5. Obliczenia numeryczne zbiornika







Program ANSYS jest dostępny za darmo w wersji akademickiej dla studentów. Licencja akademicka narzuca pewne ograniczenia na wielkości analizowanych modeli: gęstość siatki nie może przekraczać 32.000 węzłów lub elementów. Bardziej zaawansowane licencje (np. research) pozwalają na przeprowadzanie dużo dokładniejszych badań ale są one płatne. Ćwiczenia przedstawione w ramach niniejszego kursu dostosowane są do licencji akademickiej. Aby pobrać program ANSYS należy udać się na stronę: https://www.ansys.com/academic/free-student-products. W ramach jednej licencji uzyskujemy dostęp zarówno do programów z zakresu analiz mechaniki ciał stałych, mechaniki płynów, termodynamiki i wielu innych specjalistycznych pakietów obliczeniowych. Przedstawione ćwiczenia wykorzystują moduł ANSYS MECHANICAL APDL. Na kolejnych slajdach przedstawiony został proces pobierania i instalacji oprogramowania.



Studencka wersja programu znajduje się w zakładce Ansys Student – I. W zakładce związanej z pobieraniem - "Download" znajduje się link do pobrania wymaganych plików – 2 (pliki zostaną pobrane w formacie .rar). Dodatkowe informacje, między innymi na temat wymagań sprzętowych programu, znajdują się w paskach poniżej – 3.



For the free online simulation course from Cornell University, Ansys Student 2019 R3 is recommended.

| | ▲ Installation Steps | |
|----|---|--|
| 3. | System and Browser Requirements | |
| | ▲ Problem Size Limits | |
| | ▲ License Duration | |
| | ▲ What's Included | |
| | ▲ Prior Releases | |
| | | |





ANSYS – pobieranie i instalacja oprogramowania

I. Po uruchomieniu skrótu instalacyjnego "setup.exe" wyświetli się takie okno. Należy zaakceptować warunki licencyjne – I. i następnie przejść dalej – 2.

M. Tracz, M. Sienkiewicz

| 🔥 2020 R1 Product Installation - " | Windows x64" | | | | - | - 🗆 X |
|--|--|--|--|--|--|---|
| 2020 R1 | | | | | | SYS |
| | | | | | | 00 |
| | Please read the following license as | greement carefully: | | | | |
| ANSVS SIMULATION IS THE FUTURE OF ENGINEERING | CLICKWRAP SOFTWARE Version September ***IF LICENSEE HAS PREVIOUSLY PROGRAM(S), SUCH SOFTWARE CLICKWRAP SOFTWARE LICENSE If you have a previous written sof button (or the button below otherv NOTWITHSTANDING THE FOREGO LICENSE AND NONDISCLOSURE A THE TERMS OF A WRITTEN SOFTW OF THE PROGRAM(S) EXCEPT IF AGREEMENT WOULD SUPERSED If you require a printed version of License Agreement and click "I DO installation to retrieve and print this READ THIS CLICKWRAP SOFTWA BETWEEN LICENSEE AND LICENSO | LICENSE AGREEMEN 5, 2019 AGREED IN WRITING LICENSE AGREEMENT AGREEMENT IS VOID tware license agreen vise indicating your a ING OR ANY TERM O GREEMENT ("WRITTE VARE LICENSE AGREE YOU HAVE A WRITTE! AND REPLACE THIS this Clickwrap Software c Clickwrap Software RE LICENSE AGREEM OR FOR LICENSEE TO | T TO A SOFTWARE LICENSE AGRI T SUPERSEDES AND REPLACES ,*** hent as described in the precedir greement to the terms). F A WRITTEN SOFTWARE LICEN N BETAAGREEMENT"), LICENSE EMENT. THIS CLICKWRAP SOFT N BETAAGREEMENT", LICENSE EMENT. THIS CLICKWRAP SOFT CLICKWRAP SOFTWARE LICEN are License Agreement prior to a button below otherwise indicati License Agreement. ENT ("AGREEMENT") CAREFULL USE THE PROGRAM(S), AND IT | EEMENT WITH LICENSOR THAT SI THIS CLICKWRAP SOFTWARE LI Ing paragraph, you may proceed v SE AGREEMENT, OTHER THAN AI E IS NOT ENTITLED TO USE BETA WARE LICENSE AGREEMENT SOL WE A WRITTEN BETA AGREEMENT SE AGREEMENT. ACCEPTING these terms and conditi Ing that you do not accept the terr Y BEFORE PROCEEDING. THIS IS INCLUDES DISCLAIMERS OF WA | PECIFICALLY GOVERNS US CENSE AGREEMENT, AND TI with installation by clicking th NEW TECHNOLOGY EXPLO VERSIONS OF THE PROGR LELY GOVERNS USE OF BET T, THE TERMS OF THE WRIT ions, please print this Clickw ms) and go to LICENSE.TXT is SA LEGALLY BINDING CONT RRANTY AND LIMITATIONS | E OF THE HIS he "IAGREE" IRATION IAM(S) UNDER TA VERSIONS TEN BETA Vrap Software in the TRACT OF LIABILITY. |
| | BY CLICKING THE "IAGREE" BUTT THIS AGREEMENT. | ON LICENSEE'S AUTH | IORIZED REPRESENTATIVE LEG | ALLY BINDS LICENSEE TO THE TE | ERMS AND CONDITIONS CON | NTAINED IN |
| Pres - Cuttorinien | IF LICENSEE DOES NOT AGREE W REMOVE THE PROGRAM(S) FROM | TH THESE TERMS AN I LICENSEE'S COMPU | D CONDITIONS, CLICK THE "I DO TER(S) AND RETURN THE SOFT | NOT AGREE" BUTTON INDICATIN WARE AND ALL RELATED DISKS / | IG NON-ACCEPTANCE, PRO AND DOCUMENTATION WITH | MPTLY HIN THIRTY (30) |
| 062848 | IAGREE | | | | _ | |
| | I DO NOT AGREE | 1. | | | 2 | 2. |
| | | | | | < Back Next > | Exit |

ANSYS – pobieranie i instalacja oprogramowania

II. Kolejnym krokiem jest wskazanie ścieżki instalacyjnej dla programu –
I. Należy zwrócić uwagę na ilość miejsca potrzebną programowi ANSYS – 2. Następnie można już rozpocząć instalację – 3.

M.Tracz, M.Sienkiewicz



ANSYS – pobieranie i instalacja oprogramowania

III. Instalacja oprogramowania może zająć nawet godzinę. Po zakończeniu instalacji program jest gotowy do użycia.



Pierwsze kroki z oprogramowaniem ANSYS Mechanical APDL

Uruchomienie Ansysa odbywa się poprzez program "Mechanical APDL Product Launcher". Pozwala on na odpowiednie dopasowanie ustawień pod wykonywane zadania. W polu I. wybierana jest licencja. W wersji studenckiej dostępne są jedynie licencje typu Teaching. Następnie należy wskazać ścieżkę roboczą – 2. oraz nazwę pliku – 3 (nazwa ta będzie służyła do nazywania różnych plików). Ansys w trakcie pracy tworzy dwa główne pliki robocze o rozszerzeniach .db (database) oraz .dbb (database backup). Należy pamiętać, że poprawne wczytywanie baz danych odbywa się nie bezpośrednio poprzez pliki .db, tylko poprzez pokazany Launcher! Po zaznaczeniu odpowiednich odcii uruchamiamy program klikając Run – 4. Jako ciekawostkę należy jeszcze wspomnieć, że Launcher pozwala również na konkretne przydzielenie zasobów obliczeniowych czy też zarządzanie obliczeniami wielkoskalowymi.

| 19.2: ANSYS Mechanical APDL Product Launch | er [Profile: *** Last ANSYS Run ***] Hostname: | – 🗆 X |
|---|--|------------------|
| File Profiles Options Tools Links Help | D | |
| Simulation Environment: ANSYS License: ANSYS Academic Teaching | Mechanical and CFD | |
| File Customization/ H Management Preferences C | igh Performance somputing Setup | |
| 2. Working Directory: 3. Job Name: | D-1 | Browse Browse |
| 4. | | |
| R | un Cancel Run Product H | elp |

Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji

Pierwsze kroki z oprogramowaniem ANSYS Mechanical APDL



M. Tracz, M. Sienkiewicz

PLATFORMA PRZEMYSŁU 4.0



Bardzo istotną cechą Ansysa jest to, że nie posiada on funkcji "cofnij". Oznacza to, że wszelkie zmiany zarówno podczas modelowania jak i obliczeń są trwałe. Taki stan rzeczy wymaga bardzo przemyślanego używania opcji zapisywania – **Save_DB** i przywracania – **Resum_DB**. Obie opcje mają swoje przyciski w pasku narzędzi – 2. Podczas pierwszego uruchomienia nowego pliku należy na wstępie zapisać go, inaczej przy awarii programu lub niepoprawnego zamknięcia programu stracimy wszelki progres. W przypadku wczytywania istniejącej bazy należy klikać **Resum**. Wtedy baza danych zostanie wczytania z ostatniego zapisu. UWAGA: jeżeli podczas otwierania istniejącej bazy danych zostanie kliknięty przycisk **Save**, to baza zostanie nadpisana pustym plikiem. W takiej sytuacji należy wyjść (bez zapisywania) i wrócić się do Launchera i wczytać plik .dbb. Pozwoli to na przywrócenie bazy danych. Jeśli jednak przed wczytaniem backup'u baza zostanie ponownie zapisania, to dane przepadną bezpowrotnie (nastąpi nadpisanie pliku .dbb). W pasku narzędzi znajduje się również klawisz **Quit**. Jego uruchomienie spowoduje pojawienie się okna wyjścia:

| 🔥 Exit | | \times |
|-------------------------------|--------------------|----------|
| - Exit from Mechanical APDL - | | |
| | Save Geom+Loads | |
| | ○ Save Geo+Ld+Solu | |
| | O Save Everything | |
| | O Quit - No Save! | |
| | | |
| ОК | Cancel Help | |

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Górny pasek I. zawiera opcje dotyczące programu, grafiki, sposobu wyświetlania itp. Pozwala również na zapisywanie zrzutów graficznych. Wszelkie opcje modelowania i obliczeń znajdują się w rozwijanych paskach z boku ekranu – 3. Ustawione są one w taki sposób w jaki przebiega analiza. Najważniejsze z nich:

- Preprocessor wprowadzenie danych materiałowych, wybór elementu, modelowanie geometrii, budowa modelu mes,
- Solution parametry analizy, warunki podparcia i obciążenia, przeprowadzenie obliczeń,
- General Postprocessor (Postproc) prezentacja wyników, tworzenie wykresów itp.
- TimeHistory Postprocessor prezentacja wyników z uwzględnieniem czasu.

Należy pamiętać, że przeważnie komendy są przypisane do konkretnych kroków i nie można ich wywoływać poza przypisanym modułem (np. nie uruchomimy obliczeń w module preprocesora).

W trakcie używania Ansys pokazuje komentarze dotyczące kolejnych kroków lub opisujące krótko wybraną opcję. Pokazywane są one na dole ekranu – 4.

Po prawej stronie ekranu znajdują się opcje dotyczące wyświetlania modelu – 5. Widoki, które można ustawić dotyczą zarówno rzutów na konkretne płaszczyzny, widoków izometrycznych czy nawet ręcznego ustawienia pozycji "kamery". Na samym dole znajduje się przycisk odpowiedzialny za swobodne przemieszczenia kamery przy pomocy myszki.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Poza głównym menu w trakcie działania programu Ansys otwiera dodatkowe okno: "Output Window". Pokazywane są w nim wszystkie komendy wywoływane przez użytkownika. Dodatkowo wszystkie informacje zwracane przez program będą tutaj widoczne. Jest to niezwykle pomocne gdy wystąpią błędy w trakcie obliczeń. W przypadku gdy nie została odjęta odpowiednia liczba stopni swobody modelu (model jest niedostatecznie podparty) przy próbie obliczeń dostaniemy następujący komunikat:

*** ERROR *** CP = 4.562 TIME= 20:59:11 There is at least 1 small equation solver pivot term (e.g., at the UZ degree of freedom of node 9). Please check for an insufficiently constrained model.

Informuje on o tym, że wystąpił błąd w trakcie obliczeń oraz czym może być on spowodowany.

| A Mechanical APDL 19.2 Output Window | _ | | \times |
|--|------------------------|--------------------------|-----------|
| SHARED MEMORY PARALLEL REQUESTED SINGLE PROCESS WITH 2 THREADS REQUESTED TOTAL OF 2 CORES REQUESTED START-UP FILE MODE = READ STOP FILE MODE = READ GRAPHICS DEVICE REQUESTED = win32 GRAPHICAL ENTRY = YES LANGUAGE = en-us INITIAL DIRECTORY = | | | ~ |
| RELEASE= Release 19.2 BUILD= 19.2 RSION=WINDOWS x64 CURRENT JOBNAME=f /SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32 , RASTER LANES = 8 | UP2018 CP= MODE, | 30808 0.188 GRAPHI | VE C P |
| RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= Company of the second secon | | | 0 |
| /INPUT FILE= 0 ans LINE= 0 ACTIVATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI) | . PLEAS | 5E WAIT | |
| CUTTING PLANE SET TO THE WORKING PLANE | | | |
| PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0 TURN OFF WORKING PLANE DISPLAY | | | |
| PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0 | | | |
| PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0 | | | |

M. Tracz, M. Sienkiewicz



ANSYS Mechanical APDL – porady i wskazówki

Często w trakcie modelowania użytkownik musi wskazać konkretne komponenty, np.: w przypadku tworzenia linii pomiędzy punktami, wybór linii, na których nałożone zostaną warunki podparcia czy zaznaczenie powierzchni do podzielenia na elementy skończone. W takich przypadkach wywoływane jest menu odpowiedzialne za zaznaczanie. Składa się ono zazwyczaj z następujących elementów:

- Zaznaczenie lub odznaczenie (Uwaga: przełączanie tych opcji jest również możliwe przy pomocy prawego przycisku myszy). Wybrana opcja jest również wyróżniona przy pomocy kursora (kierunek strzałki, patrz rysunki)
- 2. Typ zaznaczenia: pojedynczy, prostokątny itp.
- Licznik zaznaczonych elementów oraz informacja o tym ile można ich wybrać (w przypadku linii pomiędzy dwoma punktami, maksymalna liczba punktów do wyboru będzie wynosić 2).
- Okno do wpisywania listy komponentów. Czasem (jeśli znane są) konkretne numery poszczególnych komponentów można je bezpośrednio wpisać używając tego okna.
- 5. Na koniec zatwierdzamy (lub resetujemy) wybrane komponenty przy pomocy klawiszy z tego menu.

| | Create Volume | by Areas | ŵ | Create Volum | e by Areas | |
|---|--|-------------------|-----|--------------|------------|---|
| | • Pick | C Unpick | , w | C Pick | Unpick | Ŷ |
| | <pre> Single Single C Polygon C Loop </pre> | C Box C Circle | | Single | C Box | |
| | Count = Maximum = Minimum = Area No. = | 0 6 2 | | | | |
| | <pre>G List of C Min, Ma</pre> | Items x, Inc | | | | |
| • | | | | | | |
| | OK | Apply | | | | |
| | Reset | Cancel | | | | |
| | | | | | | |

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Wybór poszczególnych komponentów modelu odbywa się przy pomocy menu **Select** znajdującego się na górnym pasku:



A Select Entities Nodes By Num/Pick 2. • From Full. Reselect Also Select 3. O Unselect Sele All Invert Sele None Sele Belo 0K Apply Plot Replot Cancel Help

Znajdują się tutaj trzy bardzo przydatne opcje: **Entities**, **Everything**, i **Everything Below**. Pierwsza z nich pozwala na otwarcie kolejnego menu kontekstowego, które służy do wyboru konkretnych komponentów według pewnych zasad. W oknie I. można wybrać jaki typ komponentu będzie wybierany (np. węzły, elementy, linie czy objętości). Okno 2. pozwala na wybór typu selekcji – może się ona odbywać poprzez kliknięcie albo np. poprzez wybór konkretnego typu elementu (opcji jest dużo). W punkcie 3. ustawia się typ wyboru.

Pozostałe dwie opcje **Select Everything** oraz **Everything Below** pozwalają na wybór wszystkiego lub wszystkiego poniżej pewnego, już wybranego, komponentu (hierarchia w Ansysie jest następująca: *objętość* \rightarrow *powierzchnia* \rightarrow *linia* \rightarrow *punkt kluczowy* \rightarrow *element* \rightarrow *węzeł*).

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Kolorem podstawowym tła w programie Ansys jest kolor czarny. W trakcie modelowania jest on bardzo wygodnym wyborem, jednak do tworzenia zdjęć preferowany jest kolor biały. Aby to zmienić należy odwrócić kolory postępując w następujący sposób:

\Lambda ANSYS Mechanical Enterprise Utility Menu

| <u>File</u> <u>Select</u> <u>List</u> <u>Plot</u> | Plot <u>C</u> trls WorkPlane Pa | rameters Macro MenuCtrls | <u>H</u> elp |
|---|---|---|---|
| D 🗃 🖬 🗐 🎒 🕼 Toolbar | Pan Zoom Rotate View Settings | • | |
| SAVE_DB RESUM_D | Numbering Symbols | | |
| Main Menu | Style | Hidden Line Options | |
| ➡ Preferences ➡ Preprocessor ➡ Solution ➡ Constant | Font Controls Window Controls Erase Options | Size and Shape Edge Options | - |
| TimeHist Postproc ROM Tool | Animate Annotation | Graphs Colors | Create Color Map |
| ☑ Radiation Opt ☑ Session Editor ☑ Finish | Device Options Redirect Plots Hard Copy | Light Source Translucency Texturing | Save Color Map Banded Contour Map Default Color Map |
| | Save Plot Ctrls | Background • | Reverse Video |

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Generowanie obrazków z programu odbywa się poprzez **PlotCtrls** → **Redirect Plots** (patrz obrazek). Program zapewnia możliwość generowania obrazków w różnych formatach, ale również pozwala na zapis do pliku GRPH, który następnie stanowi kolekcję zapisanych obrazków (kolejne ujęcia są dodawane do jednego pliku zamiast generować kolejne pliki graficzne).

ANSYS Mechanical Enterprise Utility Menu

| <u>File Select List Plot</u> | Plot <u>C</u> trls WorkPlane F | Pa <u>r</u> ameters <u>M</u> acro Me <u>n</u> uCtrls |
|---|---|---|
| D 🖻 🖬 🗗 🎒 🌆 | Pan Zoom Rotate View Settings | • |
| SAVE_DB RESUM_D | Numbering Symbols Style | • |
| Preferences Preprocessor Solution General Postproc | Font Controls Window Controls Erase Options | NODES |
| ☑ TimeHist Postpro ☑ ROM Tool ☑ Radiation Opt | Animate Annotation | > > |
| i Session Editor ■ Finish | Device Options Redirect Plots Hard Copy | To GRPH File To PSCR File |
| | Save Plot Ctrls Restore Plot Ctrls Reset Plot Ctrls | To HPGL File To HPGL2 File To JPEG File To TIFE File |
| | Capture Image Restore Image Write Metafile | To PNG File To VRML File To Screen |
| | Multi-Plot Controls Multi-Window Layout | To Segment Memory Delete Segments Segment Status |
| | Best Quality Image | Segment Status |



Program zapewnia również możliwość przedstawienia wyników w postaci wykresów pokazujących rozkład wybranych wielkości na ścieżce. Ścieżki określa się za pomocą węzłów – I. Ilość punktów, które należy wskazać zależy od kształtu ścieżki. W przypadku linii prostej wystarczą dwa węzły – jeden wyznaczający początek ścieżki i drugi wyznaczający jej koniec – 2.





ANSYS Mechanical APDL – tworzenie wykresów

Po wybraniu punktów należy nazwać ścieżkę – I. Program pozwala również na wskazanie ilości podziałów na ścieżce – 2. Liczba ta wskazuje z ilu punktów pobrane zostaną wartości liczbowe do wykresu. Oczywiście większa liczba podziałów przekłada się na dużo dokładniejsze i gładsze wykresy.





Kolejnym krokiem jest zmapowanie odpowiednich wartości na ścieżkę. W tym celu wykorzystujemy funkcję **Map onto Path** – I. Na jednym wykresie można przedstawić kilka wartości. Dlatego też program prosi o nadanie nazwy dla danej wielkości – 2. W tym wypadku, jak widać na zaznaczeniu 3, przedstawione są naprężenia zredukowane. Nadana nazwa "zred" będzie również widoczna w legendzie na końcowym wykresie.



M.Tracz, M.Sienkiewicz



Końcowym krokiem jest narysowanie wykresu – I.Z okna 2 należy wybrać wielkości, które mają zostać pokazane na wykresie. Posiadają one te same nazwy jak wpisane wcześniej. Tutaj przedstawione zostaną naprężenia zredukowane - "zred" oraz naprężenia w kierunku x - " N_X ".





Końcowy wykres dla liczby podziałów na ścieżce równej 200 prezentuje się następująco:



M. Tracz, M. Sienkiewicz



W przypadku, gdy ścieżek jest więcej można wybierać pomiędzy nimi przy pomocy funkcji **Recall Path.**

| Options for Outp | 🔥 Recall Path | × | | | | |
|---|-----------------------------------|--------|--|--|--|--|
| Nodal Calcs | [PATH] Define Path specifications | | | | | |
| Element Table Path Operations Define Path Delete Path | Name Recall Path by Name : | PATH_1 | | | | |
| Plot Paths Recall Path Map onto Path Plot Path Item On Graph | | PATH_1 | | | | |
| On Geometry List Path Items Path Range Linearized Strs List Linearized Add | OK Cancel | Help | | | | |

M.Tracz, M.Sienkiewicz

ANSYS Mechanical APDL – tworzenie wykresów

Tworzenie ścieżki za pomocą jedynie dwóch punktów (początkowego i końcowego) jest możliwe tylko, jeśli jest ona tworzona na prostym odcinku. W przypadku gdy jest to linia zakrzywiona należy wskazać większą liczbę punktów.



M. Tracz, M. Sienkiewicz



Zamknięty zbiornik cienkościenny obciążony jest stałym nadciśnieniem wewnętrznym p = 0.1 MPa. Zarys południka wraz z wymiarami powłoki będącej uproszczeniem rzeczywistego urządzenia pokazano na rys. I.

Powłoka składa się z części kulistej, walcowej i stożkowej. Z rys. I widać, że promienie kuli, walca, promień podstawy stożka oraz wysokość stożka wynoszą **1000 mm**. Oznaczmy ten wymiar jako **R**. Dopuszcza się różne grubości wymienionych trzech segmentów powłoki, oznaczone kolejno: δ_k , δ_w , δ_s . Konieczny w załomie profil usztywniający przyjęto w formie wąskiej tarczy pierścieniowej o szerokości **a** = **100 mm**. Podobnie jak dla płaszcza, grubość pierścienia oznaczona δ_P zadawana jest jako parametr. Płaszcz powłoki i pierścień wykonano ze blachy stalowej dla której moduł Younga **E** = **2.0** · **10**⁵ **MPa**, a liczba Poissona **v** = **0.3**. Stałe materiałowe nie wchodzą do wzorów teorii błonowej.

W zadaniu przyjmujemy: $\delta_k = \delta_w = \delta_s = 5 \text{ mm}$ oraz $\delta_P = 10 \text{ mm}$.



Rys. I. Wymiary geometryczne południka powłoki osiowosymetrycznej.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Obliczenia dla kuli. W przypadku obciążenia kuli stałym ciśnieniem obliczenia są bardzo proste. Skoro obydwa promienie krzywizny – południkowej i obwodowej są sobie równe, tyle samo wynoszą składowe naprężeń południkowych i obwodowych. Dodatkowo wartości te są stałe wzdłuż południka. Wobec tego do obliczenia ich wystarczy posłużyć się jedynie równaniem Laplace'a. Wynika z niego, że:

$$\sigma_p = \sigma_t = \frac{pR}{2\delta_k} = \frac{0.1MPa \cdot 1000mm}{2 \cdot 5mm} = 10 \text{ MPa}$$



Obliczenia dla walca. Przecinając myślowo zbiornik w obrębie walca należy napisać równanie równowagi sił osiowych dla którejkolwiek z oddzielonych części. Jedyną niewiadomą równania jest składowa południkowa naprężenia. Jej wartość wyraża się wzorem:

$$\sigma_p = \frac{pR}{2\delta_w} = \frac{0.1MPa \cdot 1000mm}{2 \cdot 5mm} = 10 \text{ MPa}$$

Ponieważ promień krzywizny południkowej w walcu wynosi nieskończoność, jedyną niewiadomą w równaniu Lapace'a jest składowa obwodowa, wyrażona poniższym wzorem :

$$\sigma_t = \frac{pR}{\delta_w} = \frac{0.1MPa \cdot 1000mm}{5mm} = 20 \text{ MPa}$$

Obydwie składowe naprężeń są stałe wzdłuż południka.



Obliczenia dla stożka. Sposób postępowania jest identyczny jak dla walca. Rozkłady naprężenia południkowego i obwodowego są tym razem liniowo zmienne wzdłuż południka. Przyjmują wartości zerowe w wierzchołku a maksymalne na połączeniu z walcem. Te maksymalne wartości wynoszą:

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{2}pR}{2\delta_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.1MPa \cdot 1000mm}{2 \cdot 5mm} = 14.14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{2}pR}{\delta_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.1MPa \cdot 1000mm}{5mm} = 28.28 \text{ MPa}$$

Czynnik $\sqrt{2}$ w powyższych wzorach wynika z tego, że kąt α stożka wynosi 45°.



Obliczenie naprężenia w pierścieniu. Zastosowano wzór, zakładając stałe naprężenie σ_P w przekroju pierścienia. W tarczy pierścieniowej jest to założenie upraszczające.

$$\sigma_P = \frac{pR^2}{2A_P} = \frac{0.1MPa \cdot 10^6 mm^2}{2 \cdot 10^3 mm^2} = 50 \text{ MPa}$$

gdzie A_P jest polem przekroju pierścienia ($A_P = a \cdot \delta_P$).

Uzyskane powyżej wyniki liczbowe zamieszczono w poniższej tabeli:

| | kula | walec | stożek | pierścień |
|-----------------------------|------|-------|--------|-----------|
| σ_p [MPa] | 10 | 10 | 14.14 | |
| σ_t / σ_P [MPa] | 10 | 20 | 28.28 | 50 |

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Na kolejnych slajdach przedstawione będą najważniejsze kroki prowadzące do wyników analizy metodą elementów skończonych z wykorzystaniem systemu ANSYS.

A. Wybranie typu elementów SHELL181 (rys. 2).

| E Preferences | _ / | Element Types | | × |
|--|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| Preprocessor Element Type Add/Edit/Delete Switch Elem Type Add DOF | A Library of Element Types | Defined Element Typ NONE DEFINED | es: | |
| Remove DOFs Elem Tech Control Real Constants | Library of Element Types | | Structural Mass Link | A 3D 4node 181 8node 281 |
| Material Props Sections Modeling | | | Beam Pipe Solid Shell | Axisym 2node 208 3node 209 Axi-harmonic 61 |
| Meshing Checking Ctrls | Element type reference number | | Solid-Shell | 3D 4node 181 |
| Numbering Ctris Archive Model Coupling / Ceqn Multi-field Set Up | ОК | Apply | Cancel | Help |
| | | Add | Options | Delete |
| B Solution General Postproc TimeHist Postpro ■ ROM Tool | | Close | | Help |
| | | | 4 | |

Rys. 2. Określenie typu elementów skończonych (SHELL181).

| MI | Fracz | M Sien | kiewicz |
|-------|--------------|---------|---------|
| 1.1.1 | macz, | 1.51611 | RIEWICZ |



B. Określenie własności mechanicznych materiałów (rys. 3).



Rys. 3. Określenie własności sprężystych materiału powłoki.

W przypadku systemu Ansys niezwykle ważne używanie poprawnych jednostek iest wymiarowych i właściwości materiałowych. Sam program nie prosi o zdefiniowanie, czy używane będą przy budowaniu modelu milimetry, czy metry. Decyzję należy podjąć na etapie wprowadzania jednostek właściwości materiałowych. Jeżeli wymiary będą podawane w milimetrach (tak jak w niniejszym przykładzie), to moduł Younga zostanie wpisany w postaci 2.10⁵ MPa (tak jak na rys. 3), a wyniki naprężeń otrzymamy również w MPa. Jeśli geometria modelu byłaby wprowadzana w metrach, to wpisać należy $2 \cdot 10^{11}$ Pa. Otrzymamy wtedy w wynikach naprężenia w jednostce Pa.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



C. Określenie listy atrybutów typu Section definiujących grubości poszczególnych segmentów zbiornika i pierścienia usztywniającego (rys. 4).

Jak już wspomniano w elementach typu SHELL grubość jest parametrem. Grubości poszczególnych elementów wprowadzamy jako

| kolejne pozycje na liście. | Sections Bection Library Beam Beal | Create and Modify Shell Sections Section Edit Tools | × |
|----------------------------|---|--|---|
| | □ Lay-up □ Add / Edit □ Plot Section □ Pre-integrated □ Pretension □ Joints □ Reinforcing □ Pipe | Layup Layup Create and Modify Shell Sections Name ID I ID I ID I ID I I I I I I I I I I | J |
| | Link Axis Contact List Sections Delete Section Modeling Meshing Checking Ctrls Numbering Ctrls Archive Model Coupling / Ceqn Multi-field Set Up Loads | 1 5 1 • 0.0 3 • • Add Layer Delete Layer | |

Rys. 4. Określenie grubości 5 mm na pierwszej pozycji listy **Section** (nr pozycji na liście wstawia się w okienku ID).

M. Tracz, M. Sienkiewicz



D. Zdefiniowanie punktów kluczowych południka.



Rys. 5. Zdefiniowanie pierwszego punktu kluczowego .

Tak zdefiniowany punkt ma numer I, program sam numeruje punkty, linie, powierzchnie itd. Punkt ten ma zerowe współrzędne, leży zatem w początku aktywnego układu odniesienia. Następnym punktom nadawane są automatycznie kolejne numery. Wstawiając współrzędne kolejnych punktów należy pamiętać, że w Ansysie zamiast przecinka dziesiętnego stosuje się kropkę.

Następne punkty kluczowe zostaną zdefiniowane metodą kopiowania.

M. Tracz, M. Sienkiewicz

Przebieg analizy numerycznej – Preprocessor

| □ Model □ Cre □ Ope □ Mov □ Cop P Mov □ A P A P A P A P A □ A P A □ A P A □ A P A □ A P A □ A □ A □ A □ A □ A □ A □ A □ | ing ate rate re / Modify by eypoints ines reas 'olumes ine Mesh rea Mesh lodes | |
|---|---|------------------------|
| Copy Keypoin | ts | |
| <pre> • Pick </pre> | C Unpick | |
| <pre> Single Delygon C Loop </pre> | C Box C Circle | |
| Count = Maximum = Minimum = KeyP No. = | : 0 : 65 : 1 | Ι. |
| <pre> List of Items C Min, Max, Inc </pre> | | Rys. 6. C linijce d |
| OK | Apply | |
| Reset | Cancel | |
| Pick All | Help | |
| | | |
| KGEN] Pic | k or enter ke | ypoints to be copied |

LATFORMA PRZEMYSŁU 4.0

Przed wykonaniem większości operacji zachodzi konieczność wskazania na ekranie już istniejących fragmentów modelu. Pokazuje się wtedy małe okno w lewym dolnym rogu ekranu – I, a w dolnej linijce odpowiednie polecenie – 2. W tym kroku z rysunku 6 wynika konieczność wskazania punktu do skopiowania. Zatwierdzenie skutkuje pojawieniem się następnego okienka (patrz rys. 7) służącego do wpisania współrzędnych przesunięcia. W ten sposób utworzono drugi punkt tworzącej stożka. Podobnie postępując dostaje się trzy kolejne punkty kluczowe konieczne do stworzenia całego południka wg. rys. I. Oczywiście zamiast kopiowania można każdy punkt zdefiniować oddzielnie wpisując jego znane współrzędne.

Rys. 6. Okienko pomocnicze z poleceniem w dolnej inijce do wybierania kursorem na ekranie.



Rys. 7. Skopiowanie wskazanego punktu .

M. Tracz, M. Sienkiewicz



E. Tworzenie linii prostych i łuków.

Z rysunku 9 wynika utworzenie łuku o promieniu 1000 mm między punktami o numerach 45 i 4. W pierwszym kroku należy te punkty wskazać. W drugim wskazuje się pomocniczy punkt (tutaj nr 44), dowolnie wybrany po stronie środka promienia krzywizny łuku. Trzecim krokiem jest operacja w okienku pokazanym na rysunku 9. Uwaga: numery punktów nie muszą być takie same jak na rys. 9.

Na tym etapie utworzony jest południk jak na rys. I.

| □ Modeling □ Create □ Keypoints □ Lines □ Lines ∅ Straight ∅ In Activ ៷ Overlaid ៷ Tangen ៷ Tan to 2 ៷ Normal ៷ Norm to | Line e Coord d on Are t to Line Lines to Line o 2 Lines | |
|--|---|--|
| Create Straight Line | to line 2 Lines | |
| Pick C Unpick | | |
| © Single C Box C Polygon C Circle C Loop | | |
| Count = 0 | | |
| Maximum = 2 | | |
| KeyP No. = | il | |
| • List of Items • Min, Max, Inc | | |
| | | |
| OK Apply | | |
| Reset Cancel | | |
| Pick All Help | | |
| L | | |

| Preprocessor Element Type Real Constants Material Props Sections Modeling Create Keypoints Lines Lines Arcs Through 3 KPs By End KPs & Rad Agy Cent & Radius Full Circle | |
|--|--------------|
| 🔥 Arc by End KPs & Radius | × |
| [LARC] Define Arc by End Keypoints and Radius RAD Radius of the arc P1,P2 Keypoints at start + end | 1000 45 4 |
| PC KP on center-of-curvature | 44 |
| - side and plane of arc OK Apply | Cancel Help |

Rys. 9. Utworzenie łuku.

[LSTR] Pick or enter end keypoints of line

Rys. 8. Tworzenie linii prostej między dwoma wskazanymi punktami.

Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji



Na tym etapie opłaca się nadać tzw. podziały na liniach południka. Nie są to dosłownie podziały, wskazują jedynie ile elementów będzie swymi krawędziami leżało na linii, inaczej mówiąc określają gęstość później wygenerowanej siatki elementów. Działanie to uaktywnia się wskazując kursorem przycisk **Lines Set** z grupy Size Controls (Rys. 10).

| Preferences | MeshTool | | |
|--|---------------------------|--|--|
| Preprocessor Element Type | Element Attributes: | | |
| Real Constants | | | |
| Material Props | Global 💌 Set | | |
| Sections | | | |
| Modeling | Smart Size | | |
| Meshing | | | |
| Mesh Attributes | Fine 6 Coarse | | |
| | | | |
| Size Chiris Mesher Onte | Size Controls: | | |
| Concatenate | Global Set Clear | | |
| ⊞ Mesh | Areas Set Clear | | |
| Modify Mesh | | | |
| Check Mesh | Lines Set Clear | | |
| Clear | Copy Flip | | |
| Checking Ctrls | | | |
| Numbering Ctrls | Layer Set Clear | | |
| Archive Model | Keypts Set Clear | | |
| Coupling / Ceqn Multi field Set Up | | | |
| | | | |
| | Mesh: Areas 🗸 | | |
| Path Operations | Shape: O Tri 🔍 Quad | | |
| Solution | C Free C Married C Sweep | | |
| General Postproc | No Free (* Mapped * Sweep | | |
| TimeHist Postpro | 3 or 4 sided | | |
| ROM Tool | | | |
| Radiation Opt | Mesh Clear | | |
| Session Editor | | | |
| | | | |
| | | | |
| | Refine at: Elements | | |
| | Befine | | |
| | | | |
| | Close Help | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Pick a menu item or enter a command (PREP7)

Rys. 10. Użycie wielofunkcyjnego okna Mesh Tool.

Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji



| ∃ Preprocessor | A Element Sizes on Picked Lines | | × |
|---------------------------|---|----------|-----|
| | [LESIZE] Element sizes on picked lines | | |
| Material Props | SIZE Element edge length | | |
| Sections Modeling | NDIV No. of element divisions | 20 | 1. |
| ■ Meshing | (NDIV is used only if SIZE is blank or zero) | | |
| Mesh Attributes | KYNDIV SIZE,NDIV can be changed | Ves | |
| Mesh Iool Size Cotris | SPACE Spacing ratio | | 2. |
| Mesher Opts | ANGSIZ Division arc (degrees) | | |
| Concatenate | (use ANGSIZ only if number of divisions (NDIV) and | | |
| ⊞ Mesh ⊞ Modify Mesh | element edge length (SIZE) are blank or zero) | | |
| Check Mesh | Clear attached areas and volumes | ∏ No | |
| E Clear | | | |
| Numbering Ctris | OK Apply | Cancel H | elp |
| Archive Model | | | |

Rys. I I. Przypisanie liniom podziałów elementowych .

Liczbę podziałów elementowych wstawia się w linijce drugiej – I. Wypełnienie tylko tego pola daje podziały równomierne na liczbę elementów równą wpisanej wartości. Wstawienie dodatkowo odpowiedniego współczynnika w polu **Spacing ratio** – 2 umożliwia stopniowe zagęszczanie albo rozrzedzanie siatki elementów wzdłuż linii. Jeśli nadać znak minus współczynnikowi, dostaje się zagęszczanie albo rozrzedzanie do środka linii a dalej proces odwrotny w stronę drugiego końca linii. Południk z podziałami linii przedstawia rysunek 12.





M. Tracz, M. Sienkiewicz



F. Tworzenie powierzchni poprzez obrót tworzącej.



Uwaga! Operację obrotu należy wykonać w dwóch krokach: najpierw obrót samego południka zbiornika, a w drugim kroku obrót krawędzi pierścienia.



Rys. I 3. Wytworzenie ćwiartki powłoki złożonej z 20 segmentów.

Rys. 14. Powierzchniowy model geometryczny ćwiartki powłoki .

M. Tracz, M. Sienkiewicz





Jak widać z rys. 13 operacja **Sweep Lines about Axis** dopuszcza wytworzenie pojedynczej powierzchni na każdym z płaszczy, jeśli w linijce **No. of area segments** wstawić liczbę I. Wtedy jednak siatka wygenerowanych elementów na dużych powierzchniach byłaby nieregularna, co wpłynęłoby na dokładność obliczeń jak i możliwość późniejszej prezentacji wyników w formie odpowiadającej rozwiązaniu teoretycznemu. Teraz należy podkreślić, że omawiana operacja definiuje powierzchnie ale co oczywiste powstają również odpowiadające im linie i punkty kluczowe. Na rys. 14 pokazano powierzchnie, zatem użyto komendy **Plot Areas** wybierając z górnego poziomego paska **Plot**. Równie dobrze można wybrać komendę: **Plot Lines** (albo **Plot Keypoints)** i widzieć na ekranie linie jak na rys. 15 (albo punkty kluczowe).

Rys. 15. Liniowy model geometryczny ćwiartki powłoki.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



G. Scalenie dwóch lub więcej punktów kluczowych , linii itd. o tych samych współrzędnych.

Ponieważ na obracanym południku mamy rozgałęzienie linii (tworząca pierścienia i tworzące płaszcza), operację **Sweep Lines about Axis** należy zrobić w dwóch krokach, obraca się najpierw np. trzy linie płaszcza a następnie odcinek pierścienia. Należy zwrócić uwagę, że punkt kluczowy wspólny dla obu części będzie obracany dwukrotnie. To powoduje powstanie dublujących się punktów kluczowych i linii oddzielnych dla pierścienia, i oddzielnych dla południka. Komponenty, które są zdublowane znajdują się w tym samym miejscu w przestrzeni, ale nie są ze sobą połączone. System Ansys będzie to rozumiał jako dwie zupełnie niezależne części nie mające ze sobą wspólnej geometrii. Bez "sklejenia" model byłby nieciągły. W celu zintegrowania obydwu fragmentów używa się operacji **Merge Coincident or Equivalently Defined Items** (rys. 16).

Przebieg analizy numerycznej – Preprocessor

| Main Menu | 🔥 Merge Coincident or Equivalently Defined Items | | \times |
|---------------------------------------|---|--------------------|----------|
| Preferences | [NUMMRG] Merge Coincident or Equivalently Defined Items | | |
| Preprocessor Element Type | Label Type of item to be merge | All | |
| | TOLER Range of coincidence | | |
| Material Props | GTOLER Solid model tolerance | | |
| Sections Modeling | ACTION Merge items or select? | | |
| Meshing | | • Merge items | |
| Checking Ctrls | | O Select w/o merge | |
| □ Numbering Ctrls | SWITCH Retain lowest/highest? | LOWest number | |
| Compress Numbers Set Start Number | | | |
| Start Num Status | OK Apply | Cancel Help | |
| Add Num Offset | | | |

Rys. 16. Scalanie dwóch lub więcej punktów kluczowych , linii itd. o tych samych spółrzędnych.

Najczęściej w pierwszej linijce okienka ustawia się tryb **All**, a to dla pełnej spójności modelu. Należy wziąć pod uwagę, że scaleniu podlegają również różne pozycje na liście np. **Sections**, jeśli grubości płaszcza są na tych pozycjach takie same. Proces polega na pozbyciu się duplikatu i zostawieniu tylko jednego komponentu. Dla przykładu: mamy zdublowane punkty o numerach 30 i 45. Scalenie spowoduje usunięcie jednego z nich, powiedzmy punktu kluczowego o numerze 45. Wszystkie linie, które się z nim łączyły ulegną modyfikacji polegającej na zamianie punktu końcowego na ten o numerze 30. W ten sposób uzyskujemy spójność modelu.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



H. Przypisanie powierzchniom atrybutów.

Przed generacją siatki elementów należy przypisać powierzchniom numery pozycji na listach **Section**, czyli nadać płaszczowi odpowiednie grubości. W przypadku, gdy w zadaniu listy typów elementów oraz własności materiałowych byłyby więcej niż jednopozycyjne, należałoby to również uwzględnić poprzez przypisanie odpowiednich pozycji z list. Okno do przypisania poszczególnym powierzchniom atrybutów zamieszczono na rys. 17.

| Main Menu | \Lambda Area Attributes | × |
|--|--|----------------|
| Preferences | [AATT] Assign Attributes to Picked Areas | |
| Preprocessor Element Type | MAT Material number | 1 • |
| | REAL Real constant set number | None defined 🗨 |
| Sections Modeling | TYPE Element type number | 1 SHELL181 |
| □ Meshing | ESYS Element coordinate sys | 0 🗸 |
| Default Attribs | SECT Element section | 1 💌 |
| I All Keypoints | | 2 |
| ■ All Lines | | 4 |
| All Areas | | |
| ➢ Picked Areas Image: All Volumes | OK Apply | Cancel Help |
| | | |

Rys. 17. Przypisanie powierzchniom atrybutów.

M.Tracz, M.Sienkiewicz



I. Określenie warunków brzegowych na liniach i ciśnienia na powierzchniach.

Aby wydzielona ćwiartka powłoki pracowała jak cały zbiornik, na brzegowych południkach przykłada się warunki symetrii (patrz rys. 18). Za płaszczyznę symetrii uważa się płaszczyznę zawierającą dany południk. W ten sposób blokuje się jedną składową translacyjną w poprzek powierzchni symetrii i dwie składowe rotacyjne: względem stycznej do południka i względem promienia wodzącego południka. Warunki symetrii to użyteczny zabieg przy modelowaniu, dający znaczącą redukcję wymiaru zadania a co za tym idzie zajętej pamięci komputera i czasu obliczeń. Dodatkowo w niniejszym zadaniu odbiera się translację w kierunku osi powłoki, przykładając odpowiednie warunki na równoleżniku łączącym pierścień z płaszczem (patrz rys. 19). Spełniony jest wtedy warunek konieczny wszelkich analiz metodą elementów skończonych odebrania wszystkich sześciu stopni swobody bryły sztywnej. Obciążenie płaszcza ciśnieniem przedstawia rys. 20.

Preferences Preprocessor Solution Analysis Type Define Loads Settings Apply □ Structural Displacement ➢ On Areas ➢ On Keypoints ➢ On Nodes On Node Components □ Symmetry B.C. On Lines ➢with Area ➢ On Areas On Nodes

Rys. 18. Określenie warunków symetrii na brzegowych południkach.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Przebieg analizy numerycznej – Preprocessor



Rys. 19. Odebranie przemieszczenia pionowego na połączeniu pierścienia z płaszczem.

Rys. 20. Określenie ciśnienia na powierzchniach płaszcza.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Przyłożone warunki brzegowe oraz ciśnienia można przedstawić graficznie na tle modelu geometrycznego otwierając odpowiednie okno **Symbols** ukryte pod zakładką **PlotCtrls** na górnym pasku. Rysunek 21 przedstawia takie wielofunkcyjne okno, gdzie ustawiono **All Applied BCs, Pressures (as Arrows)**.

Rys. 21. Ustawienie rysowania modelu wraz z symbolami warunków brzegowych i ciśnienia.



M.Tracz, M.Sienkiewicz



Model geometryczny ćwiartki powłoki wraz z symbolami warunków brzegowych i ciśnienia widać na rys. 22.



Rys. 22. Model geometryczny ćwiartki powłoki wraz z symbolami warunków brzegowych i ciśnienia.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



Podział powierzchni powłoki na elementy skończone.

Przed podziałem modelu na elementy skończone należy jeszcze wprowadzić dodatkowe podziały linii łączących poszczególne części płaszcza (linie prostopadłe do południka). Ze względu na powstanie 20 segmentów jest to sumarycznie 40 linii, na których należy wprowadzić podział na jeden element.

Na otwartym ponownie oknie Mesh Tool należy wybrać z Mesh : Areas, a z Quad. Następnie ustawić tryb Mapped (powierzchnie Shape : czworoboczne) i kliknąć przycisk **Mesh**. Dalej wybrać powierzchnie walca i pierścienia. Operacja ta spowoduje wygenerowanie siatki elementów skończonych na wskazanych powierzchniach. Cały proces należy powtórzyć dla powierzchni kuli i stożka, z tą różnicą, że należy wybrać tryb Free (powierzchnie trójboczne).

MeshTool Main Menu Preferences Element Attributes: Preprocessor ▼ Set Element Type Global Real Constants Material Props Smart Size Sections Modelina Fine 6 Meshing Mesh Attributes Size Controls: MeshTool Set Global Size Cntrls Mesher Opts Areas Set Concatenate Set Lines ⊞ Mesh Modify Mesh Сору Check Mesh Clear Set Layer Checking Ctrls Numbering Ctrls Keypts Set Archive Model E Coupling / Cegn Mesh: Areas Multi-field Set Up Shape: C Tri Physics • Mapped C Free Path Operations Solution 3 or 4 sided General Postproc TimeHist Postpro B ROM Tool Mesh Radiation Opt Session Editor 🖾 Finish Refine at: Elements Refine

Rys. 23. Podział na elementy skończone powierzchni powłoki.

M.Tracz, M.Sienkiewicz

Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Coarse

Clear

Clear

Clear

Flip

Clear

Clear

-

 $\overline{\mathbf{w}}$

Quad

Clear

Help

Close





Rys. 24. Siatka elementów skończonych na powierzchniach powłoki.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



A. Wykonanie obliczeń.

Ścieżkę do uruchomienia obliczeń wskazuje rys. 25.



Rys. 25. Uruchomienie obliczeń.

Zanim uruchomione zostaną procedury metody elementów skończonych, wszelkie atrybuty modelu obliczeniowego, obciążenia oraz warunki brzegowe przetransferowane zostaną automatycznie do elementów i węzłów.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



A. Prezentacja wyników.

Wyniki obliczeń pokazuje się w postaci map oraz wykresów. Wcześniej warto wykorzystać możliwość ustawienia odpowiedniej formy dla tych wyników. Do tego służy okno **Options for Output** (rys. 26).



Rys. 26. Ustawienie wynikowego układu odniesienia oraz warstwy powierzchni.

M. Tracz, M. Sienkiewicz



W przypadku struktury powłokowej wyniki powinno się prezentować w układach elementowych. Układy elementowe, odrębne dla poszczególnych elementów zdefiniowane są względem ich krawędzi. Aby wyniki obserwować w tych układach wystarczy w pierwszej linijce Result coord system wybrać opcję As calculated – I. jeśli dodatkowo uzyskana siatka jest regularna to, krawędzie wszystkich elementów mają układ południkowo – równoleżnikowy. Rysowane ostatecznie składowe SX i SY płaskiego stanu naprężenia są głównymi naprężeniami południkowymi i obwodowymi. Wtedy jedynie ma sens porównanie wyników numerycznych z analitycznymi. Drugie ustawienie dotyczy linijki Shell results are from. Na rys. 25 wybrano opcję Middle layer – 2, co oznacza, że będą rysowane wyniki na powierzchni środkowej płaszcza – tzw. naprężenia błonowe. Oprócz tego można obserwować wyniki na powierzchni dolnej albo górnej.

| Main Menu | \Lambda Options for Output | × |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Preferences | Options for Output | |
| | [RSYS] Results coord system | As calculated 🗨 |
| General Postproc | Local system reference no. | |
| Data & File Opts Results Summary | [AVPRIN] Principal stress calcs | From components 🔹 |
| Read Results | [AVRES] Avg rslts (pwr grph) for | All but Mat Prop 🔻 |
| Failure Criteria Options for Outp | Use interior data | □ NO |
| Results Viewer | [/EFACET] Facets/element edge | 1 facet/edge ▼ |
| E Load Case Check Elem Shape | [SHELL] Shell results are from | Middle layer 🔻 |
| Write Results | [LAYER] Layer results are from | 2. |
| ROM Operations | | O Max failure crit |
| Define/Modify Manual Rezoning | | Specified layer |
| TimeHist Postpro | Specified layer number | 0 |
| ROM Tool Rediation Opt | [FORCE] Force results are | Total force 💌 |
| Session Editor | | |
| 🖾 Finish | OK I Const I | Usia |
| | Cancel | |

Rys. 26. Ustawienie wynikowego układu odniesienia oraz warstwy powierzchni.



.032273

B. Prezentacja wyników.

LATFORMA PRZEMYSŁU 4.0

Pierwsza mapa (rys. 27) przedstawia pole sumarycznych przemieszczeń.

NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 USUM (AVG) RSYS=SOLU DMX =.272884 SMN =.032273 SMX =.272884



Rys. 27. Pole sumarycznych przemieszczeń . Jednostki w legendzie w mm.

Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji

Przebieg analizy numerycznej – General Postprocessor

Następne dwie mapy przedstawiają rozkłady naprężeń **południkowych** i obwodowych.

NODAL SOLUTION

STEP=1 SUB =1 TIME=1 SX (AVG) MIDDLE RSYS=SOLU DMX =.272884 SMN =-23.3705 SMX =22.9255



Rys. 28. Mapa naprężeń SX. Jednostki w legendzie w MPa.



Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji



Następne dwie mapy przedstawiają rozkłady naprężeń południkowych i **obwodowych**. NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 SY (AVG) MIDDLE RSYS=SOLU DMX =.272884 SMN =-12.4517 SMX =26.8622

-12.4517



Rys. 29. Mapa naprężeń SY. Jednostki w legendzie w MPa.

> Politechnika Warszawska, Wydział MEiL Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji



Na rysunkach 28 i 29 utrzymano ogólne oznaczenia SX i SY. Rozstrzygnięcie, które z nich jest południkowe a które obwodowe wymaga porównania z rozwiązaniem teoretycznym. Okazuje się, że w tym zadaniu naprężenie SX z rys. 28 reprezentuje składową obwodową na powierzchni środkowej kuli, walca i pierścienia, natomiast na powierzchni stożka składową południkową. Z kolei naprężenie SY z rys. 29 reprezentuje składową południkową na powierzchni środkowej kuli, walca (pierścienia promieniową), natomiast na powierzchni stożka składową obwodową. Z tego też powodu wykresy SX i SY zamieszczono na odrębnych rysunkach: nr 30 dla stożka i nr 31 dla walca z kulą łącznie.

Przebieg analizy numerycznej – General Postprocessor PLATFORMA PRZEMYSŁU 4.0

POST1 STEP=1 SUB =1 TIME=1

SX

SY

PATH PLOT NOD1=1389 NOD2=482 26.63 23.193 19.751 16.309 12.867 9.425 5.983 2.541 -.901 -4.343 -7.785 282.842 848.526 0 565.684 1131.368 1414.214 141.421 424.263 707.105 989.947 1272.789 DIST

Rys. 30. Wykresy naprężeń południkowych (SX) i obwodowych (SY) na południku stożka.

M.Tracz, M.Sienkiewicz

Przebieg analizy numerycznej – General Postprocessor PLATFORMA PRZEMYSŁU 4.0

POST1 STEP=1 SUB =1TIME=1

SX

SY

PATH PLOT NOD1=482 NOD2=508 22.925 19.854 16.783 13.712 10.641 7.57 4.499 1.428 -1.643-4.714 -7.785 0 514.104 1028.208 1542.312 2056.416 2570.516 257.052 771.156 1285.26 1799.364 2313.468 DIST

Rys. 31. Wykresy naprężeń obwodowych (SX) i południkowych (SY) na południku walca i kuli .

M.Tracz, M.Sienkiewicz



Przebieg analizy numerycznej – General Postprocessor

(AVG)

NODAL SOLUTION

STEP=1 SUB =1 TIME=1 SX

MIDDLE

RSYS=SOLU DMX =.122452 SMN =-23.3705

SMX = -21.86

Wreszcie rys. 32 przedstawia mapę składowej obwodowej na pierścieniu usztywniającym (SX). Składowa promieniowa (SY) może zostać pominięta ze względu na małe wartości.

Rys. 32 . Naprężenia obwodowe na pierścieniu usztywniającym. Jednostki w legendzie w MPa.

-23.3705 -23.2027 -23.0349 -22.867 -22.6992 -22.5314 -22.3635 -22.1957 -22.0279 -21.86



Przedstawione w zwartej postaci najważniejsze wyniki analizy powłoki osiowosymetrycznej pozwalają dokonać oceny ich poprawności w odniesieniu do uproszczonej teorii błonowej. W szczególności łatwo dostrzec dużą niezgodność w okolicy załomu południka z pierścieniem ale wytłumaczeniem jest fakt uwzględnienia efektu brzegowego w modelu mes zapewniającego ciągłość przemieszczeń, czego nie ujmuje teoria błonowa.



ZI. Porównać wyniki obliczeń zbiornika metodą elementów skończonych dla grubości płaszczy kuli, walca i stożka 5 mm oraz grubości pierścienia I0 mm z wartościami ze wzorów analitycznych (strona 27). Opisać wpływ pierścienia na lokalne zaburzenie stanu naprężenia w walcu i stożku. Opisać również zaburzenie na połączeniu kuli i walca.

Z2. Przeprowadzić obliczenia opisanego zbiornika dla grubości płaszczy kuli, walca i stożka 5 mm oraz grubości pierścienia 40 mm. Porównać wyniki z obliczeniami dla mniejszej grubości pierścienia wynoszącej 10 mm.



- Program metody elementów skończonych ANSYS oblicza:
 - A. tylko naprężenia średnie wzdłuż grubości płaszcza.
 - B. naprężenia na obydwu powierzchniach zewnętrznych płaszcza.
 - C. naprężenia zgięciowe w płaszczu.
 - D. pełny płaski stan naprężenia.
- Aby uzyskać za pomocą programu ANSYS składowe płaskiego stanu naprężenia odpowiadające naprężeniom południkowemu i obwodowemu należy w opcjach do prezentacji wyników ustawić układ:
 - A. kartezjański.
 - B. walcowy.
 - C. elementowy indywidualny dla każdego elementu.
 - D. dowolny.



- Program metody elementów skończonych ANSYS oblicza:
 - A. tylko naprężenia średnie wzdłuż grubości płaszcza.
 - B. naprężenia na obydwu powierzchniach zewnętrznych płaszcza.
 - C. naprężenia zgięciowe w płaszczu.
 - D. pełny płaski stan naprężenia.
- Aby uzyskać za pomocą programu ANSYS składowe płaskiego stanu naprężenia odpowiadające naprężeniom południkowemu i obwodowemu należy w opcjach do prezentacji wyników ustawić układ:
 - A. kartezjański.
 - B. walcowy.
 - C. elementowy indywidualny dla każdego elementu.
 - D. dowolny.