych głównie w RFN, Japonii, Polsce, Holandii i Wielkiej Brytanii. Badania te dotyczyły głównie węzłów T ram wyizolowanych z konstrukcji. Łącznie zbadano ponad 200 węzłów. Pozwoliło to na zaproponowanie zaleceń co do sposobu oceny ich nośności oraz rozpoczęcie studiów i sformułowanie pierwszych oszacowań sztywności takich połączeń.

W latach 1980-81 przeprowadzono w COBPKM "Mostostal" obszerne badania węzłów T ram z rur prostokątnych [5] o następujących głównych parametrach:

$$\beta = b_n/b_o = 0.46-1.0, \eta = h_n/b_o = 0.73-2.02, \lambda = b_o/t_o = 25.5-36.5, n = P_o/A_o R_e = 0.23, 0.47$$

Łącznie zbadano 51 węzłów niewzmocnionych, dla których podano krzywe $M-\phi$

W RFN F. Mang [2] przeprowadził badania 75 węzłów z rur kwadratowych oraz 13 węzłów z rur prostokątnych o parametrach:

$$\beta = \eta = 0.4 - 1.0, \lambda = 10 - 40, n = 0$$

Przedstawiono krzywe siła-przemieszczenie końca rygla oraz porównano uzyskane nośności eksperymentalne z aktualnymi oszacowaniami teoretycznymi. Sformułowano również sposób określania sztywności tych węzłów w oparciu o równanie prac wirtualnych i wprowadzono bezwymiarowy współczynnik sztywności, który dla stali o $\nu = 0.3$ i $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ przybiera postać: $C = C^* t_0^3 / 52$ [kNm] przy t_0 w [mm]. Sztywność węzła jest określona jako sprężysty obrót węzła mierzony w punkcie przy ścianie czołowej słupa, do której przyspawany jest rygiel, tj. $C = M/\phi$. Wartości C^* są przedstawione w postaci wykresu w funkcji b_n/b_o , b_o/t_o i t_n/t_o .

W Japonii podobne badania przeprowadził H. Kanatan [6], który zbadał 66 węzłów z rur kwadratowych o następujących głównych parametrach:

$$\beta = 0.5 - 1.0, \eta = 0.5 - 1.725, \lambda = 17 - 50, n = 0$$

W mniejszej skali badania podobnych węzłów przeprowadził w Kanadzie R. M. Korol [7], który zbadał 6 węzłów niewzmocnionych o następujących głównych parametrach:

$$\beta = \eta = 0.6 - 1.0, \lambda = 24 - 32, n = 0$$

Również J. Wardenier zbadał 3 takie połączenia [8] o następującej charakterystyce:

$$\beta = \eta = 0.57 - 1.0, \lambda = 23.1 - 29.4, n = 0$$

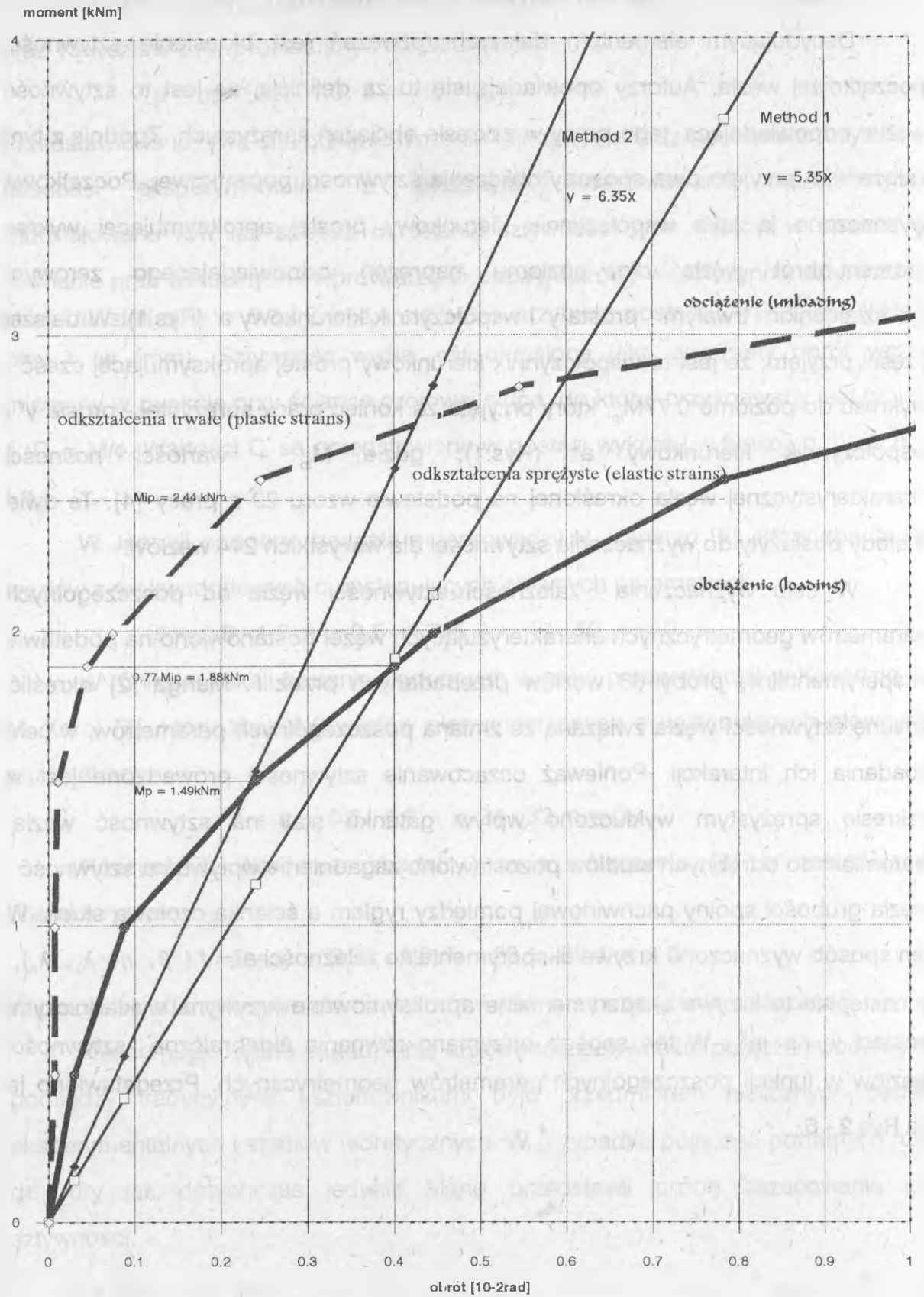
W pracach podano krzywe moment-obrót węzła oraz obciążenia niszczące.

Reasumując, samo zagadnienie szacowania sztywności połączeń podatnych pomiędzy tradycyjnymi kształtownikami było przedmiotem nielicznych badań eksperymentalnych i studiów teoretycznych. W przypadku połączeń podatnych rura do rury jak dotychczas jedynie Mang przedstawił próbę oszacowania ich sztywności.

3. SZTYWNOŚĆ POCZĄTKOWA

Decydującym elementem dalszych rozważań jest określenie sztywności początkowej węzła. Autorzy opowiadają się tu za definicją, że jest to sztywność węzła odpowiadająca jego pracy w zakresie obciążeń sprężystych. Zgodnie z tym założeniem przyjęto dwa sposoby obliczenia sztywności początkowej. Początkowo wyznaczono ją jako współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej wykres moment-obrót węzła dla poziomu naprężeń odpowiadającego zerowym odkształceniom trwałym - prosta y' i współczynnik kierunkowy a' (Rys.1). W dalszej części przyjęto, że jest to współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej część wykresu do poziomu $0.77M_{ip}$, który przyjęto za koniec pracy sprężystej - prosta y'' i współczynnik kierunkowy a'' (Rys.1), gdzie M_{ip} - wartości nośności charakterystycznej węzła określonej na podstawie wzoru 29 z pracy [4]. Te dwie metody posłużyły do wyznaczenia sztywności dla wszystkich 214 węzłów.

W celu wyznaczenia zależności sztywności węzła od poszczególnych parametrów geometrycznych charakteryzujących węzeł postanowiono na podstawie eksperymentalnej próby 88 węzłów przebadanych przez F. Manga [2] określić zmianę sztywności węzła związaną ze zmianą poszczególnych parametrów, w celu zbadania ich interakcji. Ponieważ oszacowanie sztywności prowadzone jest w zakresie sprężystym wykluczono wpływ gatunku stali na sztywność węzła. Natomiast do odrębnych studiów pozostawiono zagadnienie wpływu na sztywność węzła grubości spoiny pachwinowej pomiędzy rygłem a ścianką czołową słupa. W ten sposób wyznaczono krzywe eksperymentalne zależności $a = f(\beta, \eta, \lambda_o, \lambda_n)$, a następnie te krzywe eksperymentalne aproksymowano krzywymi wykładniczymi postaci $y = b \cdot m^x$. W ten sposób otrzymano równania algebraiczne sztywności węzłów w funkcji poszczególnych parametrów geometrycznych. Przedstawiono je na Rys.2 - 5.



Rys.1

Wyznaczenie zależności algebraicznej $a = f(\beta)$

(Determining of algebraic equation $a = f(\beta)$)

1) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar nosności wężła wg Szlendaka*

(method 1)

2) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar zerowych odkształceń trwałych.

(method 2)

Węzeł joint	a* from method 1	a from method 2	$\lambda\sigma$	Reo [MPa]	β	η	$\lambda\eta$	Ren [MPa]	Aproksymacja approximation a''	Aproksymacja approximation a''
m27	0.206	0.41	33.33333	214	0.4	0.4	10	375	0.21605399	0.443176149
m104	0.99	1.69	33.33333	313	0.6	0.6	30	369	0.86432396	1.335542148
m31	3.41	3.36	33.33333	313	0.8	0.8	20	436	3.457727892	4.024730985
m36	5.71	6.21	33.33333	314	0.9	0.9	30	332	6.915087879	6.98677064
m39	15.783	13.94	33.33333	315	1	1	33.33333	315	13.83264	12.128752

Funkcja aproksymacyjna (approximation function):

krzywa wykładnicza (exponential curve) $a = f(\lambda\eta) = b \cdot m^\beta$

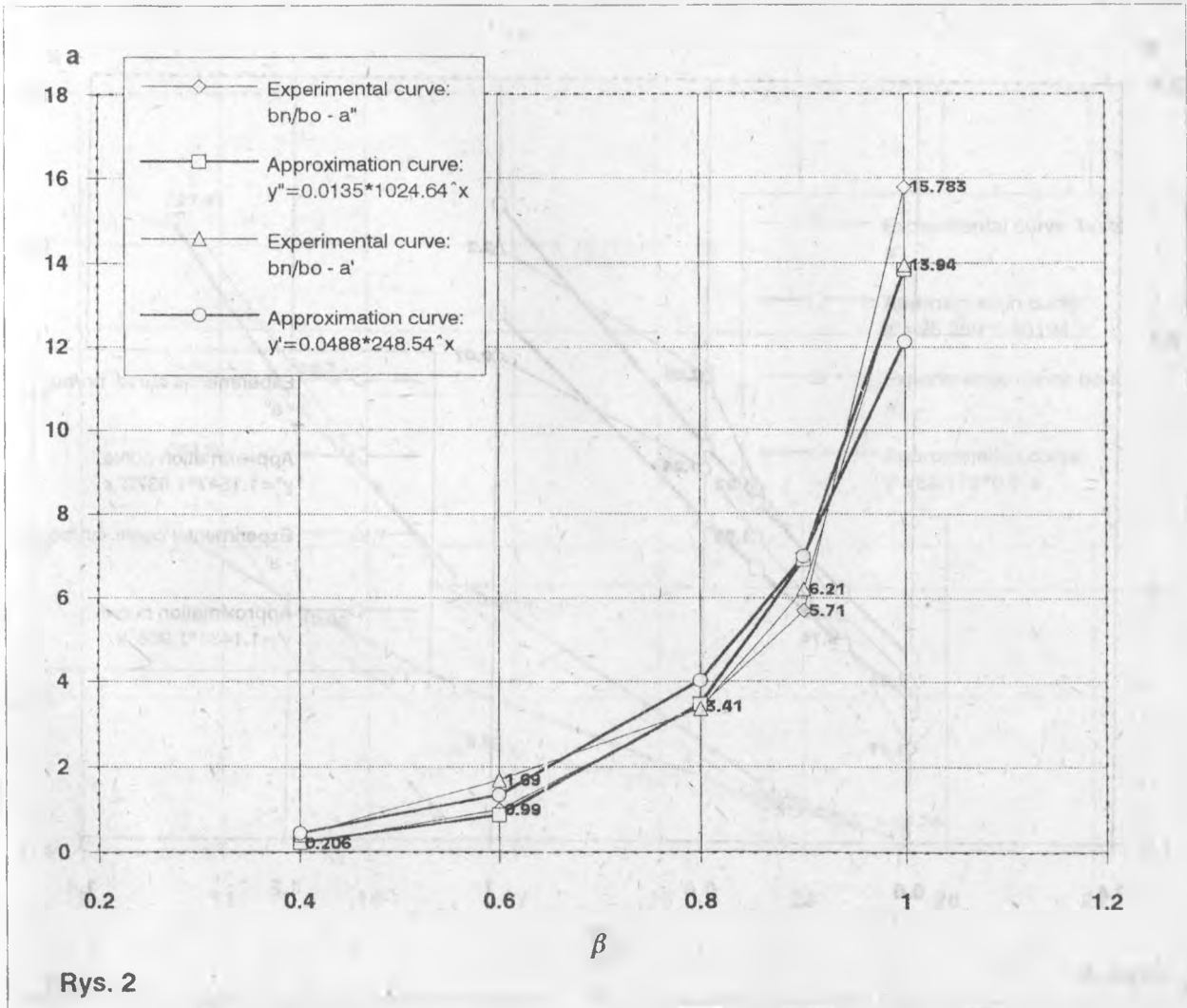
1) $m = 1024.64$

$b = 0.0135$

2) $m = 248.5418$

$b = 0.0488$

* - J. Szlendak: Beam-Column Welded RHS Connections, Thin-Walled Structures 12 (1991), p. 69.



Wyznaczenie zależności algebraicznej $a = f(\eta)$

(Determining of algebraic equation $a = f(\eta)$)

1) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar nosności węzła wg Szlendaka*

(method 1)

2) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar zerowych odkształceń trwałych.

(method 2)

Węzeł joint	a'' from method 1	a from method 2	λ_0	Reo [MPa]	β	η	$\lambda \eta$	Ren [MPa]	Aproksymacja approximation a''	Aproksymacja approximation a'
m29	2.07	2.2	33.33333	300	0.6	1	20	356	2.121418504	2.2502718
m124	1.94	2.05	33.33333	368	0.6	0.8	22.22	344	1.878429424	1.965294414
m104	1.86	1.92	33.33333	373	0.6	0.75	12.676	358	1.822162167	1.899878291
m104	1.74	1.77	33.33333	321	0.6	0.667	11.267	314	1.732455077	1.796059528
m104	1.61	1.69	33.33333	390	0.6	0.6	20	369	1.663272677	1.71640694

Funkcja aproksymacyjna (approximation function):

krzywa wykładnicza (exponential curve) $a = f(\lambda\eta) = b * m \eta$

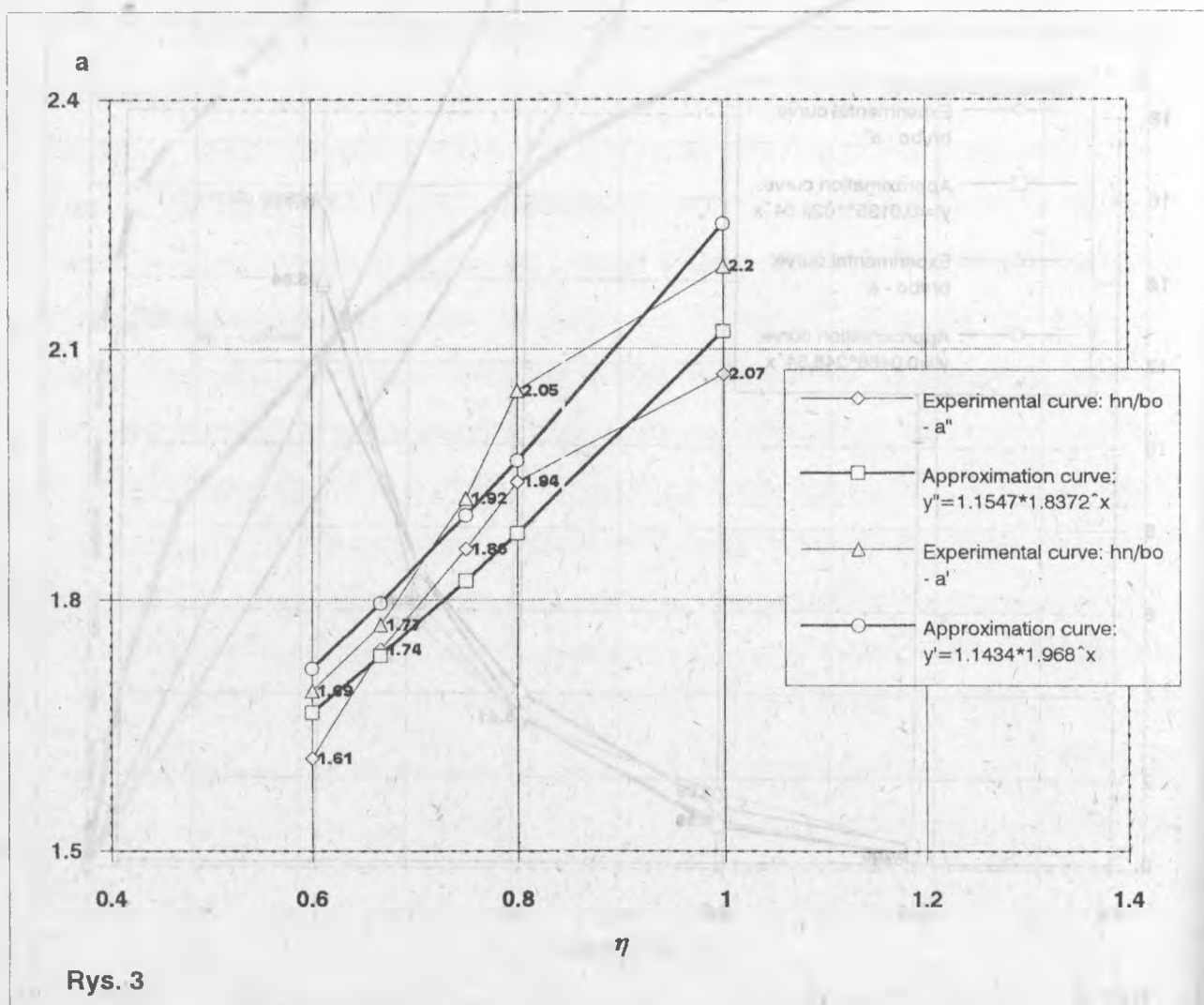
1) $m = 1.837203$

$b = 1.1547$

2) $m = 1.968053$

$b = 1.1434$

* - J. Szlendak: Beam-Column Welded RHS Connections, Thin-Walled Structures 12 (1991), p. 69.



Wyznaczenie zależności algebraicznej $a = f(\lambda\sigma)$

(Determining of algebraic equation $a = f(\lambda\sigma)$)

1) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar nosności węzła wg Szlendaka*

(method 1)

2) w przypadku sztywności określanej w oparciu o obszar zerowych odkształceń trwałych.

(method 2)

Węzeł joint	a" from method 1	a from method 2	$\lambda\sigma$	Reo [MPa]	β	η	$\lambda\eta$	Ren [MPa]	Aproksymacja approximation a"	Aproksymacja approximation a"
m114	14.55	21.21	10	250	0.8	0.8	14.28571	246	12.48273236	20.63200066
m107	10.04	16.7	12.5	430	0.8	0.8	14.28571	246	10.46605555	15.85431889
m12	6.82	10.56	15.87302	243	0.8	0.8	14.28571	246	6.251498581	11.11237464
m105	5.2	5.3	22.22222	246	0.8	0.8	14.28571	246	5.274478178	5.69223898
m7	4.76	4.74	25	398	0.8	0.8	14.28571	246	4.33660552	4.247945973

Funkcja aproksymacyjna (approximation function):

krzywa wykładnicza (exponential curve) $a = f(\lambda\eta) = b * m^{\lambda\sigma}$

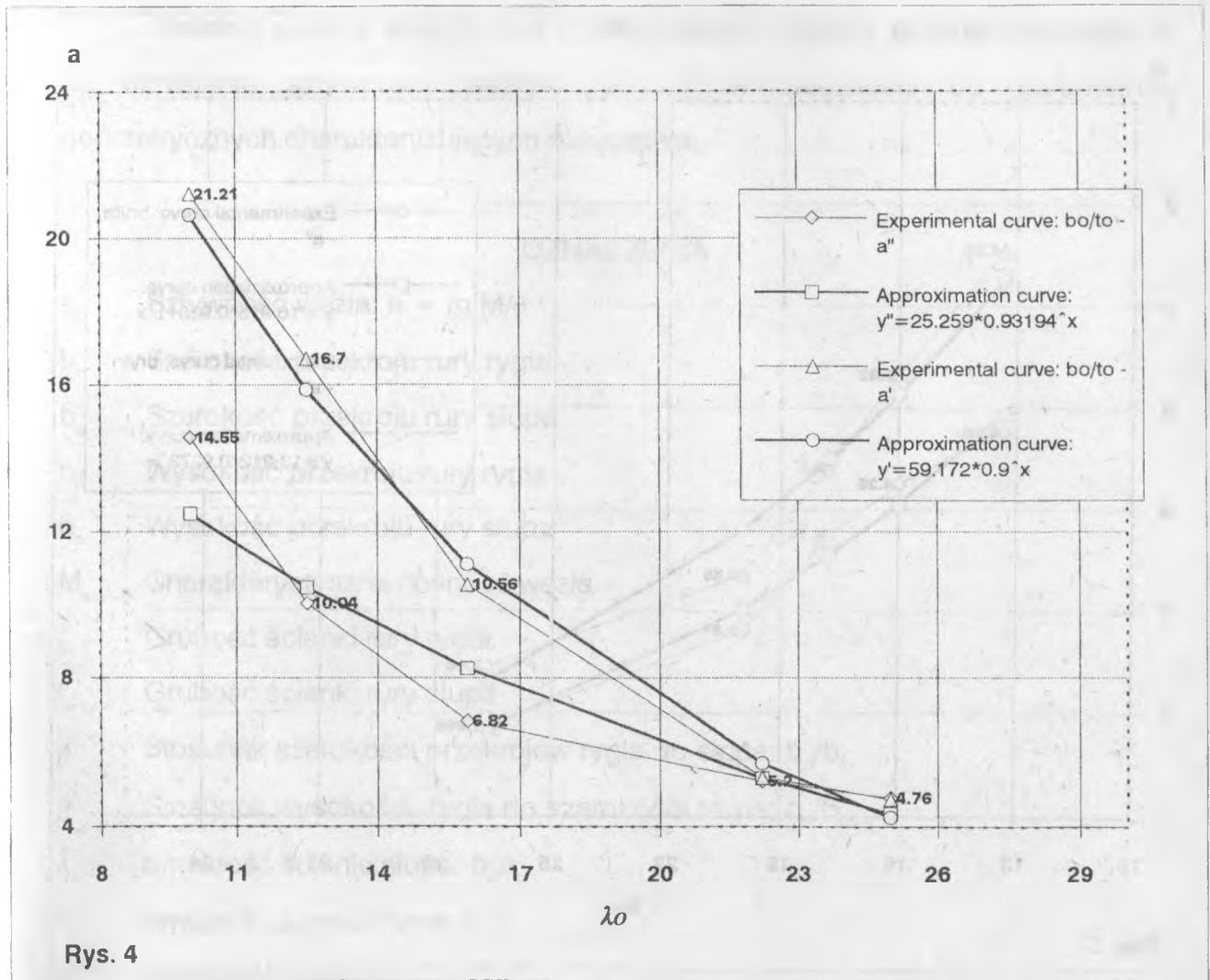
1) $m = 0.931943$

$b = 25.259$

2) $m = 0.900703$

$b = 59.172$

* - J. Szlendak: Beam-Column Welded RHS Connections, Thin-Walled Structures 12 (1991), p. 69.



Wyznaczenie zależności algebraicznej $a = f(\lambda\eta)$

(Determining of algebraic equation $a = f(\lambda\eta)$)

1) w przypadku sztywności określonej w oparciu o obszar nosności węzła wg Szlendaka*.
(method 1)

2) w przypadku sztywności określonej w oparciu o obszar zerowych odkształceń trwałych.
(method 2)

Węzeł joint	a* from method 1	a from method 2	$\lambda\sigma$	Reo [MPa]	β	η	$\lambda\eta$	Ren [MPa]	Aproksymacja approximation a''	Aproksymacja approximation a''
m34	4.75	6.55	33.333333	303	0.8	0.8	13.333333	409	4.931379605	6.255536423
m33	4.25	5.32	33.333333	313	0.8	0.8	16	415	4.052756903	5.126999024
m32	3.75	4.4	33.333333	313	0.8	0.8	17.777778	344	3.555810711	4.49016459
m31	2.81	3.36	33.333333	313	0.8	0.8	20	436	3.019421432	3.804179868
m30	1.865	2.46	33.333333	313	0.8	0.8	26.666667	383	1.848753597	2.313435469

Funkcja aproksymacyjna (approximation function):

krzywa wykładnicza (exponential curve)

$$a = f(\lambda\eta) = b * m^{\lambda\eta}$$

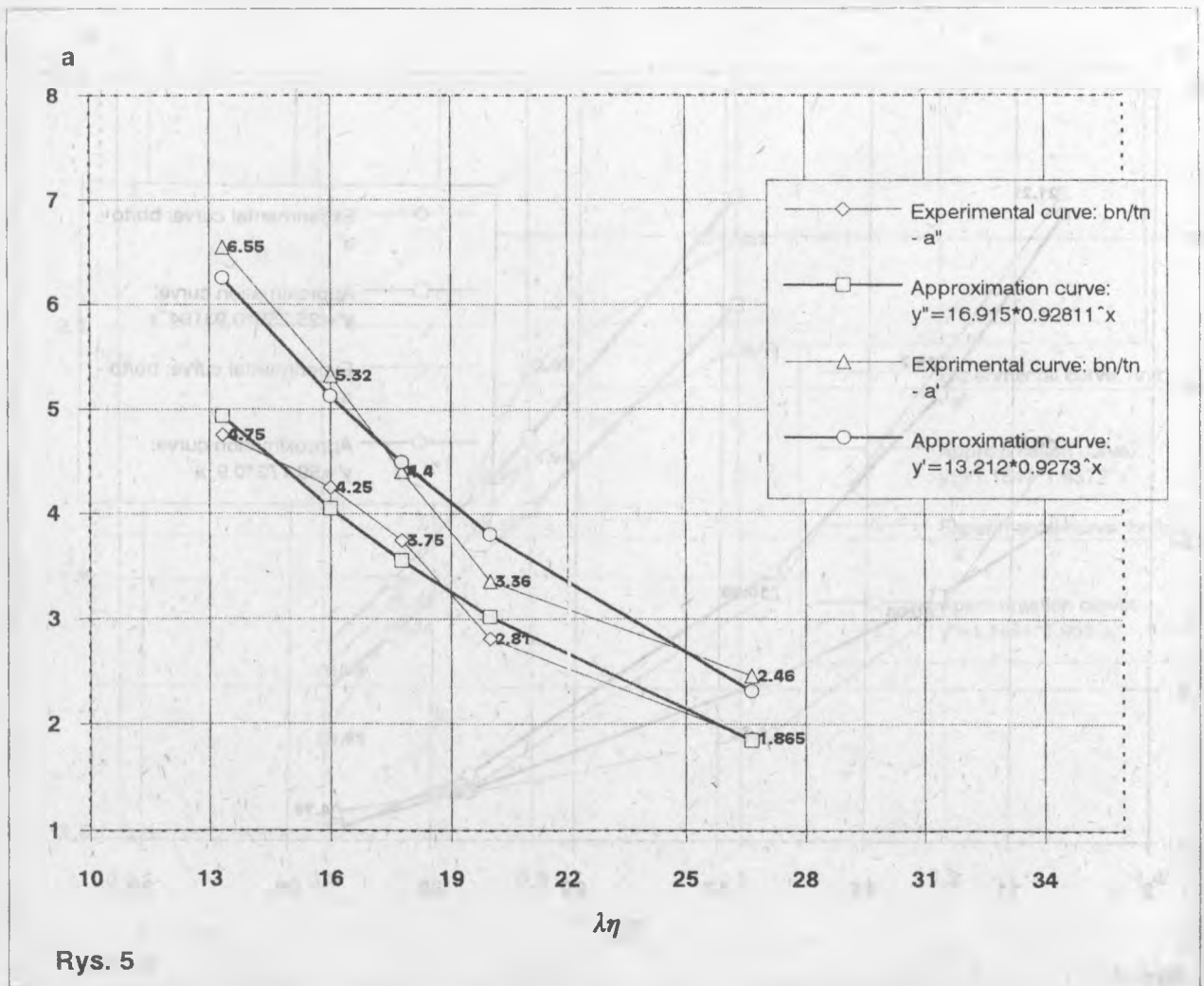
1) $m = 0.929059$

$b = 13.154$

2) $m = 0.92811$

$b = 16.915$

* - J. Szlendak: Beam-Column Welded RHS Connections. Thin-Walled Structures 12 (1991), p. 69.



4. WNIOSKI

1. W wyniku przeprowadzanych analiz wyspecyfikowano cztery podstawowe parametry mające decydujący wpływ na sztywność wężła, tj. β , η , λ_o , λ_n .
2. Stwierdzono, że parametry β i η mają wpływ wprost proporcjonalny na sztywność wężła (zwiększenie wartości parametru powoduje zwiększenie sztywności wężła), natomiast parametry λ_o i λ_n mają wpływ odwrotnie proporcjonalny na sztywność wężła.
3. W obrębie parametrów wprost proporcjonalnych do wzrostu sztywności wężła w większym stopniu przyczynia się wzrost wartości parametru β .
4. W obszarze parametrów odwrotnie proporcjonalnych do zmniejszenia się sztywności wężła w większym stopniu przyczynia się wzrost wartości parametru λ_o .

Obecnie autorzy pracują nad zdefiniowaniem ogólnej formuły pozwalającej na określenie sztywności węzłów typu T w zależności od parametrów geometrycznych charakteryzujących połączenia.

OZNACZENIA

- | | |
|-------------|--|
| a | Sztywność wężła: $a = \text{tg } M/\phi$ |
| b_n | Szerokość przekroju rury rygla |
| b_o | Szerokość przekroju rury słupa |
| h_n | Wysokość przekroju rury rygla |
| h_o | Wysokość przekroju rury słupa |
| M_{ip} | Charakterystyczna nośność wężła |
| t_n | Grubość ścianki rury rygla |
| t_o | Grubość ścianki rury słupa |
| β | Stosunek szerokości przekrojów rygla do słupa: b_n/b_o |
| η | Stosunek wysokości rygla do szerokości słupa: h_n/b_o |
| λ_o | Smukłość ścianki słupa: b_o/t_o |
| λ_n | Smukłość ścianki rygla: b_n/t_n |
| ϕ | Kąt obrotu wężła |

Literatura:

1. Redwood, R.G.: *The behaviour of joints between rectangular hollow structural members*, Civ. Eng. and Public Works Rev., 60, 711, 1965, 1463-1469.
2. Mang, F: *Bemessungsverfahren für T-knoten aus Rechteck-Hohlprofilen*, Project 82, Univ. Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, 1981.
3. Wardenier, J.: *Hollow section joints*, Delf University Press, Delf 1982.
4. Szlendak, J.: *Beam-Column Welded RHS Connections*, Thin-Walled Structures, 12, (1991), 63-80.
5. Bródka, J., Kordiak, J., Czechowski, A.: *Badanie podatności wybranych typów węzłów konstrukcji stalowych. Analiza wyników badań*, Opracowanie COBPKM "Mostostal", 1985.
6. Tabuchim M., Kanatani H., Kamba, T: *The local strength of welded RHS T-joints subjected to bending moment*, IIW Doc. XV-563-84.
7. Korol, R.M.: *Development of design rules for Vierendeel connections*, International Symposium on Hollow Structural Sections, Toronto, May 1977.
8. Wardenier, J.: *Investigation on Vierendeel Joints, determination of the M- and P- characteristics and the fatigue behaviour*, Sterin Report 6-72-11, Delft University of Technology, 1972.