

## KONSTRUKCJA MONOCOQUE

### WSTĘP

Monocoque to samonośna konstrukcja nadwozia, która pełni jednocześnie funkcję elementu nośnego i ochronnego. Jest to bardzo często wykorzystywany rodzaj konstrukcji w motorosporcie jak i w Formula Student.

Podstawowym założeniem regulaminowym jest wykonanie ramy stalowej, jednak konstrukcja tego typu jest cięższa i mniej sztywna w porównaniu do nadwozia kompozytowego. Regulamin dopuszcza zastosowanie alternatywnych materiałów, pod warunkiem wykazania ich równoważności wytrzymałościowej względem ramy stalowej. Dla porównania, stalowa rama rurowa waży około 30–32 kg i charakteryzuje się ograniczoną sztywnością. Zastosowanie monocoque pozwala zredukować masę nawet o 20% oraz osiągnąć 2–3 razy większą sztywność skrętną. Dodatkowo, taka konstrukcja umożliwia bardziej efektywne rozmieszczenie podzespołów oraz poprawę aerodynamiki pojazdu.

### CEL PROJEKTU

Celem projektu jest zaprojektowanie i wykonanie monocoque z włókna węglowego, który spełni zarówno wymagania regulaminowe jak i oczekiwania w zakresie sztywności oraz masy.

Kluczowe założenia to:

- zwiększenie sztywności skrętnej pojazdu,
- redukcja masy nadwozia,
- zapewnienie wysokiej serwisowalności konstrukcji – szczególnie istotnej przy budowie pierwszego bolidu elektrycznego,
- walidacja konstrukcji poprzez symulacje MES i testy fizyczne próbek,
- spełnienie kryteriów dokumentu SES i dopuszczenie konstrukcji do zawodów.

Projekt ma również na celu rozwój kompetencji członków zespołu w zakresie nowoczesnych technologii kompozytowych, projektowania CAD, analizy MES oraz procesów produkcyjnych.

### SES (Structural Equivalency Spreadsheet)

Dokument w formie arkusza kalkulacyjnego, udostępniany przez organizatora zawodów. Jego celem jest wykazanie równoważności struktury kompozytowej względem bazowego odpowiednika ze stali. Na podstawie wyników prób wytrzymałościowych wyliczane są kluczowe parametry bezpieczeństwa, takie jak: ilość energii pochłoniętej podczas zderzenia, maksymalne odkształcenie przed zniszczeniem czy wytrzymałość w każdym z krytycznych punktów mocowania.

W arkuszu umieszcza się wszystkie kluczowe informacje, takie jak:

- zastosowane layupy (ukierunkowanie, spłot oraz liczba warstw włókna węglowego),
- udokumentowane próby wytrzymałościowe laminatów,
- wymiary geometryczne,
- elementy zapewniające bezpieczeństwo kierowcy (przedni zderzak, obręcz bezpieczeństwa – roll hoops, mocowania pasów bezpieczeństwa).

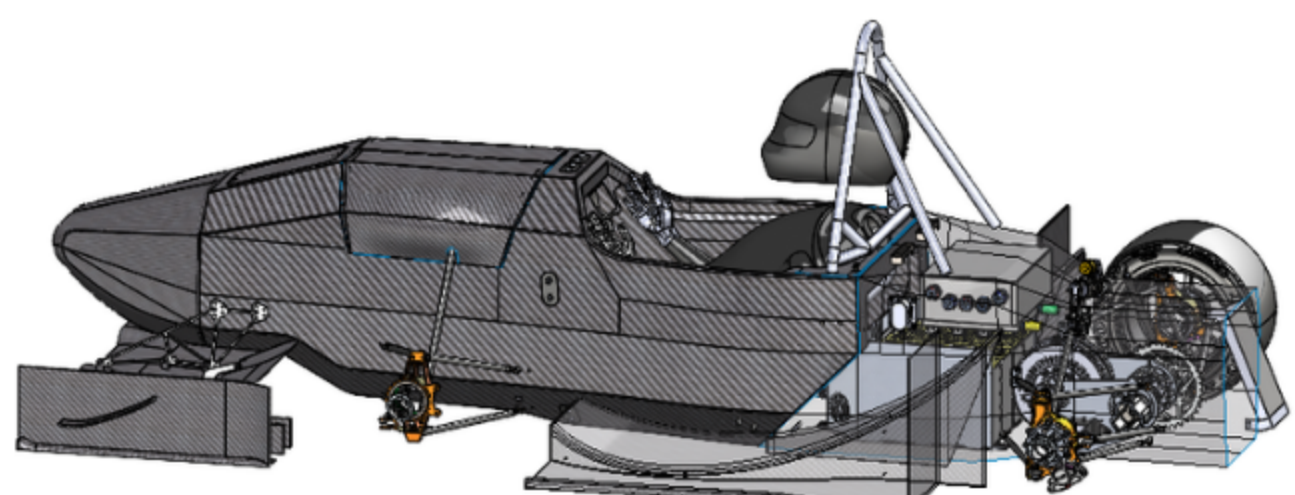
### PROCES PROJEKTOWANIA

Rozpoczyna się od stworzenia wstępnego modelu CAD, który uwzględnia zarówno wymagania regulaminowe Formula Student, jak i geometrię wszystkich komponentów umieszczanych wewnątrz nadwozia. Kluczowym aspektem na tym etapie jest efektywne upakowanie elementów, takich jak pakiet akumulatorów, inwerter, układ chłodzenia, ergonomia kierowcy, mocowania zawieszenia oraz komponenty układu napędowego.

Po ustaleniu wstępnego rozmieszczenia elementów i zapewnieniu odpowiedniego rozkładu mas, dostępności serwisowej i zgodności z regulaminem, przeprowadza się analizy numeryczne (MES). Na ich podstawie identyfikowane są niewralgiczne strefy, w których występują największe naprężenia.

Kolejny krok to opracowanie finalnego modelu CAD, który uwzględnia wyniki analiz oraz aspekty technologiczne produkcji – w tym odpowiednie kąty pochylenia ścian pod względem rozformowania.

Równolegle trwa projektowanie layupu kompozytowego, czyli ustalanie liczby, rodzaju i orientacji warstw włókna węglowego w poszczególnych panelach. W zależności od funkcji i obciążeń danego obszaru monocoque stosuje się zróżnicowane layupy, np. umocnienia laminatu w strefach mocowania zawieszenia i cieńsze laminaty w częściach nienaprężonych. W tym procesie niezbędne jest bieżące porównywanie danych z arkuszem SES, który określa minimalne wymagania wytrzymałościowe i geometrię dopuszczalnych struktur kompozytowych.



Rys. 1. Monocoque wraz z umiejscowieniem komponentów

### TECHNOLOGIA WYKONANIA

Proces produkcji monocoque rozpoczyna się od frezowania formy pozytywowej (kopyta) z MDF. Na jej powierzchni wykonywane są formy negatywowe z laminatu węglowego, co zapewnia zbliżoną rozszerzalność cieplną między formą a detalem i minimalizuje ryzyko deformacji podczas wygrzewania w autoklawie.

Po przygotowaniu form przystępuje się do laminowania. Warstwy prepregu układane są ręcznie, zgodnie z wcześniej zaprojektowanym i przetestowanym layupem, który definiuje orientację włókien i liczbę warstw dla uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych.

Podczas produkcji detal przechodzi przez trzyletający proces utwardzania w autoklawie:

#### 1. Zewnętrzna strona monocoque

Na formie układana jest pierwsza część laminatu – warstwy prepregu tworzące zewnętrzną powierzchnię detalu. Po ich ułożeniu przeprowadzane jest pierwsze wygrzewanie w autoklawie.

#### 2. Rdzeń i elementy strukturalne

Na utwardzoną warstwę zewnętrzną nakładana jest klej strukturalny (glue film), następnie rdzeń typu honeycomb oraz aluminiowe inserty w miejscach punktów mocowania. Od strony rdzenia zawsze stosuje się tkaninę twill, która ogranicza ryzyko delaminacji.

#### 3. Wewnętrzna strona laminatu

Po ułożeniu rdzenia proces jest powtarzany po drugiej stronie – ponownie układany jest klej strukturalny i laminat w odpowiednim układzie warstw, zgodnym z projektem.



Rys. 2. Formy w autoklawie

## PANELE KOMPOZYTOWE

### DLACZEGO STOSUJEMY KOMPOZYT PRZEKŁADKOWY SANDWICH, A NIE MONOLIT?

Kompozyt przekładkowy składa się z cienkich, sztywnych warstw zewnętrznych (laminatu) oraz lekkiego, grubego rdzenia – najczęściej o strukturze plastra miodu. Taka konstrukcja zapewnia znacznie lepszy stosunek sztywności do masy niż jednolity (monolityczny) laminat głównie dzięki zwiększeniu momentu bezwładności całego panelu.

Dzięki zwiększeniu odległości między zewnętrznymi warstwami nośnymi, panel typu sandwich:

- jest wielokrotnie sztywniejszy przy zginaniu,
- zachowuje niską masę dzięki lekkiemu rdzeniowi,
- lepiej tłumi drgania i wibracje,
- może być łatwo dostosowany do lokalnych wzmocnień (np. insertów).

Monolit musiałby być znacznie grubszy (i cięższy), aby osiągnąć porównywalną sztywność. Dlatego w strukturach takich jak monocoque w motorsporcie stosuje się kompozyt przekładkowy – łączący wysoką sztywność, niską masę i możliwość dostosowania do obciążeń lokalnych.

### WYKORZYSTANE MATERIAŁY

Do budowy zastosowano materiały kompozytowe klasy przemysłowej. Głównym materiałem konstrukcyjnym jest preimpregnowane włókno węglowe (prepreg), występujące w dwóch postaciach:

- Tkanina twill 2x2, jest najpopularniejszą formą tkaniny węglowej (ukośny spłot włókien). Stosowana jest na zewnętrzną i wewnętrzną warstwę "spajającą" resztę laminatu.

- Włókna jednokierunkowe (UD), które odpowiadają za wytrzymałość i sztywność w ściśle określonych kierunkach – ich właściwości są bardzo wysokie w osi włókna, lecz bliskie zeru prostopadle do niej, dlatego kluczowe jest odpowiednie ukierunkowanie layupu.

W technologii prepreg stosunek ilości żywicy (matrycy) do zbrojenia jest precyzyjnie kontrolowany, co zapewnia wysoką jakość laminatu i ułatwia formowanie skomplikowanych kształtów.

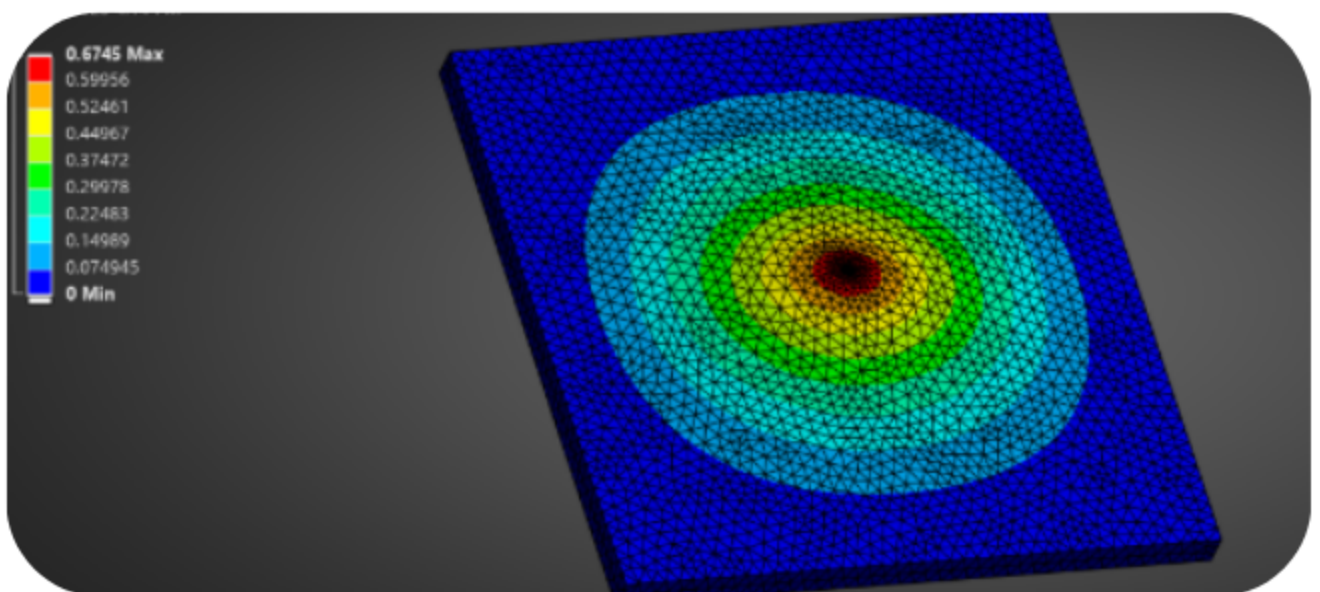
Dla uzyskania lekkiej, a zarazem sztywnej struktury typu sandwich, jako rdzeń zastosowano aluminiowy honeycomb ze stopu 5052. Warstwy zewnętrzne łączy się z rdzeniem za pomocą kleju strukturalnego (glue film).

### PPROJEKTOWANIE LAMINATU KOMPOZYTOWEGO

Laminat kompozytowy to wielowarstwowa struktura, w której każda warstwa wnosi określone właściwości mechaniczne w zależności od rodzaju zbrojenia i jego orientacji. Projektowanie laminatu polega na świadomym doborze sekwencji warstw, tak aby uzyskać wymagane właściwości wytrzymałościowe w różnych kierunkach obciążenia.

W procesie projektowania uwzględnia się m.in.:

- orientację włókien w każdej warstwie (np. 0°, 45°, -45°, 90°),
- moduł sprężystości włókien (materiały o podwyższonej sztywności mają zazwyczaj mniejszą wytrzymałość),
- typ spłotu (UD – jednokierunkowe, twill – tkanina krzyżowa),
- gramaturę każdej warstwy (g/m²),
- gramaturę rdzenia,
- grubość rdzenia



Rys. 7. Analiza MES panelu z punktem mocowania (insertem)

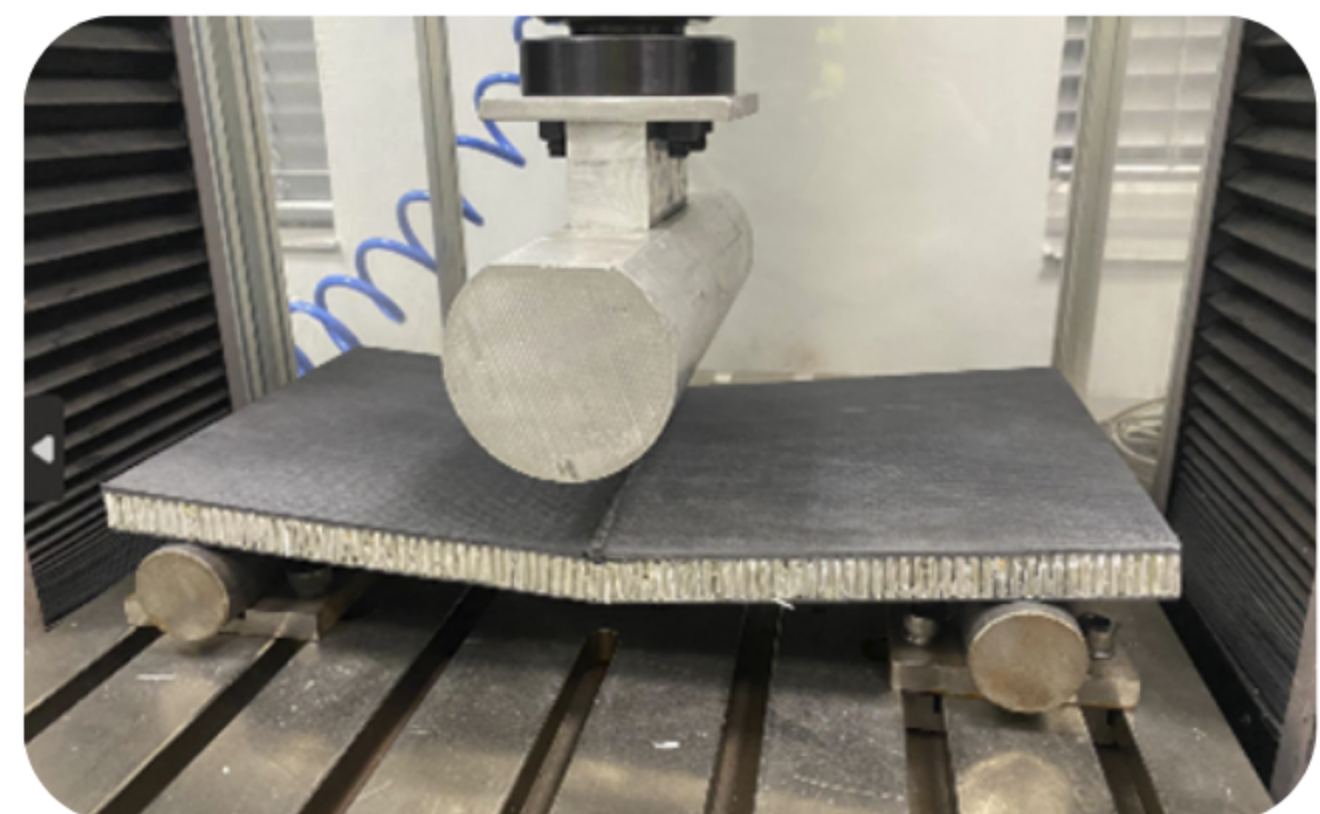
### TESTY PRÓBEK PANETU TYPU SANDWICH

W celu walidacji wytrzymałości struktury monocoque przeprowadzono testy mechaniczne próbek paneli typu sandwich zgodnie z wymaganiami dokumentu SES. Próbkę została wykonana z identycznego układu warstw, rdzenia i materiałów jak finalny element.

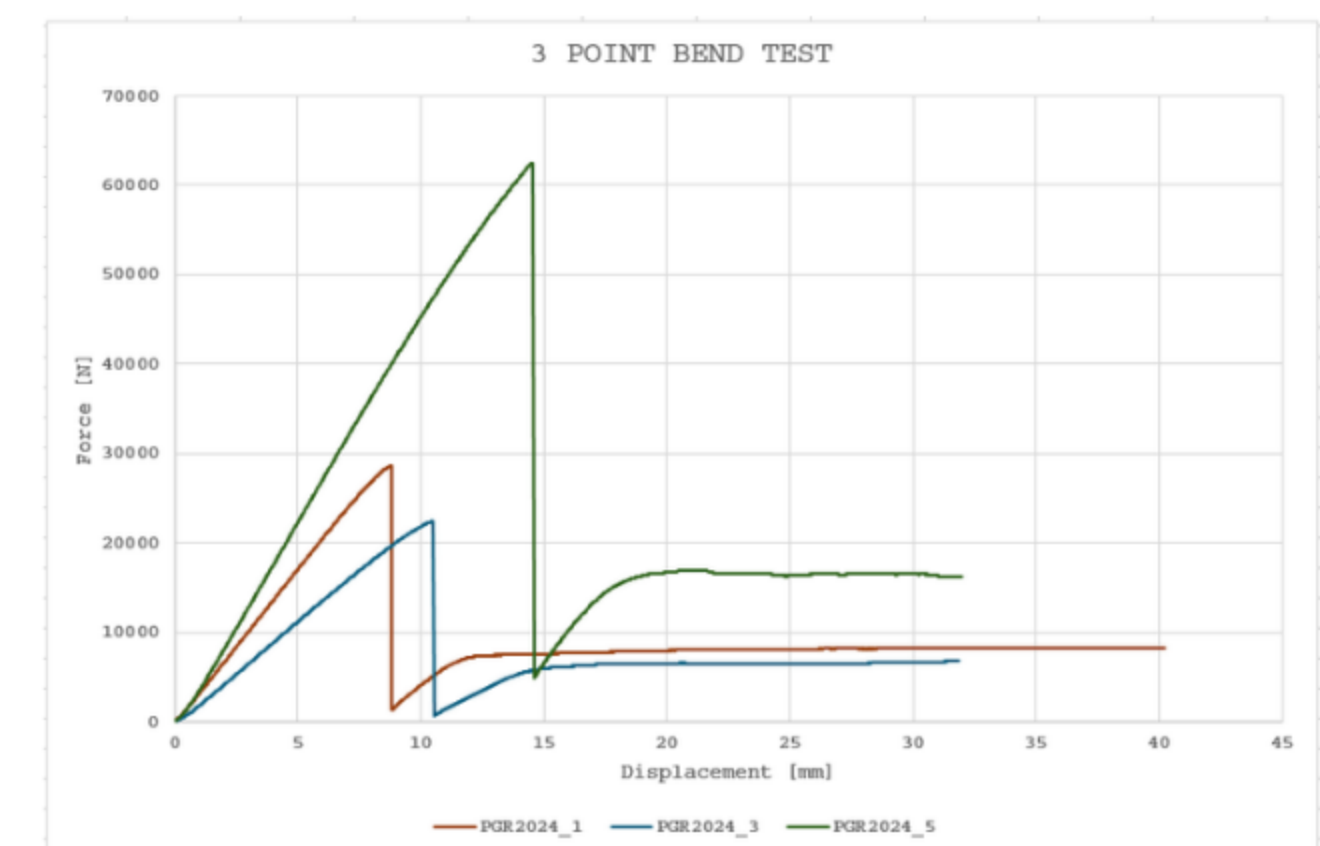
Wykonano dwa obowiązkowe badania:

- **3-point bending test (3PB)**

Test zginania trójpunktowego pozwala określić wytrzymałość, sztywność oraz sposób zniszczenia panelu pod obciążeniem. Dostarcza informacji o zachowaniu całej struktury monocoque w warunkach rzeczywistego ugięcia.



Rys. 3. Trzy-punktowe zginanie



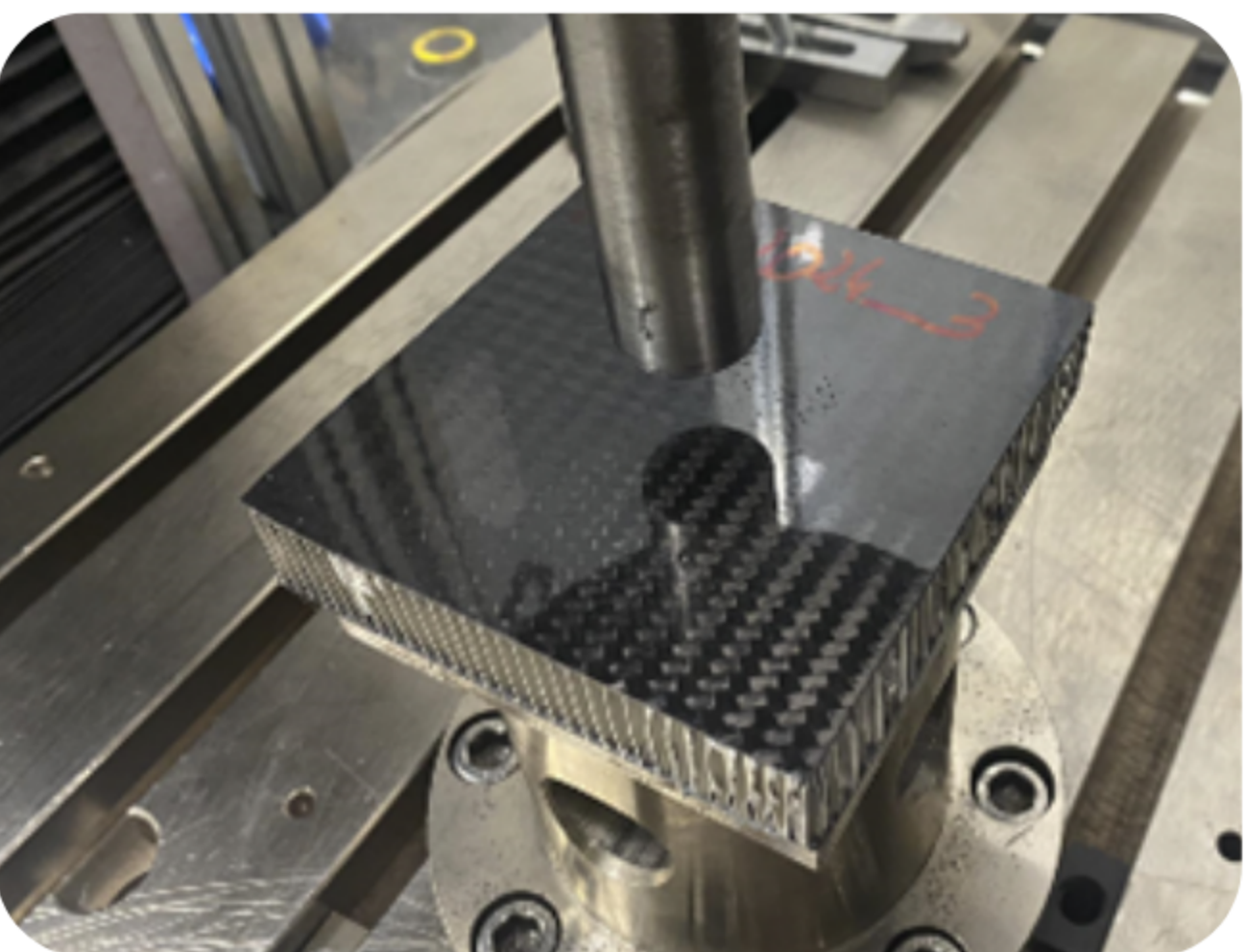
Rys. 5. Porównanie wyników testów 3-punktowego zginania próbek

### SYMULACJA MES (Metoda Elementów Skończonych)

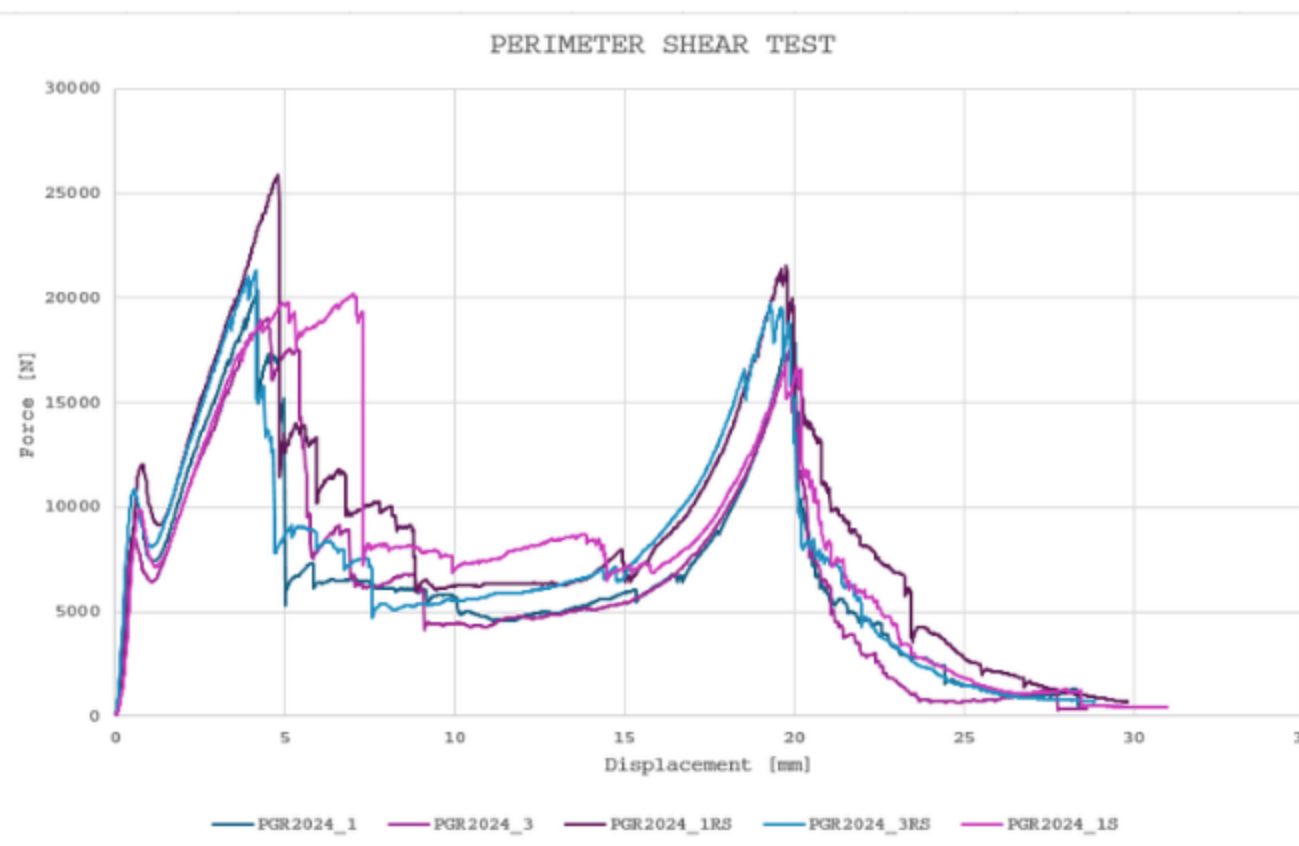
Symulacja przedstawia odkształcenia panelu kompozytowego (uproszczonego fragmentu monocoque) w miejscu mocowania zawieszenia z przyłożoną siłą 10kN (odkształcenia są istotnym parametrem dla punktów mocowań zawieszenia ze względu na ich wpływ na własności kinematyczne i dynamiczne samochodu).

- **Perimeter shear test (PST)**

Test ścinania obwodowego pozwala określić wytrzymałość na ścinanie laminatu co jest istotne przy projektowaniu punktów mocowań



Rys. 4. Testy przebijania



Rys. 6. Porównanie wyników testów przebijania obwodowego próbek

### ANALIZA BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Wykresy przedstawiają wyniki uzyskane z maszyny wytrzymałościowej. Na podstawie prób trójpunktowego zginania (3PB) można zauważyć, że panele typu sandwich pracują wyłącznie w zakresie sprężystym, po czym następuje ich gwałtowne i całkowite zniszczenie.

Z kolei podczas testu przebijania widoczne są dwa charakterystyczne piki siły. Pierwszy odpowiada przebicciu górnej warstwy kompozytowej. Fragment wykresu pomiędzy pikami obrazuje przebijanie rdzenia – materiału przekładkowego o niskiej wytrzymałości na przebiccie. Następnie następuje drugi pik siły, wynikający z przebiccia dolnej warstwy z włókna węglowego.