

MIKROSYSTEMY (MEMS) - laboratorium

Ćwiczenie nr 1

Piezorezystancyjny czujnik ciśnienia: modelowanie membrany krzemowej – podstawowego elementu piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia

Cel i zakres ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest zbadanie wpływu grubości, kształtu i konstrukcji membrany krzemowej mikromechanicznego czujnika ciśnienia na zakres mierzonych ciśnień.

Głównym zadaniem jest zaprojektowanie w programie AutoCAD struktury takiego czujnika według zaleceń prowadzącego, a następnie zamodelowanie pracy membrany krzemowej dla różnych wartości ciśnienia pobudzającego i wyciągnięcie wniosków z wyników symulacji. Otrzymane wyniki należy zweryfikować z wartościami uzyskanymi podczas pomiaru ugięcia membrany w funkcji ciśnienia (ćwiczenie nr 2*).

*dotyczy, jeśli ćwiczenie nr 2 zostało wcześniej wykonane

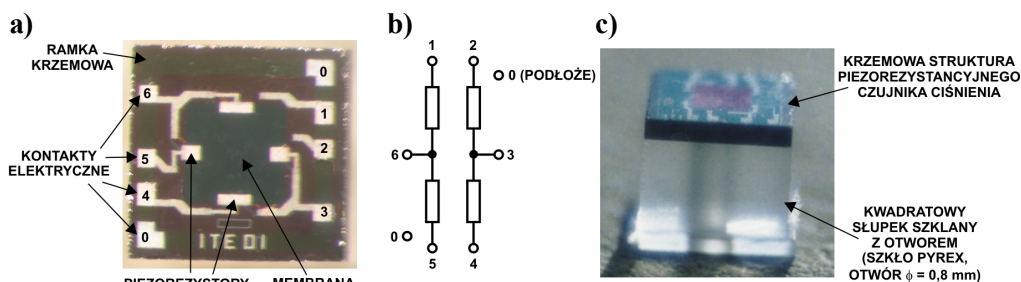
Przebieg ćwiczenia:

Ćwiczenie składa się z trzech etapów:

- etap 1 – zaprojektowanie struktury czujnika ciśnienia w programie AutoCAD,
- etap 2 – zamodelowanie zaprojektowanej struktury w programie Comsol Multiphysics,
- etap 3 – prezentacja wyników.

1. Projekt membrany

Powszechnie produkowany czujnik ciśnienia (przykład na rysunku poniżej – produkcja ITE Warszawa) składa się z części krzemowej osadzonej na słupku szklanym o wysokości 2 mm. W podłożu krzemowym o grubości 380 μm , metodami mikromechanicznymi i mikroelektronicznymi, wytworzono membranę krzemową oraz w jej górnej części rezystory wdyfundowane (piezorezystory) i kontakty elektryczne. Tak przygotowane podłoże łączy się w procesie bondingu anodowego z podłożem szklanym zawierającym szereg przelotowych otworów. Następnie, strukturę dzieli się na niezależne chipy – miniaturowe piezorezystancyjne czujniki ciśnienia – o wymiarach planarnych około 2,2 x 2,2 mm² i wysokości 2,38 mm. Membrana krzemowa ma najczęściej wymiary 1 x 1 mm² i grubość dostosowaną do zakresu ciśnień roboczych.



Rysunek 1. Mikromechaniczny piezorezystancyjny czujnik ciśnienia: a) topologia ścieżek, b) schemat elektryczny piezorezystorów, c) widok gotowej struktury czujnika

W projekcie AutoCAD mikromechanicznego czujnika ciśnienia należy zatem przyjąć, że:

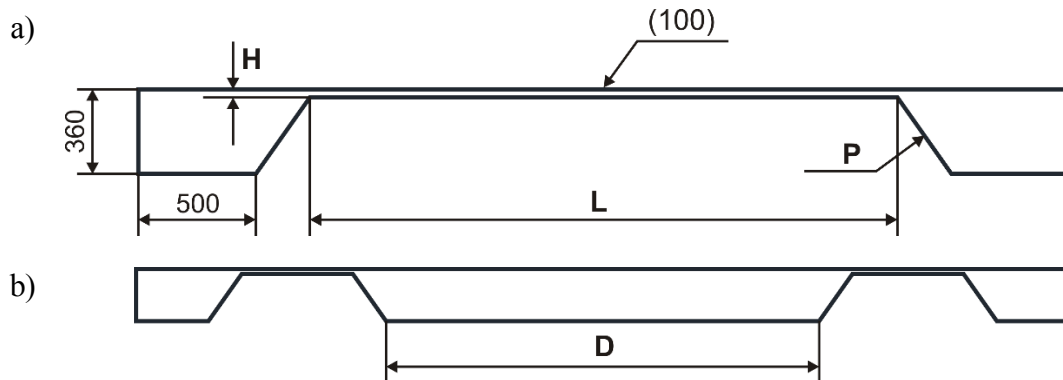
- struktura czujnika wykonana jest w podłożu krzemowym o orientacji krystalograficznej (100),
- do wytworzenia membrany zastosowano mokre anizotropowe trawienie krzemu.



UWAGA:

Prowadzący wskazuje modele membran z zestawu w Tabeli 1, których parametry należy zbadać podczas ćwiczenia.

Podczas ćwiczenia i w sprawozdaniu należy przedstawić rysunek techniczny oraz oznaczenia projektowanych membran zgodnie z Rysunkiem 2 i Tabelą 1.



Rysunek 2. Schemat przekroju membrany krzemowej:
a) bez wzmocnienia, b) ze wzmocnieniem (wymiar podane w mikrometrach)

Tabela 1. Parametry membran krzemowych

Wersja	L [mm]	H [μm]	P (hkl)	D [mm]
A	2,5	17,5	111	-
B	2,5	35	111	-
C	2,5	70	111	-
D	5	17,5	111	-
E	5	35	111	-
F	5	70	111	-
G	5	35	111	3
H	5	35	110	-

2. Modelowanie pracy membrany

Przeprowadzenie poprawnej symulacji obejmuje:

- wybranie odpowiedniego modułu symulacji w programie COMSOL,
- zaimportowanie zaprojektowanego modelu membrany z pliku DXF,
- określenie materiału, z jakiego zbudowany jest model,
- określenie warunków brzegowych,
- nałożenie odpowiedniej siatki elementów skończonych (podział modelu na trójkąty),
- umiejętną prezentację wyników.

Zadaniem jest wykonanie kilkunastu symulacji, gdzie parametrem będzie ciśnienie działające na membranę krzemową, a wynikiem wartości ugięcia oraz naprężenia.

3. Prezentacja wyników.

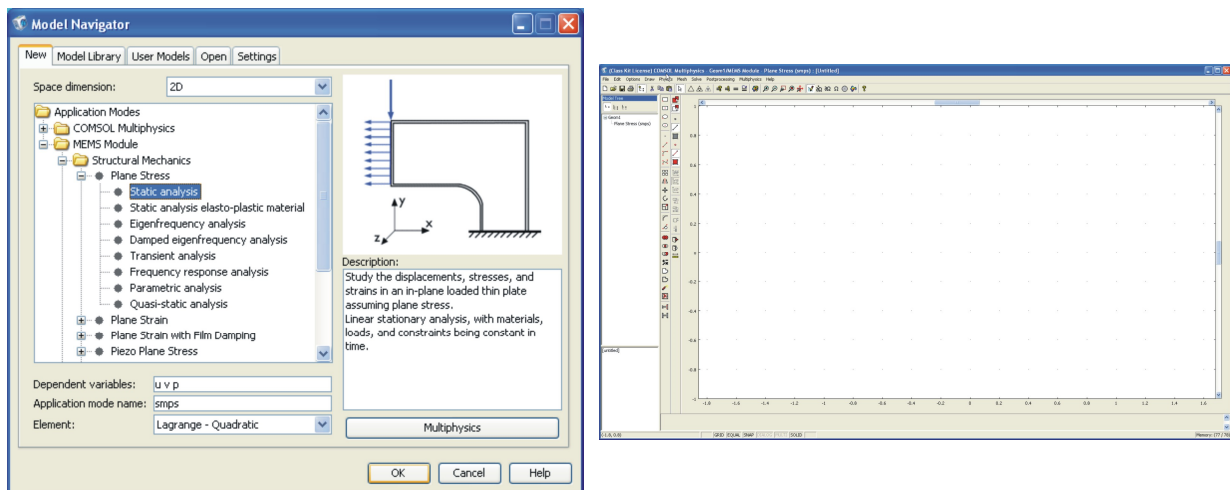
Realizujący ćwiczenie przygotowuje zwarty raport, w którym zawarty jest m.in. czytelny opis modelowanej struktury (w tym rysunki techniczne i zestawienie parametrów) oraz wyniki modelowania w formie obrazów graficznych 2D i 3D, przekrojów i wykresów zależności ugięcia i/lub naprężenia w funkcji siły dla wszystkich modelowanych membran.

Opis programu COMSOL Multiphysics:

1. Wybranie odpowiedniego modułu do symulacji.

1. Uruchom program *COMSOL Multiphysics*,
2. W oknie dialogowym *Model Navigator*, zakładce *New*, wybierz:
Space dimension: 2D
Application Modes / MEMS Module / Structural Mechanics / Plane Stress / Static analysis

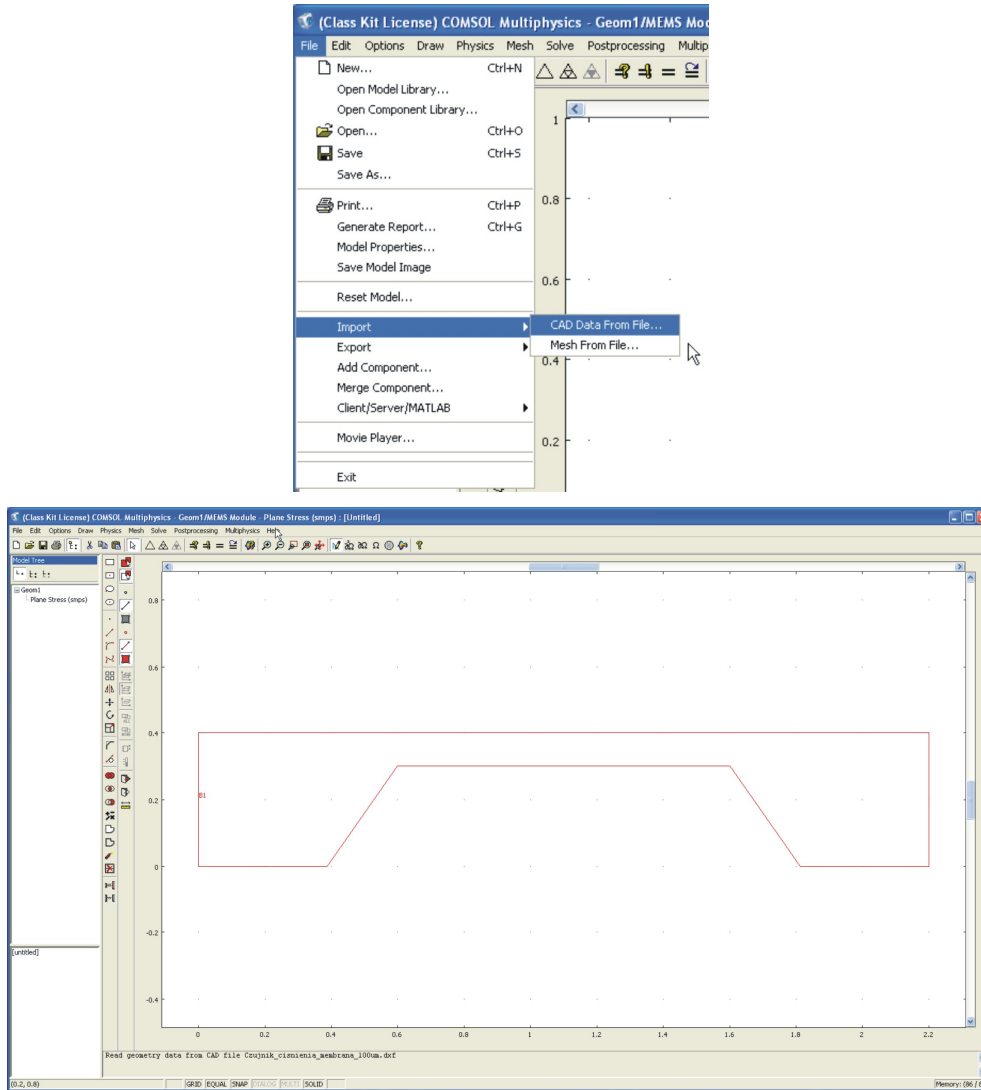
Wybór zatwierdź przyciskiem **OK** - pojawi “czyste” się okno programu.



2. Importowanie pliku AutoCAD do programu Comsol Multiphysics

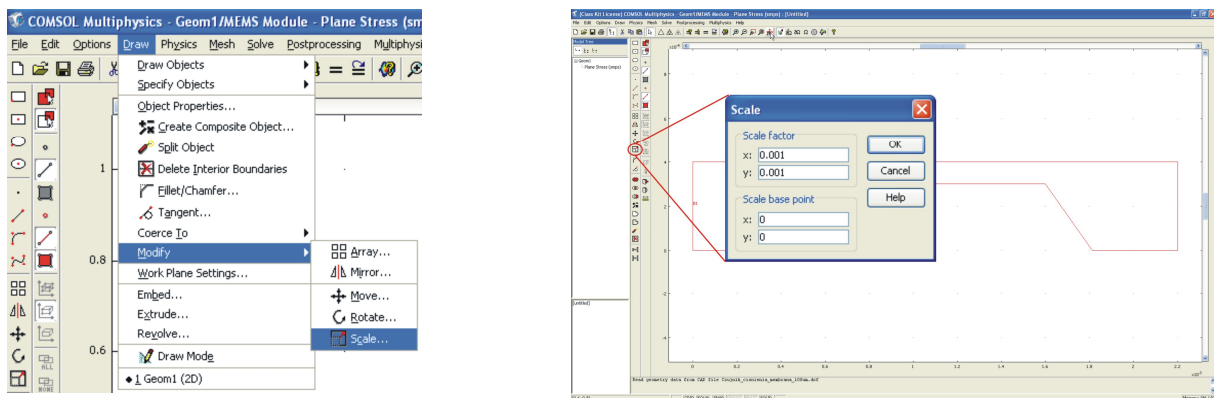
2.1. Import pliku.

Zaimportuj odpowiedni plik z rozszerzeniem DXF wykorzystując funkcję:
File / Import / CAD Data From File ...



2.2. Skalowanie.

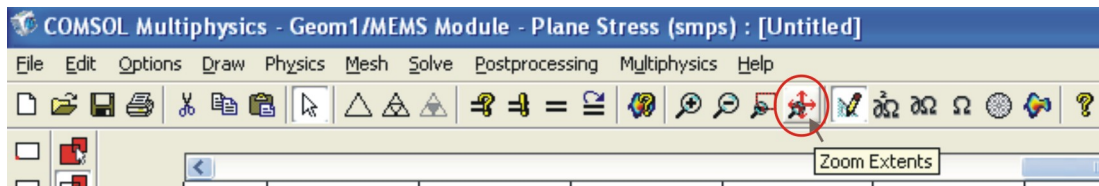
Zaznacz obiekt i dopasuj jego wymiary (skalę) wykorzystując funkcję:
Draw / Modify / Scale
 lub przycisk (skrót) menu pionowego, wpisując odpowiednie wartości.



UWAGA:

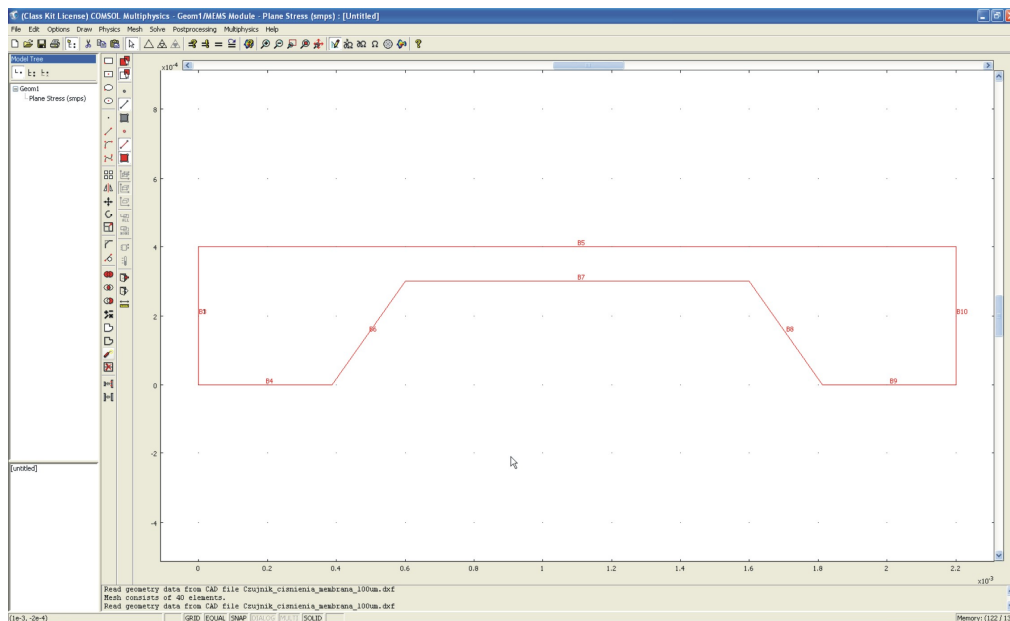
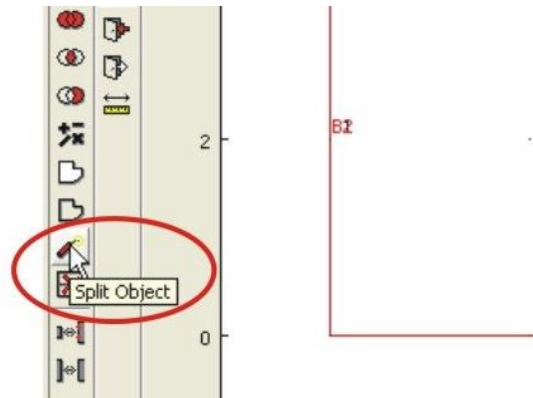
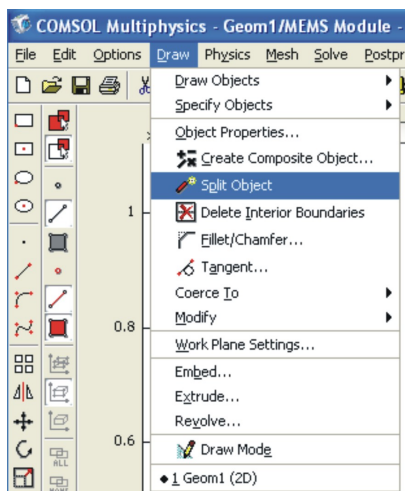
Po zaimportowaniu pliku DXF, program COMSOL przyjmuje domyślnie wymiary w jednostkach SI, tj. jednostka = 1 metr.

Po wyskalowaniu wykorzystaj funkcję dopasowania widoku obiektu do wielkości ekranu (**Zoom Extents**).



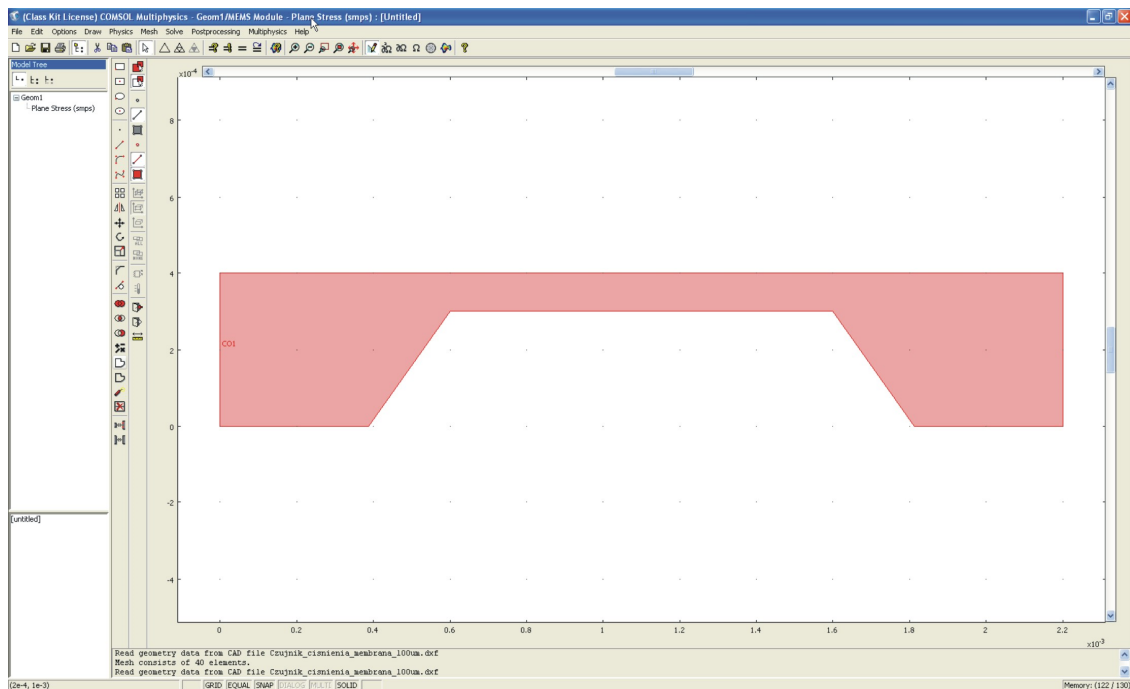
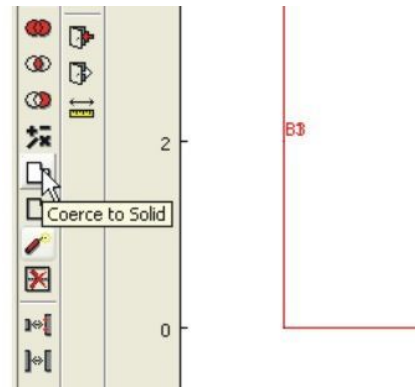
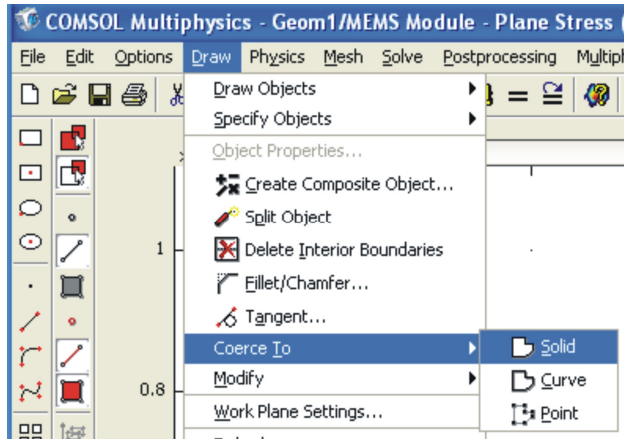
2.3. „Rozbijanie” obiektu.

Zaznacz obiekt i „Rozbij” na elementy (**Split Object**) wykorzystując funkcję: **Draw / Split object** lub przycisk (skrót) menu pionowego.



2.4. Tworzenie zwartego obiektu.

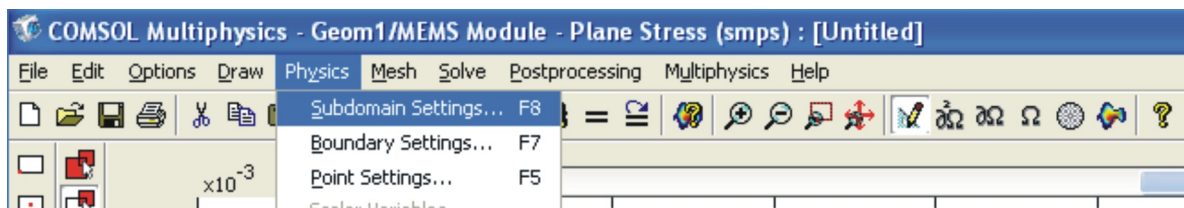
Zaznacz wszystkie elementy obiektu i utwórz obiekt zwarty wykorzystując funkcję: **Draw / Coerce To / Solid** lub przycisk (skrót) menu pionowego.



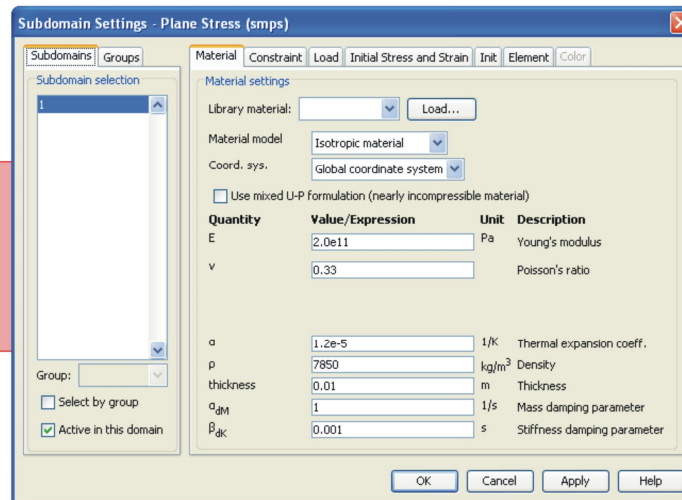
3. Parametry obiektu i symulacji.

3.1. Przypisanie materiału z jakiego zbudowany jest obiekt.

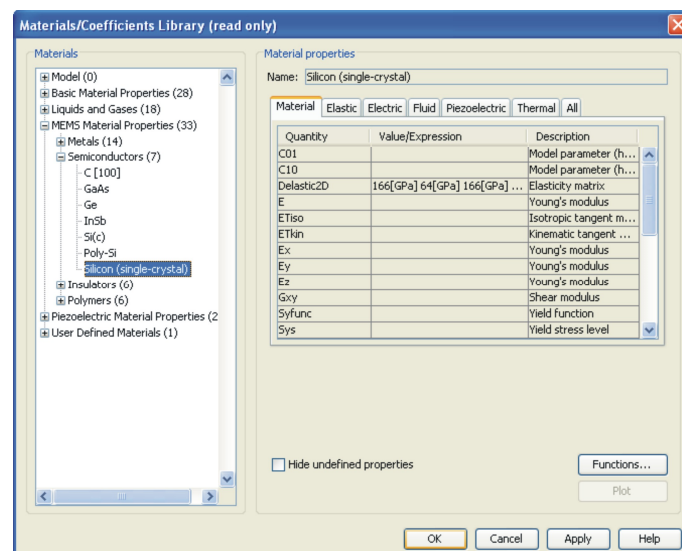
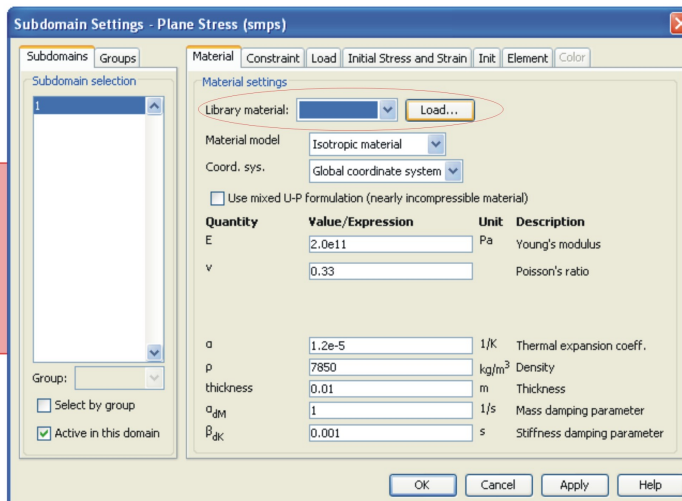
Wybierz opcję **Physics / Subdomain Settings**



W oknie dialogowym *Subdomain selection* zaznacz numer obiektu:

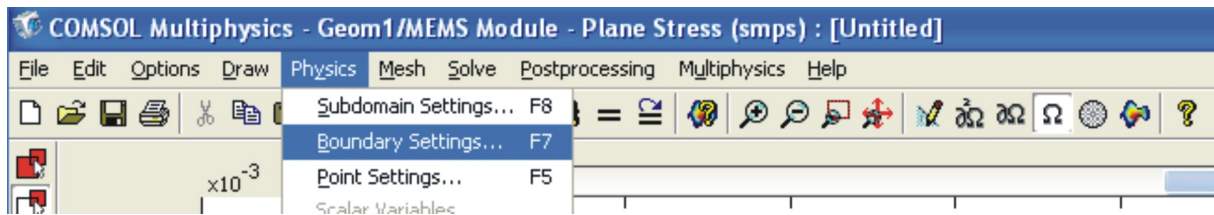


Określ materiał obiektu wybierając go z bazy materiałów:



Wybór zatwierdź przyciskiem *Apply* a następnie *OK*.

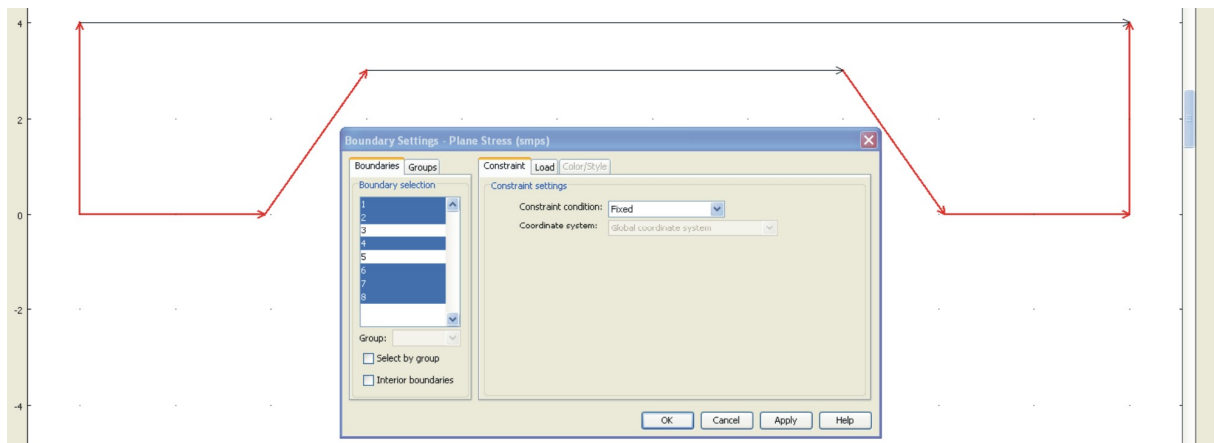
3.2. Zadanie warunków brzegowych. Wybierz opcję **Physics / Boundary Settings**



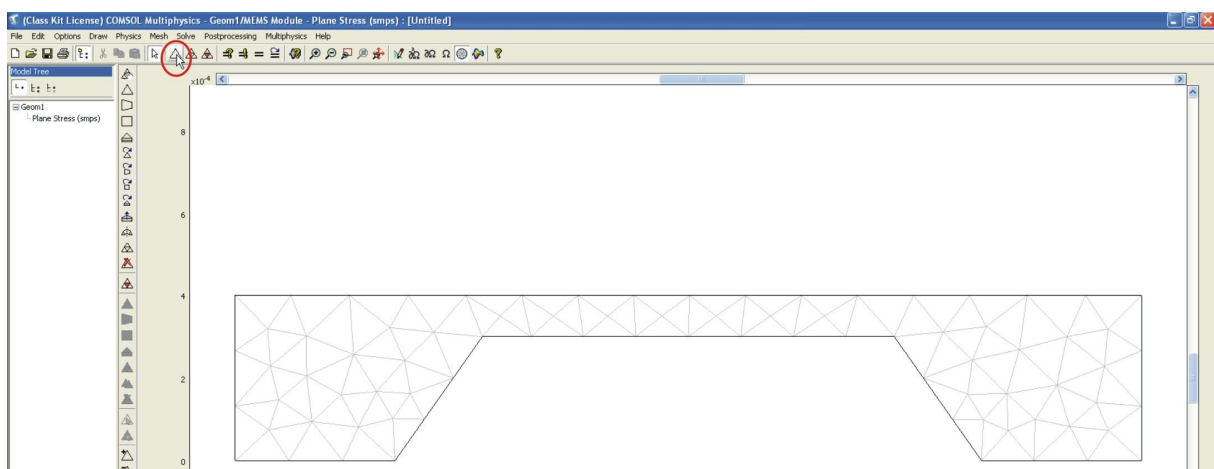
W oknie dialogowym **Boundary Settings** zaznacz odpowiednie elementy (odcinki) modelu w zakładce **Boundaries**, a następnie określ warunki brzegowe w zakładce **Constraint**:

- **Fixed** – dla odcinków nieruchomych,
- **Free** – dla odcinków ruchomych, na które nie działa bezpośrednio siła oraz dla odcinków ruchomych, na które siła działa bezpośrednio.

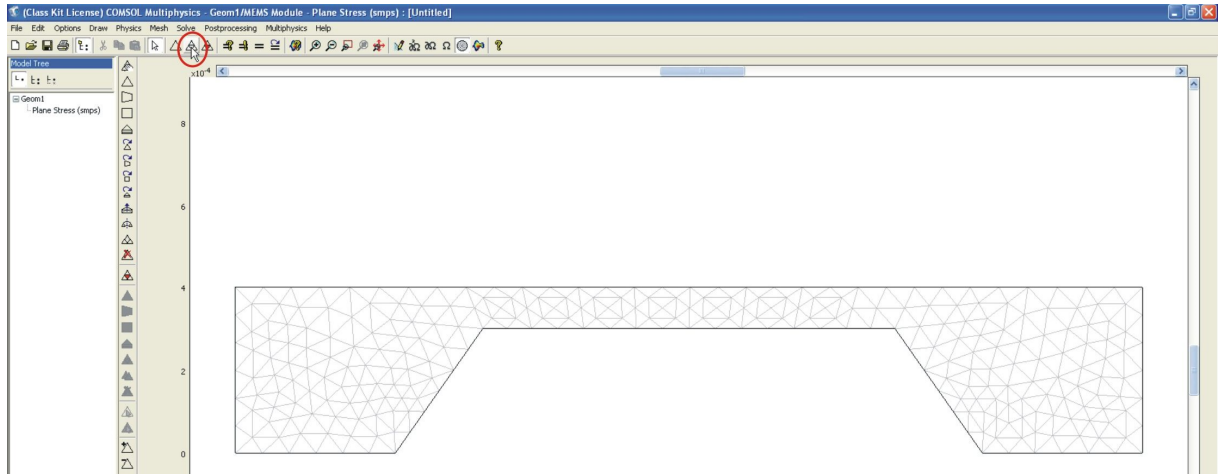
W zakładce **Load**, dla odcinków na które siła działa bezpośrednio, określ wartość ciśnienia.



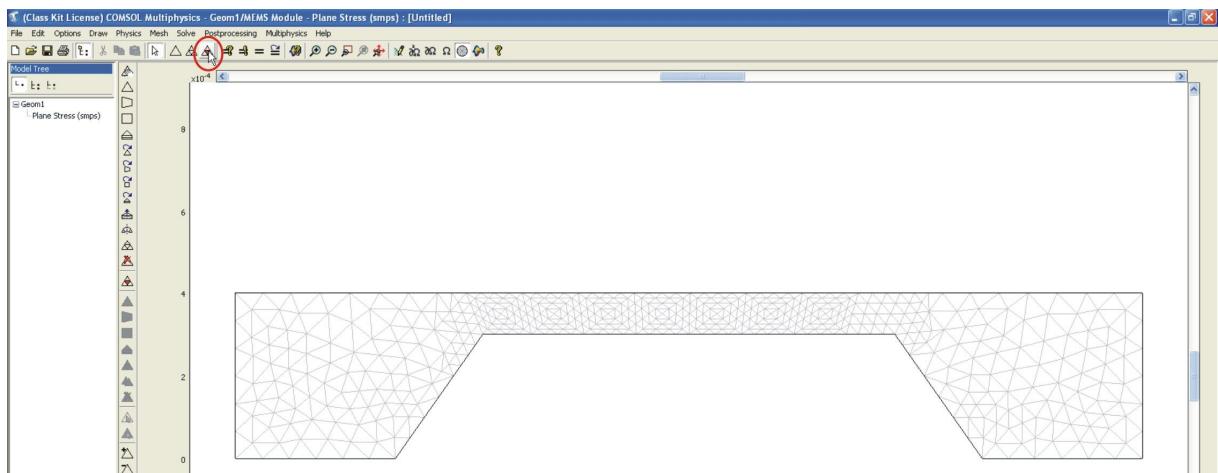
3.3. Podział obiektu na elementy skończone (meshowanie). Wybierz opcję **Mesh** wykorzystując przycisk (skrót) menu podstawowego:



Zagęść siatkę wykorzystując przycisk (skrót) menu podstawowego:



Jeśli to konieczne, zagęść siatkę lokalnie wykorzystując przycisk menu podstawowego:

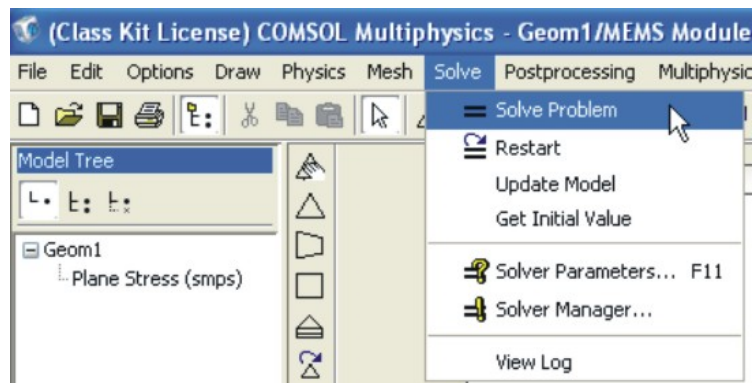


UWAGA:

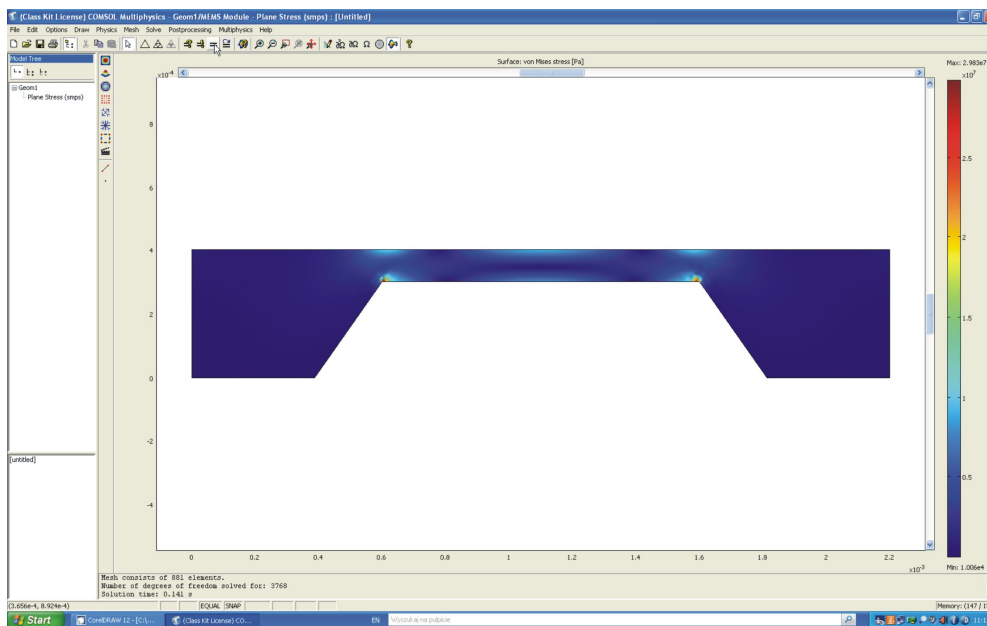
Nie zagęszczaj siatki do przeprowadzenia pierwszej symulacji. Nie zagęszczaj zbyt gęsto siatki w kolejnych próbach, gdyż może to znacząco obciążyć komputer. Podczas symulacji dla kolejnych wartości ciśnienia stosuj zawsze tę samą gęstość siatki – jednakowe warunki symulacji i otrzymanych wyników.

3.4. Przeprowadzenie symulacji.

Wybierz opcję **Solve / Solve problem**

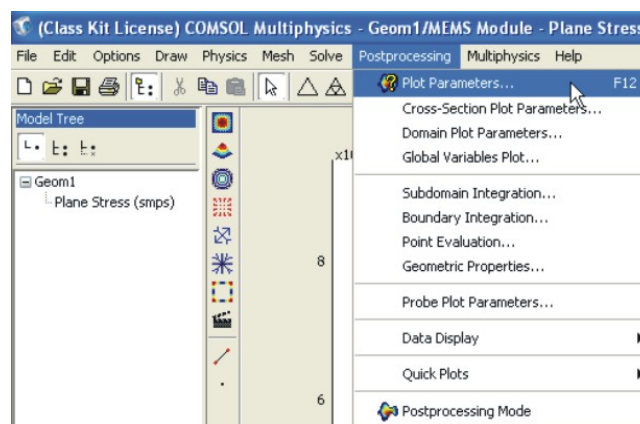


Rezultatem będzie model struktury z nałożoną mapą wartości i skalą.

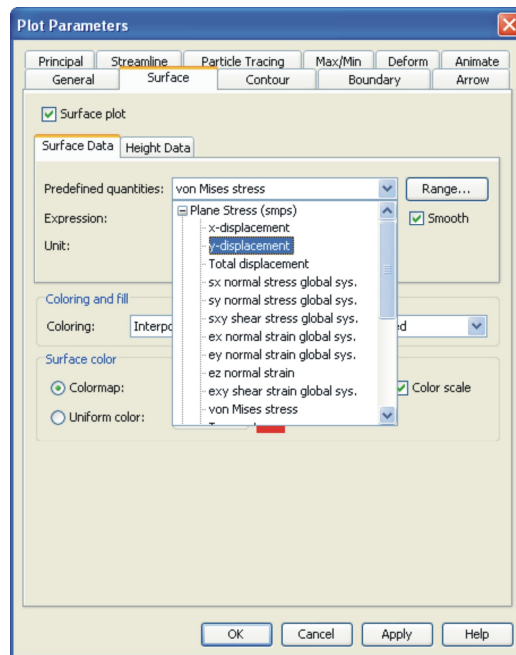
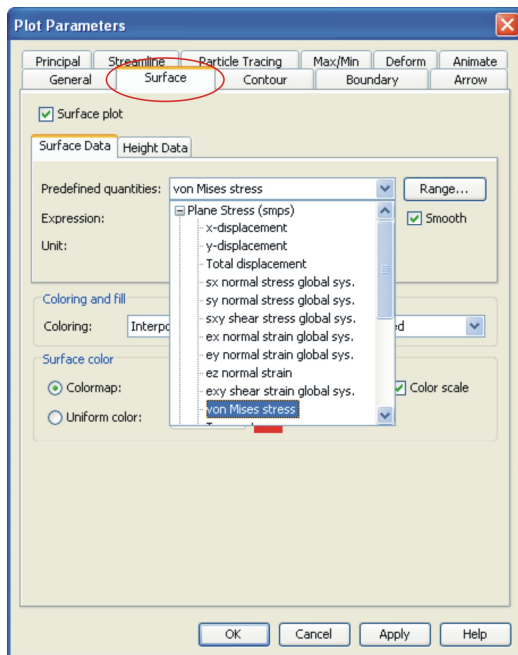


3.5. Prezentacja wyników.

Wybierz opcję **Postprocessing / Plot Parameters**

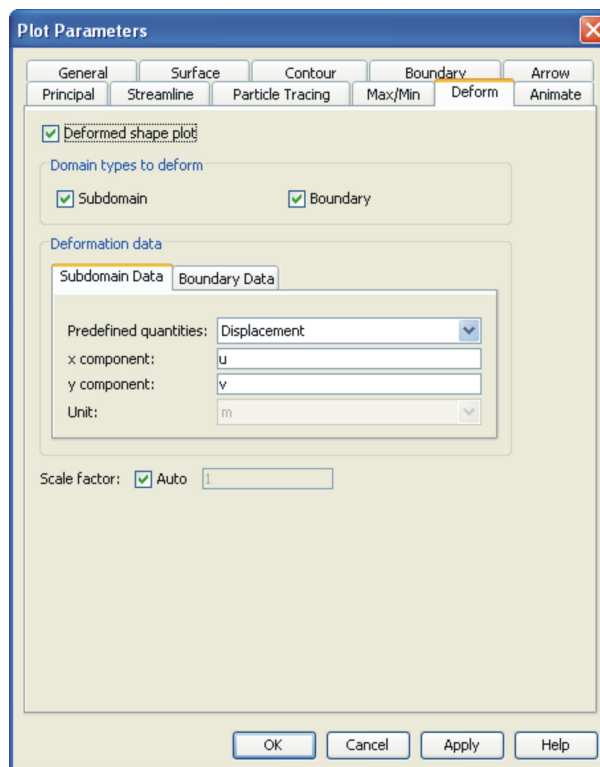


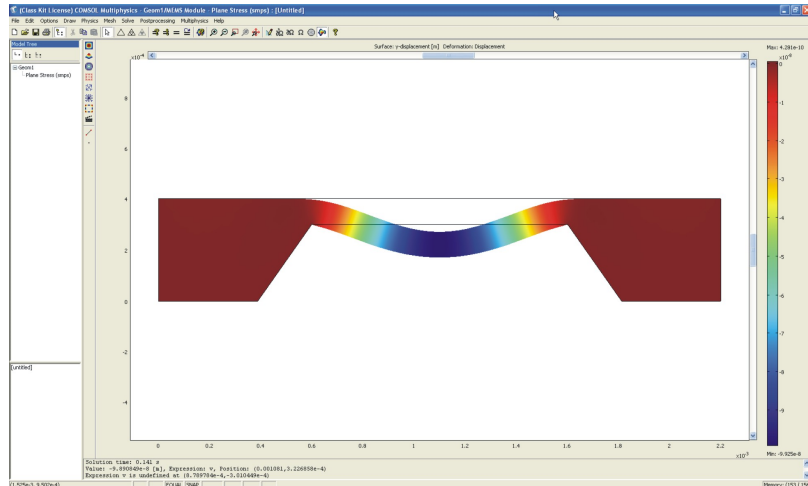
W zakładce **Surface** w opcji **Predefined quantities** wybierz odpowiedni rodzaj naprężenia (von Mises) lub odkształceń (y-displacement).



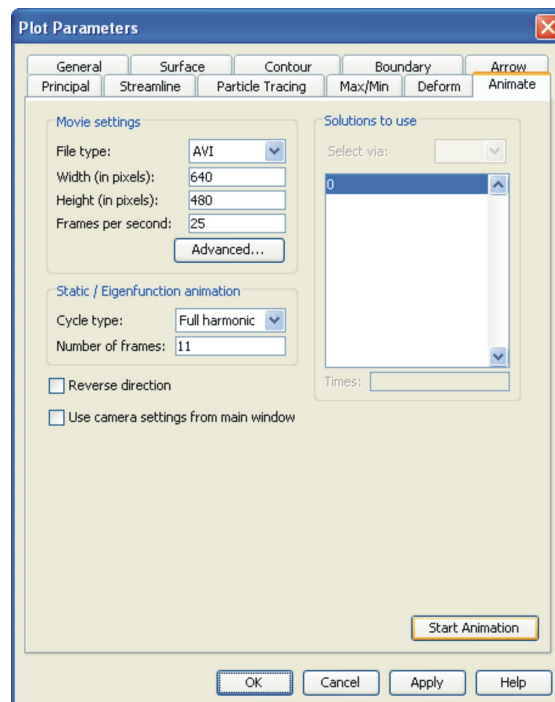
Wybór zatwierdź przyciskiem **Apply** a następnie **OK**.

Aby zobaczyć wyniki odkształcenia membrany wybierz opcję **Postprocessing / Plot Parameters**, a następnie w zakładce **Deform** zaznacz **Deformed shape plot**





Aby uzyskać efekt animacji wybierz opcję **Postprocessing / Plot Parameters**, a następnie w zakładce **Animate** ustaw parametry animacji i włącz **Start Animation**



Zagadnienia do samodzielnego przygotowania:

1. Modelowanie zjawisk fizycznych wspomaganie komputerowo – podać przykłady narzędzi informatycznych.
2. Podać i krótko scharakteryzować metodę matematyczną, którą wykorzystuje się do modelowania komputerowego.
3. Podstawowe informacje na temat krystalografii krzemu – płaszczyzny, orientacje krystalograficzne, kąty między płaszczyznami.
4. Wzory możliwe do uzyskania podczas mokrego, anizotropowego trawienia krzemu w roztworach ługów, w zależności od orientacji krystalograficznej podłoża krzemowego.
5. Naprężenie von Missesa – wyjaśnić pojęcie; wskazać maksymalną dopuszczalną wartość tego naprężenia dla struktur mikromechanicznych.