

Grzegorz MŁYNARCZYK¹, Jerzy MARSZAŁEK²

Opiekun naukowy: Jerzy MARSZAŁEK²

DOŚWIADCZALNE ZGINANIE STALOWEJ BLACHY WZMOCNIONEJ KOMPOZYTEM WARSTWOWYM

Streszczenie: W artykule szczegółowo omówiono badania doświadczalne, których celem było wyznaczenie właściwości mechanicznych struktury hybrydowej stal/kompozyt warstwowy w warunkach statycznego zginania trzypunktowego. Próbki struktury hybrydowej składały się ze stalowej blachy DP780, jednej warstwy kompozytu z włókien szklanych (GFRP) i trzywarstwowego kompozytu z włókien węglowych (CFRP). W pierwszej części pracy opisano budowę próbek, proces ich wytwarzania oraz procedurę testu zginania. Analiza efektu wzmocnienia stalowej blachy kompozytem GFRP/CFRP wymagała przeprowadzenia testu zginania blachy niewzmocnionej kompozytem. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że sztywność zginania, nośność i zdolność pochłaniania energii próbek hybrydowych były odpowiednio 3,6; 2,7 i 3,1 razy większe w porównaniu ze stalową blachą.

Słowa kluczowe: stal, kompozyt warstwowy, struktura hybrydowa, właściwości mechaniczne

EXPERIMENTAL BENDING OF STEEL SHEET REINFORCED WITH A LAYERED COMPOSITE

Summary: The article discusses in detail the experimental research aimed at determining the mechanical properties of the steel/layered composite hybrid structure under static three-point bending conditions. The hybrid structure specimens consisted of DP780 steel sheet, one layer of glass fiber reinforced polymer composite (GFRP) and three-layer carbon fiber reinforced polymer composite (CFRP). The first part of the work describes the structure of the specimens, their manufacturing process and the bending test procedure. The analysis of the effect of hybridization of the steel sheet with the GFRP/CFRP composite required a bending test of the non-reinforced steel sheet. It was found that the bending stiffness, load-bearing capacity and energy absorption capacity of the hybrid specimens were 3,6; 2,7 and 3,1 times higher, respectively, compared to the non-reinforced steel sheet.

Keywords: steel, layered composite, hybrid structure, mechanical properties

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność KWKiW, email: gm057237@student.ubb.edu.pl

² Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: jmarszalek@ubb.edu.pl

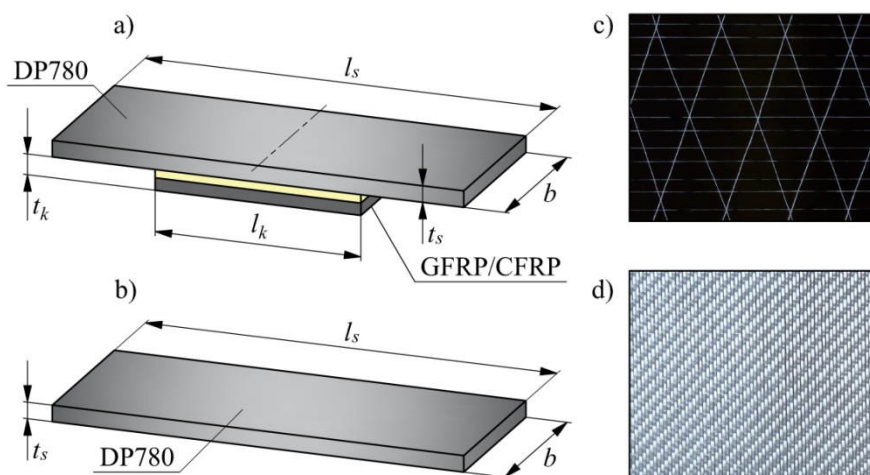
1. Wprowadzenie

Redukcja masy pojazdu jest dobrze znanym sposobem ograniczenia zużycia paliwa [1]. W przypadku samochodów osobowych najcięższym podzespołem jest nadwozie, na które przypada od 20 do 25% masy pojazdu [2]. Należy przy tym zaznaczyć, że redukcja masy nadwozia jest złożonym zagadnieniem inżynierskim. Wynika to z faktu, że nadwozie jest strukturą mającą istotne znaczenie nie tylko ze względów estetycznych, ale przede wszystkim funkcjonalnych. Zadaniem nadwozia jest umożliwienie prawidłowego montażu pozostałych podzespołów pojazdu oraz zapewnienie najwyższego poziomu bezpieczeństwa dla kierowcy i pasażerów podczas kolizji. Przystępując do redukcji masy poszczególnych elementów nadwozia należy mieć na uwadze zachowanie ich właściwości użytkowych. We współczesnych samochodach elementy nadwozia takie jak np. słupki A, B, C i belki wzmocnienia drzwi bocznych są strukturami cienkościennymi, ponieważ są wytwarzane ze stali specjalnych wysokowytrzymałych (AHSS, ang. *Advanced High-Strength Steels*) oraz stali ultra wytrzymałych (UHSS, ang. *Ultra-High Strength Steels*). W takim przypadku redukcja masy pojazdu sprowadza się do zredukowania grubości części nadwozia a sztywność i wytrzymałość tych elementów jest zagwarantowana przez ulepszone właściwości mechaniczne stali. Wraz z dalszym rozwojem stali wysokowytrzymałych, równocześnie prowadzone są badania nad wykorzystaniem struktur hybrydowych stal-CFRP w projektowaniu nadwozi (skrót CFRP oznacza kompozyt polimerowy wzmocniony włóknami węglowymi, ang. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). W tym przypadku redukcja masy stalowego elementu nadwozia sprowadza się do zredukowania grubości cięższej stalowej blachy z jednoczesnym zastosowaniem lżejszego wzmocnienia kompozytowego, które zapewnia wymaganą sztywność i wytrzymałość. Innym celem wzmocniania stalowych części nadwozia materiałami kompozytowymi jest uzyskanie struktur hybrydowych, które przy nieznacznym wzroście masy mają lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu z niewzmocnionymi elementami stalowymi. Najczęściej dąży się do wzmocnienia stalowego elementu w sposób lokalny w miejscu o najmniejszej wytrzymałości [3,4,5]. Jednak w dostępnej literaturze jest niewiele prac skupiających się wokół tego zagadnienia co oznacza, że konieczne jest prowadzenie dalszych badań w tym zakresie. Dlatego w ramach niniejszej pracy sprawdzono doświadczalnie jakie pozytywne efekty można uzyskać wzmocniając lokalnie stalową blachę kompozytem warstwowym. W tym celu przeprowadzono trzypunktowe zginanie dwóch rodzajów próbek – hybrydowych stanowiących adhezyjne połączenie stalowej blachy i kompozytu oraz próbek stalowych niewzmocnionych kompozytem.

2. Materiały i sposób przygotowania próbek

W badaniach wykorzystano stal DP780. Tłoczona na zimno stal DP780 jest powszechnie stosowana w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji elementów nadwozia, ponieważ zapewnia dobre połączenie wytrzymałości i możliwości tłoczenia dzięki swojej dwufazowej mikrostrukturze, w której twarda faza martenzytyczna jest rozproszona w plastycznej osnowie ferrytycznej. Schemat próbki hybrydowej jest przedstawiony na rysunku 1a. Sprawdzenie efektu wzmocnienia stalowej blachy za pomocą kompozytu hybrydowego GFRP/CFRP wymagało

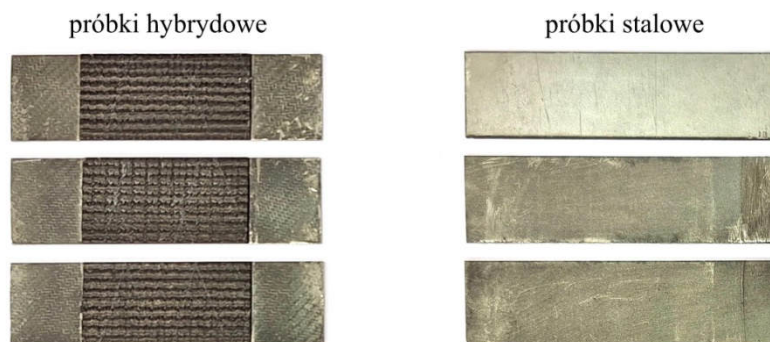
również przeprowadzenia testu zginania niewzmocnionych próbek stalowych (rysunek 1b). Strukturę hybrydową oznaczono jako stal/GFRP/CFRP, gdzie skrót GFRP oznacza kompozyt polimerowy wzmocniony włóknami szklanymi (ang. *Glass Fiber Reinforced Polymer*). Próbki hybrydowe składały się z jednej blachy o grubości $t_s = 1.45 \text{ mm}$, długości $l_s = 90 \text{ mm}$ i szerokości $b = 25 \text{ mm}$ (takie same wymiary przyjęto dla próbek stalowych). W strukturze hybrydowej stalowa blacha została wzmocniona kompozytem CFRP na długości $l_k = 50 \text{ mm}$. Kompozyt CFRP składał się z trzech warstw jednokierunkowej tkaniny z włókien węglowych (rysunek 1c). Pomiędzy blachę i kompozyt CFRP umieszczono jedną warstwę kompozytu GFRP, której zadaniem było zabezpieczenie stali przez bezpośrednim kontaktem z włóknami węglowymi – w ten sposób zwiększono ochronę stali przed korozją galwaniczną. Kompozyt GFRP został wykonany z tkaniny dwukierunkowej (rysunek 1d). Średnia grubość t_k kompozytu hybrydowego GFRP/CFRP wynosiła $1.03 \pm 0.01 \text{ mm}$.



Rysunek 1. a) budowa i wymiary próbki struktury hybrydowej, b) wymiary próbki stalowej, c) fragment tkaniny jednokierunkowej z włókien węglowych, d) fragment tkaniny dwukierunkowej o splocie twill 2×2 z włókien szklanych

Trzy próbki struktury hybrydowej stal/GFRP/CFRP zostały wykonane metodą laminowania ręcznego. Najpierw z płaskiego arkusza blachy o grubości 1.45 mm wycięto strumieniem wody trzy blachy o wymiarach $25 \times 90 \text{ mm}$. Blachy poddano jednostronnej obróbce ścierniej (piaskowaniu) w celu uzyskania większej chropowatości powierzchni i lepszego połączenia adhezyjnego z kompozytem GFRP. Ostatecznie blachy zostały wyczyszczone ciepłą wodą, odtuszczone za pomocą rozpuszczalnika i ułożone w foremniku. Na chropowatą powierzchnię każdej blachy umieszczono jedną warstwę tkaniny szklanej i trzy warstwy tkaniny węglowej. Tkaniny zostały zaimpregnowane matrycą polimerową Biresin® CR122+CH122-5. Proces utwardzania próbek hybrydowych przebiegał w dwóch etapach. W pierwszej kolejności próbki były utwardzane w temperaturze pokojowej przez 24 godziny pod ciśnieniem 0.1 MPa generowanym przez stalową pokrywę foremnika. Następnie

próbki umieszczono w piecu, w którym temperatura wynosiła 70°C a proces utwardzania trwał 5 godzin. Rysunek 2 przedstawia fotografie przygotowanych próbek. W tabeli 1 zamieszczono wyniki analizy wagowej próbek.



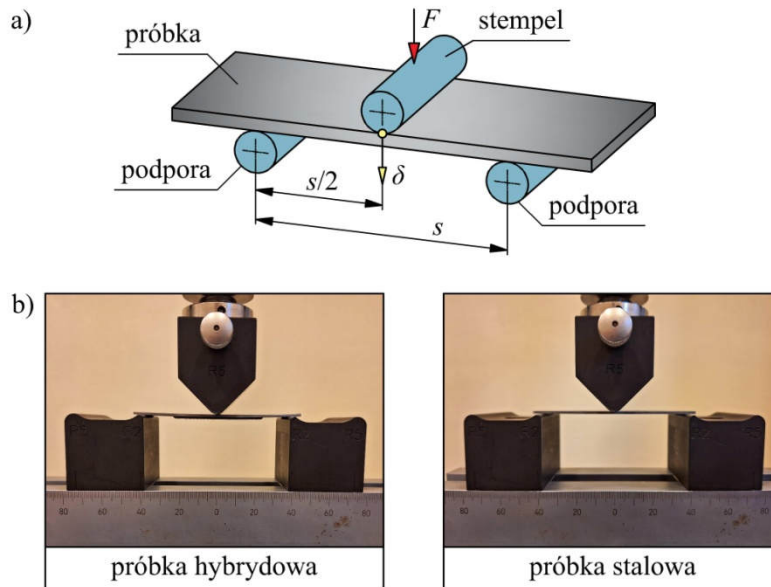
Rysunek 2. Fotografie przygotowanych próbek

Tabela 1. Porównanie masy przygotowanych próbek

numer próbki	masa próbek hybrydowych, g	masa próbek stalowych, g
1	28,23	25,87
2	28,52	26,18
3	28,17	26,27
wartość średnia	28,31±0,19	26,11±0,21

3. Test zginania trzypunktowego

Statyczny test zginania trzypunktowego próbek hybrydowych i stalowych został wykonany na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt Table Blue 5. Podczas badań zadawano strzałkę ugięcia δ (odpowiadającą przemieszczeniu stempla obciążającego) ze stałą prędkością 1 mm/min a mierzono siłę reakcji F za pośrednictwem czujnika tensometrycznego umieszczonego w trawersie maszyny wytrzymałościowej (rysunek 3a). Rozstaw podpór ustawiono na wartość $s = 80$ mm. Promień zaokrąglenia podpór i stempla wynosiły odpowiednio 2 mm i 5 mm. Rysunek 3b przedstawia fotografie przykładowych próbek w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. Otrzymane dane w postaci strzałki ugięcia δ i siły F posłużyły do opracowania charakterystyki $F(\delta)$ dla każdej próbki. Następnie bazując na charakterystykach doświadczalnych wyznaczono dla każdej próbki sztywność zginania K (nachylenie liniowej części charakterystyki $F(\delta)$ w początkowej fazie obciążenia), maksymalną wartość siły zginającej F_{max} oraz pochłoniętą energię PE (pole powierzchni pod charakterystyką $F(\delta)$ w zakresie 0- y_{max} , przy czym y_{max} jest ugięciem występującym przy F_{max}). Dla próbek stalowych, z uwagi na ich duże odkształcenie plastyczne, nie wyznaczono maksymalnej siły zginającej F_{max} .

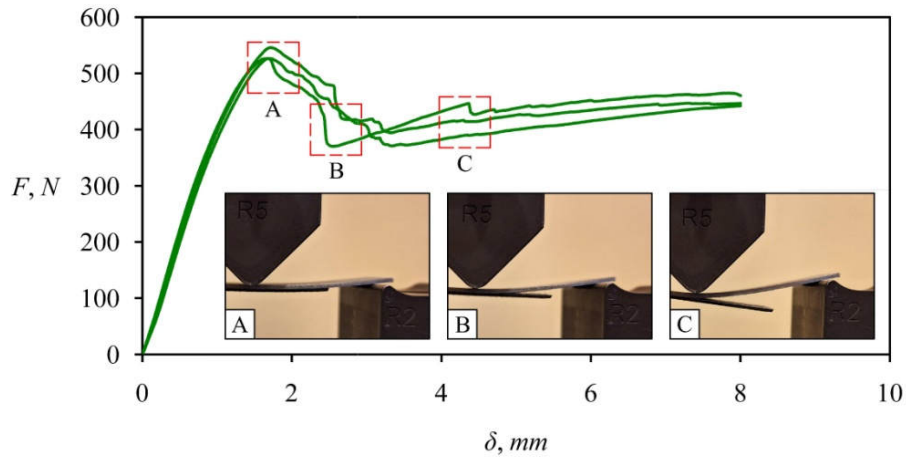


Rysunek 3. a) schemat próby zginania trzypunktowego, b) fotografie przykładowych próbek podczas testu zginania

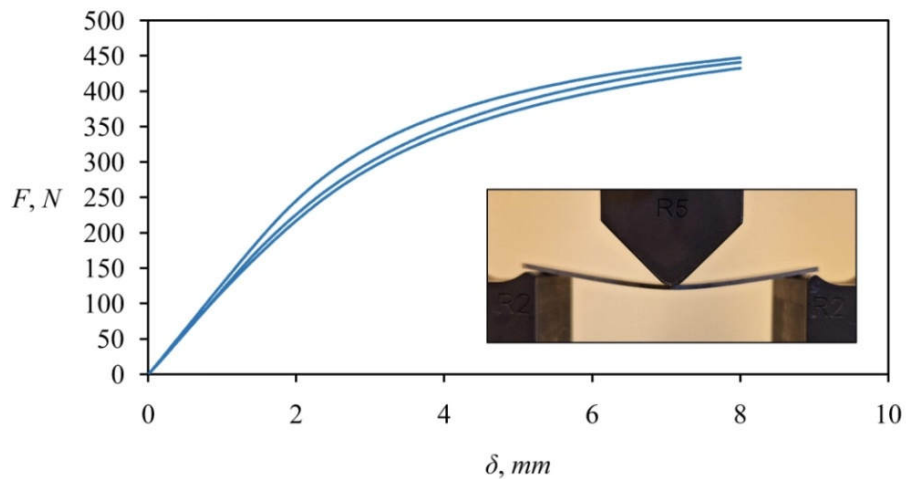
4. Wyniki i dyskusja

4.1. Charakterystyki siła-strzałka ugięcia

Na podstawie danych pomiarowych opracowano dla każdej próbki charakterystykę $F(\delta)$. W przypadku próbek struktury hybrydowej charakterystyki można podzielić na cztery części (rysunek 4). Początkowo charakterystyki są liniowe, ponieważ próbki odkształcały się sprężysto. Wraz ze wzrostem strzałki ugięcia charakterystyki stopniowo przechodzą w zakres nieliniowy z uwagi na plastyczne zachowanie blachy. Następnie siła osiąga wartość maksymalną F_{max} , po czym obserwuje się stopniowy spadek nośności próbek. Efekt ten był spowodowany rozpoczęciem procesu jednostronnego odklejania kompozytu GFRP/CFRP od blachy, czemu dodatkowo towarzyszyły wyraźne, stopniowo nasilające się efekty akustyczne. Wraz z dalszym wzrostem ugięcia kompozyt przestał pełnić funkcję dodatkowego wzmocnienia i obciążenie było przenoszone głównie przez blachę. W przypadku próbek stalowych charakterystyki składają się z dwóch części (rysunek 5) – liniowej (zakres sprężysty) i nieliniowej (zakres plastyczny). W charakterystykach próbek stalowych, w przeciwieństwie do próbek struktury hybrydowej, nie występuje spadek siły zginającej, ponieważ próbki stalowe nie uległy zniszczeniu w przyjętym przedziale pomiarowym. Dalsze zwiększanie strzałki ugięcia prowadziło z kolei do stopniowego ześlizgiwania się próbek z podpór.



Rysunek 4. Charakterystyki $F(\delta)$ dla próbek struktury hybrydowej oraz zdjęcia przykładowej próbki przedstawiające proces odklejania kompozytu hybrydowego GFRP/CFRP od stalowej blachy

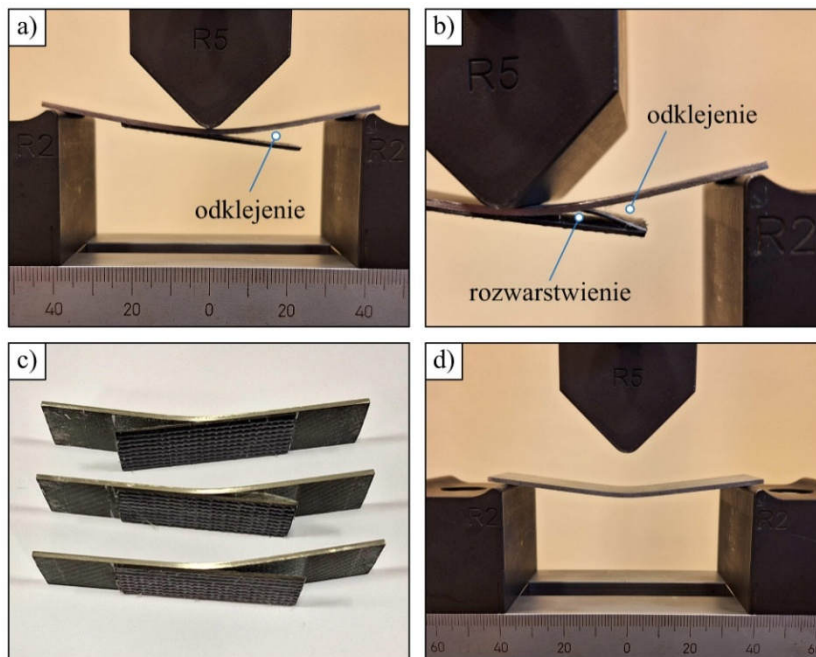


Rysunek 5. Charakterystyki $F(\delta)$ dla próbek stalowych niewzmocnionych kompozytem oraz zdjęcie przykładowej próbki podczas testu zginania przy strzałce ugięcia równej 4 mm

4.2. Schematy uszkodzenia próbek

Obserwacja makroskopowa próbek wykazała, że jedynym schematem uszkodzenia struktury hybrydowej stal/GFRP/CFRP podczas zginania było zniszczenie połączenia adhezyjnego między blachą i kompozytem hybrydowym GFRP/CFRP (rysunek 6a). Tylko w jednej próbce nastąpiło rozwarstwienie kompozytu hybrydowego w postaci lokalnego oderwania GFRP od CFRP (rysunek 6b). Ponadto w żadnej warstwie

kompozytu CFRP, nawet w tej najbardziej oddalonej od warstwy obojętnej próbki, nie został przekroczony warunek granicznego naprężenia rozciągającego – warstwy nie uległy rozerwaniu. Po zakończeniu badań okazało się, że blacha w każdej próbce hybrydowej uległa trwałej deformacji w wyniku lokalnego przekroczenia granicy plastyczności w pobliżu działania stempla obciążającego (rysunek 6c). Trwała deformacja wystąpiła również w próbkach stalowych (rysunek 6d).



Rysunek 6. a) uszkodzone połączenie adhezyjne między blachą i kompozytem GFRP/CFRP, b) lokalne rozwarstwienie między GFRP i CFRP w próbce hybrydowej, c) próbki struktury hybrydowej po zakończeniu testu zginania, d) trwała deformacja próbki stalowej

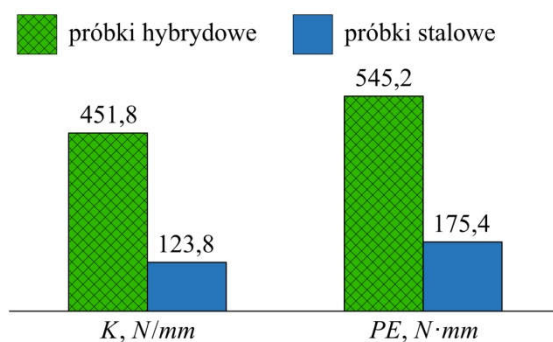
4.3. Efekt wzmocnienia

Wybrane właściwości mechaniczne próbek zostały wyznaczone na podstawie charakterystyk $F(\delta)$ i zamieszczone w tabeli 2. Graficzne porównanie sztywności zginania K i zdolności pochłaniania energii PE próbek hybrydowych i próbek stalowych przedstawia rysunek 7. Wzmocnienie blachy kompozytem skutkowało otrzymaniem struktury hybrydowej stal/GFRP/CFRP, której sztywność zginania okazała się 3,6 razy większa w porównaniu z blachą niewzmocnioną kompozytem. Nośność i zdolność pochłaniania energii próbek porównano dla średniej wartości strzałki ugięcia y_{max} równej $1,71 \pm 0,04$ mm, przy której próbki hybrydowe osiągnęły nośność maksymalną F_{max} . Pozytywny efekt wzmocnienia został odnotowany również w przypadku nośności, która zwiększyła się 2,7 razy. Jednoczesne zwiększenie sztywności zginania i nośności przełożyło się na poprawę zdolności próbek hybrydowych do pochłaniania energii, która wzrosła 3,1 razy. Należy zaznaczyć, że wszystkie te korzyści otrzymano przy stosunkowo niewielkim wzroście

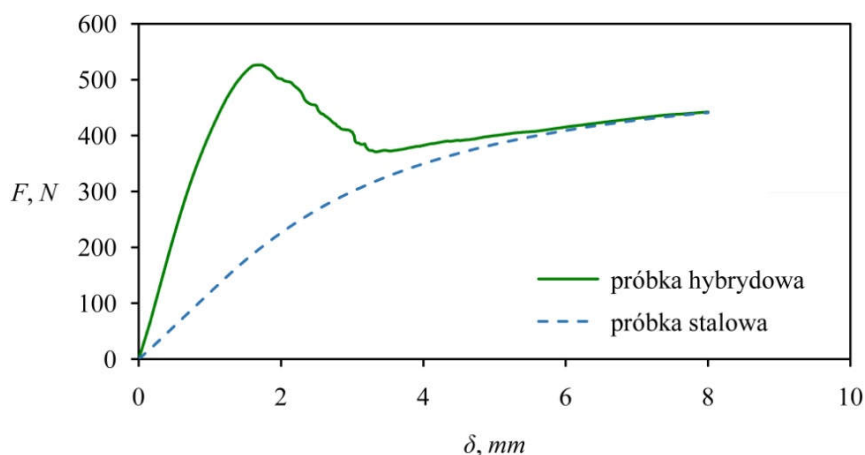
masy (8,5%) w porównaniu z blachą niewzmocnioną kompozytem. Dodatkową zaletą struktury hybrydowej jest zachowanie nośności stalowej blachy po zniszczeniu połączenia adhezyjnego z kompozytem warstwowym, co jest wyraźnie widoczne na rysunku 8.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne próbek hybrydowych i stalowych

rodzaj próbki	numer próbki	$K, N/mm$	F_{max}, N	$PE, N \cdot mm$
hybrydowa	1	465,2	526,7	556,2
	2	443,9	527,4	526,8
	3	446,4	545,6	552,7
	wartość średnia	$451,8 \pm 11,6$	$533,2 \pm 10,7$	$545,2 \pm 16,1$
stalowa	1	129,4	214,4	185,2
	2	120,6	189,9	168,6
	3	121,5	198,1	172,3
	wartość średnia	$123,8 \pm 4,8$	$200,8 \pm 12,4$	$175,4 \pm 8,7$



Rysunek 7. Graficzne porównanie sztywności zginania K i zdolności pochłaniania energii PE próbek hybrydowych i stalowych



Rysunek 8. Porównanie charakterystyk $F(\delta)$ przykładowych próbek – hybrydowej stal/GFRP/CFRP i stalowej niewzmocnionej kompozytem

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy szczegółowo przedstawiono procedurę i wyniki badań doświadczalnych, w których próbki hybrydowe stal/GFRP/CFRP były obciążane statycznie w warunkach zginania trzypunktowego z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. W pracy omówiono budowę próbek hybrydowych, proces ich wytwarzania oraz procedurę testu zginania. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie efektu wzmocnienia blachy stalowej kompozytem warstwowym poprzez porównanie wybranych właściwości mechanicznych próbek hybrydowych i próbek stalowych niewzmocnionych kompozytem. Porównanie dotyczyło takich parametrów jak sztywność zginania, maksymalna wartość siły zginającej i zdolność pochłaniania energii. Wykonano również analizę wagową próbek hybrydowych i stalowych niewzmocnionych kompozytem. Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań są następujące:

- sztywność zginania, maksymalna wartość siły zginającej (nośność) i zdolność pochłaniania energii próbek hybrydowych stal/GFRP/CFRP są odpowiednio 3,6; 2,7 i 3,1 razy większe w stosunku do blachy niewzmocnionej kompozytem, co uznaje się za pozytywny efekt wzmocnienia,
- wzmocnienie próbek stalowej blachy za pomocą jednowarstwowego kompozytu GFRP i trzywarstwowego kompozytu CFRP spowodowało, że masa otrzymanej struktury hybrydowej jest o 8,5% większa w stosunku do masy próbek stalowych niewzmocnionych kompozytem, co można uznać za negatywny efekt wzmocnienia,
- zaproponowana struktura hybrydowa stal/GFRP/CFRP ma duży potencjał redukcji masy elementów stalowych, co można uzyskać poprzez zredukowanie grubości cięższej stalowej blachy z jednoczesnym zastosowaniem lżejszego wzmocnienia kompozytowego, które zagwarantuje wymagane właściwości mechaniczne (sztywność i wytrzymałość),
- pomimo uszkodzenia połączenia adhezyjnego między blachą i kompozytem próbki struktury hybrydowej zachowały sztywność i nośność blachy stalowej, co stanowi zaletę tego typu struktur hybrydowych,
- podczas zginania struktura hybrydowa lokalnie wzmocniona kompozytem jest w szczególności narażona na uszkodzenie połączenia adhezyjnego między blachą i kompozytem (ang. *debonding*) – dlatego w ramach kolejnych badań naukowych proponuje się sprawdzenie wpływu sposobu przygotowania powierzchni stalowej blachy (w tym chropowatości powierzchni blachy) na wytrzymałość połączenia adhezyjnego,
- próbki stalowe niewzmocnione kompozytem pomimo znacznego ugięcia nie uległy zniszczeniu podczas badań, ponieważ blacha DP780, z której zostały wykonane, charakteryzują takie właściwości jak ciągliwość, duża granica plastyczności i podwyższona wytrzymałość na rozciąganie – wraz z dalszym zwiększaniem strzałki ugięcia obserwowano efekt ześlizgiwania się próbek stalowych z podpór,
- deformacja próbek hybrydowych i stalowych częściowo uległa zmniejszeniu po usunięciu obciążenia, ponieważ stal DP780 charakteryzuje sprężynowanie powrotne (ang. *springback*).

LITERATURA

1. DRABIK D.: Analiza możliwości obniżenia zużycia paliwa w samochodach osobowych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, **18**(2017)6, 612-615.
2. FUCHS E.R.H., FIELD F.R., ROTH R., KIRCHAIN R.E.: Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design. *Composites Science and Technology*, **68**(2008)9, 1989-2002.
3. KIM D.-J., LIM J., NAM B., KIM H.-J., KIM H.-S.: Design and manufacture of automotive hybrid steel/carbon fiber composite B-pillar component with high crashworthiness. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **8**(2021), 547-559.
4. LEE J.-M., MIN B.-J., PARK J.-H., KIM D.-H., KIM B.-M., KO D.-C.: Design of lightweight CFRP automotive part as an alternative for steel part by thickness and lay-up optimization. *Materials*, **12**(2019)14, 2309.
5. LEE M.-S., SEO H.-Y., KANG C.-G.: Comparison of collision test results for center-pillar reinforcements with TWB and CR420/CFRP hybrid composite materials using experimental and theoretical methods. *Composite Structures*, **168**(2017), 698-709.