



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ : Mechaniczny Energetyki I Lotnictwa

Metody Komputerowe w Mechanice Konstrukcji

SPRAWOZDANIE

Ćwiczenie nr 3 (ANSYS)

Modelowanie konstrukcji kompozytowych.

Analiza naprężeń i deformacji belki ogonowej modelu samolotu.

Wykonał : Adam Nowak (indeks 304250)

(magisterskie niestacjonarne)

WARSZAWA, styczeń 2025

Spis treści

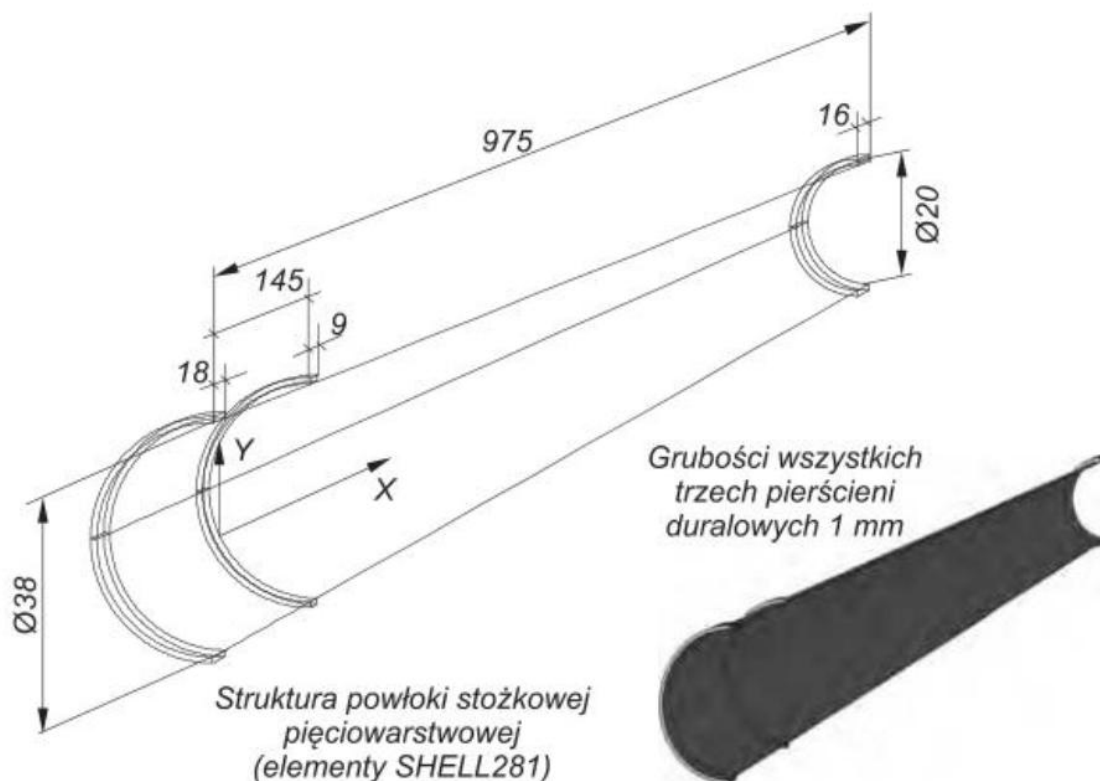
1. Cel ćwiczenia	3
2. Obiekt – dane	3
3. Właściwości materiałowe	4
4. Kryteria zniszczenia.....	5
5. Warunki brzegowe	6
6. Model MES	8
6. Symulacja weryfikacyjna.....	9
7. Analiza belki ogonowej z kompozytem szklanym	13
8. Analiza pełnego modelu belki	17
9. Analiza wytrzymałości belki.....	21

1. Cel ćwiczenia

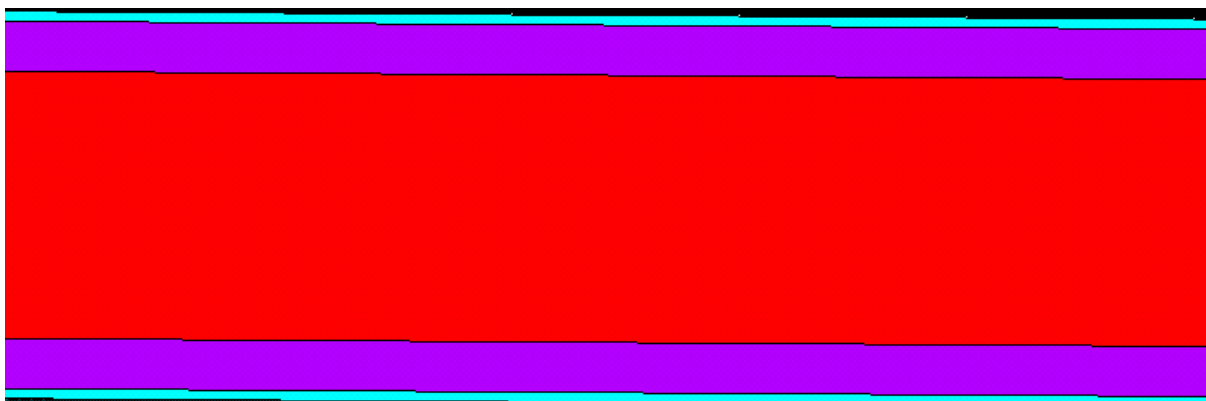
Celem ćwiczenia jest analiza belki ogonowej modelu Meleager 2001 zbudowanego na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Belka ogonowa jest rurą stożkową, wzmocnioną przez trzy duralowe wręgi. Na końcu belki zamocowany jest statecznik poziomy do ostatniej wręgi, natomiast statecznik pionowy został przyklejony do zewnętrznej powłoki.

2. Obiekt – dane

Belka składa się z rury stożkowej oraz wręg. Geometria i struktura wręg została przedstawiona na Rysunek 1. Wręgi wykonane są z duraluminium, natomiast płaszcz posiada pięciowarstwową strukturę przedstawioną w Tabeli 1.



Rysunek 1 Geometria belki ogonowej

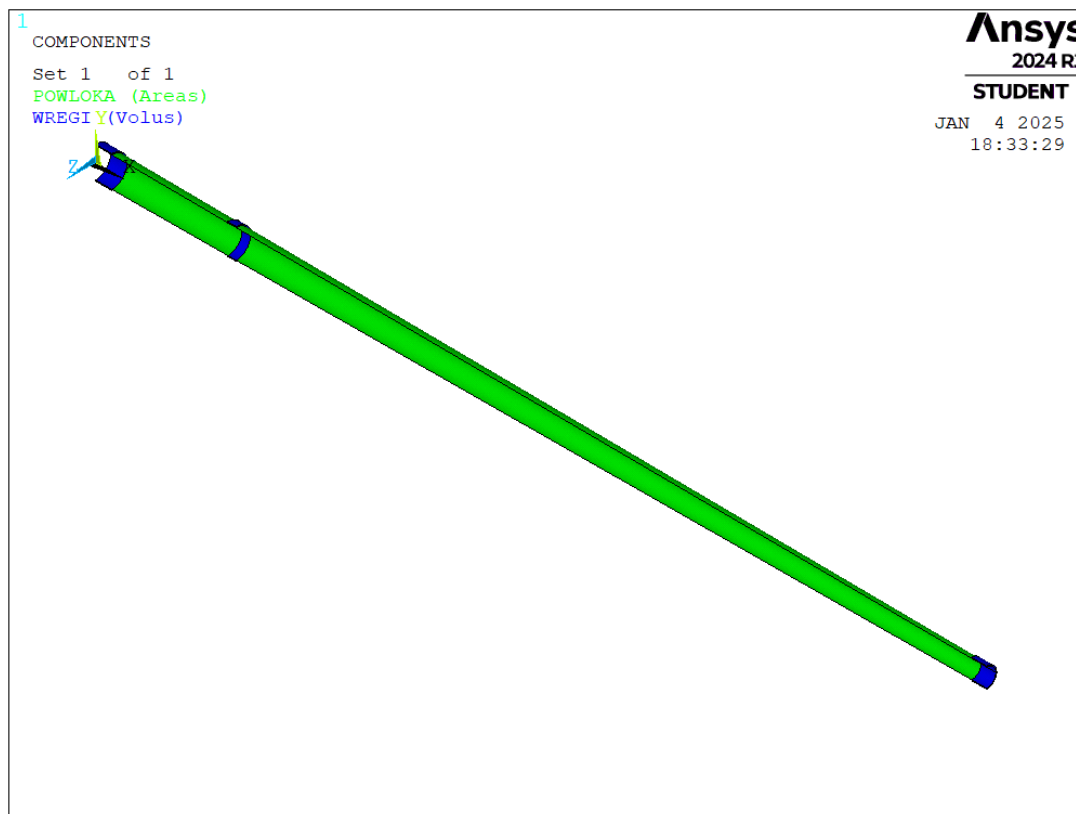


Rysunek 2 Struktura płaszcza

Warstwa	Materiał	Grubość	Orientacja włókien
1	Dural	0.03 mm	0°
2	Kompozyt węglowo-epoksydowy	0.15 mm	90°
3	Balsa	0.80 mm	90°
4	Kompozyt węglowo-epoksydowy	0.15 mm	90°
5	Dural	0.03 mm	0°

Tabela 1 Struktura płaszcza belki ogonowej

W analizie początkowo rozważono połowę belki przeciętej wzdłuż osi symetrii z nałożonym warunkiem symetrii. W kolejnych etapach przeanalizowano także cały model belki.



Rysunek 3 Geometria oraz przyjęty układ współrzędnych.

3. Właściwości materiałowe

Poniżej przedstawiono właściwości materiałowe. W dalszej części analiza zostanie zmodyfikowana – kompozyt węglowo-epoksydowy zostanie zastąpiony kompozytem szklanym o tej samej długości. Właściwości materiałowe wszystkich materiałów zaprezentowano w tabeli. Na podstawie przedstawionych założeń i ograniczeń elementu SHELL281, moduł sprężystości związany z osią „Z” nie jest brany pod uwagę. „Napężenie przechodzące przez grubość, SZ, zawsze wynosi zero”.

Parametry	Duraluminium	Balsa	Kompozyt w.-e.	Kompozyt szklany
EX [MPa]	72000	3000	96300	22555
EY [MPa]	-	80	8500	22555
EZ [MPa]	-	80	8500	1000
PRXY	0.32	0.28	0.295	0.295
PRYX	-	0.28	0.295	0.295
PRXZ	-	0.28	0.295	0.295
GXY [MPa]	-	166	6000	2675
GYZ [MPa]	-	100	1300	1000
GXZ [MPa]	-	100	1300	1000

Tabela 2 Dane materiałowe, model liniowy

4. Kryteria zniszczenia

	X	Y	Z	
Strain in Tension				<input type="text" value="0.02"/> <input type="text" value="0.02"/> <input type="text" value="0.005"/>
Strain in Compression				<input type="text" value="-0.02"/> <input type="text" value="-0.02"/> <input type="text" value="-0.005"/>
	XY	YZ	XZ	
Strain in Shear				<input type="text" value="0.015"/> <input type="text" value="0.018"/> <input type="text" value="0.015"/>
	X	Y	Z	
Stress in Tension				<input type="text" value="400"/> <input type="text" value="200"/> <input type="text" value="100"/>
Stress in Compression				<input type="text" value="-400"/> <input type="text" value="-200"/> <input type="text" value="-100"/>
	XY	YZ	XZ	
Stress in Shear				<input type="text" value="50"/> <input type="text" value="40"/> <input type="text" value="40"/>
	XY	YZ	XZ	
Stress Coupling Coefficients				<input type="text" value="0.1"/> <input type="text" value="0.08"/> <input type="text" value="0.08"/>

Rysunek 4 Kryteria wytrzymałościowe kompozytu węglowo-epoksydowego

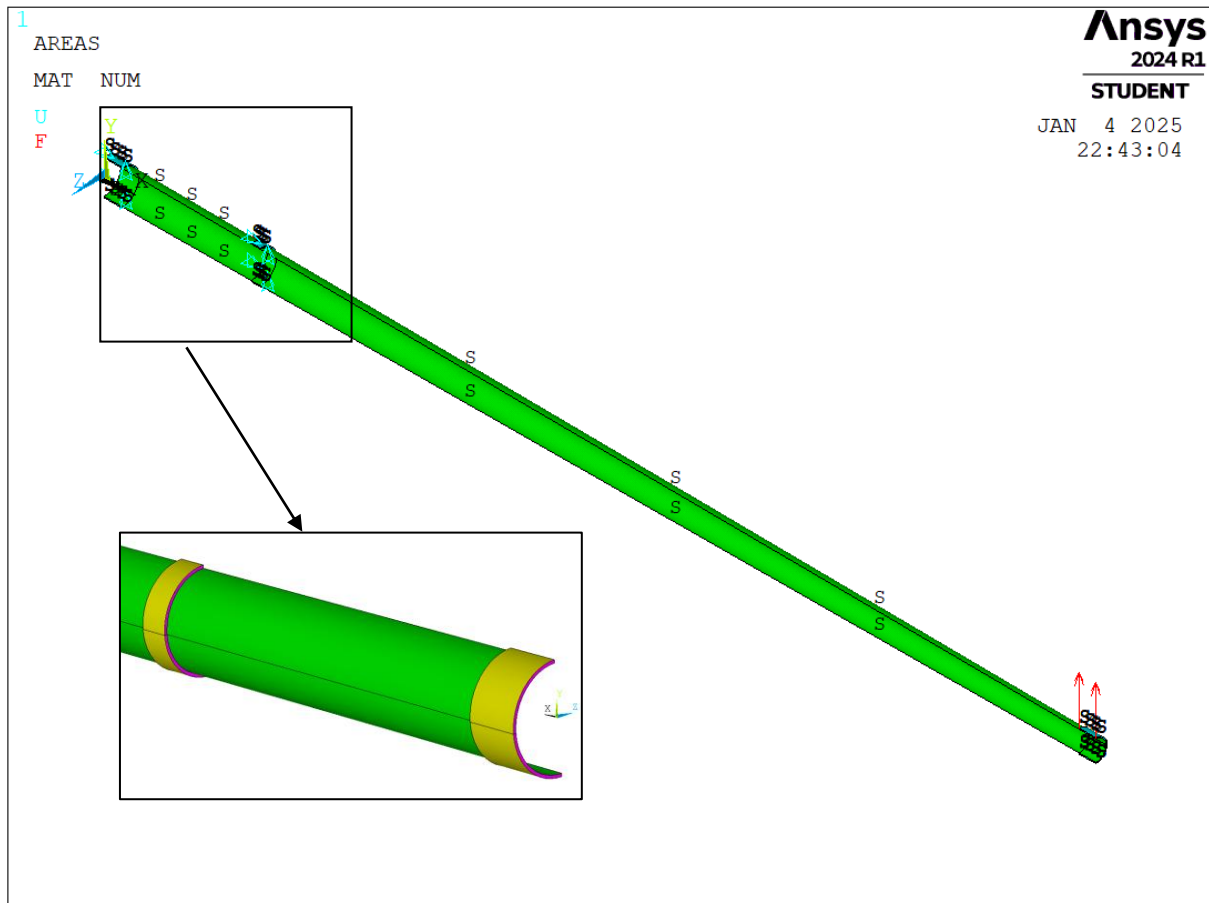
	X	Y	Z	
Strain in Tension				<input type="text" value="0.015"/> <input type="text" value="0.015"/> <input type="text" value="0.005"/>
Strain in Compression				<input type="text" value="-0.015"/> <input type="text" value="-0.015"/> <input type="text" value="-0.005"/>
	XY	YZ	XZ	
Strain in Shear				<input type="text" value="0.02"/> <input type="text" value="0.015"/> <input type="text" value="0.015"/>
	X	Y	Z	
Stress in Tension				<input type="text" value="300"/> <input type="text" value="200"/> <input type="text" value="50"/>
Stress in Compression				<input type="text" value="-300"/> <input type="text" value="-200"/> <input type="text" value="-50"/>
	XY	YZ	XZ	
Stress in Shear				<input type="text" value="50"/> <input type="text" value="40"/> <input type="text" value="40"/>
	XY	YZ	XZ	
Stress Coupling Coefficients				<input type="text" value="0.1"/> <input type="text" value="0.08"/> <input type="text" value="0.08"/>

Rysunek 5 Kryteria wytrzymałościowe kompozytu szklanego

5. Warunki brzegowe

Pierwszy przypadek (symulacja weryfikacyjna):

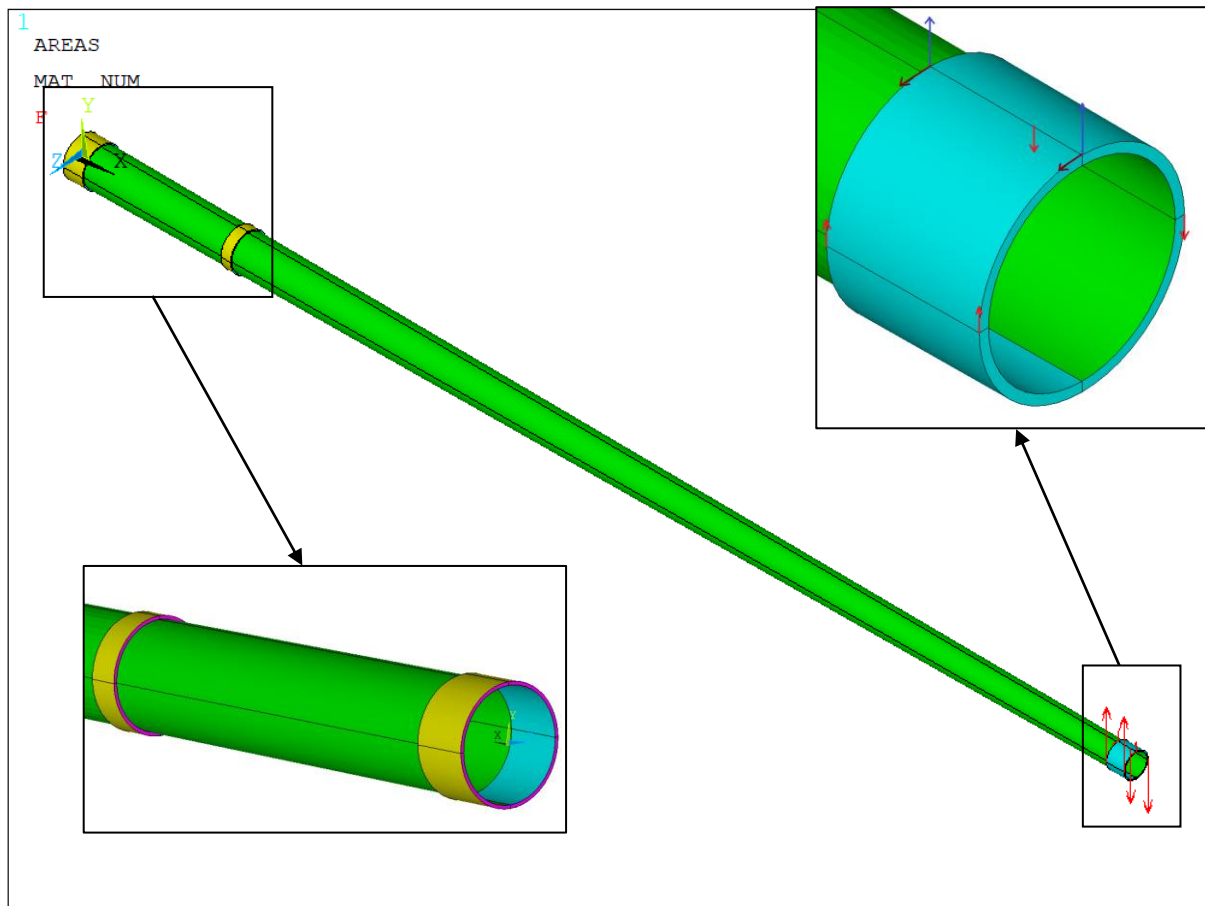
- Siła pionowa od statecznika poziomego o wartości 20 N została przyłożona w dwóch punktach na wręcie po 10 N.
- Wprowadzono warunki symetrii na liniach i powierzchniach symetrii belki.
- Dodatkowe na wręgach $UX = 0$, $UY = 0$.
- W dodatkowej analizie zmiana kompozytu węglowo-epoksydowego na kompozyt szklany.



Rysunek 6 Warunki brzegowe, przypadek 1

Drugi przypadek:

- Siła pionowa od statecznika poziomego o wartości 40 N została przyłożona w dwóch punktach na wrędze po 20 N.
- Siła poprzeczna od statecznika pionowego o wartości 30 N, przyłożona w dwóch punktach na wrędze po 15 N.
- Moment skręcający od statecznika pionowego o wartości 5000 Nmm, przyłożony jako dwie pary sił na wrędze o promieniu 11m w czterech punktach po 114 N.
- Mocowanie na wręgach $UX = 0$, $UY = 0$.



Rysunek 7 Warunki brzegowe, przypadek drugi 2

6. Model MES

5.1 Użyte oprogramowanie.

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano oprogramowanie Ansys Mechanical Enterprise z wykorzystaniem aplikacji wewnętrznej APDL.

5.2 Zastosowane elementy skończone.

Obiekt został zamodelowany za pomocą elementów SHELL281 oraz SOLID186.

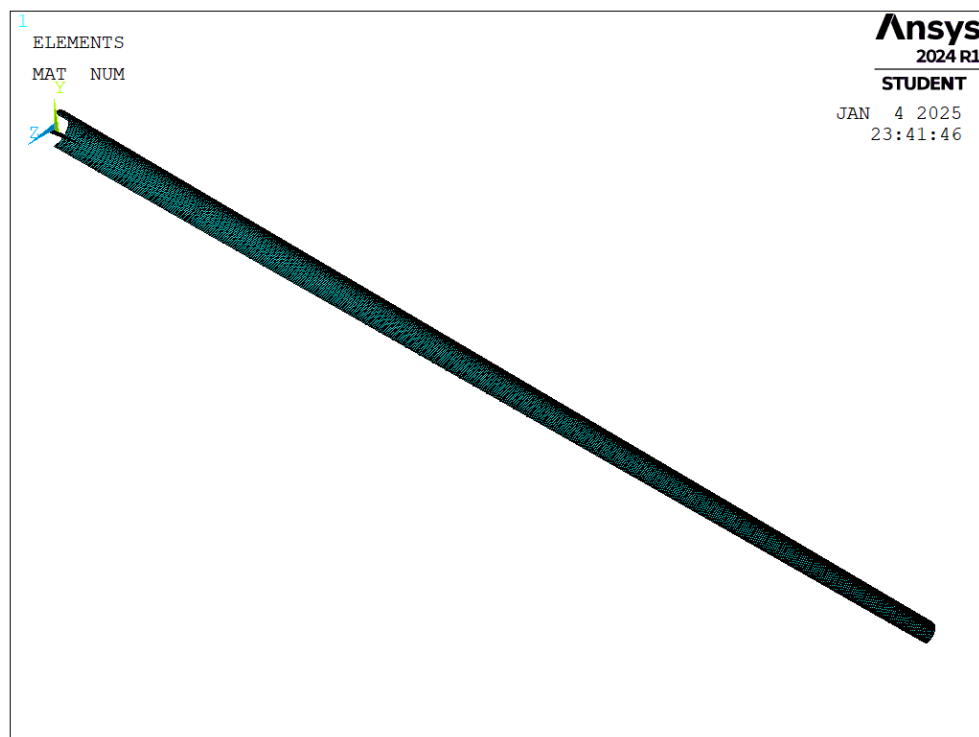
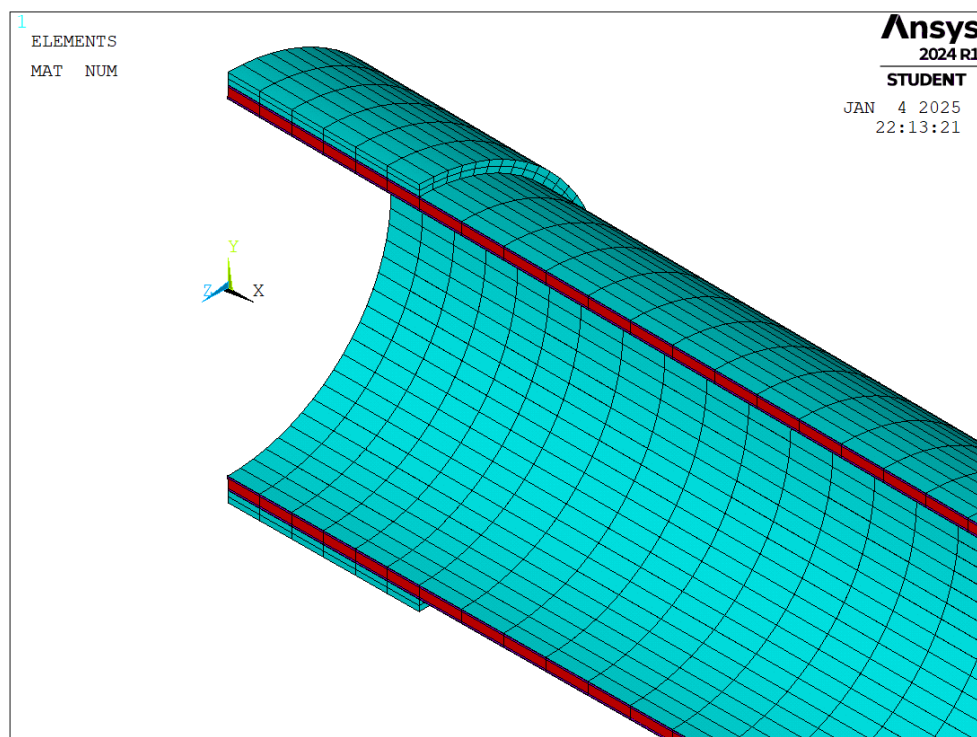


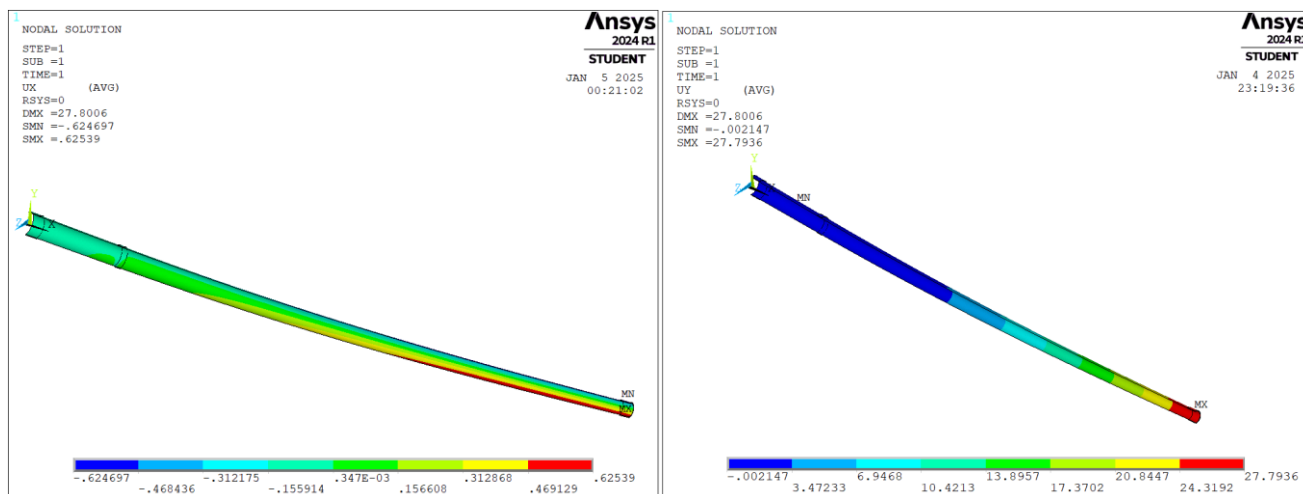
Tabela 3 Siatka strukturalna modelu



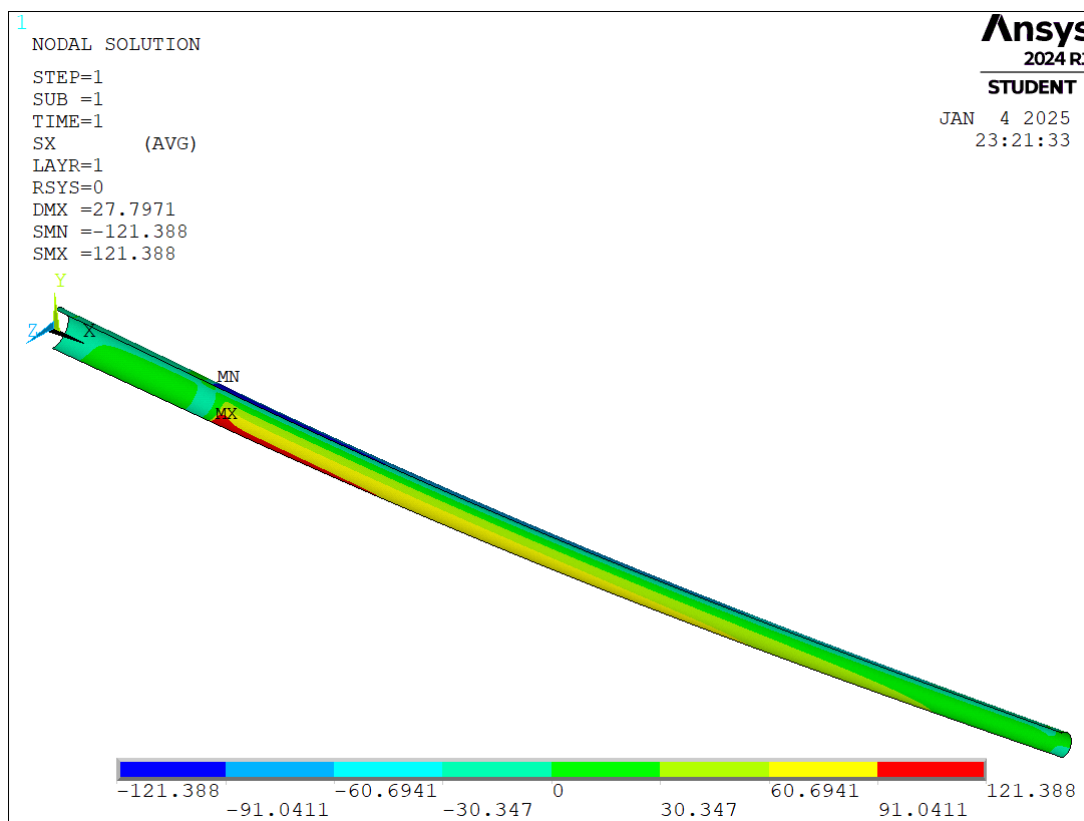
Rysunek 8 Model siatki zbliżenie na pierwszą wręgę

6. Symulacja weryfikacyjna

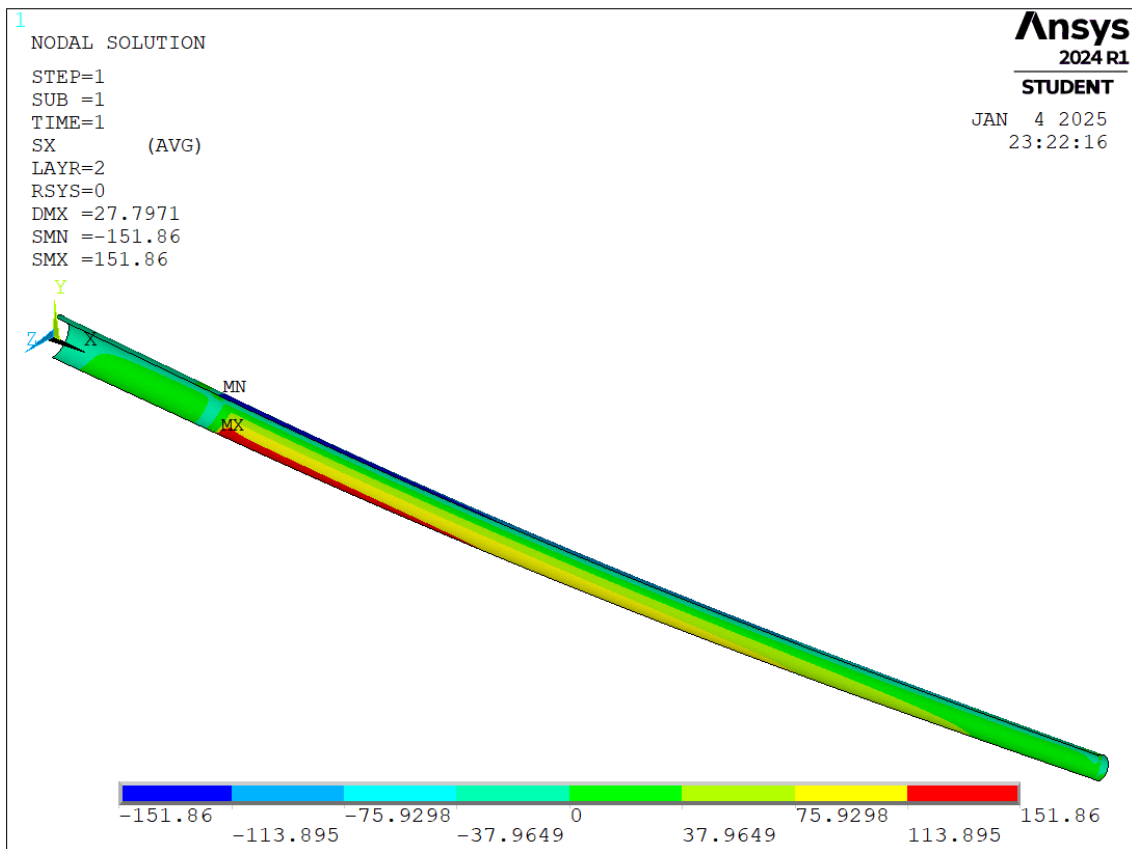
Symulacja weryfikacyjna została przeprowadzona w celu sprawdzenia poprawności modelu oraz porównania wyników uzyskanych z wynikami podanymi w instrukcji.



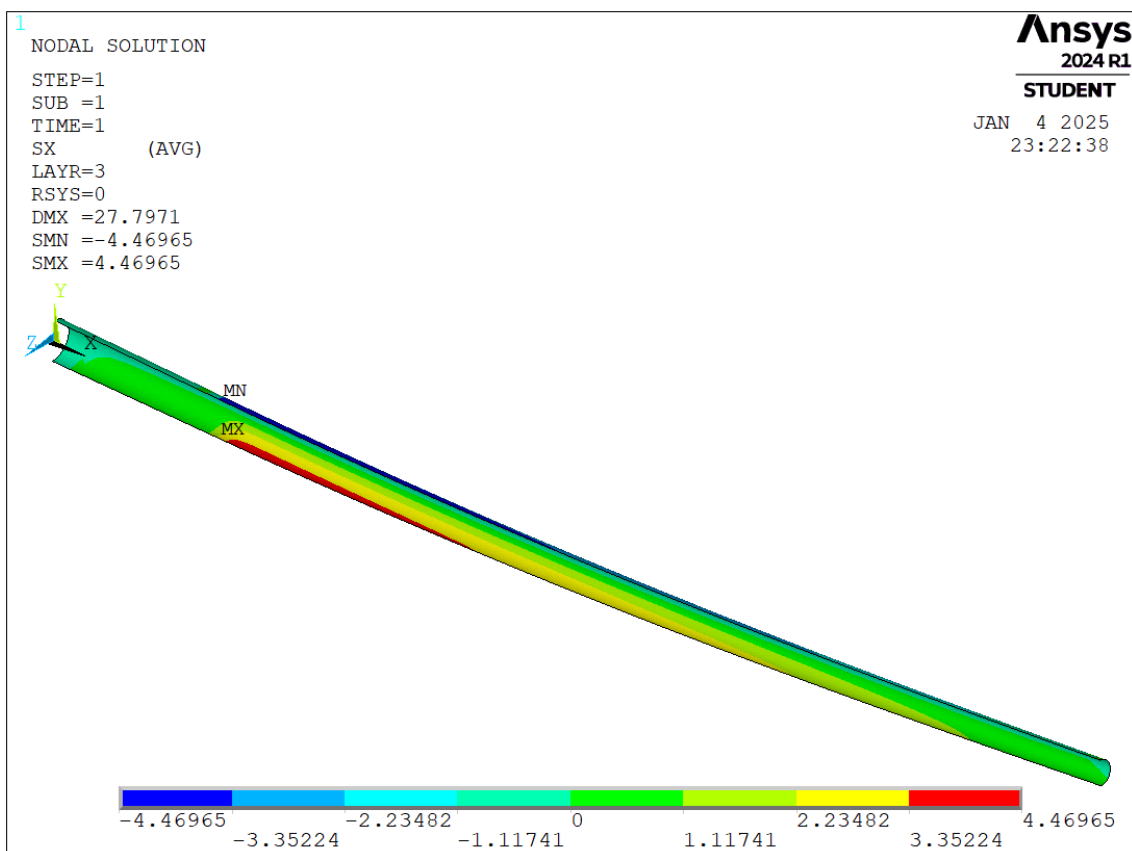
Rysunek 9 Przemieszczenia UX oraz UY



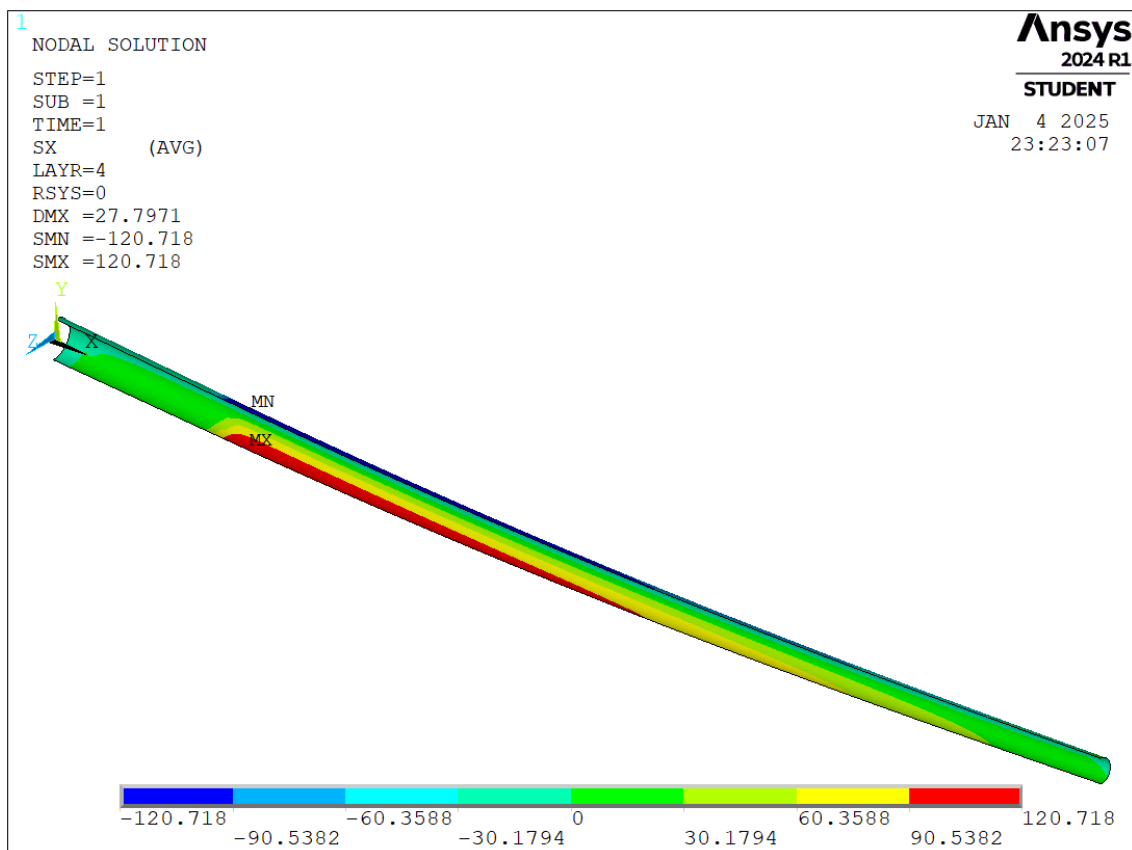
Rysunek 10 Naprężenia na kierunku X w warstwie pierwszej (duraluminium)



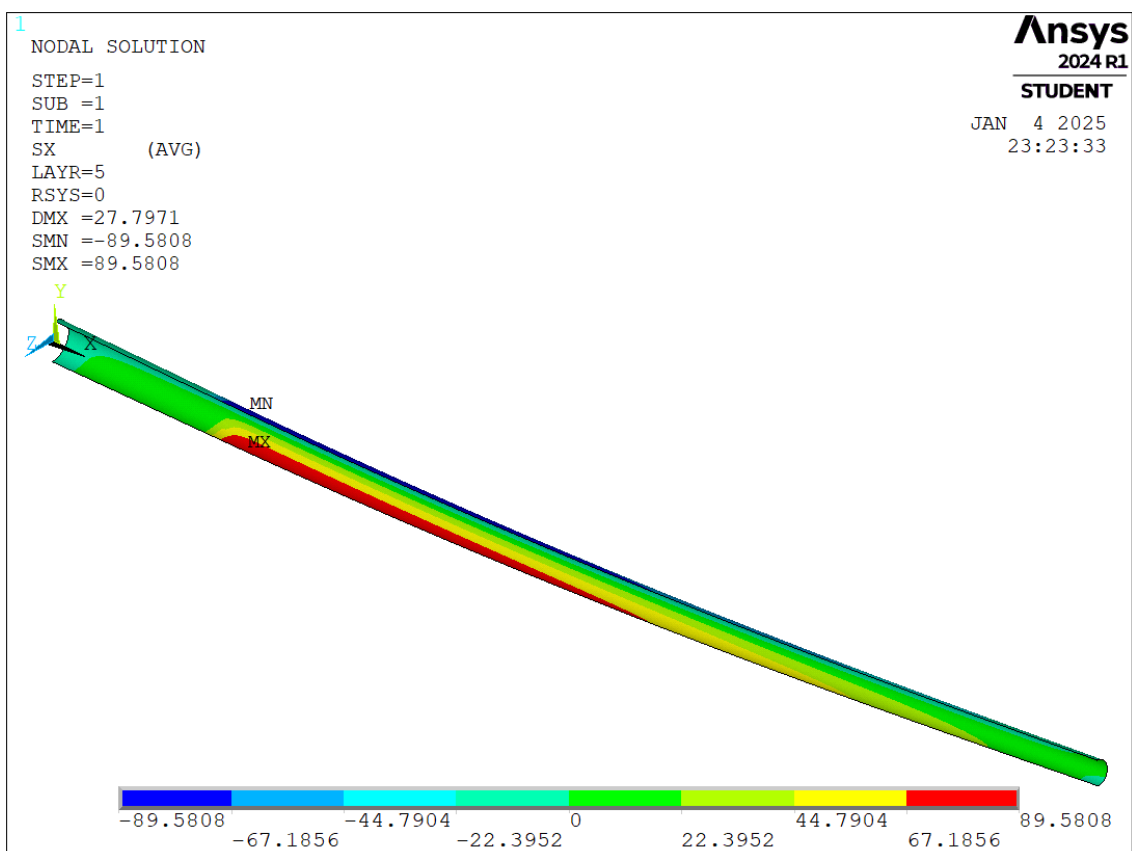
Rysunek 11 Naprężenia na kierunku X w warstwie drugiej (rowing węglowy)



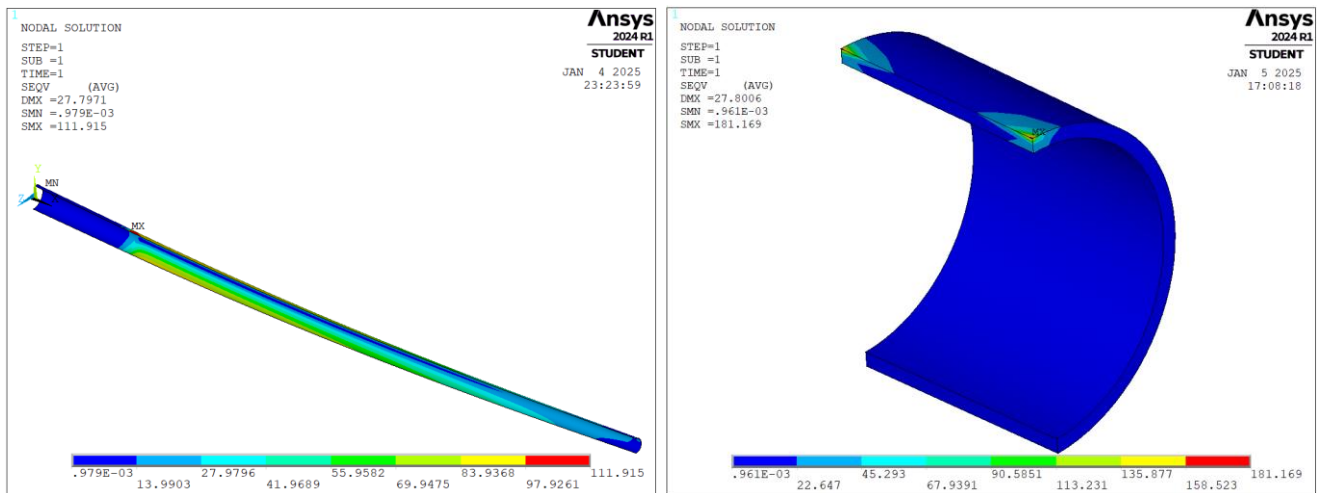
Rysunek 12 Naprężenia na kierunku X w warstwie trzeciej (balsa)



Rysunek 13 Naprężenia na kierunku X w warstwie czwartej (rowing węglowy)



Rysunek 14 Naprężenia na kierunku X w warstwie piątej (duraluminium)



Rysunek 15 Naprężenia zredukowane w warstwach zewnętrznych (duraluminium) oraz na wrędze

Przemieszczenia [mm]	UX	UY	UZ
Symulacja: instrukcja	-	24	-
Symulacja: weryfikacyjna	0.62	28	0.008
Zgodność	-	86%	-

Tabela 4 Wyniki symulacji weryfikacyjnej, przemieszczenia

Naprężenia na kierunku X [Mpa]	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5
Symulacja: instrukcja	75	100	3.1	96	72
Symulacja: weryfikacyjna	121	152	4.5	121	90
Zgodność	62%	66%	69%	79%	80%

Tabela 5 Wyniki symulacji weryfikacyjnej, naprężenia w osi X

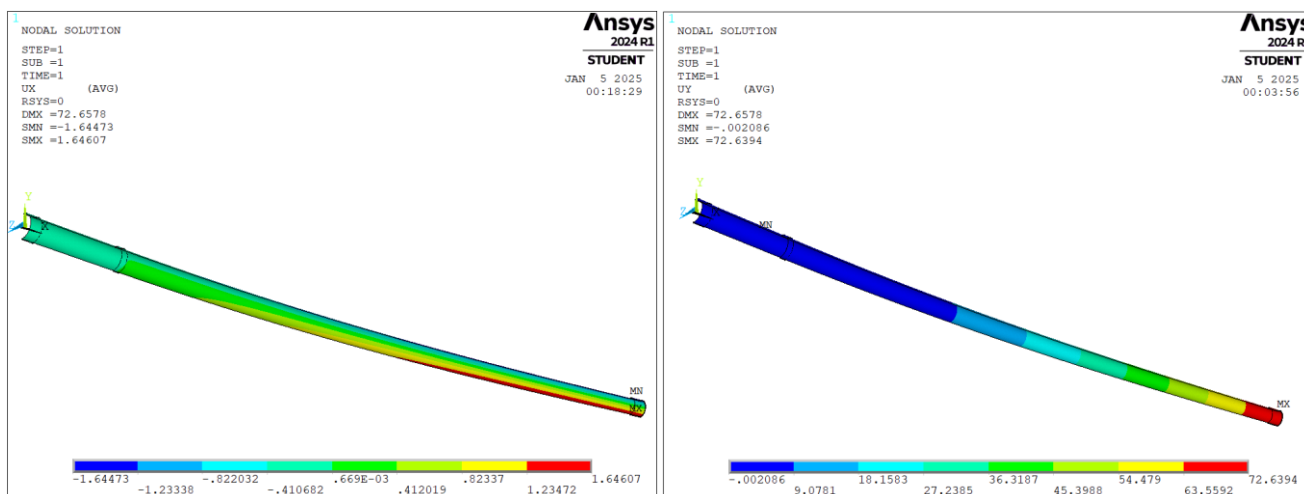
Naprężenia zredukowane [MPa]	Płaszcz	Wręga
Symulacja: instrukcja	83	-
Symulacja: weryfikacyjna	112	181
Zgodność	74%	-

Tabela 6 Wyniki symulacji weryfikacyjnej, naprężenia zredukowane Von-Mises'a

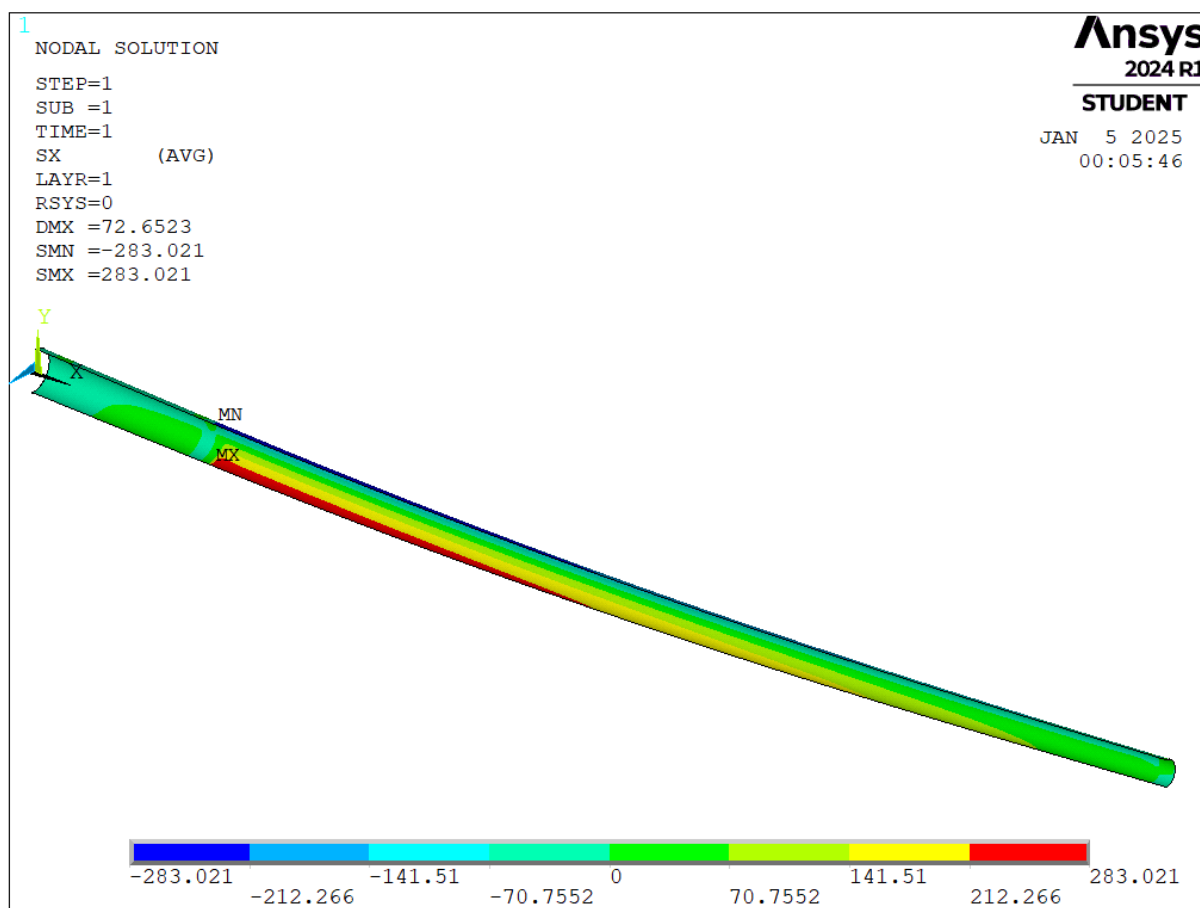
Wyniki symulacji

Wyniki symulacji weryfikacyjnej pokazują pewne rozbieżności w porównaniu do wyników podanych w instrukcji. Wartości przemieszczeń oraz kolejno naprężeń na kierunku X w kolejnych warstwach wykazują rozbieżności, które mogą wynikać z zastosowania bardziej gęstej siatki w symulacji weryfikacyjnej. Zwiększenie gęstości siatki zwykle prowadzi do bardziej precyzyjnych wyników, dlatego wyniki uzyskane w tej symulacji mogą być bliższe rzeczywistym wartościom.

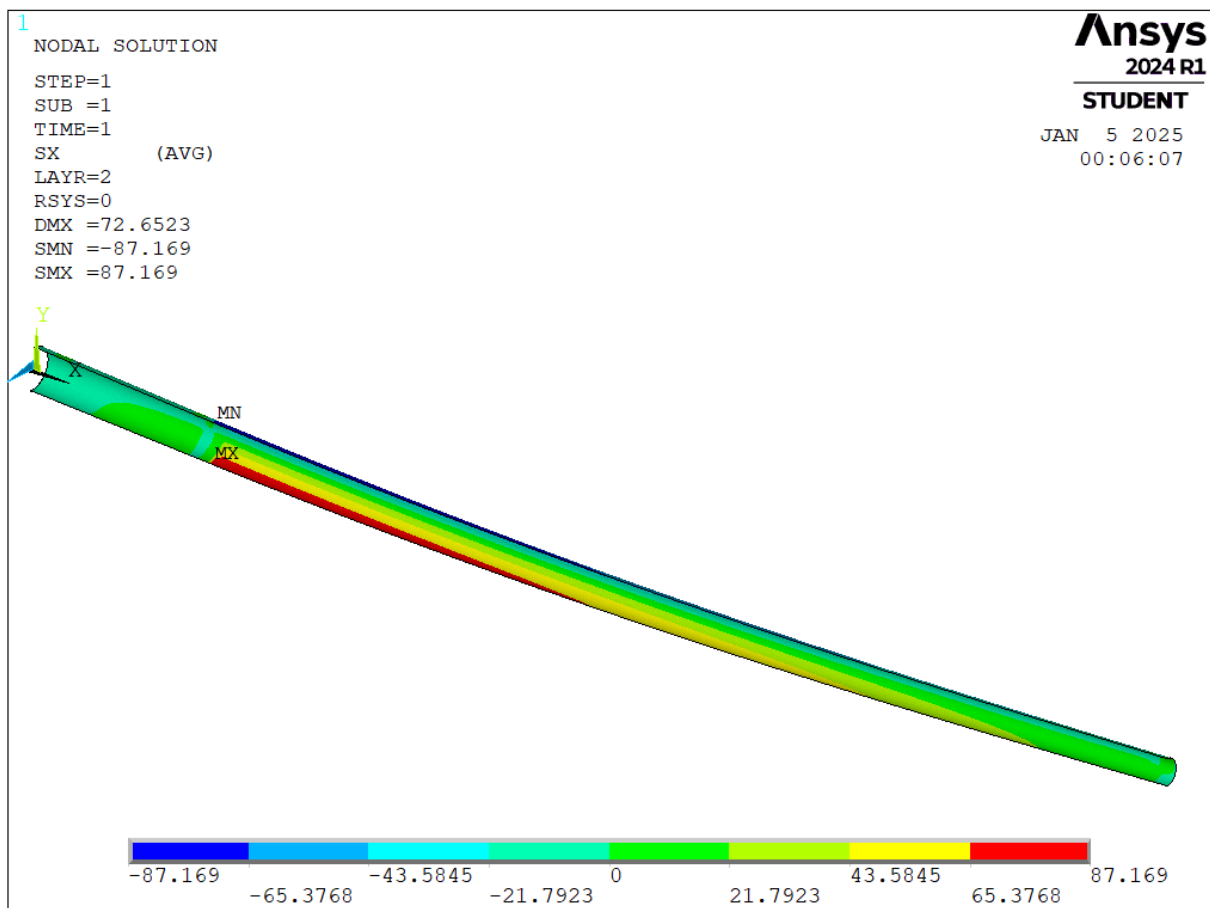
7. Analiza belki ogonowej z kompozytem szklanym



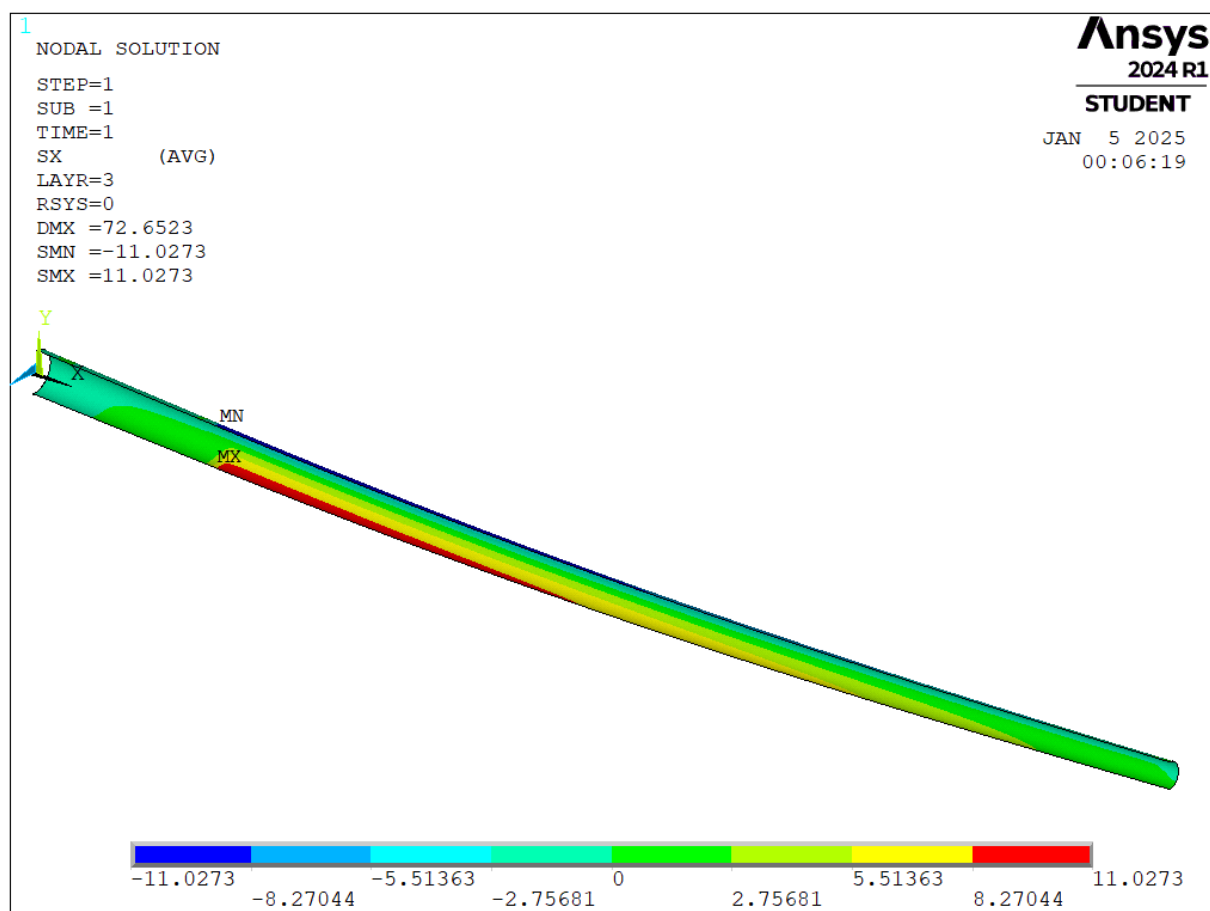
Rysunek 16 Przeszaczenia UX oraz UY z kompozytem szklanym



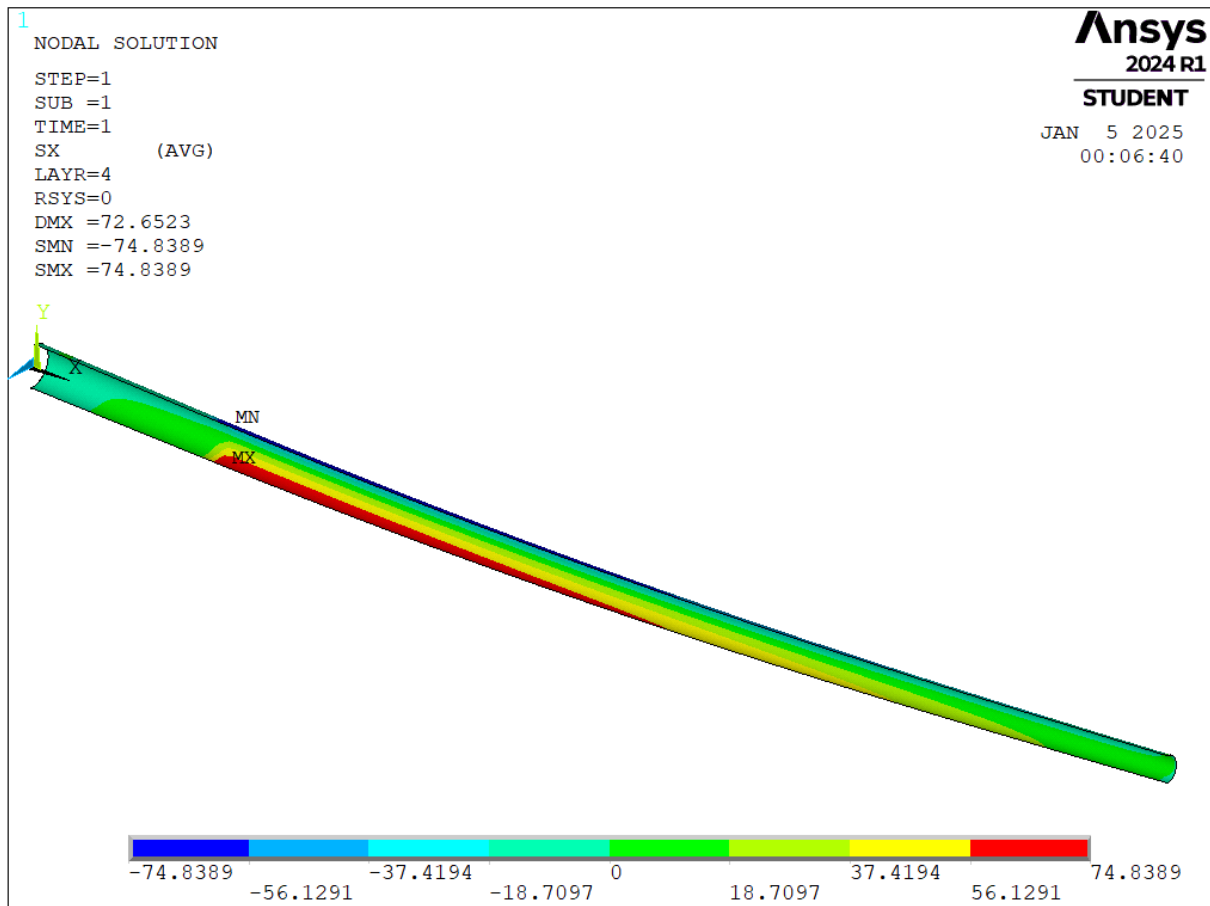
Rysunek 17 Naprężenia na kierunku X w warstwie piątej (duraluminium)



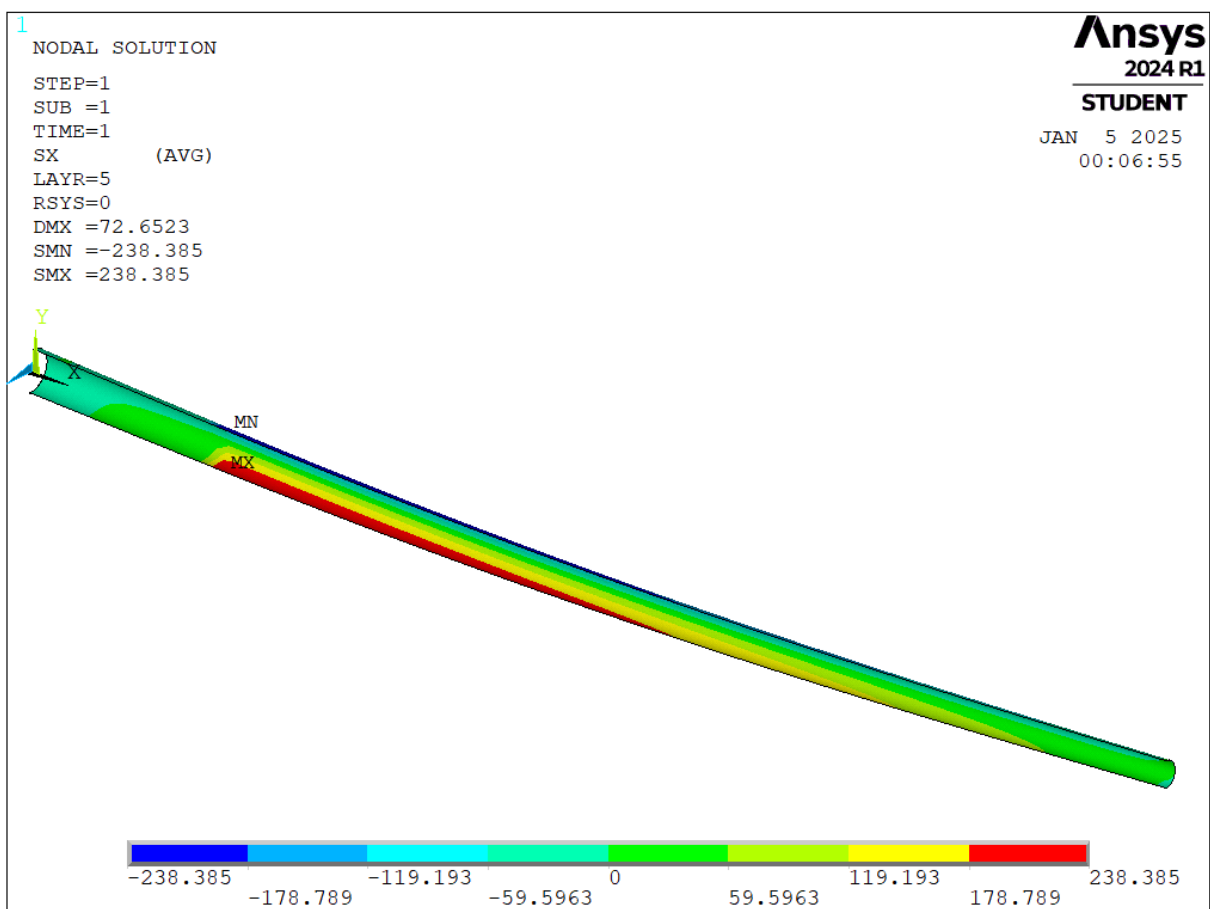
Rysunek 18 Naprężenia na kierunku X w warstwie czwartej (kompozyt szklany)



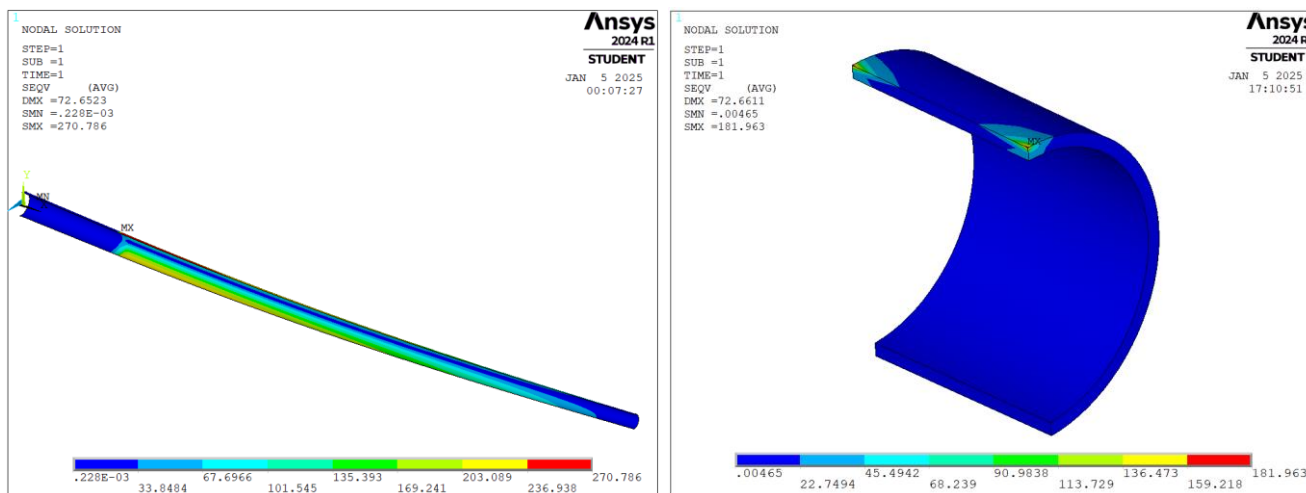
Rysunek 19 Naprężenia na kierunku X w warstwie trzeciej (balsa)



Rysunek 20 Naprężenia na kierunku X w warstwie czwartej (kompozyt szklany)



Rysunek 21 Naprężenia na kierunku X w warstwie piątej (duraluminium)



Rysunek 22 Naprężenia zredukowane w warstwach zewnętrznych (duraluminium) oraz na wrędze

Przemieszczenia [mm]	UX	UY	UZ
Kompozyt węglowo-epoksydowy	0.62	28	0.008
Kompozyt szklany	1.64	73	0.008
Różnica	1.02	45	0

Tabela 7 Wyniki symulacji z kompozytem szklanym, przemieszczenia

Naprężenia na kierunku X [Mpa]	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5
Kompozyt węglowo-epoksydowy	121	152	4.5	121	90
Kompozyt szklany	283	87	11	75	238
Różnica	162	-65	6.5	-46	148

Tabela 8 Wyniki symulacji z kompozytem szklanym, naprężenia w osi X

Naprężenia zredukowane	Płaszcz [MPa]	Wręga [MPa]
Kompozyt węglowo-epoksydowy	112	181
Kompozyt szklany	270	182
Różnica	158	1

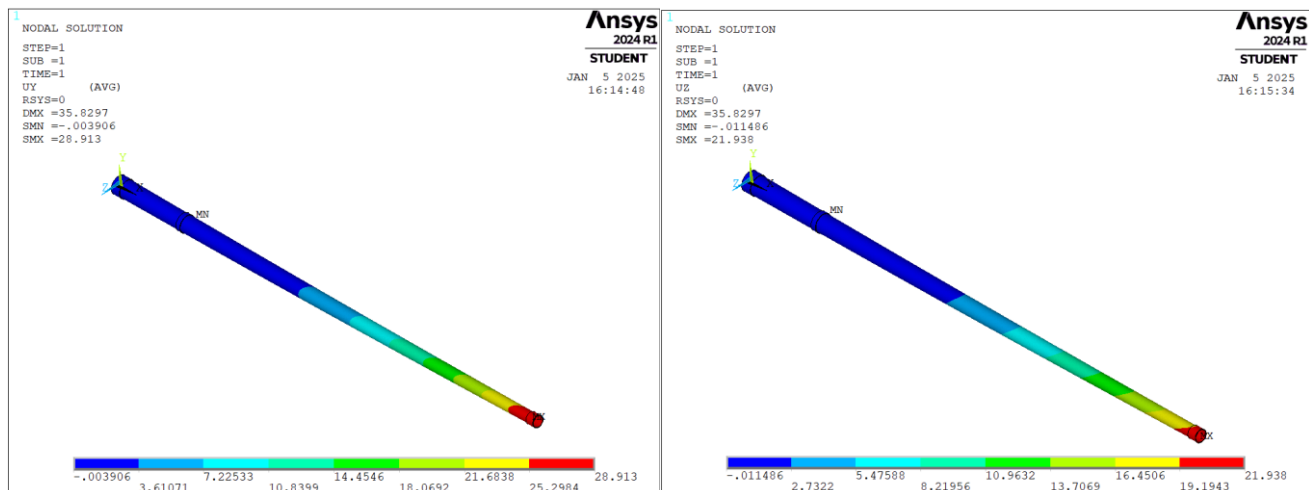
Tabela 9 Wyniki symulacji z kompozytem szklanym, naprężenia zredukowane Von-Mises'a

Wyniki symulacji

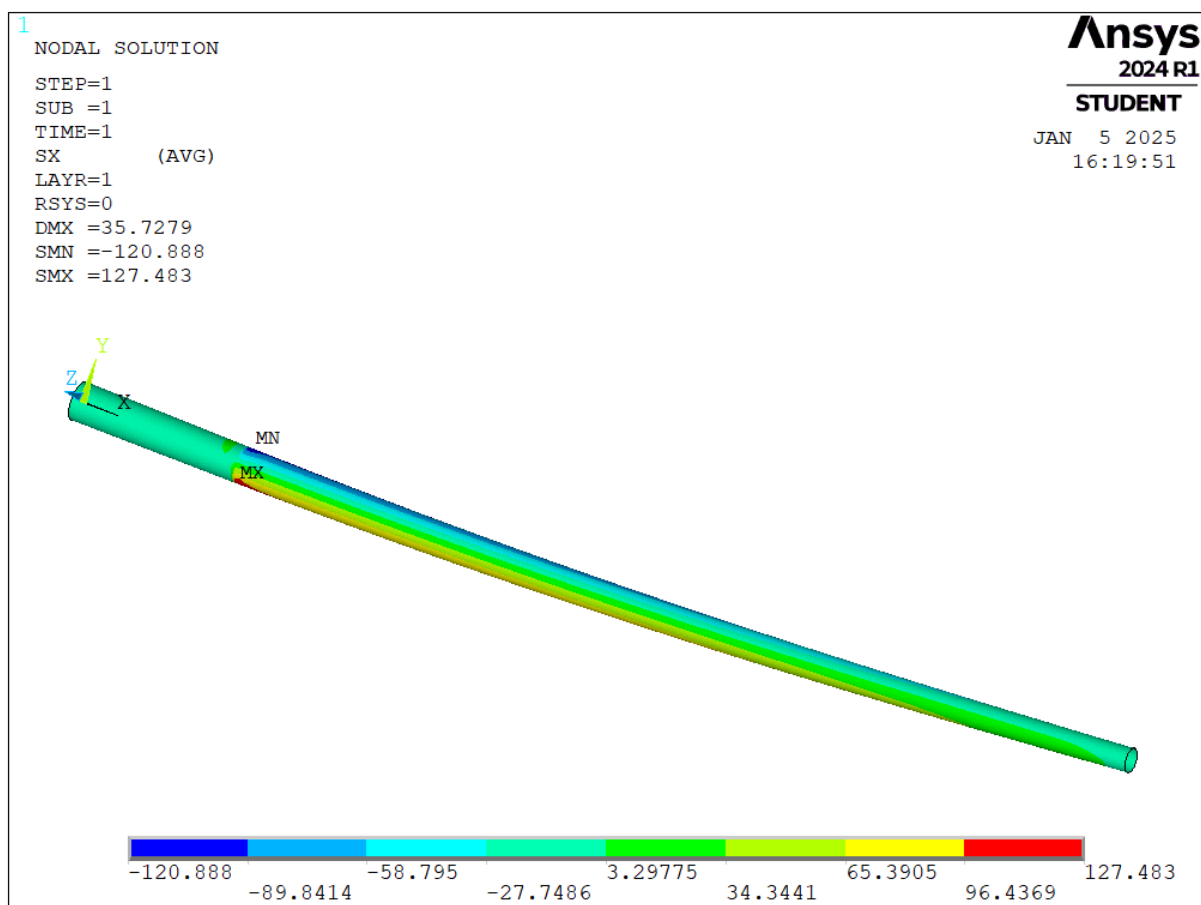
Wyniki symulacji z kompozytem szklanym pokazują, że zarówno naprężenia, jak i wartości deformacji (UX, UY) znacząco wzrosły w porównaniu do kompozytu węglowo-epoksydowego. Taki wzrost ma negatywny wpływ na wytrzymałość konstrukcji, co wynika z różnic w właściwościach materiałowych między tymi dwoma kompozytami.

Wyjątek stanowią naprężenia w warstwie dla kierunku X, gdzie wartości dla kompozytu szklanego są niższe niż dla kompozytu węglowo-epoksydowego. Jest to spowodowane niższym modułem sprężystości w kierunku X (EX) dla kompozytu szklanego (22.555 MPa w porównaniu do 96.300 MPa dla kompozytu węglowo-epoksydowego). Niższy moduł Younga prowadzi do większej zdolności do deformacji, co skutkuje mniejszymi naprężeniami w tym kierunku.

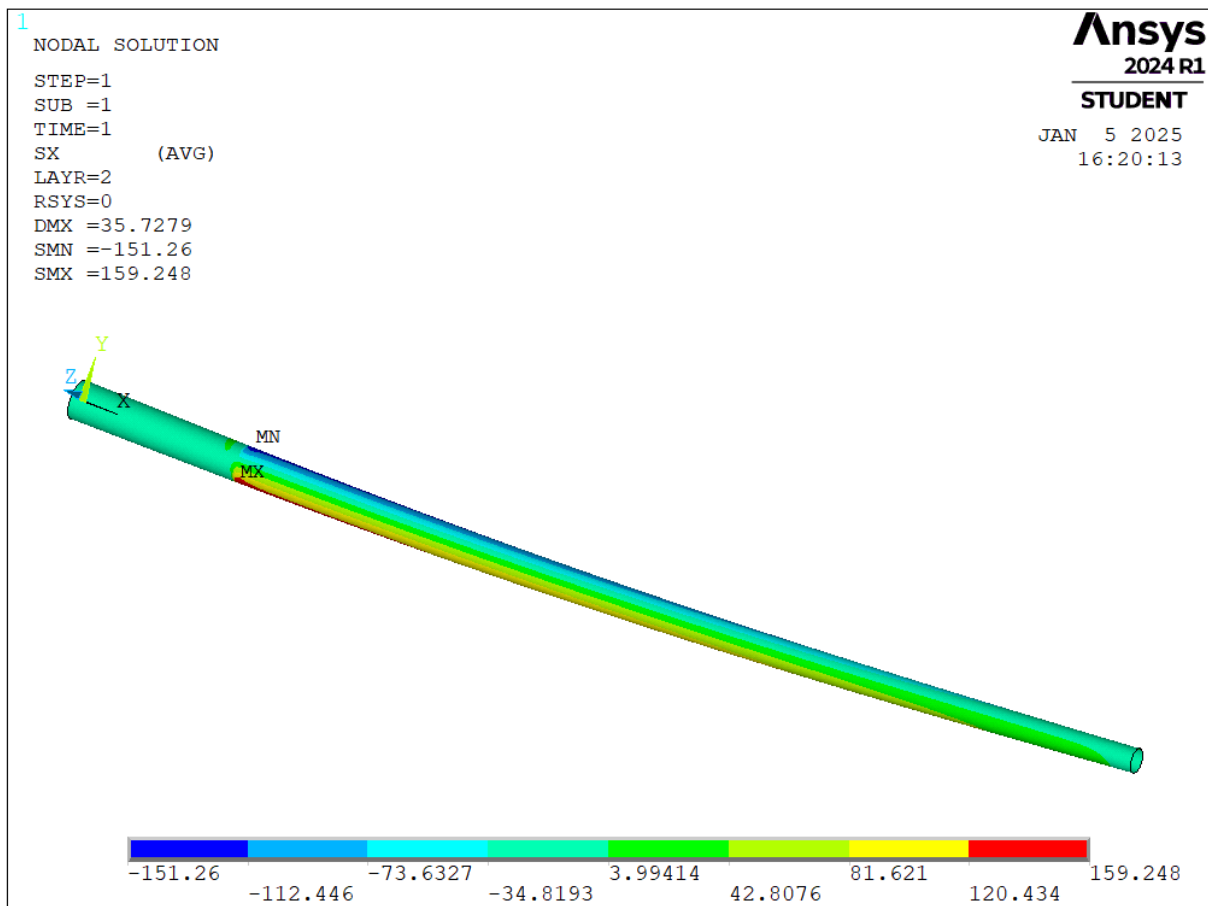
8. Analiza pełnego modelu belki



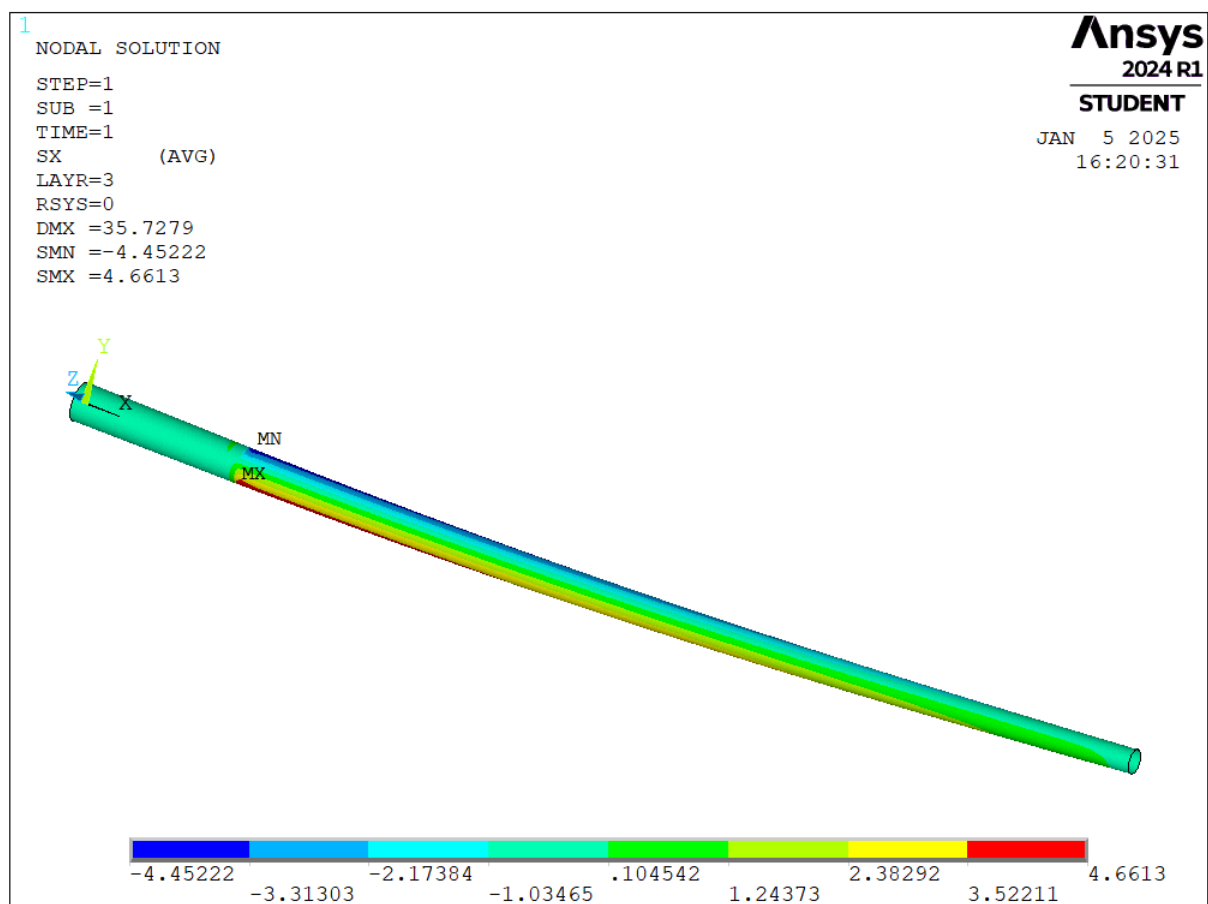
Rysunek 23 Przemieszczenia UY oraz UZ z kompozytem szklanym



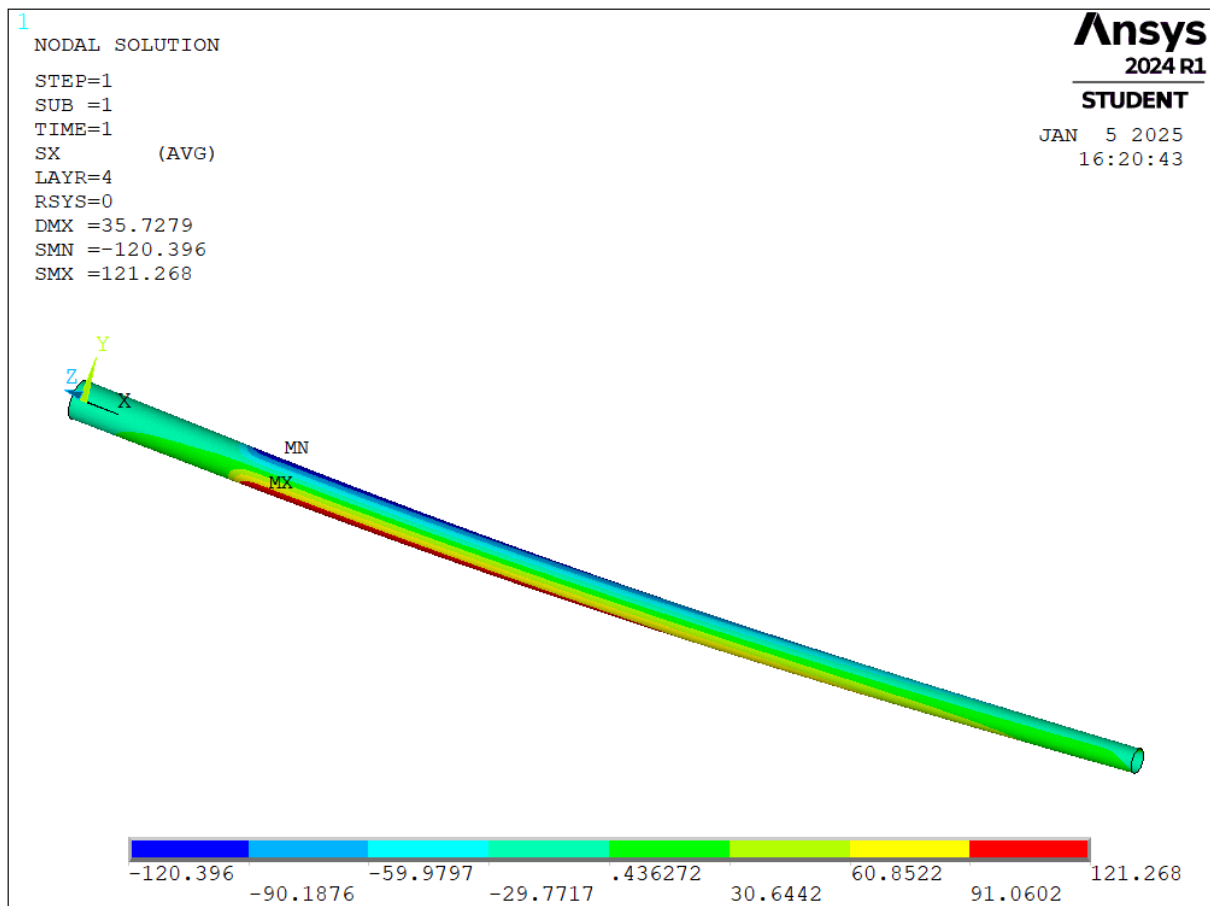
Rysunek 24 Naprężenia na kierunku X w warstwie pierwszej (duraluminium)



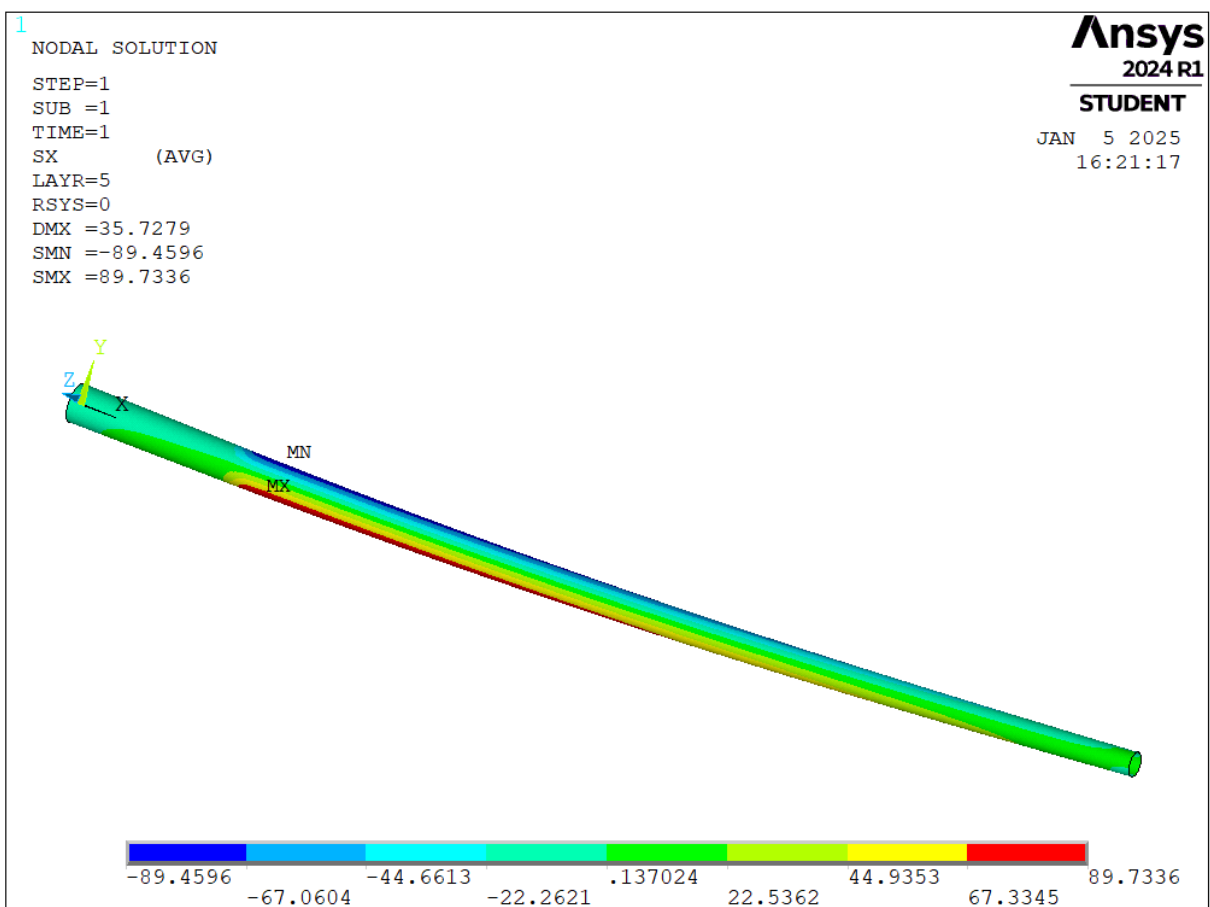
Rysunek 25 Naprężenia na kierunku X w warstwie drugiej (rowing węglowy)



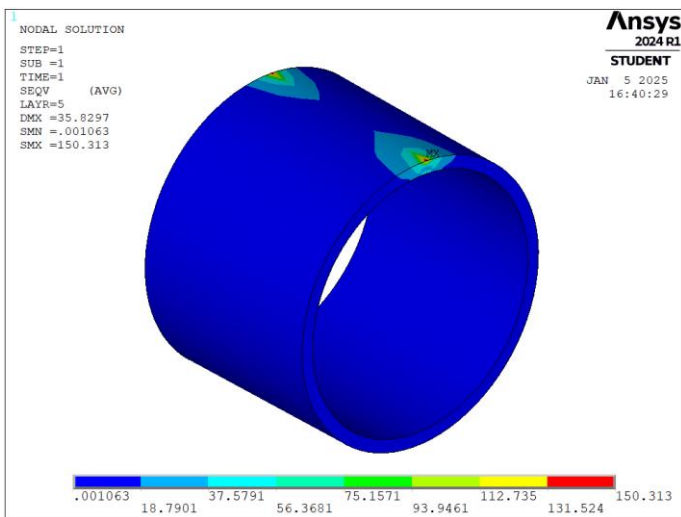
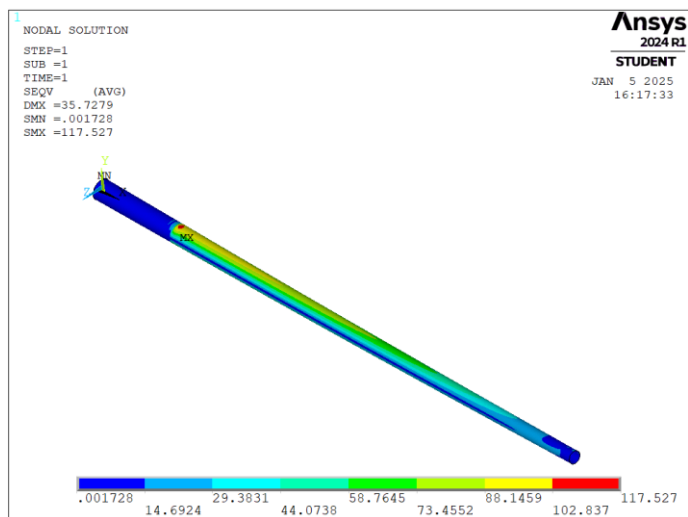
Rysunek 26 Naprężenia na kierunku X w warstwie trzeciej (balsa)



Rysunek 27 Naprężenia na kierunku X w warstwie czwartej (rowing węglowy)



Rysunek 28 Naprężenia na kierunku X w warstwie piątej (duraluminium)



Rysunek 29 Naprężenia zredukowane w warstwach zewnętrznych (duraluminium) oraz na końcowej wrędze

Przemieszczenia [mm]	UX	UY	UZ
Symulacja weryfikacyjna	0.62	28	0.008
Symulacja pełnego modelu	0.78	29	22

Tabela 10 Wyniki symulacji modelu pełnego, przemieszczenia

Naprężenia na kierunku X [MPa]	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5
Symulacja weryfikacyjna	121	152	4.5	121	90
Symulacja pełnego modelu	127	159	4.7	121	90

Tabela 11 Wyniki symulacji modelu pełnego, naprężenia w osi X

Naprężenia zredukowane [MPa]	Płaszcz	Wręga
Symulacja weryfikacyjna	112	181
Symulacja pełnego modelu	118	150

Tabela 12 Wyniki symulacji modelu pełnego, naprężenia zredukowane Von-Mises'a

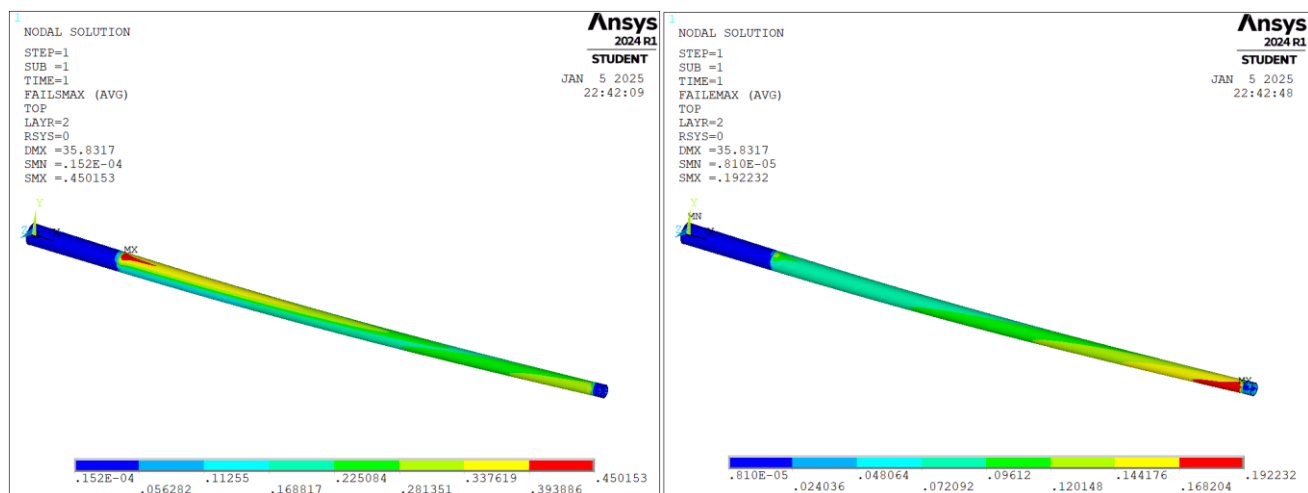
Wyniki symulacji

Wyniki symulacji pełnego modelu z kompozytem węglowo-epoksydowym wskazują na niewielki wzrost wartości naprężeń i przemieszczeń w przypadku pełnego modelu. Różnice te wynikają z uwzględnienia w pełnym modelu dodatkowych obciążeń, takich jak siła poprzeczna od usterzenia poziomego oraz moment skręcający.

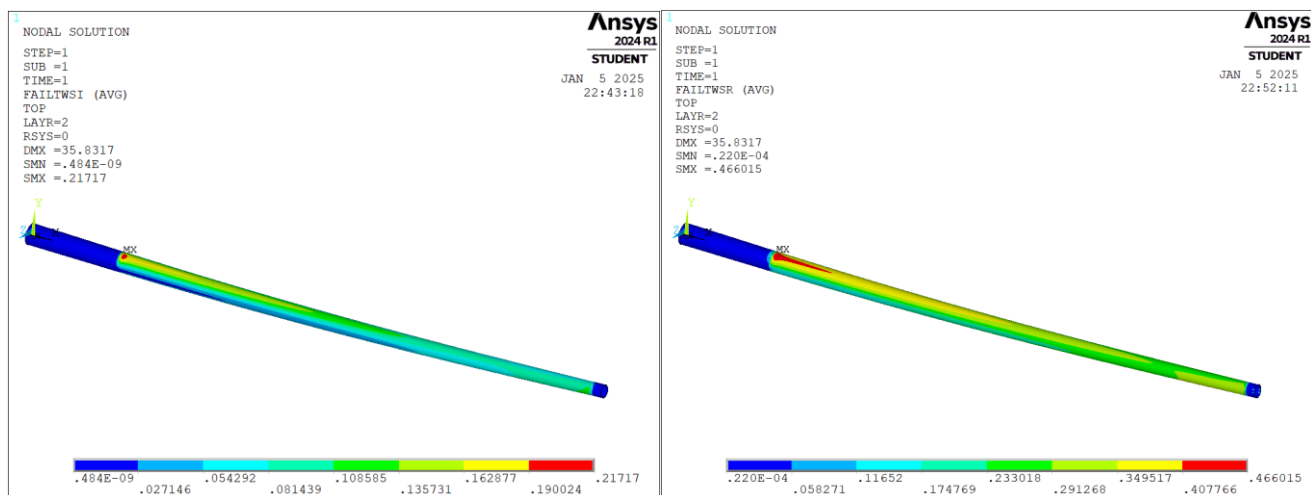
Największe zmiany występują w tylnej wrędze, na której skoncentrowano siły od usterzeń oraz moment skręcający. Obszar ten jest szczególnie narażony na naprężenia, co potwierdzają różnice wyników obu symulacji.

9. Analiza wytrzymałości belki

Wizualizacje dla kompozytu węglowo-epoksydowego w drugiej warstwie.

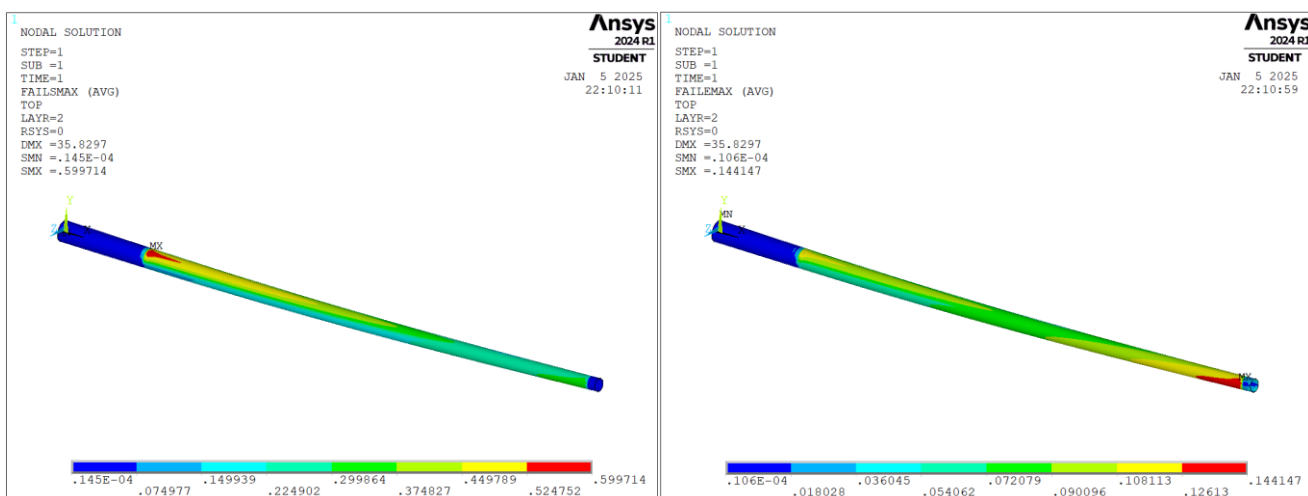


Rysunek 30 Kryteria zniszczenia, maksymalne naprężenia oraz maksymalne odkształcenia, k. węglowo-epoksydowy

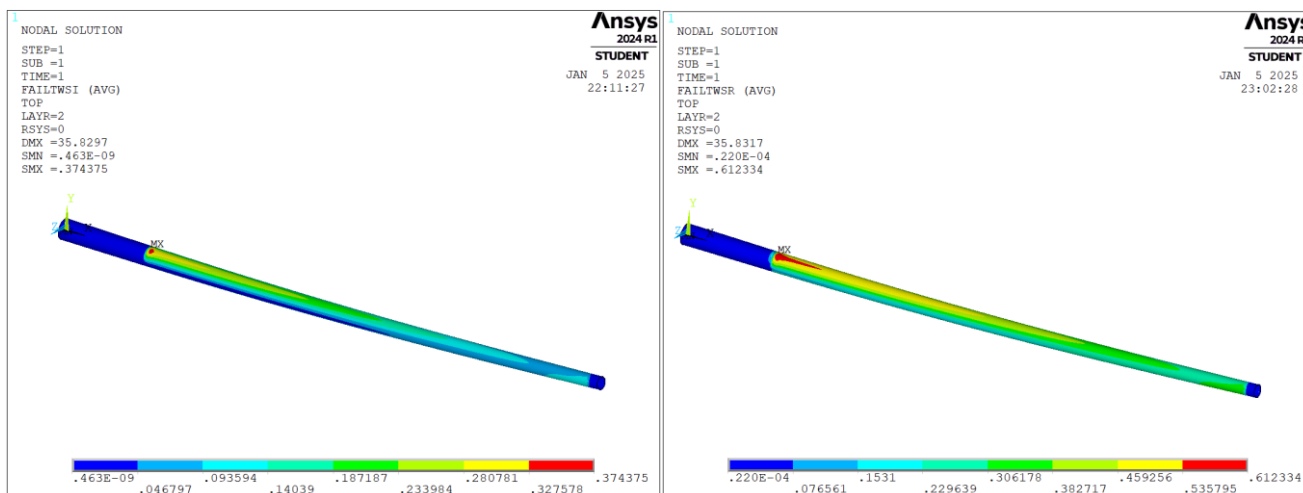


Rysunek 31 Kryteria zniszczenia, Tsai-Wu Strength oraz Inverse Tsai-Wu Strength, k. węglowo-epoksydowy

Wizualizacje dla kompozytu szklanego w drugiej warstwie.



Rysunek 32 Kryteria zniszczenia, maksymalne naprężenia oraz maksymalne odkształcenia, kompozyt szklany



Rysunek 33 Kryteria zniszczenia, Tsai-Wu Strength oraz Inverse Tsai-Wu Strength, kompozyt szklany

Warstwa 2		
Kryterium/Kompozyt	Węglowo-epoksydowy	Szklany
Max Stress	0.450	0.599
Max Strain	0.192	0.114
Tsai-Wu Strength	0.217	0.374
Inv Tsai-Wu Strength	0.466	0.612

Tabela 13 Kryteria zniszczenia kompozytów w drugiej warstwie

Warstwa 4		
Kryterium/Kompozyt	Węglowo-epoksydowy	Szklany
Max Stress	0.372	0.497
Max Strain	0.190	0.142
Tsai-Wu Strength	0.151	0.259
Inv Tsai-Wu Strength	0.389	0.509

Tabela 14 Kryteria zniszczenia kompozytów w czwartej warstwie

Wyniki symulacji

Zarówno kompozyt szklano-epoksydowy, jak i węglowo-epoksydowy w warstwach drugiej i czwartej spełniają wymagania wytrzymałościowe według czterech kryteriów wyężenia: Max Strain, Max Stress, Tsai-Wu Strength oraz Inv Tsai-Wu Strength. Wartości odkształceń i naprężeń nie przekraczają dopuszczalnych granic, co potwierdza bezpieczeństwo konstrukcji.