



## Symulacja komputerowa statycznej próby rozciągania z zastosowaniem metody elementów skończonych

Ł. Wawrzynek<sup>a</sup>, M. Serweciński<sup>a</sup>, T. Bieg<sup>a</sup>, A. Śliwa<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: lukaszwawrzynek@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: agata.sliwa@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań ze statycznej próby rozciągania oraz symulację komputerową naprężeń powstałych w wyniku zadanego przemieszczenia używając do tego celu programu ANSYS. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych zostały porównane z wynikami symulacji komputerowej w celu sprawdzenia ich poprawności.

**Abstract:** The article presents the results of the static tensile test and simulation computer simulation of stresses caused by the specified displacement by means of the ANSYS. The experimental results were compared with the results of computer simulation to verify their correctness.

**Słowa kluczowe:** statyczna próba rozciągania, metoda elementów skończonych, ANSYS

### 1. WPROWADZENIE

Metoda elementów skończonych jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Głównym atutem tej metody jest uniwersalność, polegająca na łatwości schematyzacji różnych obszarów o skomplikowanej geometrii, także niejednorodnych i anizotropowych, co kwalifikuje ją jako dobre narzędzie do modelowania różnych problemów [5].

Ogólnie MES jest pewną metodą rozwiązywania równań różniczkowych, cząstkowych po uprzedniej ich dyskretyzacji we właściwej przestrzeni. Dyskretyzację przeprowadza się lokalnie w małych obszarach o prostym, lecz dowolnym kształcie (zwanym elementami skończonymi). Jest to typowo komputerowa metoda wyznaczania naprężeń, odkształceń, uogólnionych sił i przemieszczeń w analizowanej konstrukcji dowolnego rodzaju. Metoda ta opiera się na podziale układu na skończoną liczbę elementów skończonych. W obrębie każdego elementu dokonuje się pewnych aproksymacji, a niewiadome są reprezentowane

poprzez funkcje interpolacyjne za pomocą wartości tych funkcji w skończonej liczbie punktów, zwanych węzłami [6].

Obliczenia mogą być przeprowadzane w przestrzeni dwuwymiarowej, gdzie dyskretyzacja sprowadza się najczęściej do podziału obszaru na trójkąty. Rozwiązanie takie pozwala na obliczenie wartości pojawiających się w przekroju danego układu. Związane są z tym jednak pewne ograniczenia wynikające ze specyfiki rozwiązywanego problemu. Z uwagi na postęp techniki komputerowej w ostatnich latach większość pakietów symulacyjnych wyposażona jest w możliwość rozwiązywania zagadnień w przestrzeni trójwymiarowej. Dyskretyzacja zazwyczaj polega na podziale obszaru na czworoboki. Modelowanie takie pozbawione jest fundamentalnych ograniczeń technologii 2D, ale jest znacznie bardziej wymagające pod względem pamięci i mocy obliczeniowej komputera [5,6].

Celem pracy jest porównanie wyników ze stanowiskowej próby rozciągania z wynikami uzyskanymi podczas symulacji komputerowej badania w programie ANSYS. Porównanie pozwoli na obliczenie błędu i ocenę przydatności systemu MES.

## 2. STANOWISKOWE BADANIE STATYCZNEJ PRÓBY ROZCIĄGANIA

Badanie przeprowadzono na maszynie zwanej „zrywarką”. Do naszej dyspozycji była maszyna wytrzymałościowa ZWICK Z100 (rys. 1) o specyfikacji przedstawionej w tabelicy 1.



Rysunek 1. Maszyna wytrzymałościowa  
*Figure 1. Testing machine*

Tablica 1. Specyfikacja maszyny wytrzymałościowej ZWICK Z100

Table 1. Specification of ZWICK Z100 testing machine

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| Siła badania                   | do 100 kN           |
| Szerokość przestrzeni roboczej | 640 mm              |
| Wysokość przestrzeni roboczej  | 1403 mm             |
| Zakres prędkości badania       | 0,0005÷1 500 mm/min |

Materiał, z którego wykonano próbki to stop aluminium AW-6060 (PA38). Cechuje się średnią wytrzymałością na rozciąganie i średnią wytrzymałością zmęczeniową. Podatny jest do anodowania dekoracyjnego oraz do spawania. Znalazł zastosowanie w produkcji prętów oraz profili aluminiowych. Dzięki wysokiej podatności do tłoczenia, pozwala uzyskiwać profile o skomplikowanych kształtach. Znajduje zastosowanie w produkcji elementów architektonicznych: elementy ścian, profile okienne, profile drzwi, drabiny, ogrodzenia, balustrady, wyposażenia samochodów, elementy przyczep, radiatory [4].

W tablicy 2 przedstawiono odpowiedniki norm, w tablicy 3 przedstawiono skład chemiczny, a w tablicy 4 przedstawiono własności fizyczne danego stopu aluminium.

Tablica 2. Odpowiedniki norm aluminium PA38 [4]

Table 2. Equivalent standards of aluminium PA38 [4]

| PA38/6060 |        |        |           |        |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|
| PN/EN     | W. nr  | ISO    | DIN       | Inne   |
| PA38/6060 | 3.3206 | AlMgSi | AlMgSi0,5 | Aldrey |

Tablica 3. Skład chemiczny aluminium PA38 [4]

Table 3. Chemical composition of aluminium PA38 [4]

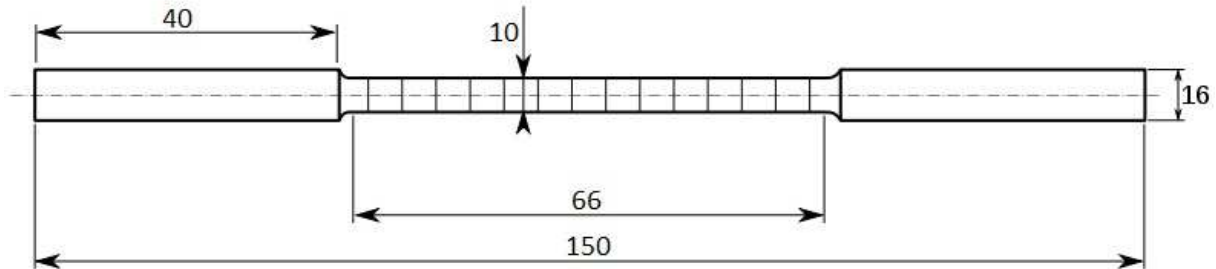
| PA38/6060, % |     |     |     |      |      |      |    |    |     |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|------|----|----|-----|
| Si           | Fe  | Cu  | Mn  | Mg   | Cr   | Zn   | Ni | Zr | Ti  |
| 0,3          | 0,1 | Max | Max | 0,35 | Max  | Max  | -  | -  | Max |
| 0,6          | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,6  | 0,05 | 0,15 | -  | -  | 0,1 |

Tablica 4. Własności fizyczne aluminium PA38 [4]

Table 3. Physical properties of aluminium PA38 [4]

| Własności fizyczne                    |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| gęstość                               | 2,7 g/cm <sup>3</sup> |
| temperatura krzepnięcia               | 610°C                 |
| temperatura płynięcia                 | 655°C                 |
| liczba Poissona                       | 0,33                  |
| ciepło właściwe                       | 898 J/kgK             |
| współczynnik rozszerzalności cieplnej | 23,4 μm/mK            |
| opór właściwy                         | 34 nWm                |
| przewodność cieplna                   | 200 W/mK              |
| przewodność elektryczna               | 51 % IACS             |
| moduł sprężystości E                  | 69500 MPa             |
| moduł sprężystości poprzecznej G      | 26100 MPa             |

Próbki użyte do badania zostały wykonane z prętów aluminiowych o wymiarach przedstawionych na rysunku 2.



Rysunek 2. Zwymiarowana próbka  
*Figure 2. Dimensioned sample*

Zgodnie ze wszystkimi standardami oraz zasadami BHP przeprowadzono statyczną próbę rozciągania na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z100 próbek o przekroju okrągłym i średnicy części roboczej 10 mm.

Na rysunku 3 przedstawiono próbki przed zerwaniem, a na rysunku 4 próbki po zerwaniu.



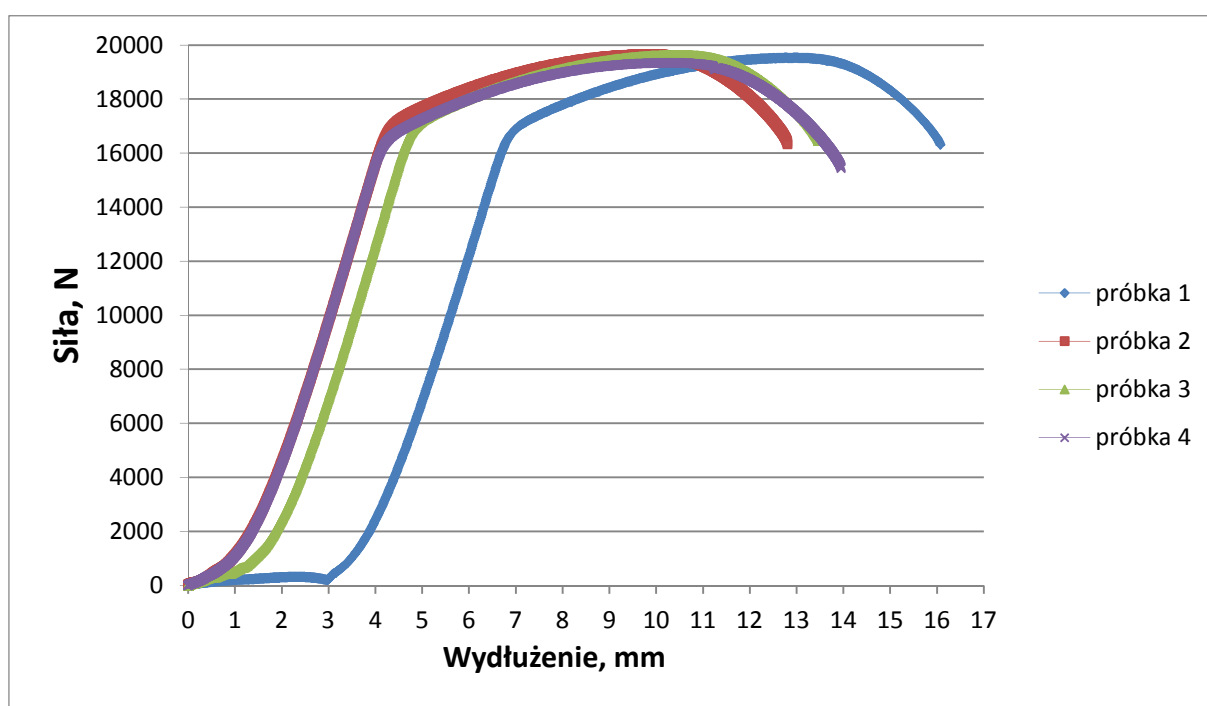
Rysunek 3. Próbki przed badaniem  
*Figure 3. Samples before test*



Rysunek 4. Próbki po zerwaniu  
*Figure 4. Samples after rupture*

Na rysunku 5 w formie wykresu przedstawiono otrzymane wyniki ze statycznej próby rozciągania wszystkich czterech próbek. Można zauważyć że próbka 1 odbiega od reszty, jednak nie wpływa to na dalsze wyniki.

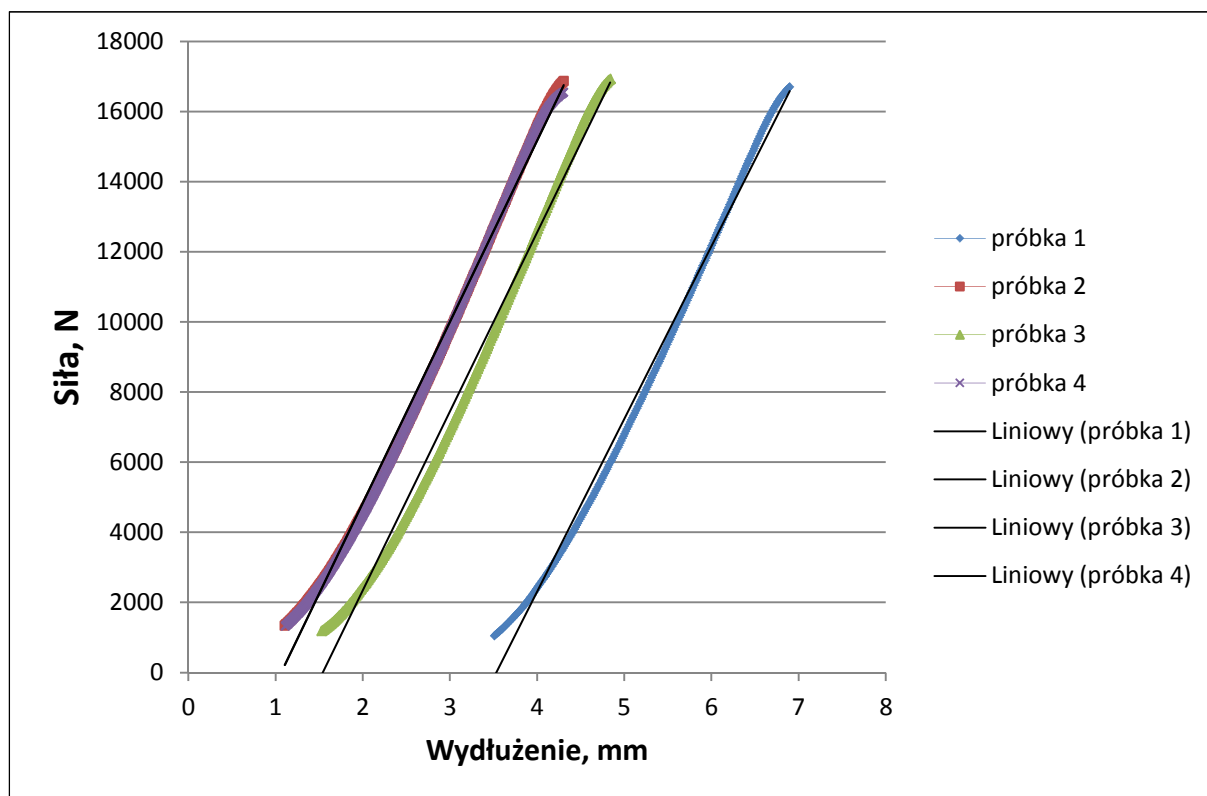
Dla dalszych badań głównie pod kątem symulacji komputerowej wzięto pod uwagę tylko liniowy zakres wyników próby rozciągania co zostało zaprezentowane na rysunku 6. Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 6 odczytano wartości wydłużeń względnych co zawarto w tabelicy 5. Na podstawie wartości siły  $F$  odczytanej z wykresu oraz znając średnicę początkową próbki  $S$ , obliczono naprężenie  $\sigma$  (1). Na podstawie bezwzględnego wydłużenia próbki  $\Delta l$  odczytanego z wykresu 6 oraz długości początkowej części roboczej próbki  $l_0$ , obliczono odkształcenie względne  $\varepsilon$  (2). Ostatnim etapem było wyznaczenie naprężeń rzeczywistych na podstawie odkształcenia względnego  $\varepsilon$  oraz naprężenia  $\sigma$  (3).



Rysunek 5. Wyniki statycznej próby rozciągania czterech próbek w postaci wykresu  
 Figure 5. Results of the static tensile tests of four samples in graph form

Tablica 5. Wartości wydłużeń względnych  
 Table 5. Values of relative elongations

| Nr próbki | $\Delta l$ , mm |
|-----------|-----------------|
| Próbka 1  | 3,39            |
| Próbka 2  | 3,20            |
| Próbka 3  | 3,30            |
| Próbka 4  | 3,20            |
| Średnia   | 3,27            |



Rysunek 6. Liniowy zakres wyników statycznej próby rozciągania  
 Figure 6. Linear range of results from static tensile tests

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{16764 \text{ [N]}}{78,5398 \text{ [mm}^2\text{]}} = 213,4559 \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma$  – naprężenie, MPa,

$F$  – siła mierzona w N,

$S$  – początkowy przekrój kształtki, wyrażony w  $\text{mm}^2$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{3,27 \text{ [mm]}}{66 \text{ [mm]}} = 0,049545, \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – odkształcenie względne

$\Delta l$  – bezwzględne wydłużenie, mm,

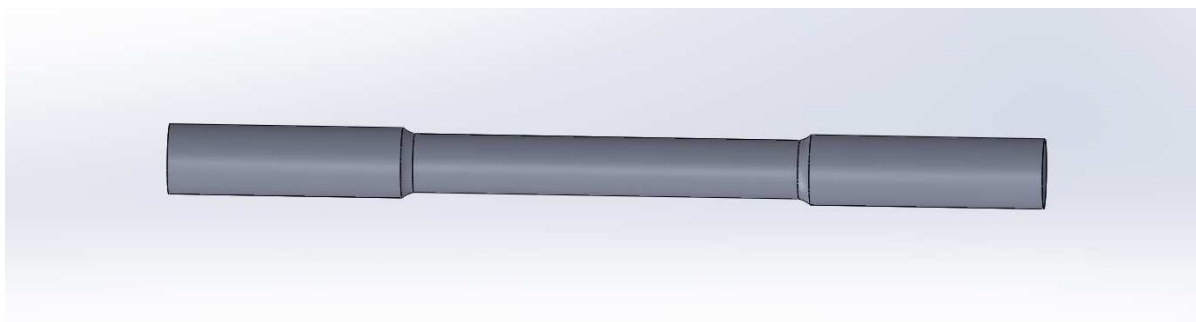
$l_0$  – długość części roboczej próbki przed zerwaniem, mm.

Na podstawie powyższych obliczeń wynika, że przy maksymalnym naprężeniu  $\sigma = 213,4559 \text{ MPa}$  i maksymalnym względnym odkształceniu  $\varepsilon = 0,049545$  maksymalne rzeczywiste naprężenia wynoszą:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{213,4559 \text{ [MPa]}}{0,049545} = 4308,082 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

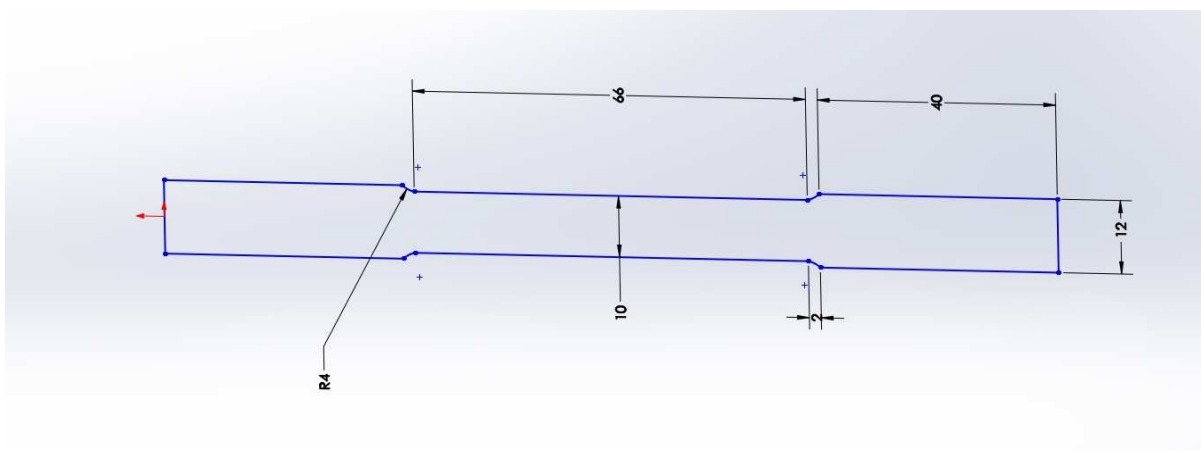
### 3. SYMULACJA KOMPUTEROWA W PROGRAMIE ANSYS

Geometryczny model próbki został wykonany w programie SolidWorks (rys. 7), a następnie wyeksportowany do programu ANSYS. Na rysunku 8 przedstawiono model próbki z jej rzeczywistymi wymiarami. Dane materiałowe próbek niezbędne do wykonania symulacji komputerowej przedstawiono na rysunku 9. Dla wspomnianego modelu geometrycznego w programie ANSYS wygenerowano siatkę elementów skończonych co przedstawiono na rysunku 10. Kolejnym krokiem wykonania symulacji było nałożenie warunków brzegowych, w tym celu jeden z uchwytów został unieruchomiony natomiast na drugim zadano kierunkowe przemieszczenie, które odczytano z wykresu (rys. 6) co pokazano na rysunku 11. W programie ANSYS zamodelowano naprężenia jakie wynikają z nadanego wydłużenia 3,27 mm. Wyniki naprężeń przedstawiono w formie graficznej i tabelarycznej (rys. 12).



Rysunek 7. Gotowy element wykonany w programie SolidWorks

*Figure 7. Finished sample made in SolidWorks*



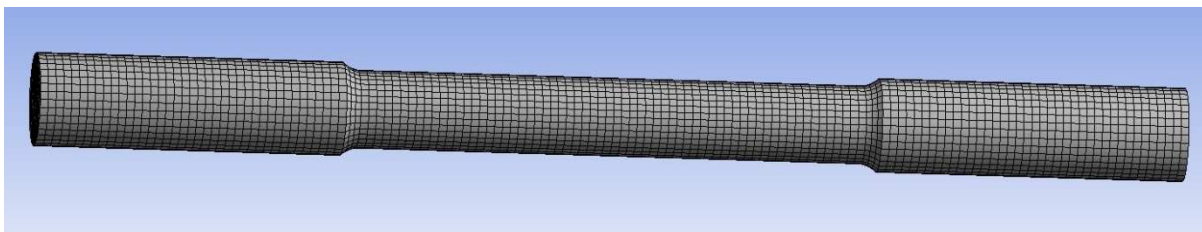
Rysunek 8. Zwymiarowana próbka w programie SolidWorks

*Figure 8. Dimensioned sample in SolidWorks*

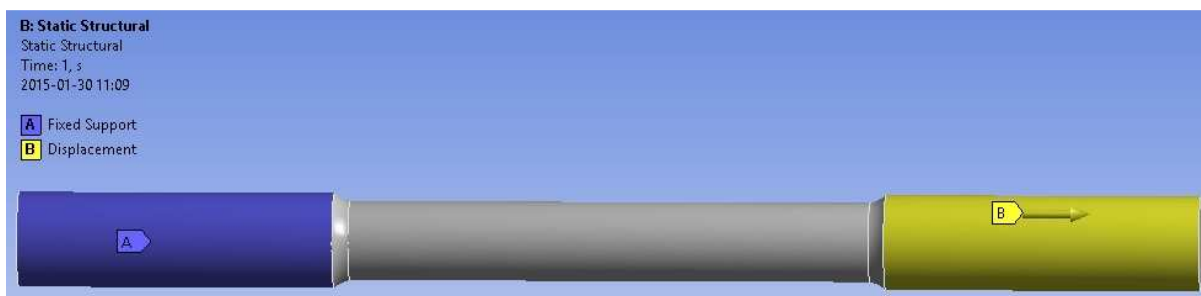


| Properties of Outline Row 5: AL PA38 |                      |                        |                    |     |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------|-----|
|                                      | A                    | B                      | C                  | D E |
| 1                                    | Property             | Value                  | Unit               |     |
| 2                                    | Density              | 2,7                    | g cm <sup>-3</sup> |     |
| 3                                    | Isotropic Elasticity |                        |                    |     |
| 4                                    | Derive from          | Young's Modulus and... |                    |     |
| 5                                    | Young's Modulus      | 69500                  | MPa                |     |
| 6                                    | Poisson's Ratio      | 0,33                   |                    |     |
| 7                                    | Bulk Modulus         | 6,8137E+10             | Pa                 |     |
| 8                                    | Shear Modulus        | 2,6128E+10             | Pa                 |     |

Rysunek 9. Wprowadzone własności materiału w programie ANSYS Workbench  
 Figure 9. Properties of the material typed in ANSYS Workbench



Rysunek 10. Wygenerowana siatka  
 Figure 10. Generated mesh



Rysunek 11. Nadane unieruchomienie (A) oraz przemieszczenie (B) na uchwytach próbki  
 Figure 11. Determination of fixed support (A) and displacement (B) on sample holders

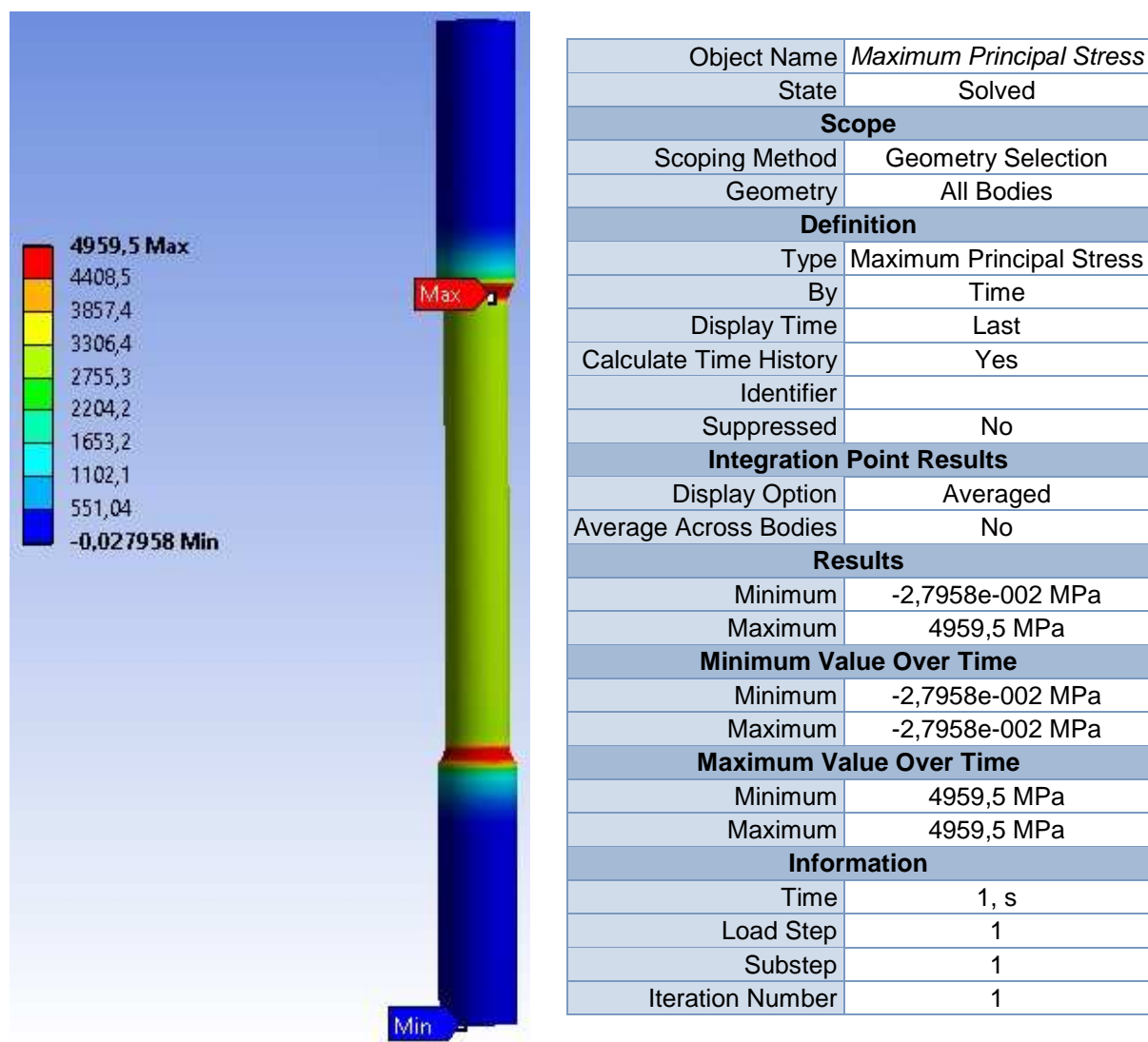
Dokonano analizy porównawczej wyników naprężeń uzyskanych przy pomocy symulacji komputerowej z wynikami obliczeń oraz wyznaczono błąd statyczny (4).

$$\frac{4408,5 - 4308,082}{4408,5} \times 100[\%] \approx 2,28[\%] \quad (4)$$

Wyniki symulacji naprężeń są w pełni adekwatne z wynikami obliczonymi a błąd statystyczny nie przekracza 2,3%.

- wartość uzyskana ze stanowiskowego badania: 4308,082 MPa,
- wartość uzyskana z symulacji badania w programie ANSYS: 4408,5 MPa.





Rysunek 12. Graficzne i tabelaryczne przedstawienie wyników w programie ANSYS  
 Figure 12. Graphical and tabular presentation of the results in ANSYS

#### 4. PODSUMOWANIE

W powyższym artykule przedstawiono wyniki ze statycznej próby rozciągania, model wykonany w programie SolidWorks oraz kolejne czynności, które wykonywano przy tworzeniu symulacji w programie ANSYS, korzystając z wyników uzyskanych podczas badania.

Otrzymane wartości naprężeń po wykonaniu symulacji, z pominięciem maksymalnych (które mogą nie być wiarygodne), porównano z wynikami badań eksperymentalnymi i obliczono błąd. Wyniósł on około 2,28%. Uzyskany błąd jest względnie niski, można więc przyjąć, że program ANSYS sprawdza się przy symulacjach naprężeń podczas rozciągania. Nie należy jednak zawierać mu w pełni i przeprowadzać dodatkowe badania eksperymentalne w sytuacjach, w których jest to możliwe.

**LITERATURA**

1. strona internetowa: <http://www.biomech.pwr.wroc.pl>
2. strona internetowa: <http://dydaktyka.polsl.pl>
3. strona internetowa: <http://pl.wikipedia.org>
4. strona internetowa: <http://www.dostal.com.pl>
5. T. Zagrajek, G. Krzesiński, P. Marek, Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z zastosowaniem systemu ANSYS, Wydawnictwo OWPW, Warszawa, 2005.
6. strona internetowa: <http://www.strek.strefa.pl>