

Szymon SWIERCZYNA*

Politechnika Śląska

BADANIA TARCIA W SWORZNIOWYCH 1-CIĘTYCH POŁĄCZENIACH KSZTAŁTOWNIKÓW CIENKOŚCIENNYCH

Streszczenie. W referacie zamieszczono wyniki badań 1-ciętych, sworzniowych połączeń kształtowników cienkościennych, w których występują tarcia posuwiste i obrotowe. Rezultaty dotychczasowych badań porównano na wykresach z czterema ścieżkami równowagi statycznej $M-\phi$ oraz teoretyczną krzywą numeryczną, uzyskanymi na drodze badań połączenia 3-sworzniowego.

INVESTIGATIONS OF FRICTION IN SINGLE-CUT BLIND BOLT JOINTS OF THIN-WALLED STEEL SECTIONS

Summary. The paper provides the results of investigations of single-cut blind bolt joints of thin-walled steel sections, in which sliding friction and journal friction do occur. Results of tests were compared in diagrams with four path of static equilibrium $M-\phi$ and theoretical numerical curve, obtained by investigating a 3-bolt joint.

1. Wprowadzenie

Konieczność uwzględnienia wpływu sztywności połączeń na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji oraz jej ogólny stan deformacji, jest wymogiem norm europejskich [1, 2]. Przeprowadzone dotychczas badania 1-ciętych połączeń kształtowników giętych na zimno, wykonanych za pomocą sworzni jednostronnych typu BOM [3], wskazują na złożony charakter zjawisk, które należy uwzględnić, aby prawidłowo ten wpływ ocenić [4]. Wynika to m.in. z dużej odkształcalności cienkich ścianek łączonych elementów w sąsiedztwie łączników, tj. owalizacji, przechylania się łącznika w otworach, a także konstrukcji dwumateriałowego łącznika składającego się z trzpienia i tulei.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Walter Wuwer, prof. w Politechnice Śląskiej.

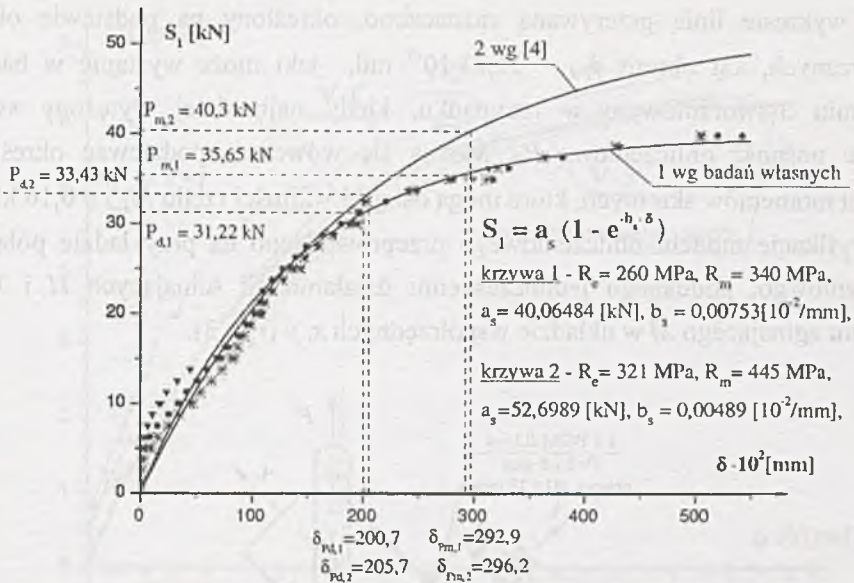
Przedstawiony w [4] model analityczny obliczania dowolnego połączenia 1-ciętego, uwzględniający tarcie posuwiste istniejące między łączonymi ściankami, został zweryfikowany doświadczalnie w badaniach równocześnie zginanych i ścinanych połączeń 4- i 5-sworzniowych, wewnętrznie, statycznie niewyznaczalnych. Przekonano się, że rzeczywista sztywność połączeń jest wówczas o kilkanaście procent wyższa od sztywności wynikającej z obliczeń numerycznych, uwzględniających jedynie wpływ tarcia posuwistego, szczególnie przy większych wartościach sił wewnętrznych w połączeniu. Jedną z przyczyn tych różnic może być pominięcie w modelu obliczeniowym tarcia obrotowego powstającego w osi każdego sworznia, w złożonym stanie obciążenia badanych połączeń.

2. Badania doświadczalne

Nośności obliczeniowe łączników ustalono statystycznie, zgodnie z wytycznymi europejskimi [5], na podstawie wyników badania pięciu jednakowych, osiowo rozciąganych elementów próbnych z połączeniami 2-sworzniowymi [6]. Uzyskano równanie konstytutywne w postaci zmieniającej się nieliniowo zależności łączącej obciążenie siłą ścinającą S_1 pojedynczego sworznia z wzajemnym przemieszczeniem δ łączonych ścianek. Badania przeprowadzane były dotychczas na kształtownikach nieocynkowanych, przewiduje się jednak, jako niezbędne, wykonanie analogicznych badań z zastosowaniem kształtowników ocynkowanych.

Wyniki w postaci krzywych zależności S_1 - δ dla elementów próbnych o grubości ścianki 4,0 mm, wykonanych ze stali o dwóch różnych wartościach granicy plastyczności R_e , przedstawiono na wykresie (rys. 1), na który naniesiono również wartości nośności obliczeniowej P_d i granicznej P_m sworzni wraz z odpowiadającymi im przemieszczeniami δ . Krzywe 1 i 2 uwzględniają jedynie tarcie posuwiste, występujące w sąsiedztwie łączników.

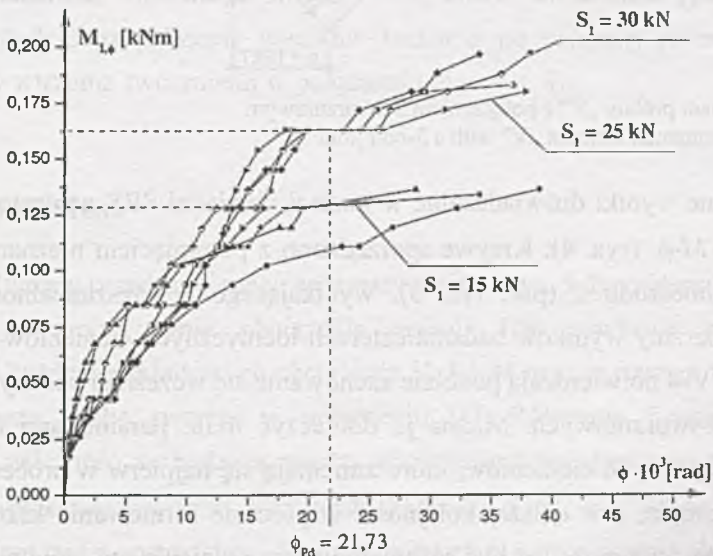
Tarcie obrotowe, występujące w równocześnie ścinanych i zginanych połączeniach, badano na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, które pozwala na obciążanie połączenia 1-sworzniowego jednocześnie siłą ścinającą S_1 i momentem skrętnym $M_{1,\phi}$. Stanowisko badawcze i przebieg badania opisano szerzej w [7].



Rys. 1. Wynikowe krzywe zależności S_1 - δ , przy łączeniu ścianek o grubości 4,0 mm, wykonanych ze stali o różnych wartościach granicy plastyczności R_e .

Fig. 1. Resulting curves of the relation S_1 - δ when joining walls, 4,0 mm thick, made of steel with various values of the yield point R_e .

Wyniki w postaci obwiedni ścieżek równowagi statycznej zależności moment skrętny $M_{1,\phi}$ -wzajemny kąt obrotu ϕ łączonych blach, przy różnych wartościach siły ścinającej S_1 , przedstawia wykres na rys. 2.

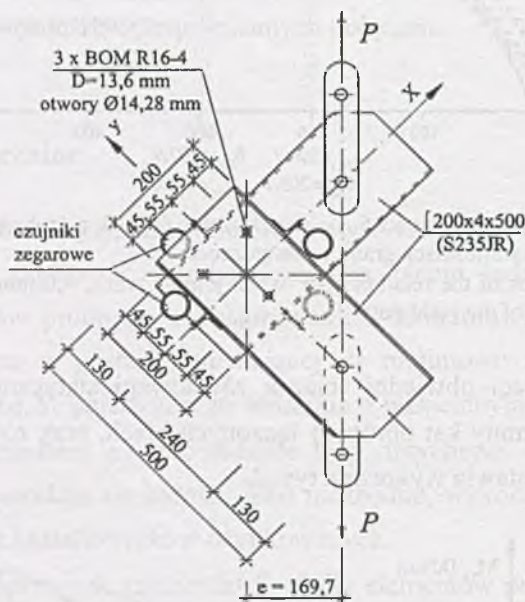


Rys. 2. Obwiednie ścieżek równowagi statycznej $M_{1,\phi}$ - ϕ

Fig. 2. Envelope curves of the paths of static equilibrium $M_{1,\phi}$ - ϕ

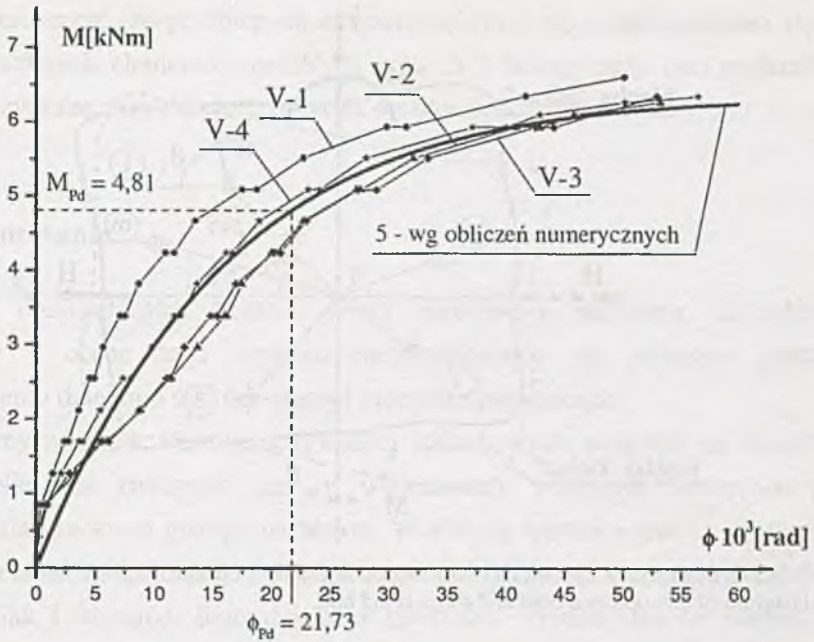
Na wykresie linią przerywaną zaznaczono, określony na podstawie obliczeń numerycznych, kąt obrotu $\phi_{pd} = 21,73 \cdot 10^{-3}$ rad, jaki może wystąpić w badanym połączeniu 3-sworzniowym w przypadku, kiedy najbardziej wyteżony sworzeń osiągnie nośność obliczeniową P_d . Można się wówczas spodziewać określonych wartości momentów skrętnych, które mogą osiągać wartości rzędu $M_{1,\phi} = 0,16$ kNm.

Weryfikację modelu obliczeniowego przeprowadzono na przykładzie połączenia 3-sworzniowego, poddanego jednoczesnemu działaniu sił ścinających H i V oraz momentu zginającego M w układzie współrzędnych x, y (rys. 3).



Rys. 3. Element próbny „V” z połączeniem 3-sworzniowym
Fig. 3. Experimental element „V” with a 3-bolt joint

Uzyskane wyniki doświadczalne w postaci obwiedni ŚRS naniesiono na wykresy zależności $M-\phi$ (rys. 4). Krzywe sporządzono z pominięciem nieznacznego wpływu zmiany mimośrodu e (por. rys. 3), wynikającego z odkształcalności połączenia. Znaczne rozrzuty wyników badania czterech identycznych elementów próbnych V-1, V-2, V-3 i V-4 potwierdzają podobne zachowanie się wcześniej badanych połączeń 2-, 4-, 5-, i 8-sworzniowych. Można je tłumaczyć m.in. parametrami mechanicznymi materiału łączonych elementów, które zmieniają się najpierw w procesie walcowania blach na gorąco, a w dalszej kolejności w procesie formowania kształtowników na zimno. Przyczyną może też być różny stopień wypełnienia otworów na łączniki przez materiał tulei sworzni w trakcie mechanicznego wykonywania połączenia, co może pociągać za sobą określone różnice jego sztywności.



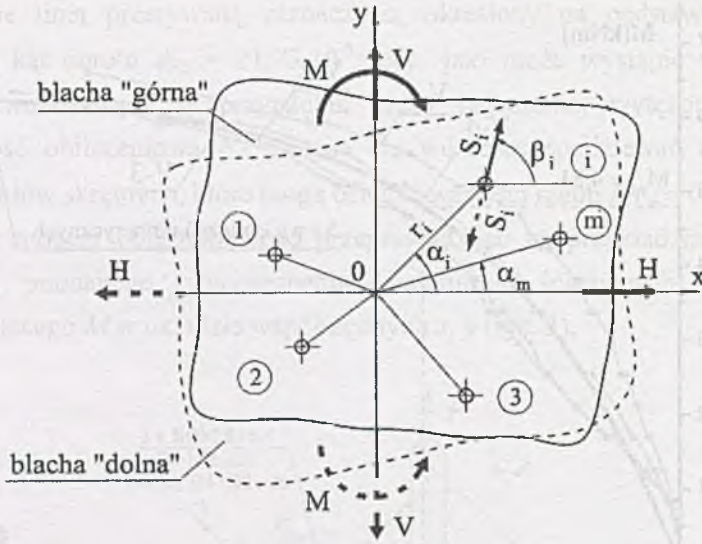
Rys. 4. Obwiednie ścieżek równowagi statycznej $M-\phi$ połączenia 3-sworzniowego w elemencie próbnym „V”

Fig. 4. Envelope curves of the paths of static equilibrium $M-\phi$ of a 3-bolt joint in the experimental element „V”

Zwraca uwagę fakt, iż w przedziale dopuszczalnych, normowych obciążeń połączenia, tj. gdy $M < M_{Pd} = 4,81$ kNm oraz $\phi < \phi_{Pd} = 21,73 \cdot 10^{-3}$ rad, kąty obrotu różnią się w badanych elementach między sobą nawet dwukrotnie (por. rys. 4). Celowe więc będzie uzupełnienie wyników badań o co najmniej jeden taki sam element próbny z trzema sworzniami w połączeniu (por. rys. 3).

3. Badania analityczne

Model analityczny przedstawiono schematycznie na rys. 5 dowolnego połączenia I-ciętego w złożonym stanie obciążenia opisują trzy równania równowagi, odpowiadające każdej ze składowych obciążenia H , V i M , oraz m równań fizycznych, gdzie m oznacza liczbę sworzni w połączeniu [4]. Równania fizyczne ujmują doświadczalną zależność zachodzącą między obciążeniem pojedynczego sworznia S_i a wzajemnym przemieszczeniem łączonych ścianek δ_i w osi i -tego sworznia, z uwzględnieniem tarcia posuwistego, lecz z pominięciem wpływu tarcia obrotowego.



Rys. 5. Schemat dowolnego, zginanego i ścinanego połączenia 1-ciętego
 Fig. 5. Diagram of any optional bent and shorn blind bolt

Zakładając, że obie blachy są sztywnymi tarczami o tych samych parametrach materiałowych i tej samej grubości, warunki równowagi przyjmują postać:

$$H - \sum_{i=1}^m S_i \cdot \cos(\beta_i - \pi) = 0, \quad (1)$$

$$V - \sum_{i=1}^m S_i \cdot \sin(\beta_i - \pi) = 0, \quad (2)$$

$$M + \sum_{i=1}^m S_i \cdot \sin(\beta_i - \pi) \cdot r_i \cdot \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^m S_i \cdot \cos(\beta_i - \pi) \cdot r_i \cdot \sin \alpha_i = 0, \quad (3)$$

natomiast równania fizyczne, wyrażające zależność między obciążeniami łączników i wzajemnymi przemieszczeniami całkowitymi blach, przyjmują postać:

$$\delta_i = f(S_i), \quad (4)$$

gdzie $f(S_i)$ oznacza przemieszczenie i -tego sworznia zależne od siły wypadkowej S_i , będące funkcją odwrotną do funkcji wykładniczej na rys. 1, opisującej daną krzywą wynikową.

Rozwiązanie analityczne układu równań (1)÷(4) sformułowanych dla połączenia 3-sworzniowego ilustruje krzywa numeryczna 5 na wykresie $M-\phi$ (por. rys. 4), uzyskana przy wykorzystaniu programu *Mathematica* (obliczenia wykonał Dr hab. inż. Ryszard Walentyński, prof. w Politechnice Śląskiej w Katedrze Teorii Konstrukcji Budowlanych).

Warto zauważyć, że przebieg tej krzywej pokrywa się z zachowaniem się tylko jednego z czterech elementów próbných typu „V”. Należy przy tym podkreślić, że krzywą 5 uzyskano przy pominięciu tarcia obrotowego.

4. Podsumowanie

Wyniki doświadczalne badania tarcia obrotowego wskazują, iż celowe są rozważanie i ocena tego wpływu na zachowanie się połączeń poddanych jednoczesnemu działaniu siły ścinającej i momentu zginającego.

Przyczyny rozrzutu wartości sztywności jednakowych połączeń są niewątpliwie złożone. Nie bez znaczenia jest tu wspomniany wcześniej 2-etapowy proces kształtowania przekroju giętego na zimno. W efekcie wartości granicy plastyczności materiału ścianek mogą zależeć zarówno od miejsca przyłożenia obciążenia (położenia łącznika), jak i kierunku jego działania (kierunku wypadkowej sił obciążających łączniki).

Konieczne jest również uwzględnienie w charakterystykach podatności rozważanych połączeń wpływu obciążeń naprzemiennych, z którymi mamy do czynienia w konstrukcjach budowlanych.

Wyniki doświadczalne i analityczne wskazują na potrzebę dalszych badań w kierunku oceny wpływu tarcia obrotowego i innych przyczyn rozrzutu mierzonych wielkości. Zamierza się badać wpływ tarcia również na przykładzie połączenia 2-sworzniowego, znajdującego się w złożonym stanie obciążenia, które jest rozwiązaniem praktycznym, często stosowanym w prętowych konstrukcjach cienkościennych.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 1993-1-1: 2006 „Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków”.
2. PN-EN 1993-1-8: 2006 „Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów”.
3. Sworznie typu Huck do wykonywania połączeń elementów konstrukcji metalowych. Aprobata Techniczna Instytutu Techniki Budowlanej, nr AT-15-3487/99.

4. Wuwer W.: Podatne połączenia na sworznie jednostronne w prętowych konstrukcjach cienkościennych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo, z. 105, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
5. Recommendations for Steel Construction, ECCS-TC7: The Design and Testing of Connections in Steel Sheeting and Sections. Constrado, No. 21, 1990.
6. Wuwer W., Swierczyna S.: Tarcie w sworzniowych I-ciętych połączeniach ścianek kształtowników giętych na zimno. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, s. Budownictwo (referat przyjęty na IX Konferencję Naukową pt. „Połączenia i Węzły w Konstrukcjach Metalowych i Zespolonych”, Rzeszów-Bezmiechowa).
7. Swierczyna S.: Badanie tarcia obrotowego w połączeniach jednociętych na sworznie jednostronne. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo, z. 112, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, s. 397-404.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bronisław Gosowski