

# Naprężenia własne

w spawanych słupach skrzynkowych  
z kształtowników profilowanych na zimno



dr inż.

**JAN GIERCZAK**

Politechnika Wroclawska, Wydział  
Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Katedra Konstrukcji Budowlanych  
ORCID: 0000-0003-3219-1844



dr inż.

**RAJMUND L. IGNATOWICZ**

Politechnika Wroclawska, Wydział  
Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Katedra Konstrukcji Budowlanych  
ORCID: 0000-0003-3663-0170

Prezentujemy wyniki badań doświadczalnych mających na celu określenie wielkości i rozkład naprężeń własnych w typowych słupach skrzynkowych spawanych z kształtowników profilowanych na zimno. Wyniki badań porównane z rezultatami innych badaczy mogą stanowić podstawę do dalszych analiz stateczności ścian słupa skrzynkowego z uwzględnieniem naprężeń własnych.

Prezentujemy wyniki badań doświadczalnych mających na celu określenie wielkości i rozkład naprężeń własnych w typowych słupach skrzynkowych spawanych z kształtowników profilowanych na zimno. Wyniki badań porównane z rezultatami innych badaczy mogą stanowić podstawę do dalszych analiz stateczności ścian słupa skrzynkowego z uwzględnieniem naprężeń własnych.

W ostatnich latach obserwuje się duże zapotrzebowanie na kształtowniki profilowane na zimno. Korzystne cechy wytrzymałościowe, stabilność kształtu, dokładność wymiarowa, możliwość formowania kształtowników z materiału uprzednio uszlachetnionego, to tylko niektóre zalety tych profili. Zachowanie się kształtowników formowanych na zimno różni się od zachowania konstrukcji o przekrojach litych (grubościenne), czyli tzw. walcowanych na gorąco. Różnica ta wynika z cienkościenności kształtowników formowanych na zimno. Często doznają one lokalnej utraty stateczności przed wyczerpaniem nośności.

## Cel badań

Pierwsze badania rozpoczęto w Wielkiej Brytanii i USA już na początku lat 40. XX wieku. Obecnie w Europie i na świecie istnieją przepisy normowe dotyczące projektowania konstrukcji z profili cienkościennych np. [1], [2]. W przepisach i zaleceniach normowych wyznacza się nośność graniczną w oparciu o pojęcie szerokości efektywnej, natomiast nie podaje się prostych za-

leżności szerokości efektywnej od przyłożonego obciążenia. Nie można w sposób prosty i jawny wyznaczyć zmian sztywności elementu w funkcji przyłożonego obciążenia z uwzględnieniem naprężeń własnych, które mogą mieć znaczący wpływ na wartości skróceń i przemieszczeń bocznych np. elementu ściskanego w postaci słupa skrzynkowego. Wpływ tego typu naprężeń był udokumentowany w wielu pracach badawczych, np. Davison, Birkemoe [3], Ingvarson [4], Kubica [5], Ignatowicz [6]. Kształtowniki formowane na zimno wytwarza się z blach cienkich stalowych o grubości od około 1 mm do 12 mm. Blachy i taśmy przeznaczone do produkcji kształtowników giętych na zimno powinny charakteryzować się wydłużalnością przed profilowaniem nie mniejszą niż  $A_3 = 20\%$ . Zarówno rozkład stref plastycznych przy formowaniu na zimno, jak i wartości odkształceń, są uzależnione od przekroju poprzecznego oraz metody formowania. Formowanie na prasie krawędzowej nie powoduje odkształceń plastycznych ścian płaskich kształtownika; efekt zgniotu koncentruje się w narożu. Profilowanie na giętarkę rolkowej powoduje pewne odkształcenia ścianek płaskich, oczywiście największe odkształcenia plastyczne występują w narożu.

Słupy prostokątne z profili giętych mogą być wykonane z dwóch ceowników formowanych na zimno. W tak wykonanym słupie dwa pasma płytowe (dwie ścianki) są połączone spoiną czołową, w której po procesie spawania pozostaną naprężenia własne.

W tej szczególnej sytuacji mamy do czynienia z naprężeniami własnymi, które są konsekwencją dwóch różnych procesów technologicznych: formowania na zimno i spawania. Rozpoznanie rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym było i jest prowadzone prawie od 80 lat. Autorzy skupią się tylko na tych badaniach, które dotyczą lub są pośrednio związane ze słupami skrzynkowymi z profili formowanych na zimno.

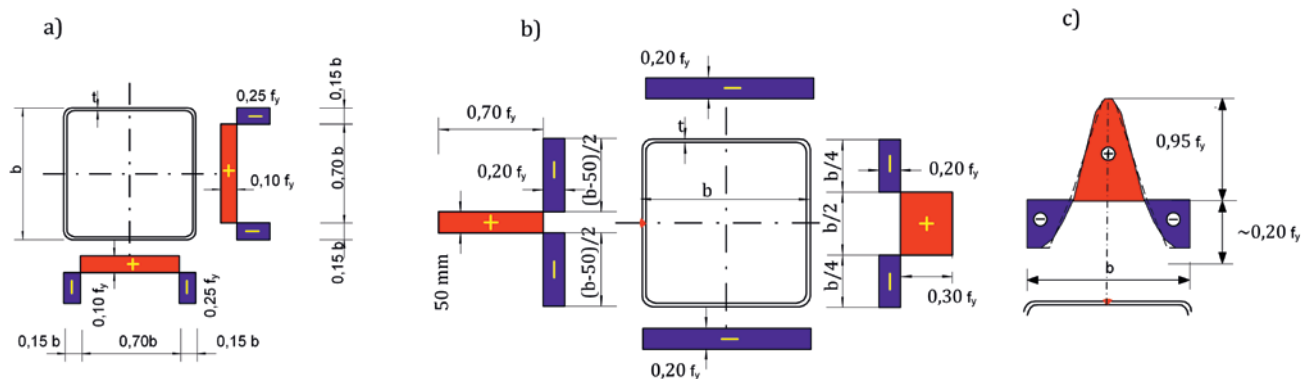
Bardzo ciekawe badania przeprowadzili Kreutz i Haller [7], jako podsumowanie przedstawili rozkład naprężeń własnych w kształtownikach rurowych, uzależniając go od procesu wytwarzania (rys. 1.).

Schafer i Pekoz [10] podsumowali wiele wcześniejszych prac dotyczących propozycji rozkładów naprężeń własnych w elementach giętych na zimno, ale głównie o przekrojach ceowych. Podzielili przekroje na formowane na giętkarkach rolkowych oraz formowane na prasach do gięcia. Wyszczególnili naprężenia typu zgięciowego i membranowego tylko w kierunku podłużnym elementu (rys. 2.).

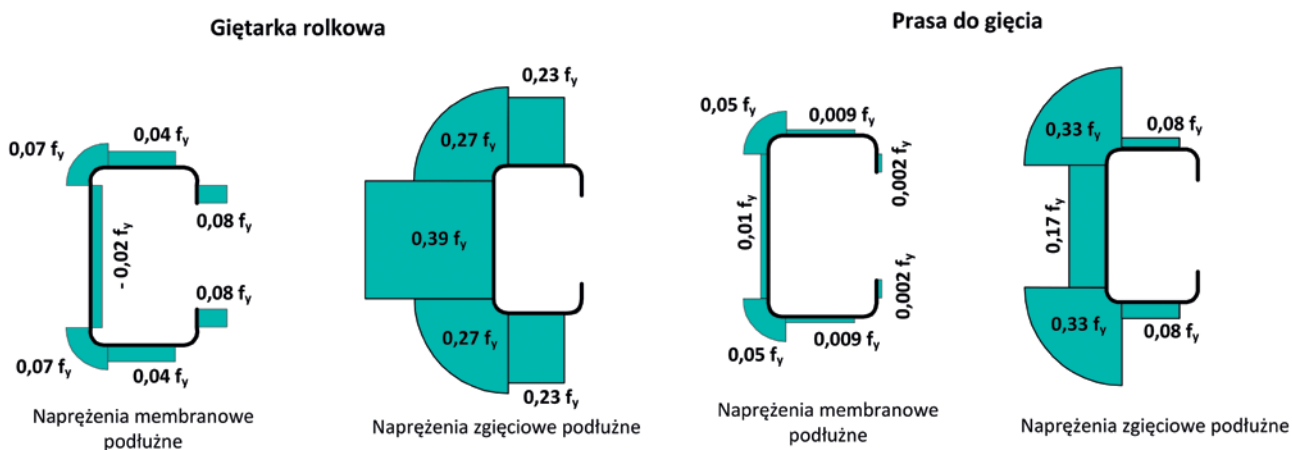
Podobne badania prowadzili Abdel-Rahman oraz Sivakumaran [11] i dotyczyły one ceowników o wymiarach 203 mm x 41,3 mm x 1,91 mm i 101,5 mm x 41,3 mm x 1,22 mm, dla których wyznaczono naprężenia własne zgięciowe na kierunku podłużnym (rys. 3.).

Rykaluk [8] podał algorytm do wyznaczania pozostających naprężeń spawalniczych w elementach prętowych traktowanych jako układ połączonych ze sobą tarcz. Przytoczył przy tym propozycję Augustyna [9], który doszedł do wniosku, że do-





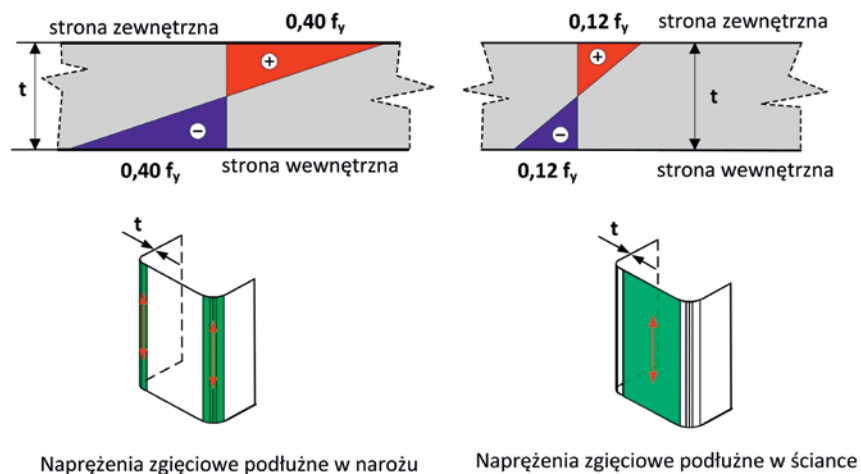
Rys. 1. Przykładowe rozkłady naprężeń własnych: a, b) w słupie skrzyńkowym wg Kreutz i Haller [7], c) w spoinie czołowej wg Rykaluka [8], Augustyna [9]



Rys. 2. Naprężenia własne od gięcia na zimno w zależności od procesu formowania kształtownika Schafer, Pekoz [10]

brą apromksamację rozkładów naprężeń własnych można uzyskać za pomocą tzw. rozkładu trapezowego. Taki opis naprężeń pokrywa się z wynikami badań Kreutza i Hallera [7] w ścianie słupa w miejscu spoiny czołowej. Ciekawe wyniki otrzymali Sully i Hancock [12], którzy przebadali słup o przekroju 125 mm x 125 mm x 6 mm ze stali o granicy plastyczności  $f_y = 383$  MPa i promieniu zagięcia  $r = 5 t$ . Otrzymane przez nich rozkłady naprężeń własnych nie odpowiadają wynikom badań słupów skrzyńkowych wykonanych przez Chan Lai Siu, Kitipornchai, Al.-Bermani [13]. Przeprowadzali oni analizy słupów skrzyńkowych, dla których przyjmowali zupełnie inne rozkłady naprężeń, wyróżniając naprężenia własne typu membranowego i zgięciowego (rys. 4).

Należy przy tym zwrócić uwagę, że w wyniku formowania przekrojów giętych na zimno zostają w nich uwięzione naprężenia własne mające charakter zarówno błonowy, jak i zgięciowy względem ścian. Ten rodzaj naprężeń zależy bezpośrednio od technologii wytwarzania elementu i był przedmiotem wielu badań. Niestety zaproponowane rozkłady naprężeń własnych różnią się na tyle



Rys. 3. Naprężenia własne wg propozycji Abdel-Rahman N., Sivakumaran [11]

mocno, że nie można jednoznacznie odpowiedzieć, która propozycja jest wystarczająca do zastosowań technicznych.

W praktyce zdarza się często, że nie posiadamy wiedzy na temat historii powstania takiego elementu. Z tego powodu podjęto próbę szacunkowego określenia naprężeń

własnych będących głównie konsekwencją wytworzenia słupa stalowego z wykorzystaniem technologii spawania, ukształtowanego z profili formowanych na zimno jako jeden z typowych elementów konstrukcji stalowej. Otrzymane wyniki własne autorzy porównali z powyższymi propozycjami.

## Wyznaczenie naprężeń własnych w badaniach doświadczalnych

Naprężenia uwjęzione w elemencie po procesie technologicznym (jako wypadkowa naprężeń spawalniczych i naprężeń od formowania na zimno) określono, wykorzystując metodę trepanacyjną (polegającą na cięciu ścianek elementu na paski). W tym celu przygotowano dwa krótkie odcinki słupów skrzynkowych o długości 300 mm i wymiarach 200 × 200 mm oraz dwóch grubościach ścianek 3 mm i 4 mm ze stali S355. Następnie na dwóch prostopadłych ściankach przyklejono tensometry elektrooporowe typu RL120/15, zarówno po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej ścianki (rys. 5).

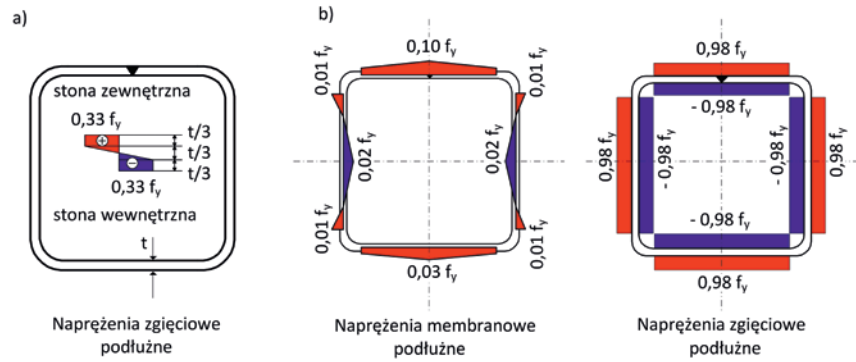
Z uwagi na ograniczenia techniczne tensometry umieszczono tylko w kierunku podłużnym na dwóch wzajemnie prostopadłych ścianach. Po podłączeniu przewodów do tensometrów zabezpieczono je woskiem przed uszkodzeniem pod wpływem działania cieczy chłodzącej (ciekła emulsja używana podczas procesu cięcia). Przed przystąpieniem do cięcia zarejestrowano wartości wskaźnikowe tensometrów jako wartości bazowe, a następnie po zakończonym procesie cięcia i zwolnieniu na jednej krawędzi (tak aby miały swobodę odkształceń) zapisywano wartości wskaźnikowe tensometrów.

Cięcie wykonano za pomocą frezarki, model typu FY251 z ustawionym układem frezów tarczowych (rys. 5). Przed cięciem model był przymocowany i usztywniony w taki sposób, aby nie było możliwości przemieszczeń i drgań elementu podczas procesu cięcia. Prędkość cięcia regulowano tak, aby nie wprawiać elementu w drgania i nie generować temperatury wyższej niż otoczenie. Po wykonaniu cięcia w kierunku podłużnym uwalniano poszczególne paski na jednej krawędzi. Uwolnienia krawędzi wykonano ręcznie brzeszczotem stalowym, aby wyeliminować drgania.

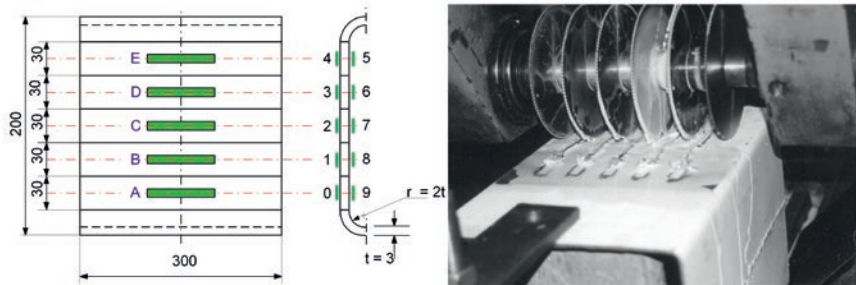
Jako uzupełnienie badań wykonano próby rozciągania stali dla poszczególnych wyciętych pasków celem określenia rozkładu granicy plastyczności  $f_y$  oraz doraźnej granicy wytrzymałości na rozciąganie  $f_m$ . Przeprowadzone próby rozciągania pozwoliły ustalić zarówno gatunek stali, jak również rozkład granicy plastyczności po obwodzie słupa z uwzględnieniem wpływu formowania na zimno. Na rys. 7. przedstawiono wyniki prób rozciągania dla poszczególnych pasków i widać wyraźny efekt wzmocnienia w narożach słupa.

## Wyniki badań

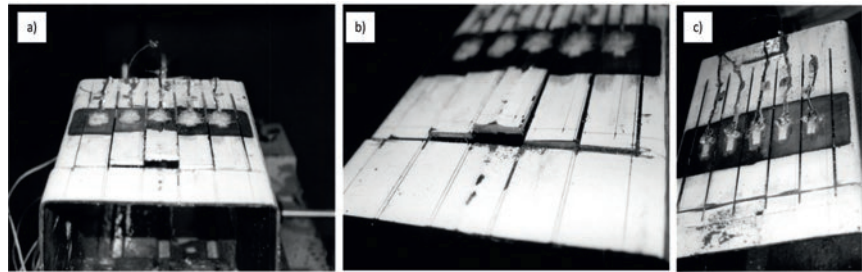
Podczas uwalniania poszczególnych pasków obserwowano wygięcie, któremu nie rzadko towarzyszył efekt akustyczny. Zjawisko to było szczególnie widoczne dla paska ze spoiną czołową w środku. Na podstawie zarejestrowanych zmian odkształceń na we-



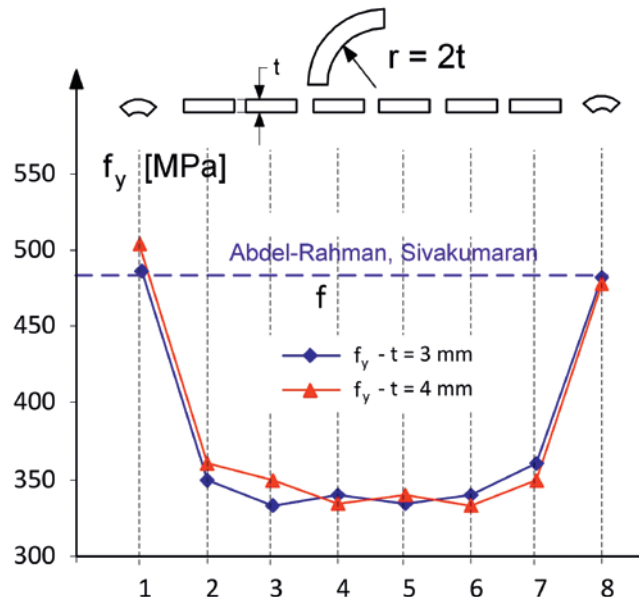
Rys. 4. Naprężenia własne wg propozycji: a) Chan, Kitipornchai, Al.-Bermami [13], b) Sully i Hancock [12]



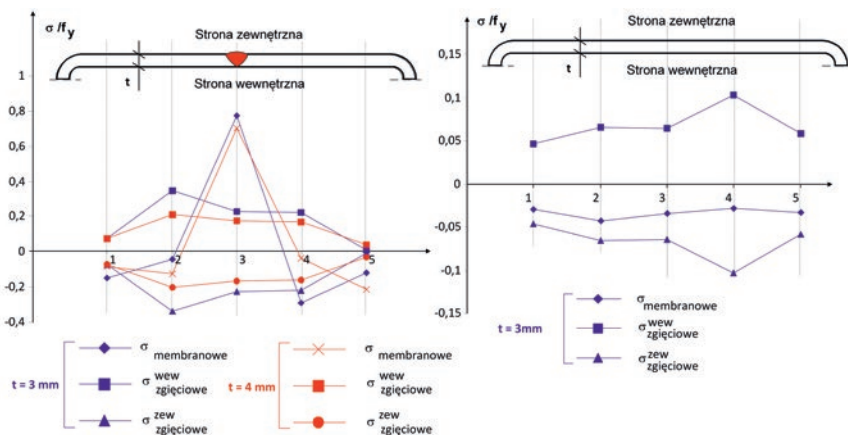
Rys. 5. Schemat rozmieszczenia tensometrów na ściance bez spoiny. Cięcie na paski przy ciągłym schładzaniu cieczą odprowadzającą ciepło



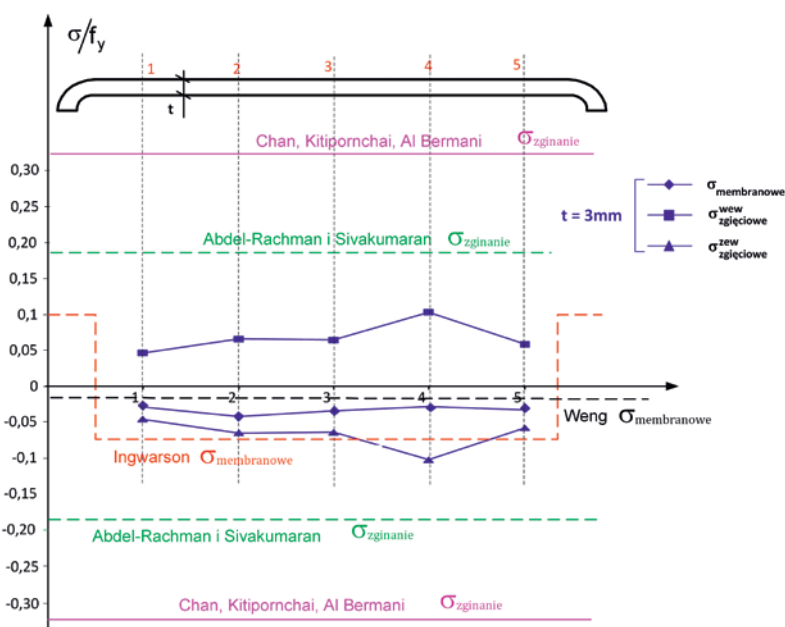
Rys. 6. Ścianka ze spoiną czołową po wykonaniu cięcia: a, b) największe odkształcenia ujawniły się w miejscu spoiny czołowej, c) ściana bez spoiny



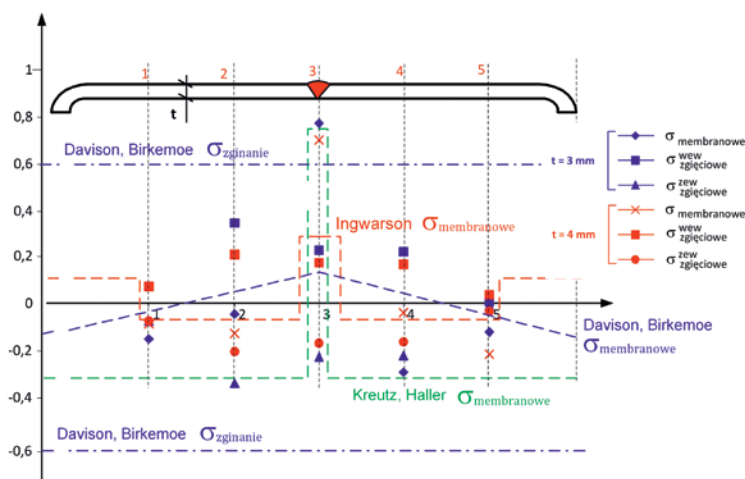
Rys. 7. Rozkład naprężeń granicy plastyczności po szerokości słupa dla ścianki bez spoiny



Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych typu zgięciowego i membranowego wzdłuż obwodu dla ścianki ze spoiną czołową i dla ścianki bez spoiny czołowej



Rys. 9. Porównanie wybranych propozycji rozkładów naprężeń własnych z wynikami otrzymanymi z badań dla ścianki bez spoiny



Rys. 10. Porównanie wybranych propozycji rozkładów naprężeń własnych z wynikami otrzymanymi z badań dla ścianki ze spoiną

wewnętrznej i zewnętrznej stronie ściany przekroju poprzecznego sporządzono rozkłady naprężeń własnych dla ściany bez spoiny i dla ściany ze spoiną czołową (rys. 8).

### Podsumowanie

Wyniki badań nie pokrywają się z przedstawionymi wcześniej propozycjami rozkładów naprężeń własnych. Na podstawie przeprowadzonych badań udało się zidentyfikować naprężenia zarówno typu zgięciowego względem grubości ściany, jak i naprężenia typu membranowego dla ścianki ze spoiną oraz bez spoiny. Porównując otrzymane wyniki dla ścianki słupa, na której nie było zlokalizowanej spoiny (rys. 9.), można zauważyć, że otrzymane naprężenia własne stanowią tylko 50% wartości otrzymanych przez Abdel-Rahman N., Sivakumaran K.S. [11]. Natomiast wartości naprężeń membranowych stanowią około 35% wartości wg propozycji Ingvarsona [4]. Rozpatrując ścianę, na której była zlokalizowana spoina czołowa (rys. 10.), można zauważyć, że kształt rozkładu naprężeń własnych typu membranowego odpowiada propozycji Kreutza, Hallera [7] oraz częściowo propozycji Ingvarsona [4]. Wartości tych naprężeń odbiegają od przytoczonych propozycji średnio od 35% do 80%. W przypadku naprężeń typu zgięciowego można postawić tezę, że otrzymano podobne wyniki i charakter rozkładu naprężeń był zachowany. Otrzymane wartości wahają się w granicach od 5% do 40% w zależności od miejsca lokalizacji na szerokości ścianki. Należy podkreślić, że wiele przytoczonych wcześniej rozkładów naprężeń własnych w słupach skrzynkowych dotyczyło co prawda profili formowanych na zimno, ale były to przekroje z tylko jedną spoiną czołową. Dlatego otrzymane wyniki należy rozpatrywać bardziej pod kątem wyrobienia sobie poglądu na sam fakt istnienia tego typu naprężeń jako swego rodzaju imperfekcji.

Żadna z przytoczonych obowiązujących propozycji nie opisuje w zadawalający sposób otrzymanego w badaniach rozkładu naprężeń. Z tego powodu przedstawiono propozycję własnych rozkładów naprężeń własnych na podstawie otrzymanych wyników, co zaprezentowano na rys. 11. i rys. 12.

Należy pamiętać, że naprężenia spawalnicze oraz ugięcia wstępne ścianek słupów profilowanych na zimno bezpośrednio wpływają na przebiegi ścieżek równowagi statycznej słupów. Uwzględnienie naprężeń własnych może powodować zmniejszenie sztywności, co może się wiązać ze wzrostem przemieszczeń bocznych słupa Ingvarson [4], Kubica[5], Ignatowicz [6]. Z przeprowadzonych badań można zaryzykować stwierdzenie, że naprężenia własne od gięcia na zimno są w słupach skrzynkowych z profili zimnogiętych niewielkie. Naprężenia własne od spawania osiągają wartości od 20% do 80%

granicy plastyczności i muszą mieć wpływ na sztywność elementów, co ma potwierdzenie w przepisach normowych w odniesieniu do krzywych wyoboczeniowych elementów ściskanych. Na zakończenie należy dodać, że zakres przedstawionych badań dotyczy tylko słupów wykonanych z profili ceowych formowanych na zimno o smukłości ścianki  $b/t = 66,6$  i  $50$ . Przedstawione wyniki dają tylko ogólny pogląd na temat rozkładu naprężeń własnych w tego typu elementach konstrukcyjnych i mogą stać się przyczynkiem do dalszych badań dotyczących np. wpływu zaprezentowanego rozkładu naprężeń własnych na stateczność lokalną ścianki słupa i jej szerokość efektywną. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.6517

Artykuł naukowy opublikowany w ramach projektu „Wsparcie dla czasopism naukowych” dofinansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (202/WNC2019/1).

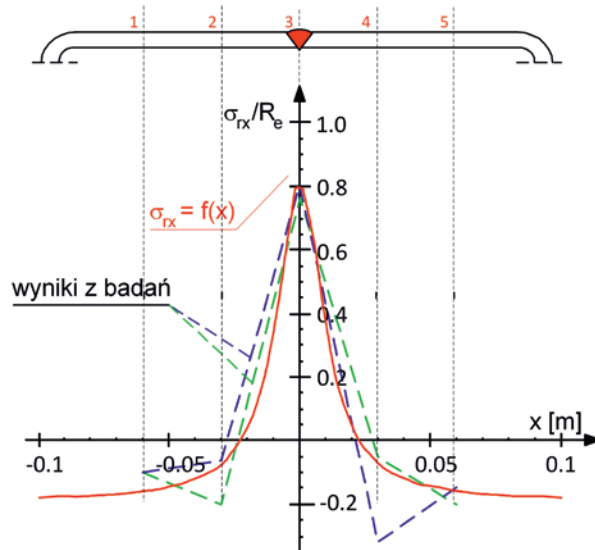
#### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Gierczak Jan, Ignatowicz L. Rajmund, 2019, Naprężenia własne w spawanych słupach skrzynkowych z kształtowników profilowanych na zimno, „Builder” 01 (270).

DOI: 10.5604/01.3001.0013.6517

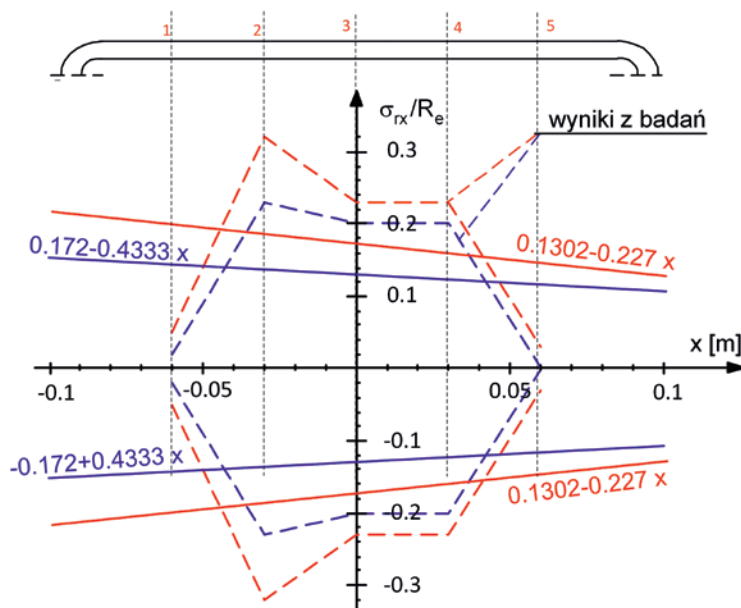
#### Literatura

- [1] North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016.
- [2] PN-EN-1993-1-3-2007-Projektowanie-konstrukcji-stalowych.-Reguly-uzupelniajace-dla-konstrukcji-z-kształtowników-i-błach-profilowanych-na-zimno.
- [3] Davison T.A., Birkemo P.C., 1983 Column behaviour of cold-formed hollow structural steel shapes, "Canadian Journal of Civil Engineering", vol.10, DOI: 10.1139/83-014.
- [4] Ingvarson L., Cold-Forming stresses. Effect on buckling, 1975, "3rd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, str. 85-119".
- [5] Kubica E., 1991, Nośność graniczna i sztywności słupów stalowych o przekrojach skrzynkowych zamkniętych, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa PWR, Nr 60.
- [6] Ignatowicz R. L., Analiza teoretyczno-doświadczalna nośności stalowych słupów skrzynkowych z kształtowników giętych na zimno, 1999, Raport Instytutu Budownictwa PWR-Seria PRE 52/99.
- [7] Kreutz J. St., Haller W., 1988, Zur Einstufung von rechteckigen und quadratischen Hohlprofilen in DIN 18800 Teil 2, „Der Stahlbau”, 57, H.5. (str. 129-134).
- [8] Rykaluk K., Pozostające naprężenia spawalnicze w wybranych stanach granicznych nośności, 1981 „Prace Naukowe Instytutu Budownictwa PWR”, Nr 29.
- [9] Augustyn J., Stateczność ogólna elementów konstrukcji stalowych z uwzględnieniem naprężeń spawalniczych, Mostostal, Warszawa 1975.
- [10] Schafer B., Pekoz T., 1997, Geometric imperfection and residual stress for use in the analytical modeling of cold-formed steel members, "Experimental model Research and Testing of Thin-Walled Structures-Prague", str. 649-659.
- [11] Abdel-Rahman N., Sivakumaran K.S., 1997, Material properties models for analysis of cold-formed steel members, "Journal of Structural Engineering", Vol. 123, No.9, ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:9(1135).
- [12] Sully R.M., Hancock J., 1996, Behaviour of cold-formed SHS beam-columns, "Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol.122, no.3. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(326).
- [13] Chan Lai Siu, Kitipornchai S., AL-Bermani A. F. G., 1991, Elasto-plastic analysis of box-beam columns including local buckling effects, "Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol. 117, No.7, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:7(1946).



$$\sigma_{rx} = \frac{1}{372} \cdot \left[ -71,82 + \frac{115666 \cdot y^2}{(0,04 + 325,8 \cdot y^2) \cdot y^2} - \frac{17,75}{0,04 + 325,8 \cdot y^2} - \frac{7,22 \cdot 10^6 \cdot y^2}{(1 + 8144 \cdot y^2)^2} + \frac{887,6}{1 + 8144 \cdot y^2} \right]$$

Rys. 11. Aproxymacja rozkładów naprężeń własnych typu membranowego otrzymanych z badań dla ścianki ze spoiną



Rys. 12. Aproxymacja rozkładów naprężeń własnych typu zgięciowego otrzymanych z badań dla ścianki bez spoiny

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych mających na celu określenie wielkości i rozkłady naprężeń własnych w typowych słupach skrzynkowych spawanych z kształtowników profilowanych na zimno. Badania wykonano metodą trepanacyjną, rejestrując zmianę stanu odkształceń po rozcięciu na paski modelu krótkiego słupa. Wyniki badań porównano z rezultatami innych badaczy i mogą one stanowić podstawę do dalszych analiz stateczności ścian słupa skrzynkowego z uwzględnieniem naprężeń własnych.

**Słowa kluczowe:** naprężenia własne, profile zimno-gięte, profile cienkościennie, konstrukcje stalowe

**Abstract:** Residual stresses in welded box columns from cold-formed sections. The paper presents the results of investigations aimed at determining the size and distribution of residual stresses in box columns welded from cold-formed sections. Trepanation method (strip cutting method) is used to determine the change in the state of deformation after cutting into strips of the short column model. The results were compared with the results of other researchers and may form the basis for further analyses of the stability of the walls of the box column, taking into account the natural stresses.

**Keywords:** residual stresses, cold-formed profiles, thin-walled profiles, steel structures