

# Cienkościenne zamknięte profile aluminiowe łączone za pomocą warstwy adhezyznej – charakterystyka przy trójpunktowym zginaniu

Prof. dr hab. inż. Tomasz Sadowski, mgr inż. Marek Nowicki, Politechnika Lubelska

ARTYKUŁY PROBLEMOWE

## 1. Wprowadzenie

Profile cienkościenne znajdują obecnie szerokie zastosowanie w budownictwie. Wykorzystywane są jako materiały konstrukcyjne, elementy stolarki, czy elementy wykończeniowe. Jednak łączenie ich za pomocą kleju to jeszcze dość mało rozpowszechnione metody, chociaż w ostatnim czasie wzrasta zainteresowanie technikami klejenia konstrukcji metalowych w budownictwie [1, 2, 3].

Opracowanie przedstawione w pracy dotyczy analizy klejonego cienkościennego profilu aluminiowego o przekroju poprzecznym omega, który poddano 3-punktowemu zginaniu. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych oraz modelowania numerycznego quasi-statycznego zginania tych elementów w dwóch ułożeniach profili.

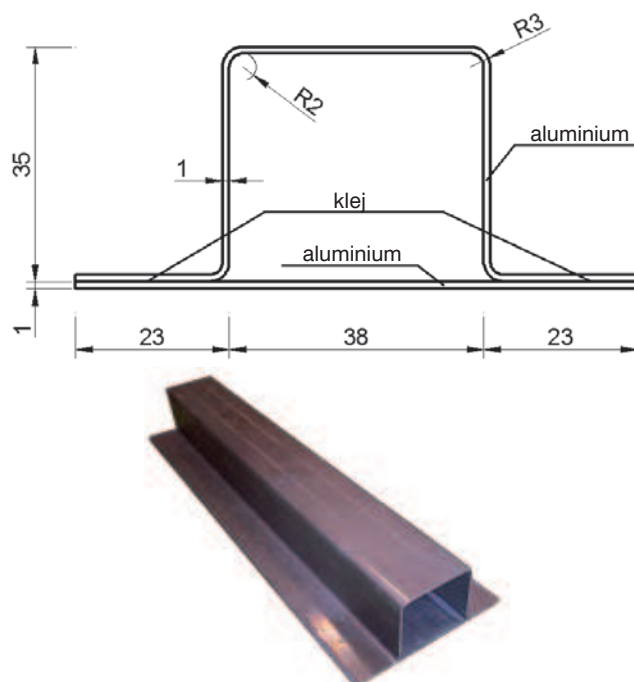
## 2. Próbkki użyte do badań

Poniżej przedstawiono geometrię próbek użytych do analizy (rys. 1). Wszystkie próbki składały się z profilu kapeluszowego oraz blachy płaskiej połączonych ze sobą za pomocą warstwy kleju.

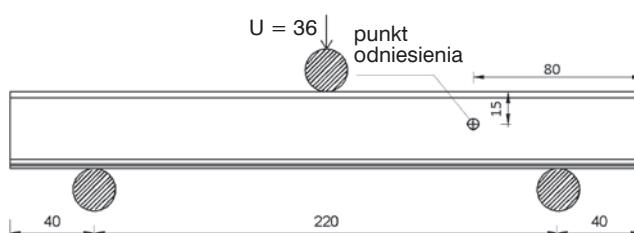
Łączone elementy wykonane były z aluminium 7075, a do ich połączenia użyto kleju Loctite 9514. Na potrzeby modelu numerycznego, parametry materiałowe aluminiowych części składowych wyznaczono doświadczalnie przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS oraz systemu „ARAMIS” (system cyfrowej korelacji obrazów). Natomiast parametry klejów przyjęto wg danych producenta [4].

## 3. Testy laboratoryjne

Badaniom laboratoryjnym poddano próbki w dwóch położeniach: profil omega w górnej (rys. 3) lub dolnej pozycji (rys. 4). Schemat statyczny oraz rozstaw podpór przedstawia rysunek 2. Próbkki poddano trójpunktowemu zginaniu na maszynie wytrzymałościowej MTS 810. Prędkość zginania próbek wynosiła 0,036 mm/s. W celu uzyskania dokładnego opisu stanu deformacji



**Rys. 1.** Próbkka: a) schemat przekroju poprzecznego [mm], b) widok próbki



**Rys. 2.** Schemat statyczny analizowanych próbek [mm]

badanego elementu zastosowano system ARAMIS. W pierwszym przypadku obciążenia, gdy profil omega umieszczony jest w górnej pozycji (rys. 3) próbka ulega skoncentrowanemu wygięciu pod wpływem 3-punktowego zginania. W miejscu przyłożenia obciążenia, górny element odkształca się charakterystycznie dla takiego przypadku [7, 8, 9]. Po przekroczeniu granicy plastyczności materiału dochodzi do załamania plastycznego



Rys. 3. Eksperyment laboratoryjny. Próbki po odkształceniu: a) cała próbka, b) miejsce przyłożenia obciążenia



Rys. 4. Próbka podczas badania



Rys. 5. Stan deformacji próbki

ścianek bocznych, a tuż po tym do miejscowego uszkodzenia i pęknięcia aluminiowego profilu omega (rys. 3). W układzie z profilem omega w górnej pozycji nie zaobserwowano uszkodzenia warstwy adhezyjnej.

Przy układzie z profilem omega w dolnym położeniu (rys. 4) element początkowo ugina się sprężysto, a po przekroczeniu wartości maksymalnej siły obciążającej dochodzi do powstania mechanizmu załamania plastycznego ścianek bocznych profilu. Załamanie to, w przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, odbywa się w kierunku wewnętrznej części profilu. Początek uszkodzenia warstwy kohezyjnej występuje przy miejscu przyłożenia obciążenia i propaguje w kierunku zewnętrznym próbki.

Przy takim układzie dochodzi także do uszkodzenia aluminiowych elementów składowych, poprzez ich pęknięcia, w miejscu wyboczenia ścianek bocznych (rys. 5). Warstwa kohezyjna uległa całkowitemu zniszczeniu (rys. 4). Wykresy rozkładu sił zostały przedstawione na rysunku 7.

#### 4. Analiza numeryczna

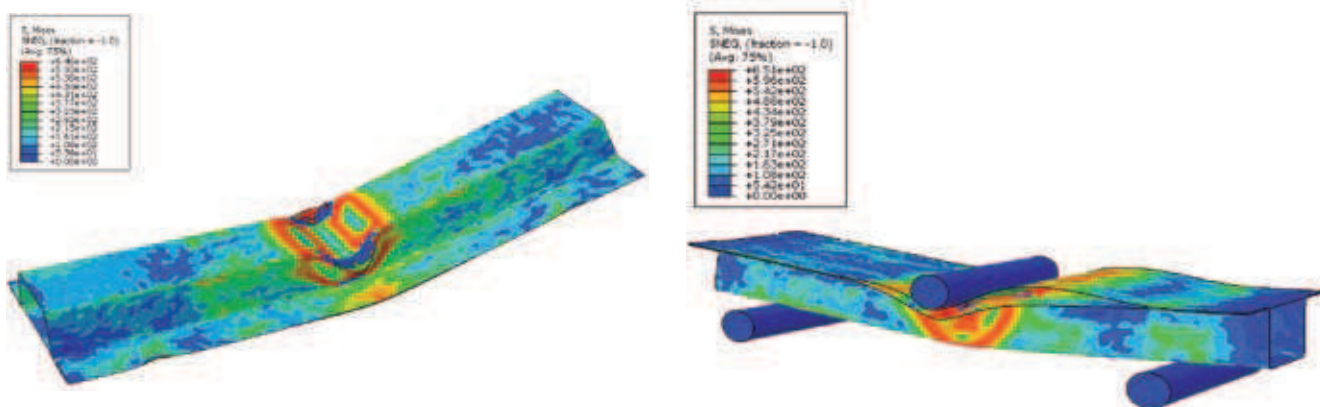
W celu wzbogacenia wyników badań laboratoryjnych wykonano symulację numeryczną zginania belek. Analizę numeryczną wykonano z zastosowaniem metody

Tabela 1. Dane materiałowe aluminium 7075 przyjęte w modelu numerycznym

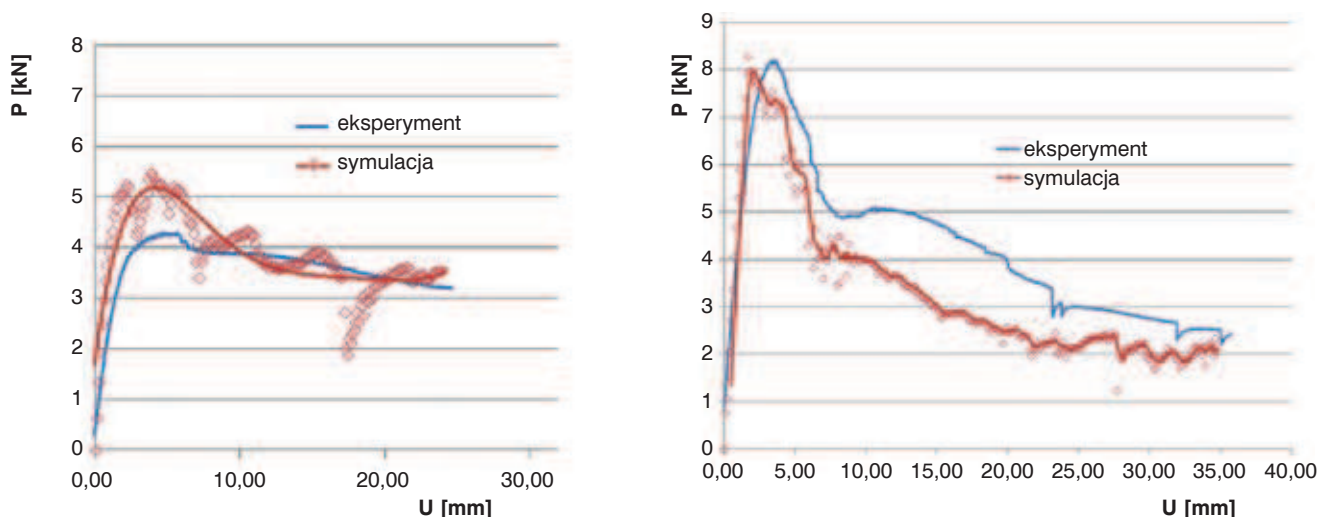
Materiał	Ciężar	moduł Young'a [kg/m <sup>3</sup> ]	Liczba Poissona [GPa]
1	2	3	4
aluminium 7075	2700	69,18	0,327

elementów skończonych (MES) przy użyciu programu „Abaqus explicit”. Poszczególne łączone elementy zostały zamodelowane jako elementy powłokowe o łącznej liczbie elementów skończonych równej 17550 typu S4R oraz liczbie węzłów 17969. Warstwa kohezyjna ulega stopniowej degradacji, tzn. do opisu jej deformacji zastosowano połączenie kohezyjne z uszkodzeniem [6]. Przyjęte do analizy dane materiałowe elementów aluminiowych przedstawia tabela 1. Natomiast dane materiałowe klejów zaczerpnięto z danych technicznych producenta [4]. Energię zniszczenia klejów przyjęto wg [5].

Po przeprowadzonej analizie numerycznej stanów deformacji modelu można stwierdzić, że z wystarczającą dokładnością oddaje on charakter badania



**Rys. 6.** Stan deformacji oraz rozkłady naprężeń Hubera-Misesa próbek poddanych 3-punktowemu zginaniu: a) profil omega w górnym i b) dolnym położeniu



**Rys. 7.** Wykresy siła-ugięcie. Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacji numerycznych: profil omega w górnym (a) i dolnym (b) położeniu

eksperymentalnego. Geometria deformacji przedstawiona na rysunku 6. wykazuje duże podobieństwo do kształtów przebadanych próbek (rys. 3, 4, 5.). Na rysunku 6 zaobserwować można rozkład naprężeń Hubera-Misesa. Wartości maksymalne tych naprężeń koncentrują się w miejscu przyłożenia obciążenia i osiągają wartość rzędu 650 MPa. W miejscu maksymalnych naprężeń dochodzi do rozerwania aluminiowej powłoki profilu omega. Gdy energia uwalniana podczas procesu propagacji pęknięcia w warstwie kohezynnej jest większa lub równa energii krytycznej zastosowanego kleju, dochodzi do uszkodzenia warstwy łączącej profile. Skutkuje to rozwarstwieniem profilu [6, 10, 11].

Przedstawione wykresy na rysunku 7 są typowe dla zginania cienkościennych profili zamkniętych [8]. Początkowo wartość siły zmienia się liniowo do granicy proporcjonalności. W momencie uzyskania maksymalnej wartości dochodzi do załamania plastycznego ścianek profilu oraz ich lokalnego uszkodzenia. W kolejnych

etapach wzrostu obciążenia dochodzi do dalszej deformacji elementu i jego zniszczenia.

Analiza wykresów przedstawionych na rysunku 7 wskazuje na zbieżność wyników badań laboratoryjnych z symulacjami numerycznymi. Zgodność ta potwierdza poprawność założeń modelu numerycznego. Na przedstawionych wykresach widać także wyraźną różnicę w wartościach maksymalnych sił w zależności od układu profilu. Zdecydowanie większą nośność uzyskuje próbka w położeniu z profilem kapeluszowym w dolnej pozycji, gdzie siła maksymalna jest na poziomie 8 kN, podczas gdy w ułożeniu odwrotnym dochodzi do wartości 4,5–5 kN.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki pozwalają optymistycznie patrzeć na zastosowanie klejów w metalowych elementach konstrukcji budowlanych. Na podstawie przeanalizowanych schematów można stwierdzić, że układ z profilem

kapeluszowym w dolnym położeniu jest korzystniejszy, ponieważ przenosi większe obciążenia. Natomiast w takim układzie dochodzi do całkowitej degradacji warstwy kohezyjnej. Analizując przedstawione wykresy można zaobserwować, w którym momencie dochodziło do uszkodzenia warstwy kohezyjnej lub do lokalnego wybożenia ścianek profilu aluminiowego. Zbudowany model numeryczny dobrze oddaje charakter testów laboratoryjnych. Umożliwia analizę rozwoju procesu deformacji cienkościennych klejonych profili aluminiowych, aż do ich całkowitego zniszczenia. Zastosowany model kohezyjny uszkodzenia warstwy kleju umożliwia opis stopniowej jej degradacji.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Piekarczyk M., Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych. Budownictwo. Czasopismo Techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. 1-B/2012 zeszyt 2  
 [2] Kubieniec G., Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia. Praca doktorska. Politechnika Krakowska 2008

- [3] Gremza G., Zamorowski J., Łączenie na zimno elementów konstrukcji stalowych. Inżynier budownictwa 18.07.2014  
 [4] LOCTITE Karta danych technicznych – Produkt Hysol 9514. listopad 2012  
 [5] Pirondi A., Fersini D., Perotti E., Moroni F., Applicabilità del modello di zona coesiva in simulazioni della frattura per diverse geometrie di giunti incollati. Atti del Congresso IGF 19, 85–93 (2007)  
 [6] Abaqus 6.11 Analysis User's Manual. 35.1.10 Surface-based cohesive behavior  
 [7] Kotelko M., Lim T.H., Rhodes J., Post-failure behavior of box section beams under pure bending (an experimental study). Thin-Walled Structures 38, 179–194 (2000)  
 [8] Kotelko M., Load-capacity estimation and collapse analysis of thin-walled beams and columns – recent advances. Thin-Walled Structures 42, 153–175 (2004)  
 [9] Belingardi G., Scattina A., Experimental investigation on the bending behavior of hybrid and steel thin walled box beams – The role of adhesive joints. International Journal of Adhesion & Adhesives 40, 31–37 (2013)  
 [10] Sadowski T., Kneć M., Golewski P., Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets. International Journal of Adhesion & Adhesives 30, 338–346 (2010)  
 [11] Sadowski T., Golewski P., Kneć M., Experimental investigation and numerical modelling of spot welding–adhesive joints response. Composite structures 112, 66–77 (2014)

## Elektrownia Kozienice



**Elektrownia Kozienice to druga co do wielkości elektrownia w Polsce. Plan jej modernizacji został zatwierdzony i wdrożony już w 1988 roku i przewiduje kolejne etapy prac aż do roku 2020.**

W ramach tej modernizacji trwa budowa bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne o mocy 1075 MW. Jest to największa inwestycja energetyczna w Polsce i będzie największą tego typu jednostką w Europie opalaną węglem kamiennym. Nowy blok ma przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego, spełniając jednocześnie wszystkie normy europejskie związane z emisją dwutlenku węgla, z wszystkimi zanieczyszczeniami oraz wszystkimi ograniczeniami z tytułu wymagań ekologicznych.

Palisander dostarczył systemy szalunkowe do wykonania konstrukcji żelbetowej stropu silosu gipsu EUROSILO. Wewnątrz okrągłego betonowego płaszcza silosu, na wysokości 11 metrów, wybudowano żelbetowy strop. Jako tymczasowe podparcie posłużyły podpory ramowe ID 15 w połączeniu z systemem Rapidshor, podporami MEP oraz systemem Superslim. Do przygotowania okrągłego stropu posłużyły również ułożone pierścieniowo dźwigarki, stanowiące element systemu stropowego PAL 20. Docelowo strop opiera się na okrągłych słupach o średnicy 100 cm i wysokości 9 m, które zostały wykonane z zastosowaniem szalunku słupa PAL-SO.

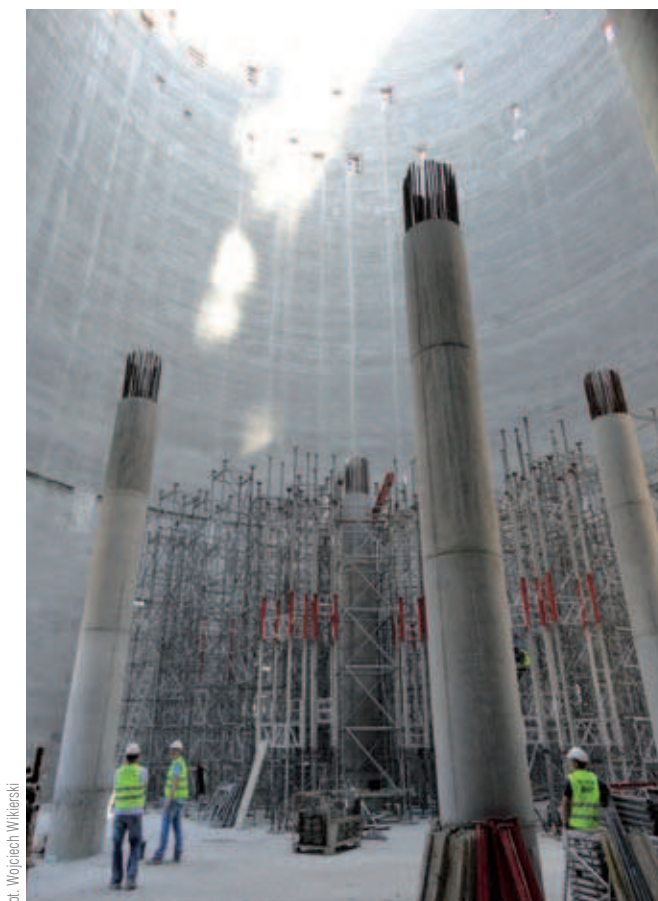


foto: Wojciech Wikerski