

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Stan zakrytyczny i mechanizm zniszczenia zimnoformowanych stalowych belek typu back-to-back poddanych czteropunktowemu zginaniu

Jacek Jankowski¹

¹Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Politechnika Łódzka
email: jacek.jankowski@p.lodz.pl

STRESZCZENIE: Praca dotyczy analizy stanu zakrytycznego stalowych, zimno formowanych belek o różnej grubości ścianki oraz opracowania mechanizmu zniszczenia, na podstawie którego wyznacza się krzywe zniszczenia. Tym samym pełna ścieżka równowagi (siła-ugięcie) jest otrzymana. Analizę przeprowadzono metodą różnic skończonych (ścieżka zakrytyczna równowagi) oraz algorytm numeryczny do wyznaczenia krzywych zniszczenia w programie Mathematica 12.0 i porównano z wynikami z eksperymentu.

SŁOWA KLUCZOWE: słowo, kluczowe, pierwsze, drugie, trzecie

1. Wstęp

Konstrukcje typu back-to-back w ogólnym rozumieniu powstają w wyniku połączenia prostych profili (o podstawowych kształtach) tworząc w ten sposób profil o złożonym kształcie przekroju poprzecznego. Często stosuje się spawanie, zgrzewanie, połączenie nitowe lub śrubowe do stworzenia tego rodzaju konstrukcji. Rozpatrywany profil stalowy o przekroju dwuteowym powstał z dwóch profili o kształcie ceowym z żeberkiem (ang.: lip-channel section) przez ich zgrzewanie punktowe.

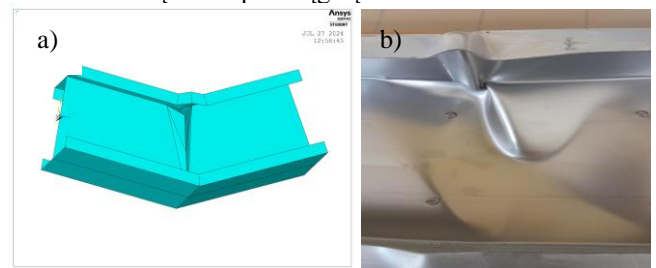
W literaturze światowej są opisywane profile stalowe tego rodzaju. W pracy [1] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń metodą elementów skończonych (FEM) ściskanych słupów back-to-back o przekroju profilu pojedynczego typu sigma. Autorzy wykazali że ich podejście do wyznaczenia nośności jest bardziej dokładne niż określane na podstawie normy AISI-S100. W artykule [2] autorzy wykonali badania eksperymentalne i porównali wyniki badań z wynikami obliczeń przeprowadzonymi przy pomocy programu Ansys w odniesieniu do normy AISI i metody DSM (ang.: Direct Strength Method). Autorzy dowodzą w tym przypadku, że norma i metoda dają miarodajne wyniki obliczeń nośności. W kolejnej pracy [3] omówiono wyniki badań i obliczeń metodą elementów skończonych w aspekcie metody DSM. Autorzy konkludują, że metoda DSM jest zalecana do obliczeń nośności. W pracy badano wpływ wybożenia lokalnego dystorsyjnego oraz sposobu rozmieszczenia śrub na nośność słupa ściskanego stalowego.

2. Obliczenia numeryczne

Metoda różnic skończonych (MRS) zastosowana została do wyznaczenia ścieżki prokrytycznej równowagi (siła-ugięcie). Dyskretyzacji poddano równania równowagi opisujące zachowanie się każdej ze ścian belki, jak również warunki ciągłości w miejscach łączenia ścian oraz warunki

brzegowe. Aby uzyskać zakrytyczną ścieżkę równowagi, tensor odkształceń przyjęto jako nieliniowy (dla dużych przemieszczeń), co skutkuje uzyskaniem wyżej wymienionych równań w postaci nieliniowej. Dyskretyzacja ich daje w rezultacie układ równań algebraicznych nieliniowych, które następnie rozwiązywane są metodą Newtona-Raphsona.

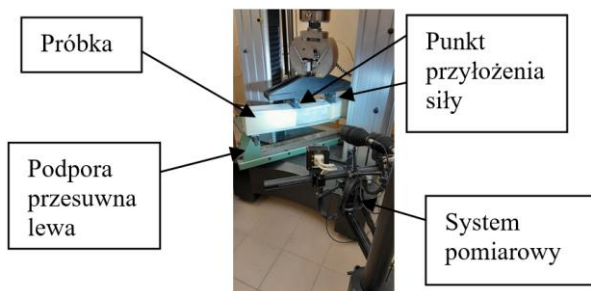
Następnie, aby uzyskać krzywą zniszczenia opisującą zachowanie się belek po osiągnięciu nośności, opracowano mechanizm (zniszczenia typu V, rys. 1a), na podstawie rzeczywistego (rys. 1b). Wykorzystując algorytm numeryczny uzyskano krzywe zniszczenia opisujące zachowanie się belek po osiągnięciu nośności.



Rys. 1 a) założony kształt mechanizmu typu V, b) rzeczywisty kształt mechanizmu zniszczenia

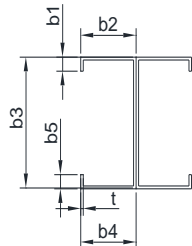
3. Wyniki badań i obliczeń numerycznych

Stanowisko do badań eksperymentalnych przedstawiono na rysunku 2. Stanowisko zostało zrealizowane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu Instron. Maszyna posiada zakres pomiarowy 0-200 kN. Dodatkowo zastosowano system pomiarowy Aramis do pomiaru przemieszczeń w dowolnym punkcie badanej próbki.



Rys. 2 Stanowisko do badań

Kształt i wymiary przekroju poprzecznego przedstawiono na rysunku poniżej (rys. 3).



Rys. 3 Kształt i wymiary przekroju poprzecznego belki

W tabeli (tab.1) poniżej zestawiono stałe materiałowe uzyskane na podstawie próby rozciągania natomiast w tabeli 2 wielkości geometryczne (rys. 3).

Tabela 1. Stałe materiałowe

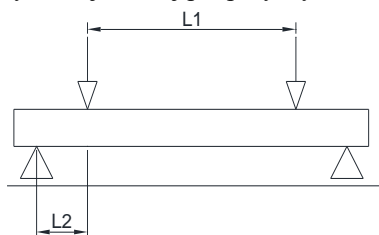
E [MPa]	ν [-]	G [GPa]
192400	0,3	74

Tabela 2. Wielkości geometryczne

$b1$ [mm]	$b2$ [mm]	$b3$ [mm]	$b4$ [mm]	$b5$ [mm]	t [mm]
20	60	120	60	20	1
20	60	120	60	20	1,5

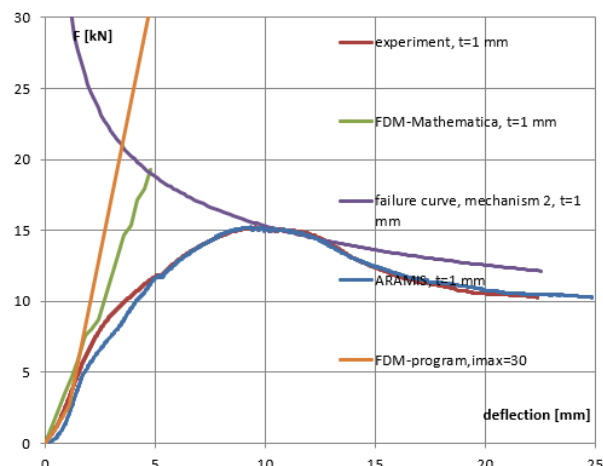
gdzie: $b1, b5$ – szerokość żeberków, $b2, b4$ – szerokość półek, $b3$ – wysokość środników, t – grubość ścianki (blachy)

Odległość między punktami przyłożenia sił wynosi $L1=300$ mm i taka sama odległość ($L2$) jest od punktu przyłożenia siły do najbliższej podpory (rys. 4).

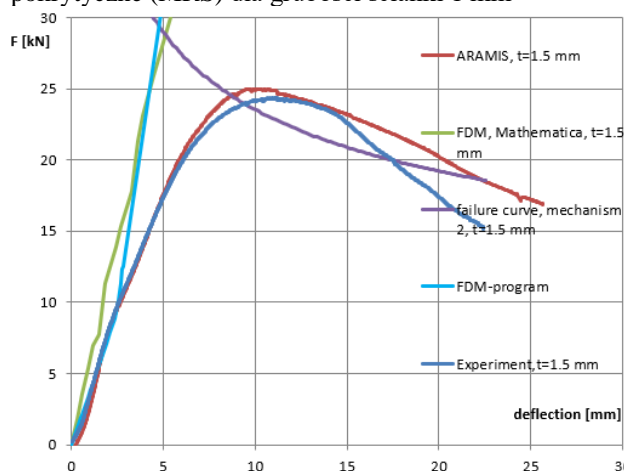


Rys. 4 Schemat obciążenia belki, wymiary

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń przeprowadzono porównanie krzywej eksperymentalnej (otrzymanej przy pomocy systemu Aramis) z krzywą otrzymaną metodą różnic skończonych i krzywą otrzymaną w oparciu o założony model zniszczenia belki poprzez utworzenie się mechanizmu typu V. Krzywe zestawiono i pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5 Krzywe: eksperymentalna, zniszczenia i pokrytyczne (MRS) dla grubości ścianki 1 mm



Rys. 6 Krzywe: eksperymentalna, zniszczenia i pokrytyczne (MRS) dla grubości ścianki 1,5 mm

4. Podsumowanie

W niniejszej pracy rozpatrzono stan dokrytyczny, zakrytyczny i zniszczenia (pełna ścieżka równowagi) belek poddanych czteropunktowemu zginaniu. Krzywą zniszczenia uzyskano zakładając kształt mechanizmu zniszczenia zgodny z rzeczywistym. Pozostałe krzywe otrzymano stosując MRS do równań równowagi, ciągłości i warunków brzegowych. Wyniki obliczeń uzyskano w programie Mathematica 12.0 oraz autorskim programie z użyciem języka programowania Object Pascal.

Na podstawie danych z obliczeń można stwierdzić, że:

- 1) w pewnym zakresie obciążenia, zastosowanie MRS daje zbliżone wyniki obliczeń do wyników z eksperymentu; przy wyższych obciążeniach metoda obliczeń (Newtona-Raphsona) staje się rozbieżna,
- 2) wyniki obliczeń uzyskane z programu komputerowego są bardziej zbieżne w porównaniu do wyników uzyskanych przy pomocy programu Mathematica..

Praca została wykonana w ramach projektu Nr 2019/35/B/ST8/02823, finansowanego przez MNiSW.

Literatura

- [1] Jingjie Y. i in., *Research on the flexural buckling behavior of the cold-formed steel back-to-back built-up columns with Σ -section*, Journal of Steel Construction Research, Vol. 302, 117404, 2024.
- [2] Sivaganesh S., Mahendrakumar M., *Design of cold-formed steel back-to-back connected built-up beams*, Journal of Thin-Walled Structures, Vol. 181, 106623, 2021.
- [3] Son T. V. I in., *Built-up back-to-back cold-formed steel compression members failing by local and distortional buckling*, Journal of Thin-Walled Structures, Vol. 159, 107224, 2021.