Biuletyn WAT
Vol. LXIV, Nr 1, 2015

Wpływ mimośrodowego obciążenia na zachowanie się ściskanych izotropowych słupów o przekroju kwadratowym z wgłębieniami w fazie progresywnego zgniotu

MIROSŁAW FERDYNUS

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny,
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, m.ferdynus@pollub.pl

Streszczenie. Obiektem badań jest cienkościenny absorber energii w postaci słupa o przekroju kwadratowym z szeregiem wgłębień w narożach, wykonany z aluminium. Bada się wpływ mimośrodowego obciążenia słupa na zakrytyczną postać ścieżki równowagi, jako próbę oceny wrażliwości tej konstrukcji na odchylenia od warunków idealnych. Nowe rozwiązanie konstrukcyjne zostało porównane ze słupem o gładkich ścianach.
Słowa kluczowe: konstrukcje cienkościenne, absorber energii, mechanizmy zniszczenia, MES
DOI: 10.5604/12345865.1145504

1. Wprowadzenie

Praca jest numerycznym studium pewnej koncepcji absorbera energii w postaci cienkościennego słupa z wgłębieniami. Wprowadzenie tych wgłębień miało na celu uczynienie pewnych fragmentów słupa bardziej podatnymi, aby w trakcie obciążania proces destrukcji uległ odpowiedniemu zainicjowaniu. Oprócz tego bada się wpływ mimośrodowego ściskania słupa na jego zakrytyczne zachowanie. Znaczenie tych analiz polega na ocenie wrażliwości tego typu konstrukcji na odchylenia od warunków idealnych.

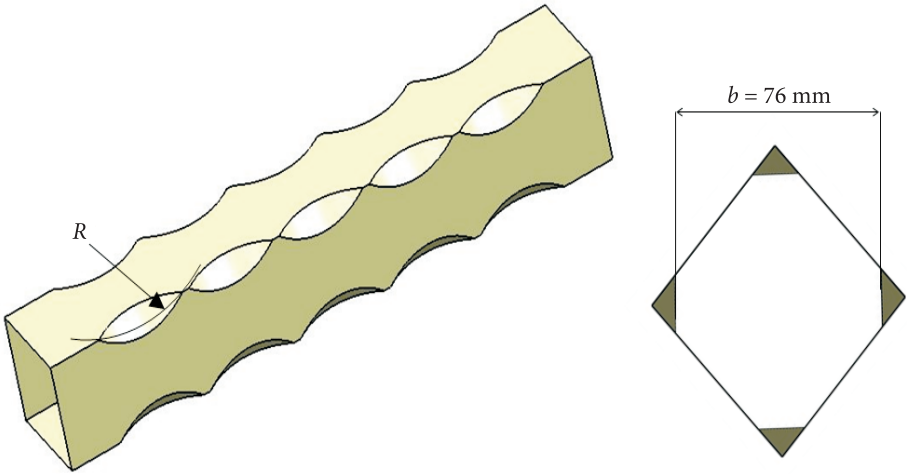
Tematyka nośności granicznej słupów izotropowych o przekroju kwadratowym została już dobrze przebadana, jednak istnieje spory niedostatek prac wskazujących na

praktyczne zastosowania opisywanych zjawisk. Istnieją dziesiątki prac poświęconych tej tematyce. Bardzo cenne są prace przeglądowe Singera, Arbocza i Wellera dotyczące badań eksperymentalnych [13, 14]. Abramowicz m.in. [1, 2] zajmował się słupami stalowymi w aspekcie ich zastosowania jako absorbera energii. Prace Langsetha i Hopperstada [9, 10] koncentrują się na słupach wykonanych z aluminium. Meng i Wierzbicki [12, 15, 16] analizowali mechanizmy zniszczenia słupów o przekrojach zamkniętych. Karagiozova badała podobne konstrukcje pracujące pod obciążeniem udarowym [8]. Nie natrafiono na prace, które dotyczyłyby słupów z tak ukształtowanymi narożami. W publikacjach [7, 11] analizowane są słupy o przekroju okrągłym z wgłębieniami, ale traktowane są one jako uszkodzenia, a więc nie były nadane celowo i są pojedyncze. Daje to nadzieję, że przedstawiona konstrukcja cienkościenna ma cechy oryginalności. Autor prowadził już symulacje MES modeli słupów z wgłębieniami. Badany był wpływ zaburzenia w postaci odchyleń od prostoliniowości osi słupa. Analizowano wpływ amplitudy krzywizny pierwotnej osi słupa na zachowanie się konstrukcji w stanie zakrytycznym [6]. Potwierdzono znaczną niewrażliwość na wspomniane zaburzenie w porównaniu ze słupami o gładkich ścianach. W obecnym artykule podjęto zadanie oceny wpływu mimośrodowego przesunięcia osi obciążenia na zachowanie się słupów z wgłębieniami podczas ściskania.

2. Przedmiot badań. Model słupa z wgłębieniami

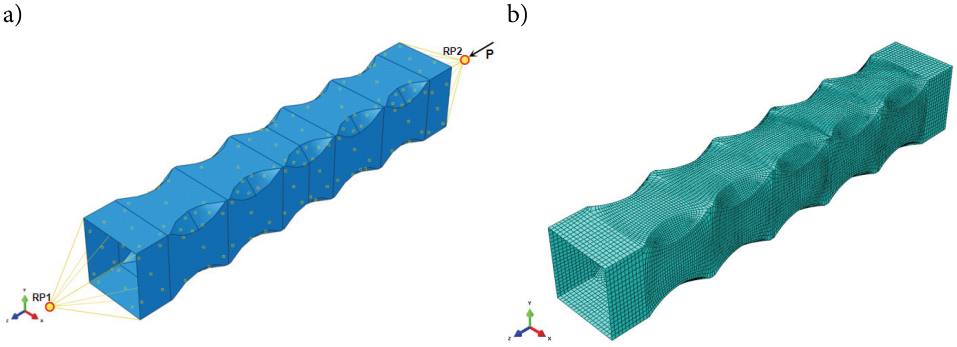
Przedmiotem analizy jest słup o przekroju kwadratowym $\square 68 \times 1$ wykonany ze stopu aluminium EN AW6060-T6 (R_e = 175 MPa, R_m = 250 MPa, ν = 0,33). W stanie plastycznym materiał wykazuje liniowe umocnienie (E = 70 000 MPa, E_t = 937,5 MPa). Wysokość słupa przyjęto jako sześciokrotność jego średniej szerokości ścianki $l = 6 \times 67 = 402$ mm. Proces modelowania słupa z wgłębieniami przeprowadzono w module Generative Shape Design systemu Catia v5. Geometria przetłoczenia charakteryzuje się promieniem R = 60 mm, zagłębienie przetłoczenia w narożu słupa określa wymiar b = 76 mm. Jak widać na rysunku 1, wykonano po cztery przetłoczenia na pięciu poziomach. Poziomy odległe są od siebie o 67 mm.

Model słupa zaimportowano do systemu Abaqus [3] w celu prowadzenia analizy MES. Procedury obliczeniowe związane z nieliniową analizą MES, szczególnie w stanach zakrytycznych, zostały opisane szczegółowo w pracach [4, 5]. Ze względu na fakt, że słupy będą badane w warunkach przegubowego podparcia w istniejącym przyrządzie (niniejsza praca jest w stadium przedeksperymentalnym), zadbano, aby warunki brzegowe odpowiadały realiom eksperymentu. W modelu MES utworzono punkty referencyjne RP1 i RP2, które poprzez więzy typu *Coupling* sztywno związano z brzegiem słupa. Punkty referencyjne odległe są od brzegów słupa o z = 65 mm, co odpowiada odległości środka geometrycznego kuli w przyrządzie od powierzchni oporowej osadzenia profili. W punkcie RP1 odebrano konstrukcji możliwość



Rys. 1. Model słupa wykonany w module Generative Shape Design systemu Catia v5

wszelkich przemieszczeń oraz obrotów względem osi *z*. W punkcie RP2, w którym przyłożone jest obciążenie siłą skupioną $P = 30$ kN, dopuszczono przemieszczenie wzdłuż osi *z*. Na rysunku 2a przedstawiono model słupa z narzuconymi warunkami brzegowymi i obciążeniem oraz ze zdefiniowanymi relacjami kontaktowymi (*Self Contact*). Rysunek 2b przedstawia model z wygenerowaną siatką MES.

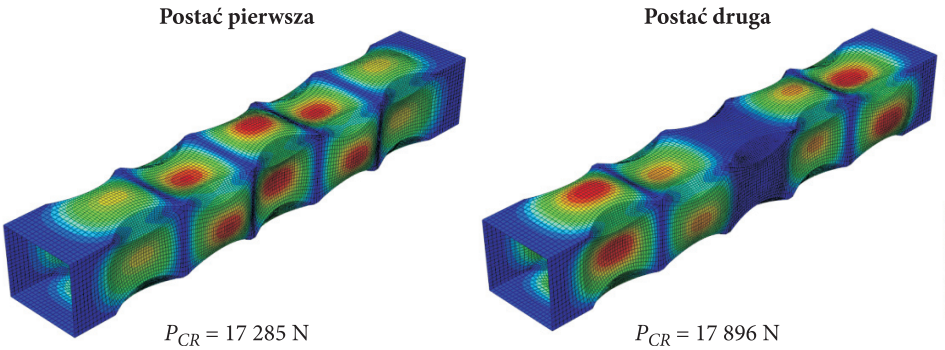


Rys. 2. Model słupa w systemie ABAQUS

Mimośrodowe obciążenie i podparcie realizowane jest poprzez zmianę położenia punktów referencyjnych RP1 i RP2 w kierunku osi *x* oraz *y* w zakresie od 0 do 5 mm co 0,5 mm. W oznaczeniu modeli litera reprezentuje kierunek przesunięcia osi obciążenia, zaś cyfra oznacza wartość przesunięcia pomnożoną przez 10. Model niezaburzony ma symbol X00 (Y00).

Specyfika analiz wyboczenia słupów wymaga prowadzenia jej w dwóch etapach: w pierwszym prowadzona jest analiza postaci wyboczenia, zaś w drugim analiza

statyczna, z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznych. Efektem końcowym pierwszego etapu jest uzyskanie siły krytycznej oraz postaci wyboczeniowych, z których pierwsza posłuży w kolejnym etapie obliczeń jako imperfekcja geometryczna. Bez wprowadzenia zaburzenia geometrii modelu imperfekcją geometryczną nie jest możliwe uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji numerycznej. Na rysunku 3 przedstawiono dwie pierwsze postaci wyboczenia słupa wraz z wartością siły krytycznej. W drugim etapie obliczeń słup obciążono siłą i poddano analizie z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznych i materiałowych. W modelu MES wzięto pod uwagę zjawiska kontaktowe zarówno na powierzchniach wewnętrznych jak i zewnętrznych.

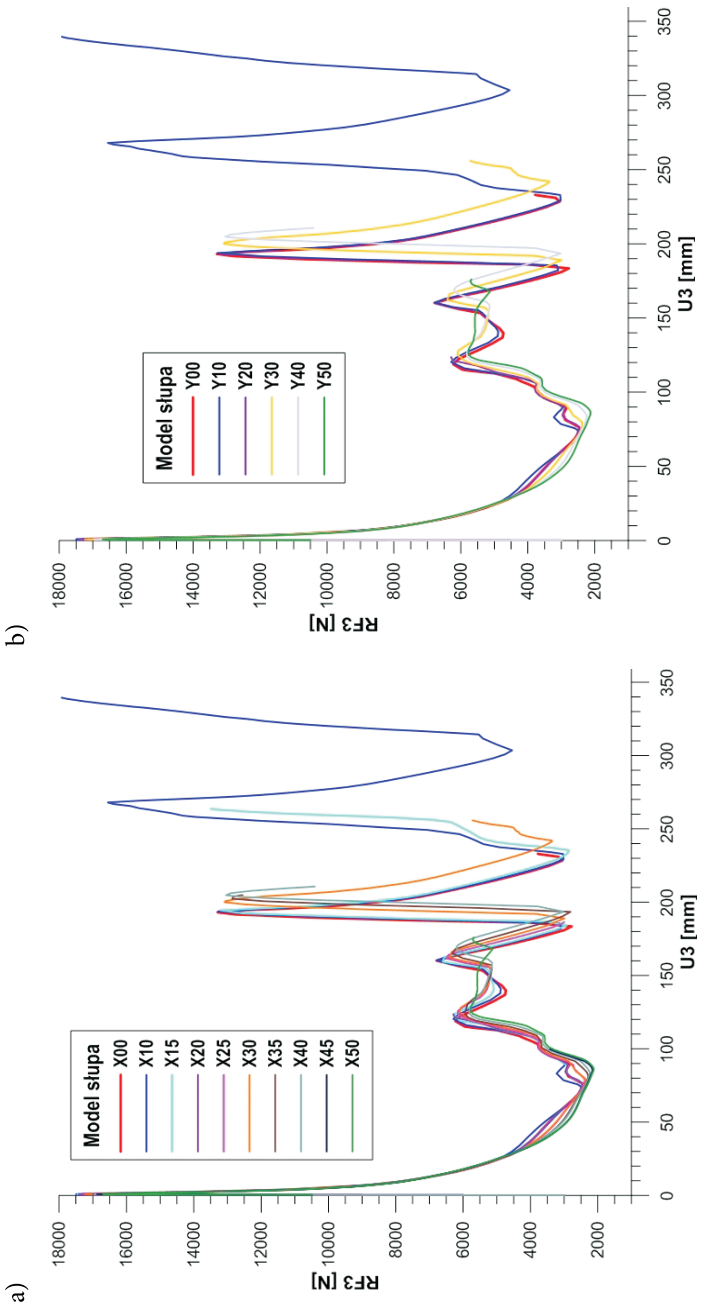


Rys. 3. Dwie pierwsze postaci wyboczenia słupa pod obciążeniem osiowym oraz wartości sił krytycznych

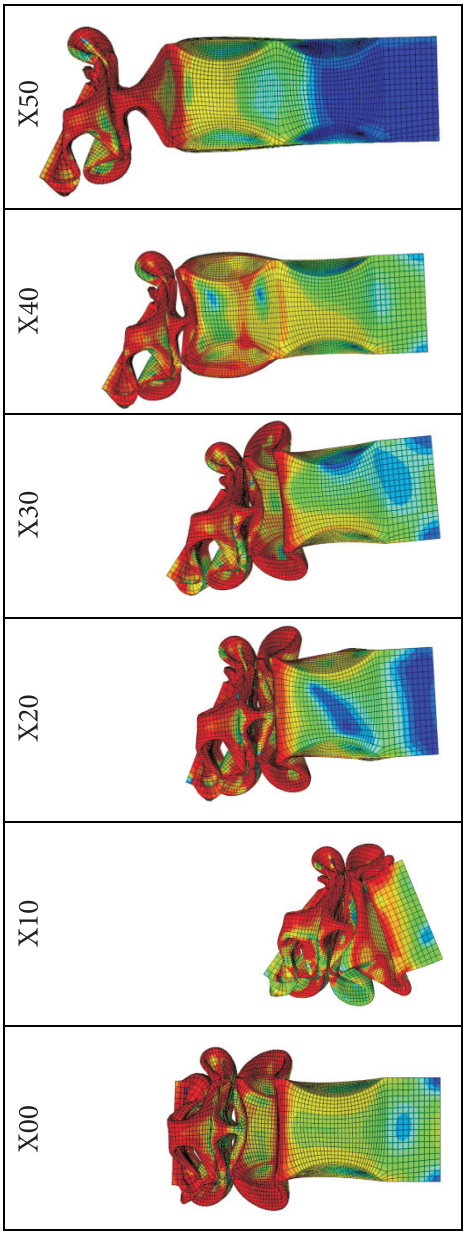
3. Wyniki badań

Na rysunku 4 przedstawiono zależność obciążenia RF3 (reakcja w kierunku osi *z*) od skrócenia słupa U3 w modelach różniących się wartością oraz kierunkiem mimośrodowego przesunięcia osi obciążenia. Wykresy te pokazują także proces zniszczenia absorbera, któremu towarzyszy pochłonięcie energii, w zależności od wartości zaburzenia, jakim jest przesunięcie osi obciążenia względem osi symetrii słupa.

Na wykresie a) przedstawiono wyniki dotyczące przesunięcia w kierunku osi *x* (modele X00-X50) zaś na wykresie b) — wyniki modeli z przesunięciem w kierunku osi *y* (Y00-Y50). Widać, że uzyskane charakterystyki są zbliżone. Charakterystyczne wartości szczytowe na wykresie odpowiadają destrukcji kolejnych poziomów. Gdy obciążenie narasta wraz ze skracaniem się słupa, wtedy narastają również naprężenia. Spadek wartości reakcji RF3 wraz ze wzrostem skrócenia słupa towarzyszy plastycznemu płynięciu kolejnych poziomów. Podobne charakterystyki występują w wielu pracach opisujących wyniki badań doświadczalnych. Prowadzono również analizy modeli z mimośrodowym przesunięciem osi po przekątnej przekroju słupa, jednakże mimo zastosowania identycznych parametrów nieliniowej analizy numerycznej,



Rys. 4. Zależność reakcji RF3 od skrócenia słupa U3

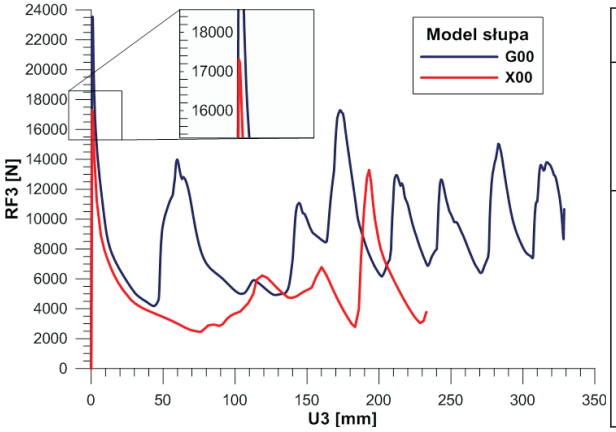


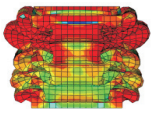
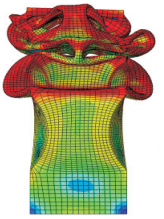
Rys. 5. Postać deformacji słupów z wgłębieniami

nie uzyskano tak wysokiego poziomu deformacji. Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane postaci deformacji słupów w zależności od wartości mimośrodowego przesunięcia osi obciążenia.

W symulacji numerycznej proces nieliniowy udało się doprowadzić do dużych deformacji. Słupy skróciły się od 185 mm do 330 mm w zależności od wartości mimośrodowego przesunięcia osi, co przy długości 402 mm daje od 46% do 82%. Widać, że **charakter pracy konstrukcji w fazie zniszczenia jest podobny, niezależnie od wartości mimośrodowego przemieszczenia osi obciążenia**.

Na rysunku 6 porównano charakterystyki nieliniowe słupa z wgłębieniami i o gładkich ścianach. Widać inny kształt zależności, ale też bardzo ważną z punktu zastosowań praktycznych cechę (większą podatność słupa zwłaszcza w początkowej fazie procesu deformacji — szczegół powiększenia). Obok wykresu pokazano postaci deformacji słupa gładkiego i z wgłębieniami, widać dobrze, że nieznacznie się różnią.



MODEL	POSTAĆ DEFORMACJI
Gładki G00	
Z wgłębieniami X00	

Rys. 6. Zależność reakcji RF3 od skrócenia słupa U3 w modelu z wgłębieniami i o gładkich ścianach

3. Wnioski końcowe

Przedstawione w pracy rozwiązanie konstrukcyjne wykazuje duży potencjał do zastosowania go jako absorbera energii. **Wykazuje wyjątkową odporność na zaburzenia w postaci mimośrodowego przemieszczenia osi obciążenia.**

Tylko w przypadku modeli X10 oraz Y10 udało się doprowadzić obliczenia do pełnej deformacji na pięciu poziomach (podobnie jak w modelu o gładkich ścianach). W pozostałych przypadkach analiza numeryczna została zakończona wcześniej z powodu niemożności uzyskania zbieżności rozwiązania. Otrzymanie nieliniowych ścieżek równowagi dla tak trudnych warunków (duża nieliniowość materiałowa i geometryczna, kontakty) wymagało wielu testów i umiejętnego

doboru parametrów analizy. Dalszej pracy wymaga także dobór parametrów analizy nieliniowej dla modeli z przesunięciem osi po przekątnej.

Kolejnym etapem badań numerycznych będzie ocena wpływu wielkości, kształtu i konfiguracji wgłębień na zachowanie się słupów w stanie zakrytycznym. Celem będzie takie ich dobranie, aby uporządkować proces destrukcji konstrukcji cienkościennej. Powinno to poprawić właściwości energoabsorpcyjne przy zwiększonej podatności. Po wyciągnięciu wniosków autor planuje analizy wybranych modeli w module dynamiki nieliniowej.

Artykuł opracowany na podstawie referatu zaprezentowanego na XIII Konferencji Naukowej TKI (Techniki Komputerowe w Inżynierii), Licheń Stary, 6-9 maja 2014.

Artykuł wpłynął do redakcji 17.07.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 10.11.2014 r.

LITERATURA

[1] Abramowicz W., *Thin-walled structures as impact energy absorbers*, Thin-walled Structures, vol. 41, 2003, 91-109.

[2] Abramowicz W., Jones N., *Dynamic Axial Crushing of Square Tubes*, International Journal of Impact Engineering, vol. 2, 1984, 179-208.

[3] ABAQUS HTML Documentation.

[4] Arbocz J., *Post-buckling behaviour of structures*, *Numerical techniques for more complicated structures*, Lecture Notes Is Physics, 228, 1985.

[5] Doyle K.J., *Nolinear analisys of thin- walled structures*, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 2001.

[6] Ferdynus M., *An energy absorber in the form of thin-walled column with square cross section and dimples*, Eksploatacja i Niezawodnosc- Maintenance and Reliability, vol. 15, No 3, 2013, 253-258.

[7] Hambly E.T., Calladine C.R., *Buckling Experiments on damaged Cylindrical Shells*, International Journal of Solids and Structures, 33, (24), 1996, 3539-3548.

[8] Karagiozova D., *Dynamic Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes Under Axial Impact- In: Stress Wave Propagation Phenomenon*, International Journal of Impact Engineering, vol. 30, 2004, 143-166.

[9] Langseth M., Hopperstad O.S., Hanssen A.G., *Crash Behaviour of Thin-Walled Aluminium Members*, Thin-Walled Structures , vol. 32, 1998, 127-150.

[10] Langseth M., Hopperstad O.S., *Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-Walled Aluminium Extrusions*, International Journal of Impact Engineering, vol. 18, 1996, 949-968.

[11] Lancaster E.R., Palmer S.C., *Model Testing of Mechanically Damaged Pipes Containing Dents and Gouges*, ASME Pressure Vessels & Piping Conference, New York, 1992, 235, 143-148.

[12] Meng Q., Al Hassani S.T.S., Soden P.D., *Axial crushing od square tubes*, International Journal of Mechanical Science, vol. 25, No 9-10, 1983, 747-773.

[13] Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Basic concepts, columns, beams, and plates*, vol. 1, John Wiley & Sons Inc. New York, 1998.

[14] Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Shells built-up structures, composites and additional topics*, vol. 2, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.

[15] Wierzbicki T., Huang J., *Initiation of plastic folding mechanism incrusched box columns,* Thin-walled Structures., vol. 13, 1991, 115-143.

[16] Wierzbicki T., Abramowicz W., *On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures*, ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 50, 1983, 727-734.

M. FERDYNUS

An influence of eccentricity of load on progressive crushing behaviour of isotropic square-tube columns with dimples

Abstract. The object of the research was a thin-walled energy absorber made of aluminium in the form of a column having square-cross section and a series of dimples in the corners. An influence of the eccentric load on sub-critical form of the equilibrium path was examined. This was an attempt to assess the structure's susceptibility to deviations of the load axis centricity. Advantages of the new solution were presented in comparison with a column having smooth walls.

Keywords: thin-walled members**,** energy absorber, crushing behaviour, FEM