

**W. Abramowicz, S. Imielowski
A. O. Wąsowski**

**QUASI — STATYCZNE ZGNIATANIE
WIELOKATNYCH KOLUMN METALOWYCH**

5/1985

P 269



WARSZAWA 1985

ISSN 0208-56

Praca wpłynęła do Redakcji 30 listopada 1984 r.



56944



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 160 egz. Ark.wyd.1 Ark.druk. 1,5

Oddano do drukarni w styczniu 1985 r.

Nr zamówienia 61/85

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

W.Abramowicz
S.Imiełowski
Samodzielna Pracownia
Teorii Materiałów Niesprężystych
A.O.Wąsowski
Instytut Maszyn Przepływowych - Gdańsk

QUASI - STATYCZNE ZGNIATANIE
WIELOKĄTNYCH KOLUMN METALOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki 25 unikalnych prób quasi-
statycznego zgniatania wielokątnych kolumn metalowych.
Opisano i przedyskutowano różne formy lokalnego wybożenia
kolumn oraz dokonano porównania danych doświadczalnych
z dostępnymi wynikami analitycznymi. Zaproponowano wzory
empiryczne opisujące proces zgniatania, a także wskazano
kierunki dalszych badań w tej dziedzinie.

Wykaz oznaczeń:

- A // - asymetryczna forma wyboczenia lokalnego
 S // - symetryczna forma wyboczenia lokalnego
 // - . ilość fal odpowiadająca danej formie wyboczenia
 C - długość boku kolumny [mm]
 d - skrócenie kolumny [mm]
 DL - błąd względny [%]
 h - grubość ścianki kolumny [mm]
 2H - długość fali wyboczenia [mm] Rys. 1ab
 IR - nieregularna postać zgniatania
 Lp - początkowa wysokość kolumny [mm]
 N - liczba naroży kolumny
 OR - globalne wyboczenie kolumny
 Pm - średnia siła zgniatania [kN] - eksperyment
 Pm^{*} - średnia siła zgniatania [kN] - obliczenia
 R_{0,2} - umowna granica plastyczności [MN/m²]
 R_m - wytrzymałość doraźna materiału [MN/m²]
 α - kąt środkowy /rozwarcie/ elementu kąowego Rys.1ab
 β - parametr zaawansowania procesu Rys.1
 σ_u - granica plastyczności materiału dla modelu sztywno-plastycznego [MN/m²].

Wprowadzenie:

Wzmoczone zainteresowanie procesami zgniatania konstrukcji cienkościennych, głównie w aspekcie zdolności do pochłaniania przez nie energii kinetycznej pojazdów w trakcie kolizji, spowodowało w ostatniej dekadzie gwałtowny rozwój różnorodnych metod obliczeniowych, począwszy od metod półempirycznych poprzez metody analityczne aż do zaawansowanych, wąsko specjalizowanych metod numerycznych. Wyczerpujący przegląd wspomnianych zagadnień znaleźć można w pracach przeglądowych [1] ; [2] .

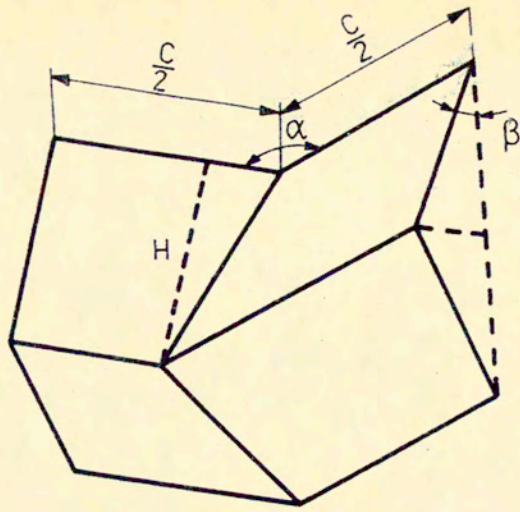
Wśród metod analitycznych opisujących proces osiowego zgniatania powłok metalowych szczególnie efektywne okazało się podejście energetyczne sformułowane w serii prac [3]+[6] . W pracach tych wyodrębniono i opisano typowe formy lokalnej utraty stateczności obserwowane w zakresie zaawansowanych odkształceń plastycznych powłok cienkościennych oraz podano proste rozwiązania analityczne pozwalające na określenie zarówno wartości obciążeń zewnętrznych w procesie zgniatania jak również na określenie podstawowych parametrów geometrycznych zdeformowanych powłok. W omawianych pracach szczególnie nacisk położono na zbadanie procesu zgniatania kolumn o przekrojach prostokątnym i kwadratowym. Przyczyną znacznego zainteresowania badaczy mechaniką zgniatania tego typu kolumn jest fakt występowania tu mechanizmów deformacji typowych dla innych konstrukcji cienkościennych a także prostota i niewielki koszt prac eksperymentalnych. W serii ^{prac} [4,7,8,9] opisano podstawowe mechanizmy deformacji prowadzące do progresywnego zgniatania kolumn o przekrojach kwadratowym i prostokątnym. Mechanizmy te, nazwane odpowiednio: podstawowy mechanizm deformacji typu I [4] i typu II [5] przedstawione są schematycznie na Rys.1 ab. Odpowiadają one obserwowanym doświadczalnie formom deformacji naroży kolumny kwadratowej. W oparciu o omawiane powyżej mechanizmy określono wartości obciążeń zewnętrznych, podano oszacowania średnich wielkości

odkształceń [7] i prędkości odkształceń [7],[9], a także opisano mechanizmy deformacji prowadzące do globalnego wyboczenia zgniatanych kolumn. We wszystkich omawianych przypadkach wykazano zadawalającą zgodność rozwiązań teoretycznych z dostępnymi wynikami badań eksperymentalnych.

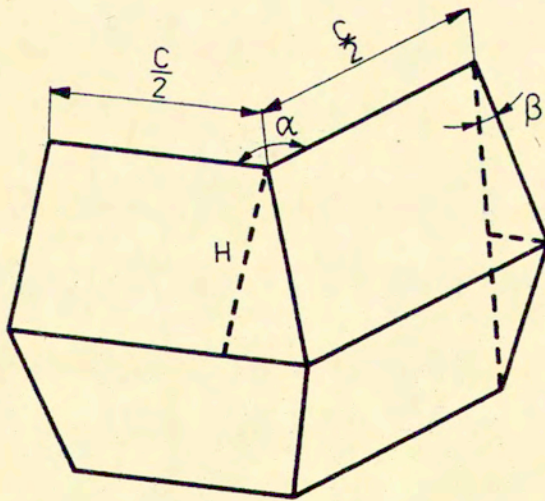
Na bazie powyższych badań w pracach [1]/rozdział 3/, [6] i [10] zaproponowano prostą metodę uogólnienia otrzymanych rozwiązań na przypadek konstrukcji o bardziej skomplikowanych kształtach otrzymując zadawalającą zgodność z badaniami eksperymentalnymi dla konstrukcji składających się z elementów kątowych o kącie rozwarcia nieznacznie różniącym się od 90° , a więc zbliżonym kształtem do pojedynczego naroża kolumny kwadratowej.

Jednocześnie rozwiązania teoretyczne opublikowane w pracach [4] i [10] wskazują na znaczny wzrost energochłonności elementów kątowych ze wzrostem kąta środkowego. Tak na przykład we wspomnianej pracy [10] pokazano, że kolumna o przekroju sześciokątnym powinna absorbować dwukrotnie więcej energii niż kolumna kwadratowa o tej samej masie. Doświadczalna weryfikacja omawianych hipotez ma pierwszorzędne znaczenie dla dalszych uogólnień otrzymanych rozwiązań na przypadek elementów kątowych o kątach rozwarcia znacznie różniących się od 90° .

W pracy niniejszej przedstawiono rezultaty 25 prób quasi-statycznego zgniatania kolumn cienkościennych o przekrojach sześciokątnym, kwadratowym, romboidalnym i trójkątnym. Wykazano eksperymentalnie, że w zakresie zmian kąta środkowego dla podstawowego mechanizmu deformacji typu I Rys.1 a, w zakresie od 20° do 160° różnice w energochłonności elementów są nieznaczne i mieszczą się w granicach błędu pomiaru. Pokazano także że średnia wielkość obciążenia zewnętrznego w procesie zgniatania opisywana jest z dostateczną dokładnością przez wyrażenia otrzymane dla podstawowego mechanizmu deformacji typu I o kącie rozwarcia 90° .



a)



b)

Rys.1

I. Badania doświadczalne

Próbki do badań wykonano z głęboko-tłocznej blachy karoseryjnej o grubości 1 mm o własnościach $R_{0,2} = 213,18 \frac{MN}{m^2}$; $R_m = 242,8 \frac{MN}{m^2}$ oraz wydłużeniu $A = 20,55\%$. Prędkość odkształcenia w próbie rozciągania wynosiła $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s}$.

Kolumny o przekrojach sześciokątnym (S) kwadratowym (K) oraz romboidalnym (R) wykonano z dwóch części i połączono spawem ciągłym /spawanie gazowe/ wzdłuż dwóch przeciwległych ścian. Kolumny o przekroju trójkąta równobocznego (T) wykonano z jednego pasma blachy a następnie łączono spawem ciągłym wzdłuż jednej ze ścian.

Wymiary niezdeformowanych kolumn podano w Tab. I. Symbolem "al" oznaczono wielkość kąta środkowego elementu katowego. W przypadku kolumn romboidalnych w tabeli podano wielkość mniejszego kąta.

Tab. I

Nr	Lp[mm]	C[mm]	h[mm]	al[deg]	d[mm]	Pm[KN]	Postac
S1	224.90	36.30	1.07	120	171.70	17.04	S(9)
S2	225.60	36.20	1.04	120	166.40	17.28	A(1)-S(7.5)
S3	225.10	35.91	1.03	120	165.40	18.67	A(1)-S(2)-IR
S4	248.50	34.74	1.04	120	165.00	16.60	A(1)-S(10)
K1	225.10	52.10	1.05	90	177.40	13.19	A(1)-S(4)-IR
K2	225.20	52.40	1.03	90	143.40	13.47	S(7)
K3	225.80	51.75	1.03	90	163.90	13.65	S(7)
K4	225.00	52.65	1.05	90	141.20	11.36	IR
K5	224.60	51.95	1.03	90	139.20	11.59	S(3)-IR
K6	225.00	52.60	1.04	90	182.20	11.49	S(7)
R1	225.10	52.37	1.03	80	159.30	10.75	S(6)
R2	225.00	52.57	1.02	80	177.00	13.98	A(1)-S(5)
R3	225.30	52.37	1.03	65	172.45	10.88	S(6)
R4	225.40	52.38	1.03	60	139.40	11.29	S(1)-IR
R5	224.30	52.18	1.04	42	176.00	11.03	S(3.5)-IR
R6	224.50	51.96	1.03	44	177.00	10.11	S(6)
R7	225.00	51.67	1.03	25	29.40	10.24	OR
R8	114.00	51.86	1.03	26	20.00	12.96	OR
R9	111.50	51.98	1.03	28	80.90	9.68	IR
T1	226.30	67.28	1.02	60	153.00	15.50	IR
T2	225.80	67.89	1.10	60	159.00	13.15	S(2)-A(1)-OR
T3	114.00	66.99	1.03	60	78.40	9.20	S(1)-OR
T4	114.80	70.17	1.09	60	90.50	15.72	IR
T5	111.00	70.78	1.09	60	88.50	10.88	S(2)-A(1)
T6	112.00	67.26	1.03	60	88.90	7.69	OR

Wymiary przekroju poprzecznego kolumn dobrano w ten sposób aby masa kolumn na jednostkę długości była taka sama dla wszystkich typów kolumn.

Swobodnie podparte kolumny zgniatano pomiędzy równoległymi płytami maszyny wytrzymałościowej typu "Instron" z prędkością głowicy $v_0 = 1 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$. Zgodnie ze wzorem (1) / [7]:

$$(1) \quad \dot{\epsilon}_{cr} = 0,33 \frac{v_0}{l} \left[\frac{l}{S} \right]$$

prędkości tej, w przypadku zgniatania kolumny kwadratowej, odpowiada średnia wartość prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}_{cr} \approx 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s}$. Proces zgniatania kolumn kontynuowano do momentu "zamknięcia" ostatniej fali wyboczenia lokalnego. W przypadku globalnego wyboczenia kolumny /utrata stateczności w sensie Eulera/ eksperyment przerywano w momencie wypadnięcia kolumny z pomiędzy płyt maszyny.

Wyniki badań eksperymentalnych zebrane są w Tab.I. W ostatniej kolumnie tej tabeli zatytułowanej "postać" zaznaczono postać deformacji kolejnych fal wyboczenia lokalnego. Dokładny opis różnych form wyboczenia lokalnego oraz ich wzajemnych powiązań znaleźć można w pracy [7]. Tutaj wspomnimy tylko, że symetrycznej postaci deformacji (S) odpowiada taka forma wyboczenia lokalnego, w której wszystkie naroża kolumny deformują się zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys.1a. Jeżeli jedno lub więcej naroży kolumny deformuje się zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys.1b to taką postać deformacji nazywamy asymetryczną (A). Liczba w nawiasach określa ilość fal odpowiadających danej formie wyboczenia lokalnego. Np. symbol: A(1) - S(7) - IR oznacza, że pierwsza fala wyboczenia lokalnego go była falą asymetryczną, następnie utworzyło się 7 fal symetrycznych i ostatecznie zaobserwowano nieregularną postać zgniatania kolumny w której nie da się jednoznacznie zidentyfikować mechanizmów przedstawionych na Rys.1ab.

II. Obserwacje doświadczalne

A/ Kolumny o przekroju sześciokątnym.

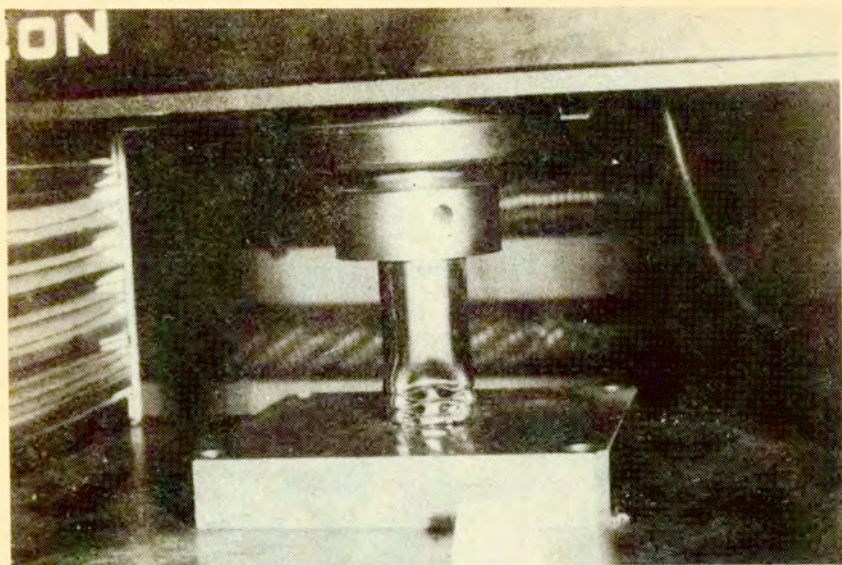
Badane kolumny w większości wypadków deformowały się zachowując symetryczną postać deformacji por. Rys. 2. W kolumnach S 2 i S 4 / Tab. I /, proces zgniatania zainicjowany został przez wytworzenie jednej fali asymetrycznej Rys. 3, po czym tworzyły się fale symetryczne. W przypadku kolumny S 3 po wytworzeniu się jednej fali asymetrycznej i dwóch fal symetrycznych postać wyboczenia lokalnego utraciła kształt osiowo-symetryczny tworząc nieregularny obraz fałd i załamania Rys. 4. Przyczyną tego zjawiska była prawdopodobnie zła jakość jednego ze spawów, która spowodowała pęknięcie kolumny w jej górnej części.

B/ Kolumny o przekroju kwadratowym.

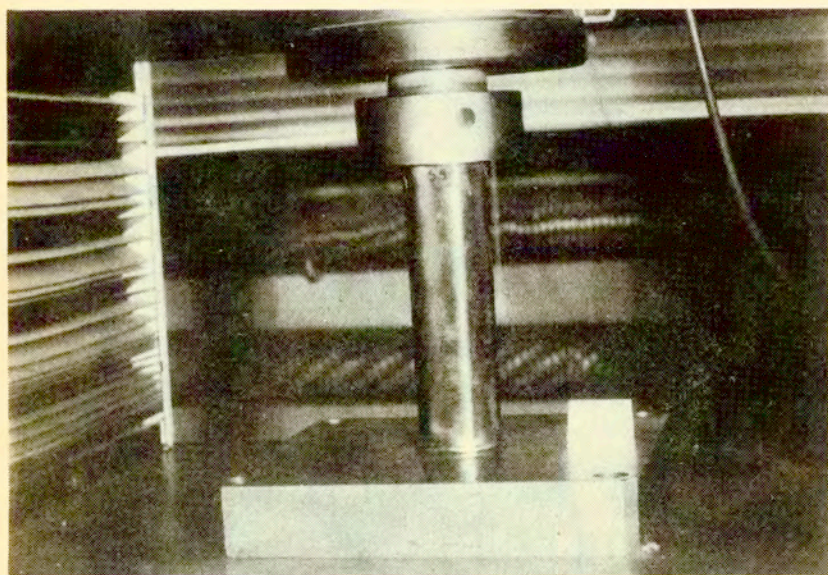
W przeważającej liczbie przypadków kolumny te deformowały się zachowując symetryczną postać deformacji Rys. 5, co jest zgodne z wynikami obliczeń przedstawionych w pracy [7]. Jedynie kolumna K 1 rozpoczęła proces zgniatania od wytworzenia jednej fali asymetrycznej. W trzech przypadkach zaobserwowano również nieregularną formę wyboczenia lokalnego, którą przypisać należy wpływowi imperfekcji początkowych a w szczególności lokalnemu uszczywnieniu ściany kolumny przez linię spawu.

C/ Kolumny romboidalne

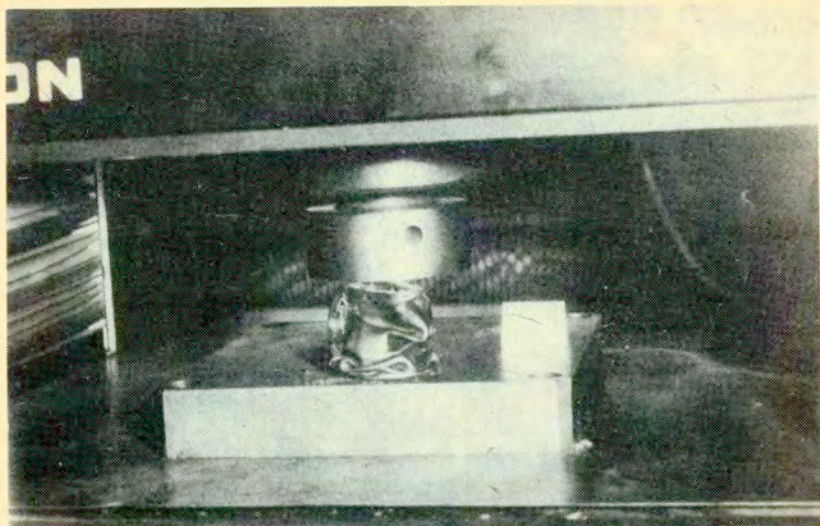
Kolumny romboidalne o mniejszym kącie środkowym zawartym w przedziale $45^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$ /por. Tab. I/, deformowały się podobnie jak kolumny o przekroju kwadratowym (por. Rys. 5 i Rys. 6). Kolumny o kącie środkowym mniejszym od 45° wykazywały tendencję do globalnego wyboczenia w wyniku znacznej redukcji momentu bezwładności przekroju poprzecznego kolumny Rys. 7. W miarę zmniejszenia kąta środkowego α odstęp pomiędzy sąsiednimi segmentami fali wewnątrz kolumny zmniejsza się aż do momentu gdy dla pewnej wartości granicznej kąta α , następuje zetknięcie się sąsiednich ścian kolumny, a tym samym znaczna redukcja momentu bezwładności przekroju.



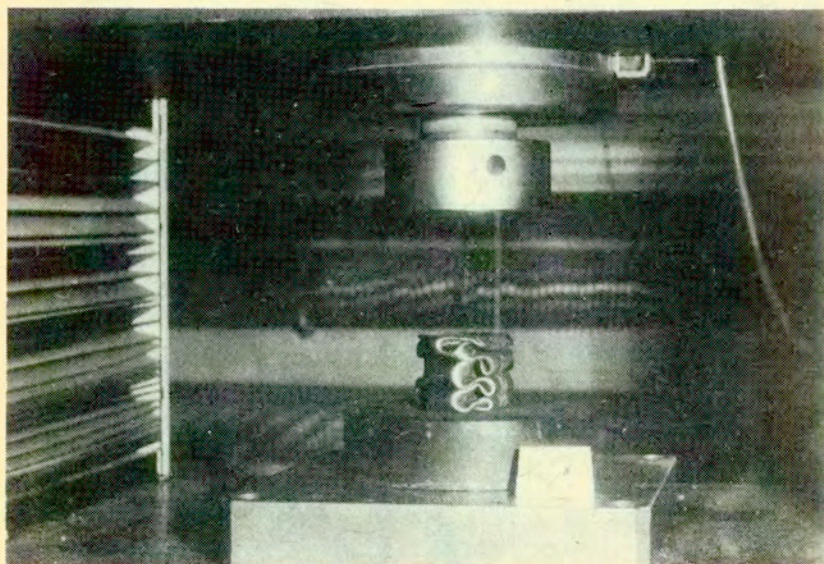
Rys.2



Rys.3



Rys.4



Rys.5

Obserwacje doświadczalne wskazują że graniczna wartość α zawarta jest w przedziale $42^\circ < \alpha_g < 40^\circ$.

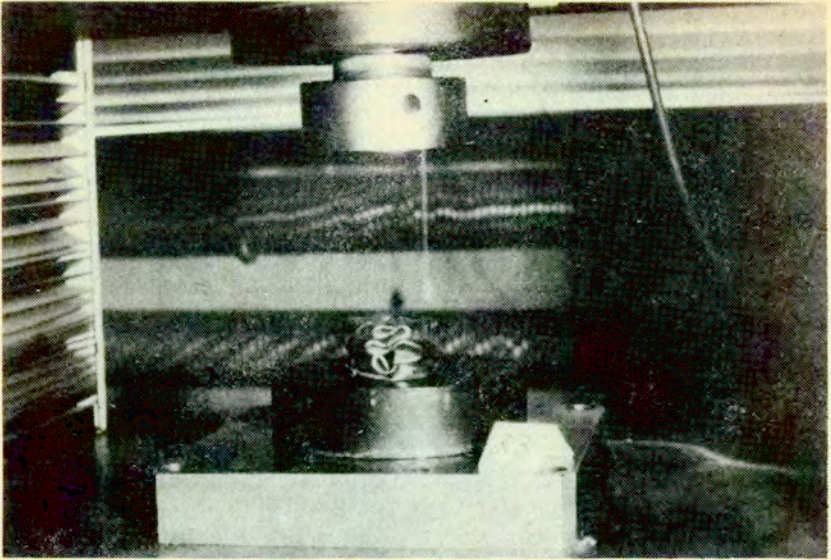
Dla kolumn o znacznie mniejszej wartości kąta α zetknięcie się sąsiednich ścian kolumny następuje już we wstępnej fazie tworzenia pierwszej fali i kolumna przechodzi w stan zginania globalnego Rys. 8.

Podobne zjawisko zaobserwowano w procesie zgniatania kolumn o przekroju prostokątnym/por.[1]Rozdz.4/ .

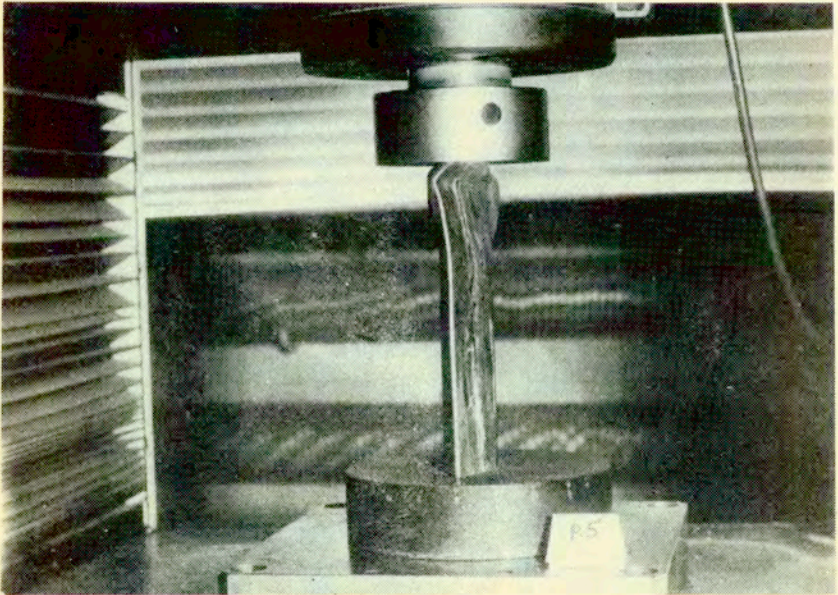
D/ Kolumny trójkątne

Podobnie jak w przypadku kolumn czworokątnych i sześciokątnych w procesie zgniatania kolumn trójkątnych zaobserwowano współistnienie dwóch podstawowych mechanizmów deformacji /por.Rys1/ Na Rys.9 przedstawione jest zaawansowane stadium zgniatania kolumny T5. Na rysunku tym widoczne jest współistnienie symetrycznych i asymetrycznych fal wyboczenia. Dwie pierwsze fale licząc od dołu kolumny, są falami symetrycznymi natomiast trzecia fala jest falą asymetryczną, Charakterystyczną cechą obydwu form wyboczenia jest znaczna redukcja momentu bezwładności przekroju poprzecznego kolumny prowadząca do globalnego zginania nawet stosunkowo krótkich kolumn Rys.10 .

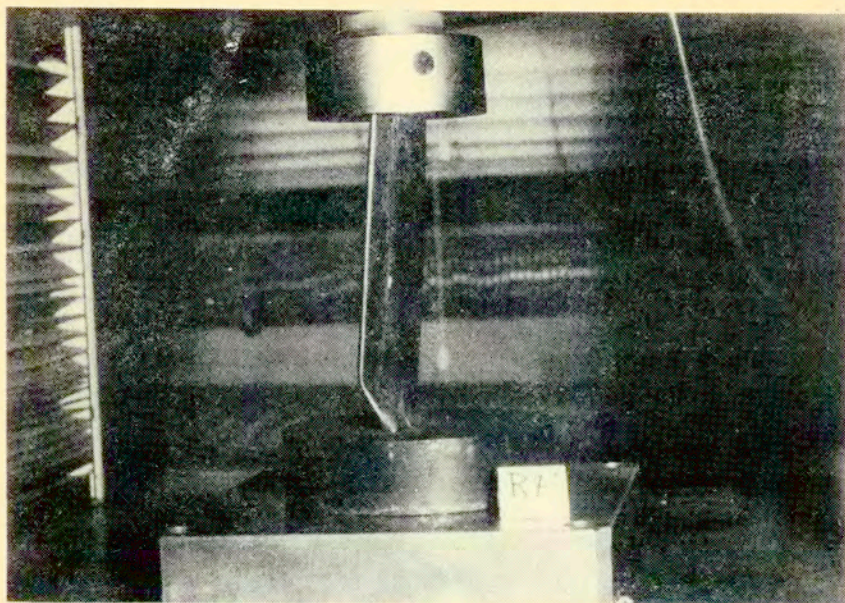
W przypadku deformacji kolumny T2 zginanie globalne zaobserwowano po utworzeniu się dwóch fal symetrycznych Rys.11.



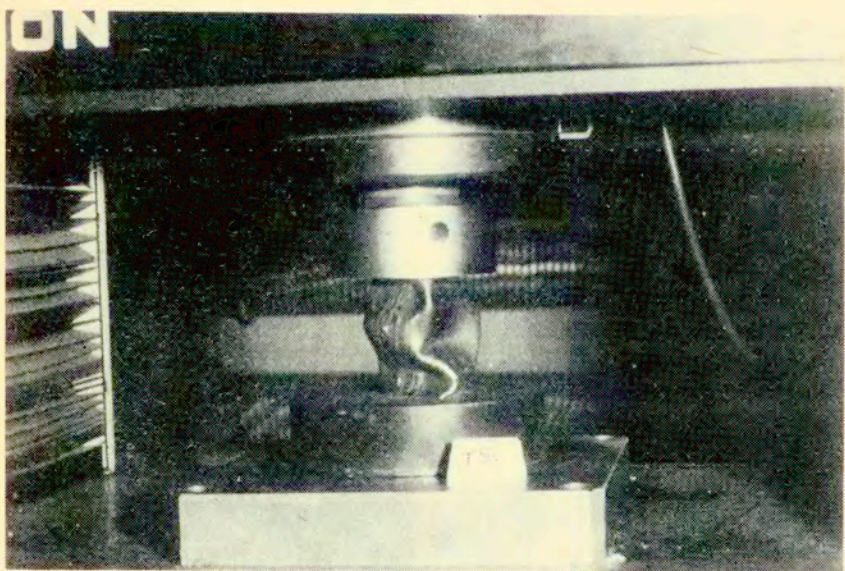
Rys. 6



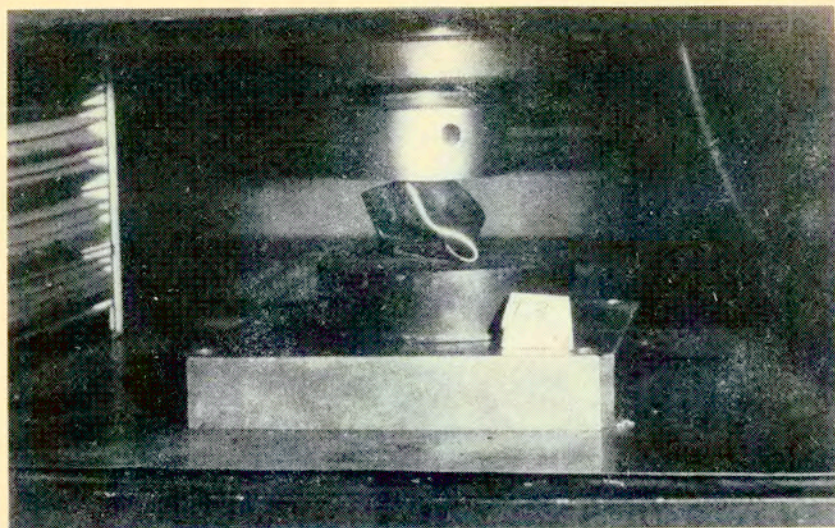
Rys. 7



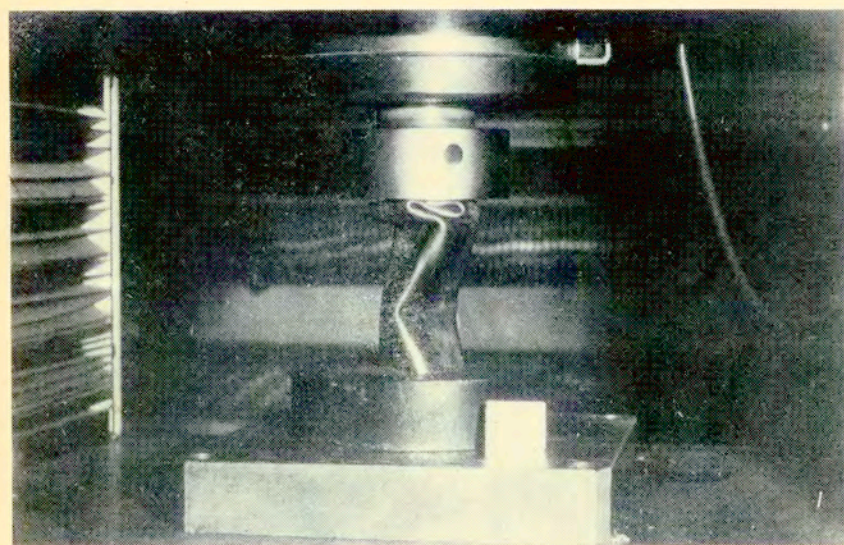
Rys. 8



Rys.9



Rys. 10



Rys. 11

III. Dyskusja wyników

Jak wspomniano poprzednio rezultaty obliczeń przedstawione w pracach [10] i [4] sugerują, że kolumny o przekroju sześciokątnym powinny absorbować dwukrotnie więcej energii niż kolumny kwadratowe o tej samej masie. Tymczasem analiza wyników eksperymentalnych zebranych w Tab. I wykazuje, że średnio kolumny sześciokątne absorbują jedynie 40% więcej energii. Wynika stąd, że wspomniane rozwiązania przewidują zbyt duży wzrost energochłonności elementów kątowych ze wzrostem kąta środkowego α i że obserwowany doświadczalnie wzrost energochłonności jest raczej skutkiem zwiększenia ilości naroży kolumny.

Wykorzystując wyniki prac [4] i [11] można wykazać, że średnia siła w procesie zgniatania jednego elementu kąтового o kącie środkowym $\alpha = 90^\circ$ i symetrycznej formie wybożenia dana jest zależnością

$$(2) \quad \frac{P_m}{M_0} = 12,82 \left(\frac{C}{h} \right)^{\frac{1}{3}}$$

gdzie: $M_0 = \frac{\sigma_u h^2}{4}$ jest pełnym momentem plastycznym ścianki kolumny.

Zakładając, że siła ta nie zależy od kąta środkowego otrzymujemy:

$$(3) \quad \frac{P_m}{M_0} = N \cdot 12,82 \left(\frac{C}{h} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dla kolumny o N narożach.

Podstawiając następnie średnie wartości C i h z Tabeli I dla kolumn sześciokątnych S i kwadratowych K otrzymujemy

$$(4) \quad \frac{P_m^S}{P_m^K} = \frac{6\sqrt{34,09}}{4\sqrt{50,31}} \cong 1,32$$

Tak więc wyrażenie (4) przewiduje 32% zwiększenie energochłonności kolumn sześciokątnych względem kolumn kwadratowych wobec 40% różnicy zaobserwowanej doświadczalnie.

Dla kolumn o przekrojach kwadratowym i trójkątnym wyrażenie (4) przewiduje ok. 20% wzrost energochłonności wobec 12% różnicy obserwowanej doświadczalnie /dla kolumn T2; T3 i T5 wykazujących przewagę symetrycznych form wybożenia/. Porównanie wielkości średnich sił zgniatania dla kolumn kwadratowych i romboidalnych potwierdza również wniosek, że ilość energii absorbowanej przez kolumny wielokątne zależy głównie od ilości naroży a nie od ich kształtu.

Na Rys.12 przedstawiono wykres wielkości $\frac{P_m}{N} \left(\frac{C}{h}\right)^{\frac{1}{3}}$ odpowiadającej jednemu narożu kolumny w funkcji kąta środkowego α . Punkty doświadczalne wyznaczone przy założeniu, że każde z naroży kolumny absorbuje taką samą ilość energii. Tak więc każdej kolumnie trapezoidalnej odpowiadają na Rys.12 dwa punkty, odpowiednio dla naroży o kącie rozwarcia α i $180^\circ - \alpha$.

Dwie linie proste na tym wykresie odpowiadają odpowiednio:

a)- zależności 5

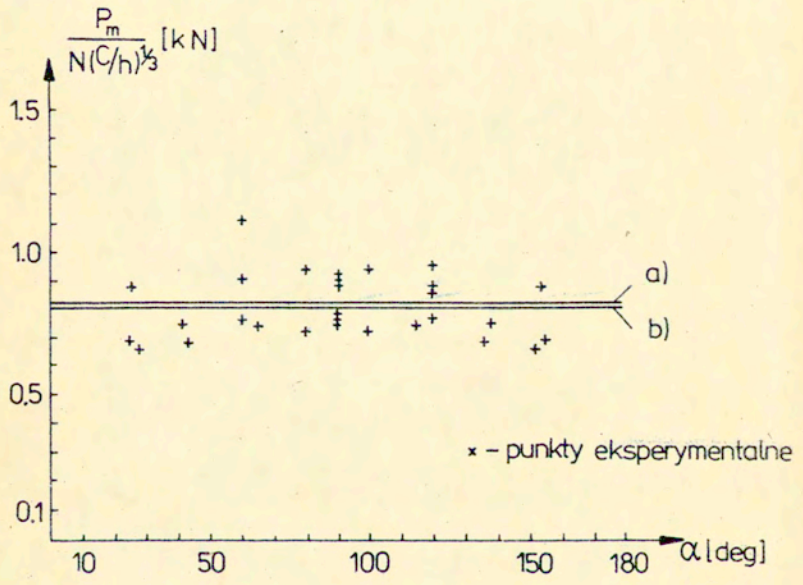
$$(5) \quad \frac{P_m}{N} \left(\frac{C}{h}\right)^{-\frac{1}{3}} = 12,82 \text{ M}_0$$

obliczonej dla $\sigma_u = R_m$ /problem doboru wartości naprężenia w procesie zgniatania kolumn omówiono w pracy [7] /.

Wykres b)- funkcji o równaniu:

$$(6) \quad \frac{P_m}{N} \left(\frac{C}{h}\right)^{-\frac{1}{3}} = 0,809 - 7,69 \cdot 10^{-6} \alpha$$

jest najlepszym liniowym przybliżeniem punktów eksperymentalnych wyznaczonym przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Przebieg wykresów a) i b) na Rys.12 potwierdza wcześniejszą hipotezę o słabej zależności średniej siły zgniatania od kształtu naroża w zakresie $20^\circ \leq \alpha \leq 160^\circ$.



Rys.12

Tab. II

Nr	c/h	P_m^* [KN]	P_m [KN]	DL [%]	postac
S1	33,0000	17,30	17,04	-2	S(9)
S2	34,0000	16,40	17,20	5	A(1)-S(7,5)
S3	34,0000	16,10	16,67	10	A(1)-S(2)-IR
S4	35,4000	15,26	15,60	2	A(1)-S(10)
K1	49,0000	13,61	13,19	4	A(1)-S(4)-IR
K2	50,0000	13,33	13,47	9	S(7)
K3	50,0000	13,10	13,65	11	S(7)
K4	50,14	12,53	11,96	-11	IR
K5	50,22	12,00	11,59	-5	S(8)-IR
K6	50,50	12,45	11,49	-9	S(7)
R1	50,34	12,20	10,75	-14	S(6)
R2	51,00	12,00	10,90	14	A(1)-S(5)
R3	50,00	12,00	10,00	-10	S(6)
R4	50,00	12,00	11,20	10	S(1)-IR
R5	50,00	11,41	11,90	10	S(3,5)-IR
R6	50,45	12,20	10,11	-21	S(6)
R7	50,17	12,10	10,24	-19	OR
R8	50,00	12,19	10,96	6	OR
S5	50,47	12,20	9,60	-26	IR
T1	60,86	9,81	15,50	37	IR
T2	60,10	11,16	10,15	15	S(2)-A(1)-OR
T3	60,00	9,96	9,20	-8	S(1)-OR
T4	64,00	11,11	15,72	29	IR
T5	64,94	11,15	10,88	-2	S(2)-A(1)
T6	65,00	10,97	7,69	-30	OR

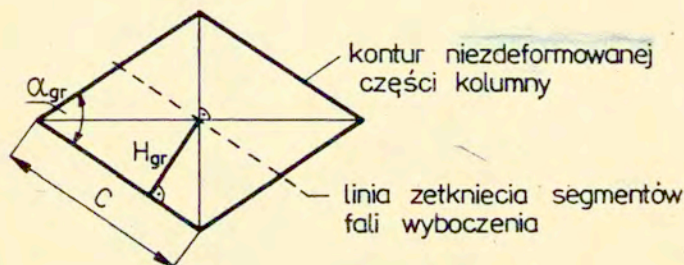
W Tab. II zestawiono wartości doświadczalnie zmierzonej średniej siły zgniatania (P_m) z wynikami obliczeń (P_m^*) wg wzoru (3). W ostatniej kolumnie tabeli podano błąd względny przybliżenia. Z danych zawartych w tabeli wynika, że zaproponowane przybliżenie (3) daje zadowalające z punktu widzenia zastosowań oszacowanie średniej siły zgniatania dla kolumn wielokątnych wykazujących przewagę symetrycznych form wybożenia. Zaskakująca jest również dobra zgodność przybliżenia w przypadku globalnego zginania kolumn romboidalnych (R7 i R8) oraz nieregularnej deformacji kolumn kwadratowych i sześciokątnych (S3 i K5) podczas gdy to samo oszacowanie wykazuje duży błąd w przypadku globalnego zginania i nieregularnej deformacji kolumn trójkątnych (T1; T4; T6).

Przedstawione tu rozwiązanie przybliżone ($\alpha = 90^\circ$) daje również dokładniejszy od proponowanego w [4] i [10] opis geometrii zdeformowanych powłok.

W pracach [4] i [7] pokazano, że długość H połowy fali wybożenia dla elementu prostokątnego określona jest zależnością /por. Rys.1a /.

$$(7) \quad \frac{H}{h} \approx \left(\frac{C}{h}\right)^{\frac{2}{3}}$$

W punkcie II c graniczny kąt środkowy α_{gr} zdefiniowano jako kąt dla którego następuje zetknięcie dwóch sąsiednich segmentów fali wybożenia wewnątrz kolumny o przekroju romboidalnym. Sytuację tą przedstawiono schematycznie na Rys.13.



Rys. 13

Z rysunku tego wynika, że dla granicznej wartości kąta mamy:

$$(8) \quad \frac{H_{gr}}{C} = \frac{1}{2} \sin \alpha_{gr}$$

oraz po uwzględnieniu (7)

$$(9) \quad \alpha_{gr} = \arcsin \left[2 \left(\frac{h}{C} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

Dla średnich wartości C i h z tabeli II otrzymujemy $\alpha_{gr} = 33^\circ$. Zaobserwowana doświadczalnie wartość zawarta jest w przedziale $42^\circ \ll \alpha_{gr} \ll 40^\circ$. Jednocześnie rozwiązania teoretyczne przedstawione w [4] i [10] nie przewidują w ogóle istnienia granicznej wartości kąta środkowego $H < \frac{C}{2} \sin \alpha$.

Wyrażenie (7) daje również dobre oszacowanie długości fali

wyboczenia w zdeformowanych próbkach wykazujących symetryczną postać deformacji. Tak np. dla kolumn kwadratowych K2 i K3 doświadczalnie zmierzona średnia długość połowy fali wyboczenia H wynosi $H_{sr} \cong 16,1$ mm /por.Tab.I/ podczas gdy wartość obliczona na podstawie (7) wynosi $H \cong 15,1$ mm .

Podobnie dla kolumny sześciokątnej S1.

Zmierzona doświadczalnie długość H wynosi $H_{sr} \cong 12,5$ mm.

Wyrażenie (7) daje $H \cong 11,3$ mm podczas gdy rozwiązanie dokładne przewiduje $H = 7,6$ mm , a więc o około 35% mniej od wartości doświadczalnej.

IV. Wnioski końcowe.

W pracy przedstawiono wyniki 25 unikalnych prób quasi-statycznego zgniatania wielokątnych kolumn metalowych. Opisano podstawowe formy wyboczenia lokalnego prowadzące do progresywnego zgniatania kolumn wielokątnych oraz wykazano doświadczalnie, że formy te są podobne we wszystkich analizowanych przypadkach. Opisano również nowe zjawiska prowadzące do globalnego wyboczenia zgniatanych kolumn.

Wykazano, że rozwiązania teoretyczne przedstawione w pracach [4] i [10] przewidują znacznie zawyżone wartości średnich obciążeń dla elementów kątowych o kącie rozwarcia większym niż 90° i zaniżają wartości tych obciążeń dla mniejszych kątów.

Pokazano jednocześnie, że rozwiązania teoretyczne otrzymane dla elementów prostokątnych dają zadawalającą zgodność z eksperymentem dla większości przebadanych przypadków. Należy podkreślić, że zaproponowane tu półempiryczne oszacowanie wartości średnich obciążeń (3) ma charakter tymczasowy i konieczne są dalsze badania mające na celu wytłumaczenie opisanych niezgodności.

W prezentowanej pracy nie rozważano asymetrycznych form wyboczenia i ich wpływu na wartości obciążeń zewnętrznych. Pominięto również wpływ efektów lepkich. Problemy te będą przedmiotem odrębnej pracy.

Autorzy pracy pragną podziękować Dyrekcji i Pracownikom Ośrodka Badawczo Rozwojowego Fabryki Samochodów Małolitrażowych w Bielsku Białej za wydatną pomoc w wykonaniu badań eksperymentalnych.

Pracę niniejszą wykonano w ramach umowy Nr IPPT/7/C-2/84.

Literatura

1. N.Jones and T.Wierzbicki, Eds, Structural Crashworthiness. Butterworths, London /1983/.
2. G.A.O. Davies, Ed. Structural Impact and Crashworthiness. Elsevier, Applied Science Publishers, London /1984/.
3. W.Abramowicz. Mechanika zgniatania konstrukcji cienkościennych, Prace IPPT Nr 35, /1981/./praca doktorska/.
4. T.Wierzbicki, W.Abramowicz, On the crushing mechanics of thin - walled structures, I.App.Mech. 50, 727-734 /1983/.
5. R.J.Hajduk, T.Wierzbicki, Extensional collapse modes of structural members. Proc.Symp. Advances and Trends in Structural and Solid Mechanics, Washington, pp.405-433, 1982.
6. T.Wierzbicki, W.Abramowicz. J de Oliveira, Crushing analysis of ship structures with particular reference to bow collisions. Det norske VERITAS technical report no.82-0709 /1982/.
7. W.Abramowicz, N.Jones, Dynamic Axial Crushing of Square Tubes, Int J.Impact Engng. Vol. 2 No2, pp.179-208, /1984/.
8. T.Wierzbicki, W.Abramowicz, Crushing of thin-walled strain rate sensitive structures. Rozprawy Inżynierskie, Polska Akademia Nauk. 29, 153-163, /1981/.
9. W.Abramowicz, Kinematyczna analiza energochłonności cienkościennych kolumn metalowych. Prace IPPT Nr 19, /1979/.
10. T.Wierzbicki, Optimum design of integrated front panel against crash, Ford Motor Company Report, 15 July 1983.
11. W.Abramowicz, The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns. Int. J.Impact Engng. Vol.1, No.3 pp. 309-317, /1983/.