

Comparison of the open and closed profile in the PVC profiles of a window frame

Porównanie profilu otwartego i zamkniętego w profilach PVC ramy okiennej

EDWARD REJMAN
PAWEŁ BAŁON
BARTŁOMIEJ KIEŁBASA
ROBERT SMUSZ *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.7.9>

Contemporary window joinery mainly uses polyvinyl chloride (PVC) for the production of windows, which has good durability and thermal properties, but relatively low stiffness. The first two features mean that when the windows are exposed to large temperature changes, there are significant displacements of the window elements, which with the complex form of the window structure leads to significant deformations, and thus loss of tightness. In order to minimize these effects, specially adapted open steel sections with a minimum thickness of 1.5 mm are placed in the main chambers of window profiles, which, according to the designers' assumptions, is to increase the stiffness of the window. The authors conducted research on the possibility of closing an open profile in order to increase its bending and torsional stiffness. This solution allowed to significantly increase the stiffness of the windows, and thus reduce their susceptibility to torsional and bending deformations, which has a positive effect on maintaining tightness and eliminating thermal bridges.

KEYWORDS: torsional stiffness, bending stiffness, window frames, PVC profiles

We współczesnej stolarce okiennej do produkcji okien wykorzystuje się przede wszystkim polichlorek winylu (PVC) charakteryzujący się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i termicznymi, ale stosunkowo małą sztywnością. Te dwie pierwsze cechy sprawiają, że przy dużych zmianach temperatury, na jakie narażone są okna, występują znaczne przemieszczenia elementów okna, co przy złożonej formie konstrukcji prowadzi do znaczących odkształceń i utraty szczelności. W celu minimalizacji tych efektów w głównych komorach profili okiennych umieszcza się specjalnie dopasowane kształtowniki stalowe otwarte o grubości blachy co najmniej 1,5 mm, co w myśl założeń konstruktorów ma zwiększać sztywność okien. Autorzy przeprowadzili badania możliwości zamknięcia profilu otwartego, aby zwiększyć jego sztywność giętną i skrętną. Takie rozwiązanie pozwoliło na znaczne zwiększenie sztywności okien, a co za tym idzie zmniejszenie ich podatności na deformacje skrętne i giętne, co wpływa na zachowanie szczelności i likwidację mostków cieplnych.

SŁOWA KLUCZOWE: sztywność giętna, sztywność skrętna, profile okienne, profile PVC

Wprowadzenie

Obliczenia wytrzymałościowe cienkościennych profili otwartych poddanych swobodnemu skręcaniu przeprowadza się przy założeniu upraszczającym, że przekrój poprzeczny pręta składa się z prostokątów o szerokości a zdecydowanie większej od grubości t . Ponadto dla skręcanych ustrojów cienkościennych o złożonych kształtach przekroju poprzecznego obliczenia przeprowadza się w ten sposób, że przekrój poprzeczny dzieli się na prostokąty o grubość t_i oraz długości a_i (wzdłuż średniej linii konturu), przy czym nie ma znaczenia, czy oś prostokąta jest linią prostą, czy zakrzywioną (rys. 1). Przyjmuje się również założenie, że kąt skręcenia całego pręta jest równy kątowi skręcenia każdej z części pręta odpowiadającej danemu prostokątowi, a moment skręcający przenoszony przez cały pręt jest równy sumie algebraicznej momentów przenoszonych przez poszczególne prostokąty.

Moment skręcający dla profilu złożonego M_s jest równy sumie momentów:

$$M_s = M_{s0} + M_{sz} \quad (1)$$

gdzie: M_s – moment skręcający dla profilu złożonego [Nm], M_{s0} – moment skręcający profilu otwartego [Nm], M_{sz} – moment skręcający profilu zamkniętego [Nm].

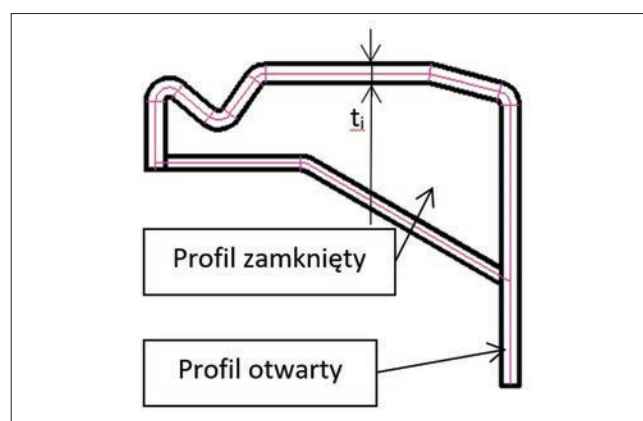


Fig. 1. Complex profile (closed and open)
Rys. 1. Profil złożony (zamknięty i otwarty)

* Dr inż. Edward Rejman – erejman@prz.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4716-7613> – Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland; F.H.U. ATUT Marek i Alicja Janeczek Sp. J., Mielec, Poland
Dr inż. Paweł Bałon – balonpawel@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3136-7908> – F.H.U. ATUT Marek i Alicja Janeczek Sp. J., Mielec, Poland; AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland
Mgr inż. Bartłomiej Kięlbasa – bartek.kielbasa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3116-2251> – F.H.U. ATUT Marek i Alicja Janeczek Sp. J., Mielec, Poland
Dr hab. inż. Robert Smusz – robsmusz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7369-1162> – Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland; F.H.U. ATUT Marek i Alicja Janeczek Sp. J., Mielec, Poland

Kąt skręcenia profilu złożonego jest równy kątowi skręcenia profilu zamkniętego i otwartego:

$$\theta = \theta_o = \theta_z \quad (2)$$

gdzie: θ – kąt skręcenia profilu złożonego, θ_o – kąt skręcenia profilu otwartego, θ_z – kąt skręcenia profilu zamkniętego. Na tej podstawie uzyskuje się zależność:

$$\frac{M_s}{C} = \frac{M_{so}}{C_o} = \frac{M_{sz}}{C_z} \quad (3)$$

gdzie: C – sztywność profilu złożonego, C_o – sztywność profilu otwartego, C_z – sztywność profilu zamkniętego.

Całkowita sztywność jest sumą sztywności składowych:

$$C = C_o + C_z \quad (4)$$

Następnie otrzymuje się zależność na sztywność profilu złożonego:

$$C = \frac{1}{3} \cdot G \cdot \sum_{i=1}^N a_i \cdot (t_i)^3 + 4 \cdot \frac{G \cdot (\int dA)^2}{\oint \frac{ds}{t}} \quad (5)$$

gdzie: G – moduł Kirchhoffa, a_i – długości ścianek przekroju pręta, t_i – grubości ścianek przekroju pręta.

Dla profilu otwartego zależność na moment skręcający jest równa:

$$\frac{M_{so}}{M_s} = \frac{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^N a_i \cdot (t_i)^3}{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^N a_i \cdot (t_i)^3 + 4 \cdot \frac{(\int dA)^2}{\oint \frac{ds}{t}}} \quad (6)$$

Z kolei wyrażenie na moment skręcający przyjmuje postać:

$$\frac{M_{sz}}{M_s} = 1 - \frac{M_{so}}{M_s} \quad (7)$$

Na tej podstawie można określić maksymalne naprężenia ścinające.

$$\frac{\tau_{\max,o}}{M_{so}} = \frac{t_{\max}}{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^N a_i \cdot (t_i)^3} \quad (8)$$

$$\frac{\tau_{\max,z}}{M_{sz}} = \frac{1}{2 \cdot t_{\min} \cdot \int dA} \quad (9)$$

gdzie: $\tau_{\max,o}$ – maksymalne naprężenia styczne dla profilu otwartego, $\tau_{\max,z}$ – maksymalne naprężenia styczne dla profilu zamkniętego.

Jako wartość wymiarującą ustrój należy przyjąć wartość większą:

$$\tau_{\max} = \max(\tau_{\max,z}, \tau_{\max,o}) \quad (10)$$

Badania w zakresie zamknięcia profilu

W celu zamknięcia profilu otwartego przeprowadzono badania i testy. Wykonano po 8 sztuk gotowego profilu. Kształtownik uzupełniający zagięto do kąta 30° (rys. 2).

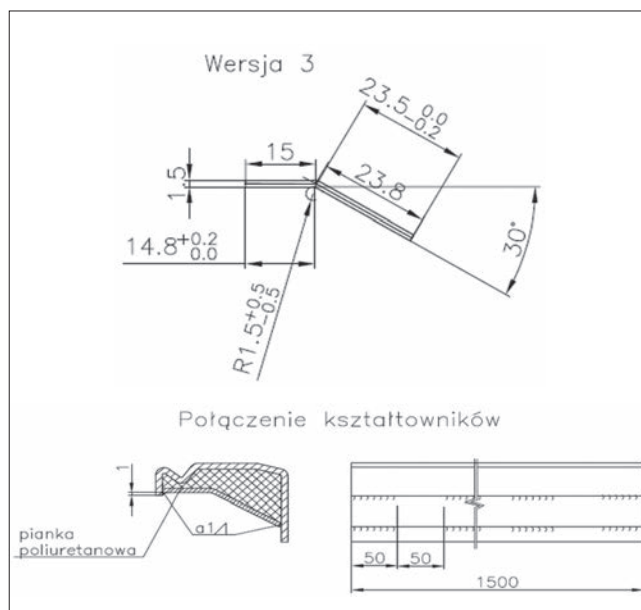


Fig. 2. Drawing of the bending of the reinforcing profile and the method of its joining

Rys. 2. Rysunek wykonania gięcia profilu wzmacniającego oraz sposób jego połączenia

Przewidziano materiał typu DP600, należący do stali UHSS/AHSS, który zapewnia wysoką wytrzymałość w zastosowaniu na elementy konstrukcyjne, ale jednocześnie jest trudny do obróbki plastycznej, np. formowania i gięcia. Do badań użyto stali DP600 o grubości 1,5 mm, składzie chemicznym podanym w tabl. I i właściwościach mechanicznych zawartych w tabl. II. Stale DP mają niewielką ilość składników stopowych i małą wartość równoważnika węgla $CEV=0,23$ (w porównaniu ze stalami o takiej samej wytrzymałości), dzięki temu mogą być łatwo spawane ze wszystkimi stalami stopowymi, zwykłymi stalami konstrukcyjnymi z użyciem konwencjonalnych metod spawania łukowego. Stale DP mogą być spawane podobnymi energiami liniowymi jak inne stale o podwyższonej wytrzymałości.

TABLE I. Chemical composition of DP600 steel
TABLICA I. Skład chemiczny stali DP600

Stal	C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, % max	Cr, % max	Al, % max
Dogal 600 DP	0,120	0,300	1,660	0,020	0,004	0,500	0,020

TABLE II. Mechanical properties of DP600 steel
TABLICA II. Właściwości mechaniczne stali DP600

Stal	$R_{p0.2}$, MPa min-max	R_m , MPa min-max	A, % min
Dogal 600 DP	350÷480	600÷700	16

Badania dotyczyły spawania spoiną w osłonie gazu obojętnego (argonu) metodą TIG w sposób ciągły oraz miejscowy w określonej odległości samej spoiny oraz separacji pomiędzy jedną a kolejną spoiną. Zastosowano spawanie ręczne oraz zrobotyzowane stanowisko badawcze w celu sprawdzenia wydajności metody. Badania w zakresie zamknięcia profilu otwartego miały na celu weryfikację możliwości montażu profilu zamkniętego (poprzez spawanie profilu otwartego)



Fig. 3. The finished profile after forming process and spot welding
Rys. 3. Gotowy profil po procesie formowania i spawania punktowego

w profilu ramy okiennicy. Istotna jest stabilizacja procesu spawania w celu eliminacji ewentualnych wypływek i minimalizacji wielkości spoiny (wysokości).

Spawano drutem G3Si1 o średnicy $\varnothing 1$ mm w osłonie gazu M21 (82% Ar i 18% CO_2) o natężeniu przepływu 12 l/min. Długość wolnego wylotu drutu wynosiła 10 mm, a pochylenie uchwytu 10° w kierunku przeciwnym do kierunku spawania. Próbkę mocowano w przyrządzie z zaciskami dźwigniowymi. Spawano bez podkładki. Wstępnie przyjęte parametry spawania zweryfikowano na podstawie wykonanych spoin przedstawionych na rys. 3. Spoiny wykonano z zastosowaniem łuku konwencjonalnego o natężeniu prądu 75 A i zmiennych prędkościach spawania od 40 do 60 cm/min (odpowiednia energia liniowa wynosiła 1,15; 1,38 i 1,72 kJ/mm) oraz z użyciem łuku pulsującego o natężeniu średnim 84 A i prędkości spawania 50 cm/min, co odpowiadało energii liniowej 1,79 kJ/mm. Na podstawie przeprowadzonej oceny jakości spoin wybrano do wykonania złączy próbnych spawanie łukiem konwencjonalnym z prędkością 40 cm/min oraz spawanie łukiem pulsującym z prędkością 50 cm/min. Złącza próbne wykonano na podstawie opracowanych instrukcji technologicznych spawania.

Parametry spawania umożliwiły wykonanie złączy doczołowych ze swobodnym formowaniem grani przy szczelinach w rowku spawalniczym do 0,5 mm. Jakość spoin oceniana wizualnie spełniała wymagania wymiarów granicznych dla poziomu B według



Fig. 4. The finished profile after forming process and spot welding which measurement 2000 mm
Rys. 4. Gotowy profil po procesie formowania i spawania punktowego o długości 2000 mm

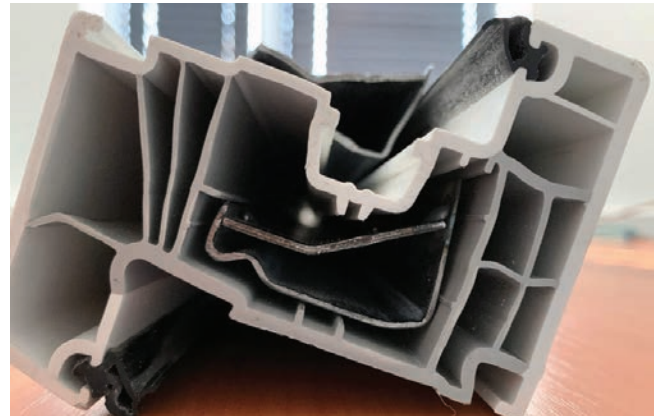


Fig. 5. The finished profile after forming process and spot welding, assembled in the PVC profile of the window
Rys. 5. Gotowy profil po procesie formowania i spawania punktowego zamontowany w profilu PVC okna

PN-EN ISO 5817. Spawanie metodą TIG stali wysoko-wytrzymałej DP600 spoiwem G3Si1 zapewnia wytrzymałość złączy doczołowych na rozciąganie na poziomie 560 MPa. Do wykonywania złączy doczołowych wskazane byłoby stosowanie spoiwa o wyższej granicy plastyczności, np. spoiwa AWS: A5.28 ER 10XS-X zalecanego przez producenta stali. Spoiwo G3Si1 może nadawać się natomiast do złączy ze spoinami pachwinowymi, np. złączy zakładkowych, których wytrzymałość można regulować przekrojem spoiny.

Wyniki badań eksperymentalnych

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych dla poszczególnych kształtowników (otwartych i zamkniętych) wyznaczono charakterystyki sztywnościowe i zależności kąta skręcenia pręta θ

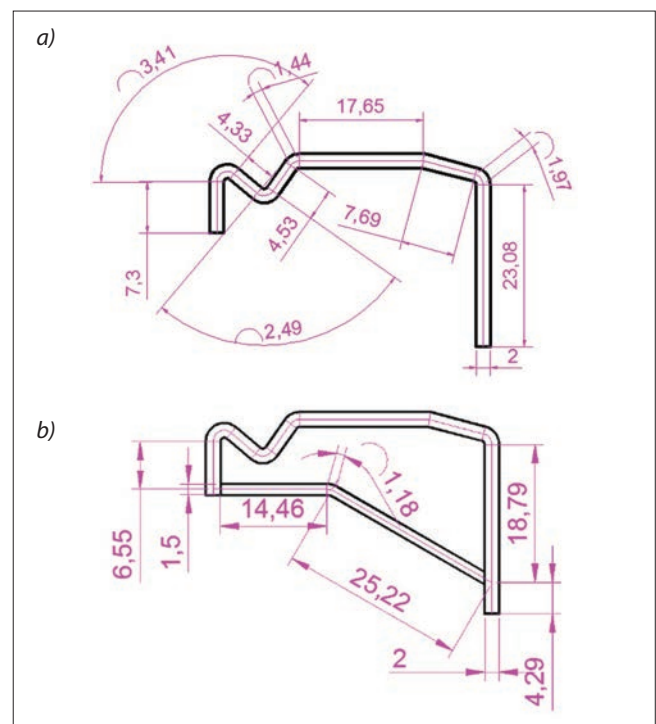


Fig. 6. Geometry of the tested profiles: a) open profile, b) closed profile
Rys. 6. Geometria badanych profili: a) profil otwarty, b) profil zamknięty

od momentu skręcającego M_s . Do wszystkich badań porównawczych stosowano pręty o długości skręcanej równej 1 m z wykorzystaniem specjalnego stanowiska badawczego, które w sposób precyzyjny pozwalało na weryfikację momentu skręcenia. Wykresy skręcania oraz uzyskane wartości maksymalnej sztywności pokazano na rys. 6. Wyznaczone wartości to odpowiednio:

- dla profilu otwartego:

$$\frac{\tau_{max}}{M_s} = 10,15 \left[\frac{MPa}{N \cdot m} \right] \text{ i } C = 15,91 \left[\frac{N \cdot m}{rad} \right]$$

- dla profilu zamkniętego:

$$\frac{\tau_{max}}{M_s} = 0,726 \left[\frac{MPa}{N \cdot m} \right] \text{ i } C = 1103,1 \left[\frac{N \cdot m}{rad} \right]$$

Wnioski

Badania wykazały, że w konstrukcji okien wykonanych z PVC w celu zwiększenia ich sztywności skrętnej i giętej powinny być stosowane wyłącznie kształtowniki zamknięte, które znacznie zwiększają sztywność całego profilu okna. W wyniku prac badawczych wykonano prototyp profilu wzmocnienia standardowego – otwartego oraz eksperymentalnego zamkniętego. W analizie eksperymentalnej na stanowisku badawczym do skręcania profili uzyskano wiarygodne wyniki badań. Istotne okazało się zamknięcie profilu poprzez dospawanie części wykonanej z materiału DP600, co spowodowało niemal 70-krotne zwiększenie sztywności w stosunku do standardowego profilu otwartego. Należy stwierdzić, że obecne konstrukcje stolarki okiennej nie są dość sztywne ze względu na powszechne stosowanie profili otwartych.

Acknowledgements/Podziękowania

Artykuł powstał w ramach projektu nr RPPK.01.02.00-18-0033/18-00 pn. „Opracowanie i wdrożenie do produkcji innowacyjnej konstrukcji okna minimalizującej liniowe mostki termiczne wraz ze zwiększoną odpornością na odkształcenia mechaniczne”, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

- [1] Bergstrom M., Bronnestam U., Gustafsson M., Ingvarsson L., Setter L. „*Sheet Steel Handbook – Design and fabrication in high strength steel*”. SSAB Tunnplant AB, Borlange, Sweden (1996), 5:12-5:27.
- [2] Brzoska Z. „*Statyka i stateczność konstrukcji prętowych i cienkościennych*”. Warszawa: PWN (1965).
- [3] PN-88/B-10085/A2, „Stolarka budowlana. Okna i drzwi. Wymagania i badania”.
- [4] BN-75/7150-03, „Okna i drzwi balkonowe drewniane. Metody badań”.
- [5] „Podręcznik praktyka” nr 6. „Dział doradztwa dla architektów”. GEALAN (2004).
- [6] Kopecki T., „*Stany zaawansowanych deformacji w projektowaniu cienkościennych ustrojów nośnych*”. Rzeszów: Oficyna wydawnicza PRz (2010). ■