

Zastosowanie metody numerycznej do wyznaczenia ugięcia profilu aluminiowego o nieregularnym kształcie

PAWEŁ LONKWIC, IRENEUSZ USYDUS, ARKADIUSZ TOFIL *

Streszczenie: Jakość oraz cechy użytkowe produktu zależą bezpośrednio od warunków parametrów procesu wytwarzania. Wpływ na nią mają także działania w fazie poprzedzającej – projektowaniu. W artykule przedstawiono wyniki badań własnych ugięcia profili aluminiowych o regularnych kształtach wykonanych z aluminium typu AW-6060. Dokonano porównania wyników otrzymanych na drodze eksperymentu oraz na drodze analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dobrano model numeryczny, który został wykorzystany do wyznaczenia ugięcia profilu o kształcie nieregularnym. Opracowany model numeryczny został zweryfikowany na stanowisku eksperymentalnym. Dla profilu o kształcie nieregularnym osiągnięto dopasowanie modelu numerycznego na poziomie 99,077%.

Słowa kluczowe: MES, profil konstrukcyjny, ugięcie, Solid Works

Wstęp

Wykorzystanie profili aluminiowych w przemyśle staje się coraz częstsze z uwagi na kilka zalet, z których najistotniejsze to:

- profile aluminiowe posiadają mniejszą masę jednostkową niż profile stalowe,
- to tworzywo konstrukcyjne jest bardzo dobrze obrabialne,
- złożony kształt profili aluminiowych generuje mniejsze koszty wytworzenia niż w przypadku profili stalowych,
- uzyskanie różnej kolorystyki poprzez proces anodowania daje trwalszą powłokę niż proces lakierowania proszkowego, chociaż w tym drugim przypadku można uzyskać większą gamę kolorystyczną.

Ważnym zagadnieniem konstrukcyjnym jest określenie wytrzymałości oraz sztywności konstrukcji wykonanych z profili aluminiowych, które w porównaniu do konstrukcji wykonanych z profili stalowych charakteryzują się mniejszymi wartościami wskaźników. Dobierając przekrój profilu aluminiowego do konstrukcji ważnym aspektem jest sprawdzenie jego wytrzymałości oraz strzałki ugięcia przy zadanych warunkach obciążenia po to, aby w czasie eksploatacji nie występowały niekontrolowane zdarzenia takie jak: nadmierne ugięcie, skręcenie, trwała deformacja lub pęknięcia. W celu stwierdzenia czy zaprojektowany profil jest właściwy pod kątem bezpieczeństwa, już we wstępnej fazie analizy do obliczenia wskaźników wytrzymałości, jako komputerowe narzędzie analityczne stosuje metodę elementów skończonych (MES). Taka procedura ma kilka zalet, m.in.:

- zmniejsza czas potrzebny do wykonania zmian konstrukcyjnych na etapie modelowania;
- redukuje czas oraz koszty potrzebne na drogą produkcję prototypową;
- nie generuje kosztów związanych z przeróbkami wynikającymi ze zmian konstrukcyjnych.

Autorzy w swoich opracowaniach często opisują wykorzystanie MES jako narzędzia analitycznego pozwalającego na sprawdzenie lub optymalizację konstrukcji. W opracowaniu [3] autorzy wykorzystali metodę MES do analizy konstrukcji ramy naczepy o zmiennej długości i zwiększonej nośności przeznaczonej do transportu ładunków ponadnormatywnych. W wyniku przeprowadzonych prac analitycznych ustalono newralgiczne obszary, w których występowały niebezpieczne naprężenia co z kolei umożliwiło modyfikację konstrukcji i pozwoliło na zmniejszenie naprężeń do bezpiecznego poziomu.

* Dr inż. Paweł Lonkwic, mgr inż. Ireneusz Usydus, mgr inż. Arkadiusz Tofil, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie, ul. Pocztowa 54, 22-100 Chełm, Poland, e-mail: plonkwic@gmail.com

W publikacji [6] zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych procesu hamowania rolki chwytnicy progresywnego nowego typu CHP 2000. Zastosowanym narzędziem numerycznym był komercyjny pakiet do obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych – program ABAQUS. Na podstawie przeprowadzonych analiz uzyskano wyniki symulacyjne zbieżne z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentu. W publikacji [8] przedstawiono wyniki symulacji MES C-kształtnej ramy urządzenia do montażu połączeń konstrukcji blaszanych. Podczas analizy wytrzymałości materiału ramy wzięto pod uwagę kilka wariantów wykonania jej geometrii, uwzględniając zmniejszenie masy. Do tak postawionego zadania autorzy użyli programu ABAQUS umożliwiającego ilościową i jakościową ocenę wytrzymałości materiału ramy. W kolejnej publikacji [1] wykorzystano metodę elementów skończonych do modelowania sposobów zwiększenia sztywności paneli wykonanych z tytanu poprzez zastosowanie usztywniaczy w kształcie krzyża. Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu PamStamp 2G w oparciu o metodę elementów skończonych. Podstawowe właściwości mechaniczne i technologiczne analizowanych arkuszy, które są niezbędne do modelowania numerycznego, określono za pomocą statycznych prób rozciągania. W artykule [9] zaprezentowano wyniki badań dotyczących wpływu uderzeń cząstek o nieregularnych kształtach typu żwir w panelach metalowych. Wykonane doświadczenia zostały wykorzystane do opracowania modeli MES procesu. W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano zbieżne wyniki symulacji z eksperymentem. W artykule [7] autorzy zaprezentowali wyniki badań własnych nad wytrzymałością profili aluminiowych oraz drewnianych

stosowanych jako detale składowe kratek osłonowych stosowanych w grzejnikach komercyjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano oceny, który profil wykazuje największą wytrzymałość na zginanie w wyniku obciążenia pochodzącego od poruszających się osób.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej gięcia z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz symulacji na maszynie wytrzymałościowej profili aluminiowych o przekrojach pokazanych na rysunku 1a, 1b, 1d, 1e. Częstym przypadkiem spotykanym w praktyce jest potrzeba wyznaczenia charakterystyki ugięcia profilu o przekroju, dla którego wyliczenie w sposób tradycyjny ugięcia jest dość kłopotliwe z uwagi na trudność wyznaczenia wskaźnika wytrzymałości na zginanie. W przedstawionych rozważaniach profilem takim był profil pokazany na rysunku 1c.

Pokazane na rysunku 1 profile zostały wykonane z aluminium gatunku EN AW-6060 (ISO AlMgSi lub PN – PA38), dla którego własności mechaniczne przedstawiono poniżej [4]:

- moduł Younga $E = 69\,500\text{ MPa}$,
- moduł sprężystości poprzecznej $G = 26\,100\text{ MPa}$,
- liczba Poissona $\nu = 0.33$,
- gęstość materiału $\rho = 2,7\text{ g/cm}^3$,
- wytrzymałość na rozciąganie profili wyciskanych $\sigma_g = 120\text{ MPa}$.

Przedstawione na rysunku 1 profile używane są jako elementy konstrukcyjno-dekoracyjne, które są narażone głównie na obciążenia wynikające z ich bardzo zróżnicowanego użytkowania. Stop aluminium AW-6060 odznacza się średnią

wytrzymałością na rozciąganie i średnią wytrzymałością zmęczeniową. Jest spawalny oraz podatny do anodowania dekoracyjnego. Jest szeroko stosowany do produkcji prętów i profili aluminiowych. Wykazuje się dużą tłocznością, dzięki czemu możliwe jest uzyskiwanie profili o złożonych kształtach. Głównym zastosowaniem profili wykonanych z tego gatunku stopu Al są profile okienne, profile drzwi, elementy ścian. Wykonuje się z niego również elementy wystroju wnętrz, ramki, oświetlenie, drabiny, balustrady, ogrodzenia, radiatory, elementy przyczep i naczep, wyposażenie biurowe, zabudowy samochodów. Z aluminium gatunku AW-6060 oferowane są profile w postaci kształtowników, rur i prętów [4].

Podstawy teoretyczne zginania

Częstym przypadkiem obciążenia podczas eksploatacji elementów wykonanych z analizowanych profili jest zginanie. Naprężenia gnące oraz moment gnący opisane są zależnościami matematycznymi (1), (2) oraz (3).

$$\sigma_g = \frac{M}{W_x} \leq k_g \quad (1)$$

$$M = \frac{P \cdot l}{2} \quad (2)$$

$$W_x = \frac{(BH^3 - bh^3)}{6H} \quad (3)$$

gdzie:

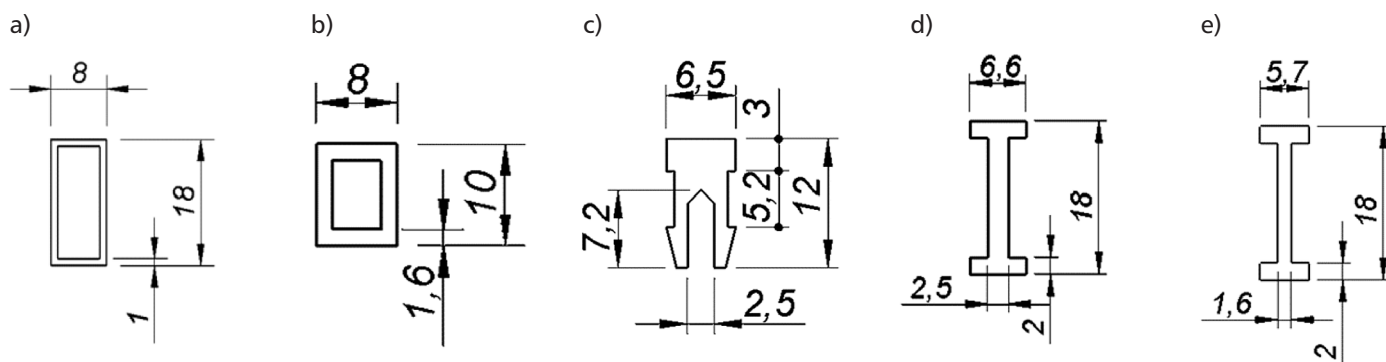
σ_g – naprężenia zginające, MPa,
 W_x – wskaźnik wytrzymałości na zginanie, mm⁴,

M – moment gnący, Nm,

P – siła, N,

l – odległość pomiędzy podporami, mm,

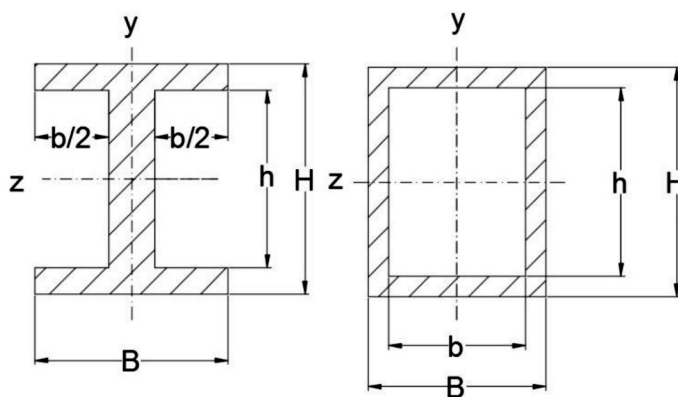
k_g – maksymalne naprężenia zginające, MPa.



Rys. 1. Przekroje profili poddanych badaniom: a) profil o przekroju rury prostokątnej-wysoki, b) profil o przekroju rury prostokątnej-niski, c) profil typu A, d) profil dwuteowy 18x6.6, e) profil dwuteowy 18x5.7

Na rysunku 2 pokazane zostały cechy geometryczne profili, których wskaźnik wytrzymałości na zginanie oblicza się wg zależności (3).

Określenie wartości naprężeń w przekrojach tzw. prostych czyli kwadratowych, prostokątnych lub okrągłych nie stanowi większego problemu. Większą trudność stanowi określenie naprężeń dla przekrojów tzw. złożonych czyli będących geometryczną kombinacją przekrojów prostych.



Rys. 2. Cechy geometryczne typowych przekrojów, których wskaźnik wytrzymałości na zginanie oblicza się według zależności (3)

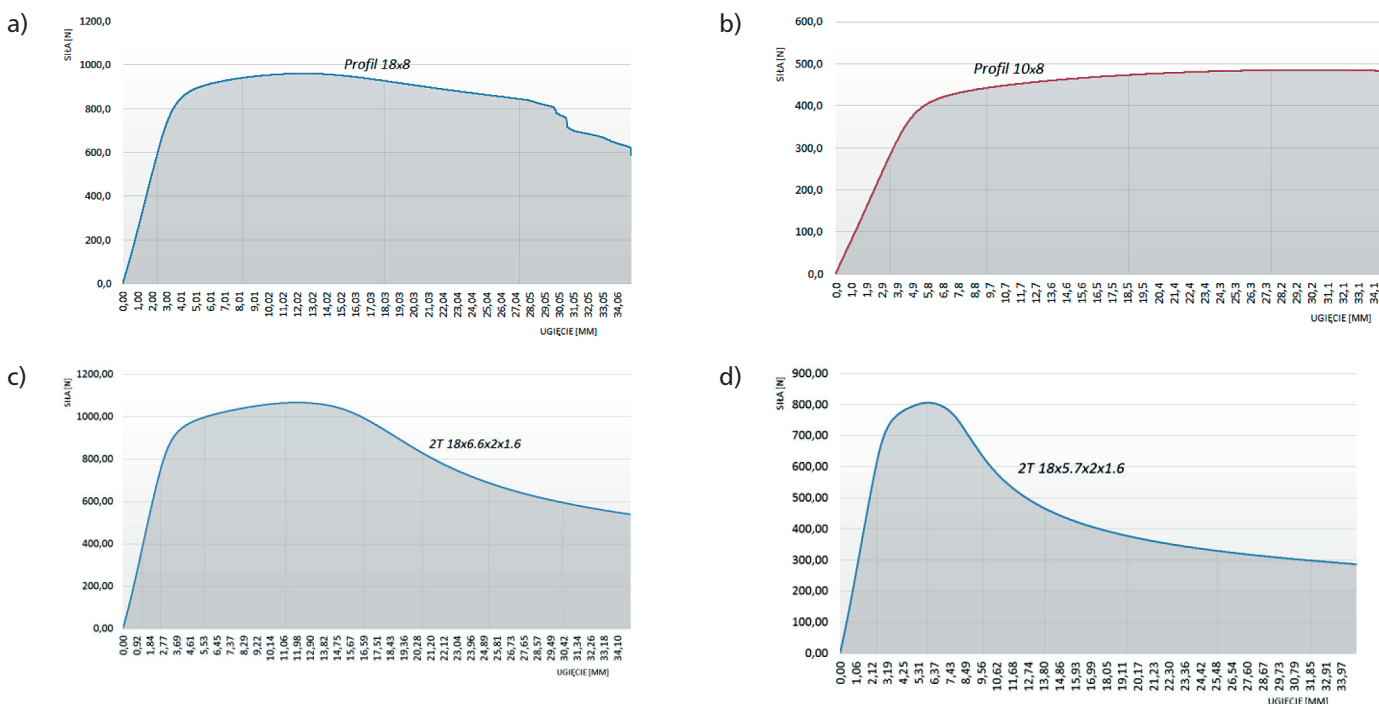
Badania eksperymentalne

W badaniach eksperymentalnych użyto maszyny wytrzymałościowej firmy Cometech model QC-508M2, którą pokazano na rysunku 3. Ugięcie wymuszano z prędkością 5 mm/min z zastosowaniem głowicy pomiarowej o nacisku maksymalnym 5 kN. Jako kryterium graniczne, po którym przerywano nacisk na profil przyjęto ugięcie o wartości 35 mm dla profili o przekrojach prostokątnych i teowych oraz 40 mm dla profilu typu A.

Walce podpór oraz walec naciskowy miały średnicę 10 mm natomiast rozstaw podpór wynosił 270 mm. Wszystkie próbki poddane badaniom na maszynie wytrzymałościowej posiadały długość 400 mm. Na rysunku 4 pokazano rozkład siły działającej na profile w funkcji ich ugięcia. Przedstawione wyniki są wartościami średnimi z pięciu wykonanych bezpośrednio po sobie pomiarów.



Rys. 3. Stanowisko badawcze, na którym wykonano testy gięcia profili



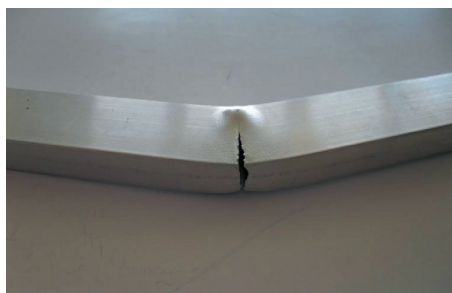
Rys. 4. Wykres siły nacisku w funkcji ugięcia dla przekroju: a) prostokątnego 18x8, b) prostokątnego 10x8, c) dwuteowego 18x6.6x2x1.6, d) dwuteowego 18x5.7x2x1.6

W tabeli 1 przedstawiono wartości siły maksymalnej przenoszonej przez badane kształtowniki (F_{max}) oraz uzyskane dla tej siły ugięcia (U_{max}).

Przekroczenie ugięcia dla siły maksymalnej spowodowało nadmierne odkształcenia i deformacje badanych profili. Profile dwuteowe oprócz ugięcia wywołanego działającą siłą uległy skręceniu i zwichrowaniu. Zniekształcenia tym spowodowane pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Deformacje profili dwuteowych o wymiarach poprzecznych 18x5.7x2x1.6



Rys. 6. Pęknięcie przekroju prostokątnego 18x8 na skutek przyłożonego obciążenia

W rurach o przekrojach prostokątnych, zarówno o wymiarze 18x8 jak i 10x8, wystąpiły deformacje przekroju poprzecznego, a w przypadku profilu 18x8 pęknięcie ścianki – rys. 6.

Badania symulacyjne z wykorzystaniem MES

Badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem oprogramowania Solid Works 2016. Do symulacji użyto modeli przestrzennych profili opracowanych na podstawie dokumentacji producenta z przyjętym materiałem z bazy dostępnych materiałów znajdujących się w Solid Works o nazwie 3.0526, dla którego wartość naprężeń rozciągających wynosi 115 MPa. W celu wykonania symulacji numerycznej zastosowano siatkę o wartości elementu 2 mm z tolerancją 0,1 mm z 4 punktami całkowania. Wartość współczynnika tarcia pomiędzy

Tabela 1. Wartości maksymalne siły oraz ugięcia profili poddanych badaniom na maszynie wytrzymałościowej

Rodzaj profilu	F_{max} , N	U_{max} , mm
Dwuteownik 18x6.6x2x1.6	1068	12,04
Dwuteownik 18x5.7x2x1.6	809	6,04
Profil prostokątny 18x8	963	12,89
Profil prostokątny 10x8	486	30,21

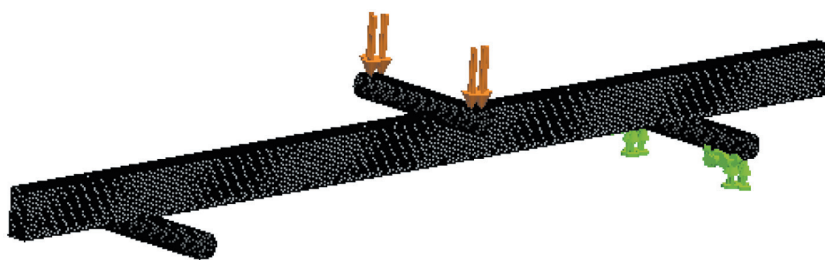
profilem, a walcami przyjęto na poziomie 0,35. Na rysunku 7 pokazano przykładowy model dyskretny z siatką MES. Kolorem zielonym zaznaczono geometrię podpór nieruchomych, a czerwonym nacisk siły na profil poprzez walec głowicy

Do porównania wartości ugięć profili uzyskanych w warunkach laboratoryjnych z wartościami otrzymanymi z wykorzystaniem metody MES przyjęto obciążenie o takiej samej wartości 100 N. Wykonane badania laboratoryjne ugięcia profili pod działaniem przyjętej wartości siły pozwoliły na uzyskanie wartości

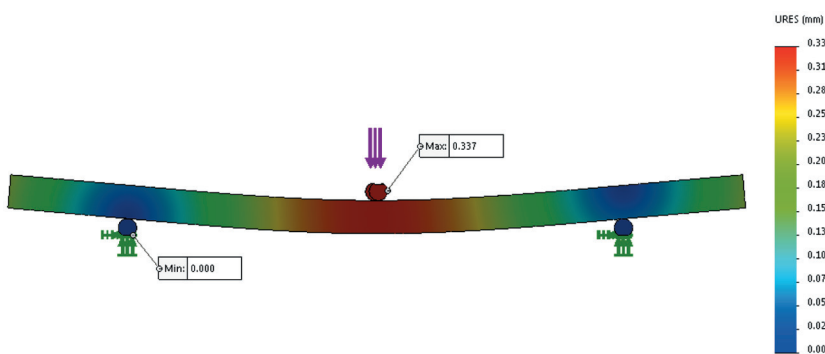
ugięcia na poziomie: dla profilu 18x8 – 0,433 mm, dla profilu 10x8 – 1,232 mm, dwuteownika 18x6x2 – 0,430 mm, dwuteownika 18x6x2.5 – 0,375 mm.

Na rysunku 8 pokazano przykładowy rozkład przemieszczeń poszczególnych węzłów siatki profilu o przekroju prostokątnym 18x6 przy współczynniku skali równym 25.

W tabeli 2 zestawiono wartości ugięcia profili o przekrojach prostokątnych i dwuteowych uzyskanych metodą MES i porównano je z wynikami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych.



Rys. 7. Przykładowy model dyskretny z siatką elementów skończonych – profil o przekroju prostokątnym 18x8



Rys. 8. Rozkład wartości ugięcia poszczególnych węzłów siatki pod działaniem siły 100 N

Tabela 2. Porównanie wartości ugięcia profili aluminiowych pod działaniem siły 100 N

Przekrój profilu	Laboratoryjna wartość ugięcia, mm	Numeryczna wartość ugięcia, mm
Dwuteownik 18x5.7x2x1.6	0,433	0,335
Dwuteownik 18x6.6x2x1.6	0,375	0,268
Profil prostokątny 18x8	0,430	0,337
Profil prostokątny 10x8	1,232	1,157

Obliczenie wartości ugięcia profili o przekrojach prostokątnym oraz dwuteowym nie stanowi problemu w ujęciu praktycznym. Więcej czasu należy poświęcić profilom o przekrojach będących kombinacją figur regularnych. Przydatnym narzędziem, ułatwiającym taką analizę, jest metoda elementów skończonych z przyjętym wcześniej modelem numerycznym, dla którego potwierdzono przyjęte warunki brzegowe, np.: za pomocą badań na maszynie wytrzymałościowej. W poniższym opracowaniu wykorzystano przyjęty model numeryczny do wyznaczenia wartości ugięcia profilu typu A, a następnie weryfikowano otrzymany wynik na maszynie wytrzymałościowej, a wyniki zestawiono w tabeli 3.

Na rysunku 9 zaprezentowano charakterystykę ugięcia profilu typu A. Maksymalna siła jaką został obciążony profil wyniosła 501 N przy ugięciu 28,72 mm.

Opisane powyżej ujęcie zagadnienia modelowania z dużym powodzeniem może być wykorzystane do walidacji projektowanych profili będących kombinacją figur regularnych z każdego materiału. Wykorzystanie metody MES we wstępnej fazie projektowania wpływa na cechy użytkowe projektowanych profili. W przypadku gdy, któraś z cech nie spełnia założonych wymagań istnieje wówczas możliwość dokonania niezbędnych zmian w geometrii we wstępnej fazie projektowania. Wykorzystanie metody MES wpływa również znacząco na oszczędności związane z wielokrotnym wykonaniem kosztownego oprzyrządowania do ich wytwarzania, co wpływa na zmniejszenie kosztów jednostkowych produkcji.

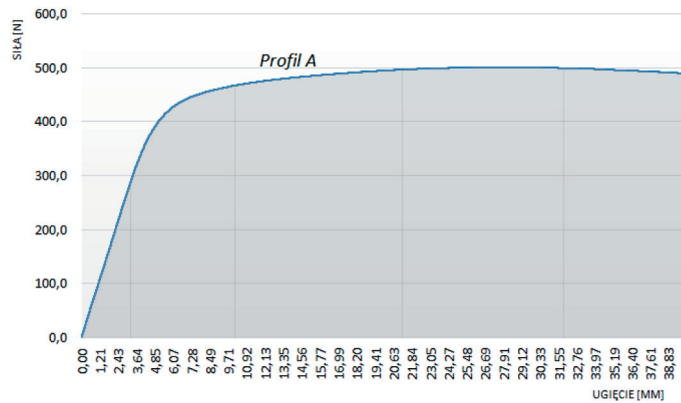
Wnioski

Wykonane badania symulacyjne ugięcia profili aluminiowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Metoda analizy numerycznej pozwala z dużym prawdopodobieństwem symulować trójpunktowe zginanie profili aluminiowych.
2. Zastosowanie metody numerycznej do szacowania wartości naprężeń generowanych na skutek obciążeń daje bardzo dobre wyniki symulacji pod warunkiem znajomości dokładnego schematu obciążenia oraz dobrania właściwego materiału.

Tabela 3. Wartości ugięcia profilu A określone metodą MES oraz jako wynik weryfikacji na maszynie wytrzymałościowej

Przekrój profilu	Laboratoryjna wartość ugięcia, mm	Numeryczna wartość ugięcia, mm
Profil A	1,107	1,021



Rys. 9. Wykres siły nacisku w funkcji ugięcia dla profilu typu A

3. Znana zależność ugięcia od obciążającej siły pozwala na etapie projektowania na szybkie określenie dopuszczalnej wartości siły obciążającej profil.

4. Siła maksymalna w badanych profilach wystąpiła przy bardzo różnych wartościach ugięć, których wartości zawierają się w zakresie od 6,04 do 30,21 mm.

5. Zwrócono uwagę na różne zachowanie badanych profili po przekroczeniu granicy wytrzymałości na zginanie. Przekroje dwuteowe wykazały większe zmniejszenie przenoszonej siły niż profile o przekroju prostokątnym.

Na podstawie zaobserwowanego zachowania profili w czasie prób eksperymentalnych oraz powstałych podczas nich wad stwierdzono potrzebę podjęcie kolejnych badań.

Literatura

1. Adamus J., Winowiecka J., Dyer M., Lacki P.: Numerical simulation of forming titanium thin-wall panels with stiffeners. *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 2018, 12(1), 54–62.
2. Czmochoński J., Smolnicki T., Rusiński E.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. *Of. Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2000.

3. Dębski H., Koszałka G., Ferdynus M.: Application of fem in the analysis of the structure of a trailer supporting frame with variable operation parameters. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (2): 107-114.

4. <http://www.metale-kolorowe.eu/aluminium/aluminium-EN-AW-6060.html>

5. Kacprzyk Z., Rakowski G.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2005.

6. Lonkwick P., Różyło P., Dębski H.: Numerical and experimental analysis of the progressive gear body with the use of finite-element method. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (4): 544-550.

7. Lonkwick P., Usyduś I., Włosek N.: Wytrzymałość profili stosowanych do produkcji krtek maskujących grzejniki podłogowe. *Obróbka Metalu* nr 4, 2017, s. 46-51.

8. Markowski T., Mucha J., Witkowski W.: FEM analysis of clinching joint machine's c-frame rigidity. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (1): 51-57.

9. Vosáhló J., Syrovátková M., Petruš M.: Numerical modelling of behaviour of surface finishing of composite materials. 2018, Volume 12(1), 48–53. ■