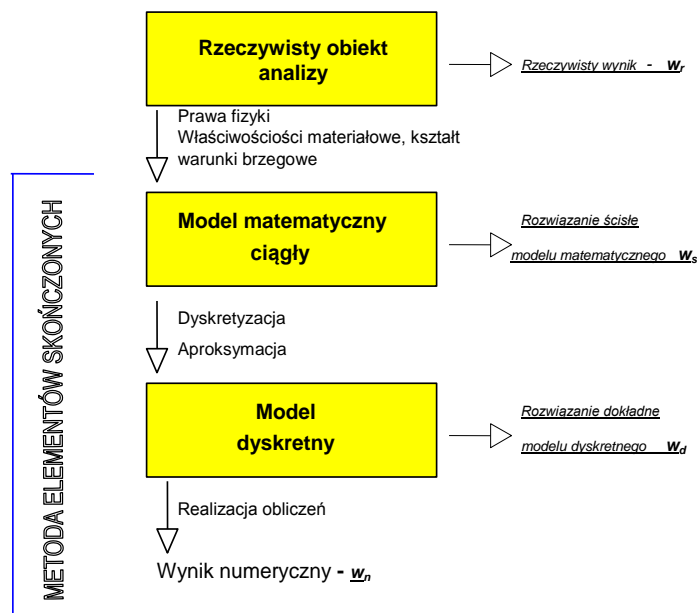


3. ZASADY BUDOWY I ANALIZY MODELI MES

Analiza konstrukcji metodą elementów skończonych polega na sformułowaniu odpowiedniego opisu matematycznego i następnie rozwiązaniu postawionego problemu (rys. 3.1). Pamiętać więc należy, że warunkiem wiarygodności i praktycznej przydatności obliczeń MES jest znajomość odpowiedniego do potrzeb modelu matematycznego. Model matematyczny może być jednowymiarowy, dwuwymiarowy, trójwymiarowy, w różny sposób idealizowane mogą być kształt, właściwości materiałowe, warunki podparcia i obciążenia konstrukcji. Na przykład konstrukcja ramowa podwozia przyczepy samochodowej może być reprezentowana przez prosty model ramy trójwymiarowej, w którym kształt przekrojów prętów ukryty jest w podanych parametrach geometrycznych (pole przekroju, momenty bezwładności, położenie głównych osi bezwładności). Można jednak model ramy zbudować stosując powłokowe elementy skończone lub trójwymiarowe elementy typu *solid*.

Wybór modelu matematycznego stanowi bardzo ważny etap analizy, od którego w zasadniczym stopniu zależy dokładność i przydatność wyników. Dobra znajomość badanych zjawisk jest więc podstawowym warunkiem efektywności symulacji komputerowej.

Dla poprawnego korzystania z programów MES wymagana jest również znajomość samej metody w zakresie uzależnionym od złożoności badanych zjawisk i stosowanych technik obliczeniowych.



Rys. 3.1. Rozwiązywanie zagadnień analizy osrodków ciągłych metodami przybliżonymi. Schemat postępowania

Budowa modelu obliczeniowego przeprowadzana jest zwykle interaktywnie w części pakietu programów MES zwanej *preprocesorem*. W tym środowisku programowym użytkownik buduje model geometryczny analizowanej konstrukcji, definiuje właściwości materiałowe i warunki brzegowe. Po wskazaniu wybranych typów elementów skończonych, które mają być wykorzystane w modelu i wymagań wobec podziału na elementy (gęstość dyskretyzacji w poszczególnych fragmentach modelu) generowana jest automatycznie siatka węzłów i elementów skończonych.

Uzyskany model dyskretny rozwiązywanego problemu może być automatycznie sprawdzany pod względem formalnej poprawności.

Zasadnicze obliczenia metody odbywają się bez bezpośredniego zaangażowania użytkownika programów MES. Użytkownik definiuje tylko rodzaj zagadnienia (np. statyka, drgania własne, drgania nieustalone itp.), metodę rozwiązania i jej główne parametry (np. kryteria zbieżności, stopień szczegółowości wyników itp.). Program przeprowadza obliczenia na podstawie tych informacji i zapisuje wyniki na dysku komputera.

Do prezentacji, analizy i archiwizacji otrzymanych wyników służy moduł oprogramowania zwany *postprocesorem*. Wybrane rezultaty obliczeń prezentować można za pomocą map warstwicznych, wykresów, wydruków, animacji. Możliwe jest również dokonywanie dodatkowych operacji na wynikach, np. sumowanie wyników z kilku wariantów obciążenia dla utworzenia nowego wariantu, prezentacja rozkładu dowolnie zdefiniowanej funkcji składowych stanu naprężenia (np. własnej hipotezy wytrzymałościowej). W niektórych pakietach MES możliwe są dodatkowe obliczenia wymagane np. przez obowiązujące normy wytrzymałościowe i przepisy bezpieczeństwa.

Przedstawione poniżej wskazówki dotyczą podstawowych praktycznych zasad budowy i wykorzystania modeli metody dla czytelnika znającego podstawy teoretyczne MES.

3.1. MODEL GEOMETRYCZNY

Model geometryczny (model typu *solid*) w postaci linii, powierzchni i brył stanowi część całego modelu matematycznego i nie musi być wiernym odzwierciedleniem rzeczywistego kształtu badanego obiektu. Mimo, że każda rzeczywista konstrukcja inżynierska jest obiektem trójwymiarowym to wiele zagadnień analizowanych może być za pomocą elementów prętowych, albo przy wykorzystaniu modeli dwuwymiarowych (*plaski stan naprężenia*, *plaski stan odkształcenia*, *osiowa symetria*). Przyjęcie takich wyidealizowanych założeń w bardzo dużym stopniu zmniejsza liczbę elementów skończonych i liczbę węzłów a w konsekwencji liczbę stopni swobody niezbędną do uzyskania wymaganej dokładności modelu dyskretnego.

W wielu przypadkach model geometryczny może pomijać pewne detale rzeczywistego obiektu, takie jak małe karby, spawy, małe otwory, fragmenty konstrukcji nie mające znaczenia dla analizowanych zjawisk. Stopień akceptowalnych uproszczeń modelu zależy ponadto od celów obliczeń. Na przykład, gdy celem jest określenie deformacji obiektu lub częstości drgań własnych to model może w stopniu bardziej zgrubnym odzwierciedlać rzeczywisty kształt niż w przypadku, gdy celem jest znalezienie maksymalnej wartości naprężenia zredukowanego. Z tego powodu nie zawsze najlepszym rozwiązaniem jest bezpośrednie wykorzystanie modeli geometrycznych pochodzących z programów CAD. Warto tutaj zaznaczyć, że do budowy najbardziej polecanych, regularnych siatek elementów skończonych korzystne może być podzielenie analizowanego obszaru na kilka, a czasami nawet więcej podobszarów, w których działanie automatycznych generatorów siatek daje znacznie lepsze rezultaty niż w przypadku automatycznego podziału całego obszaru analizy.

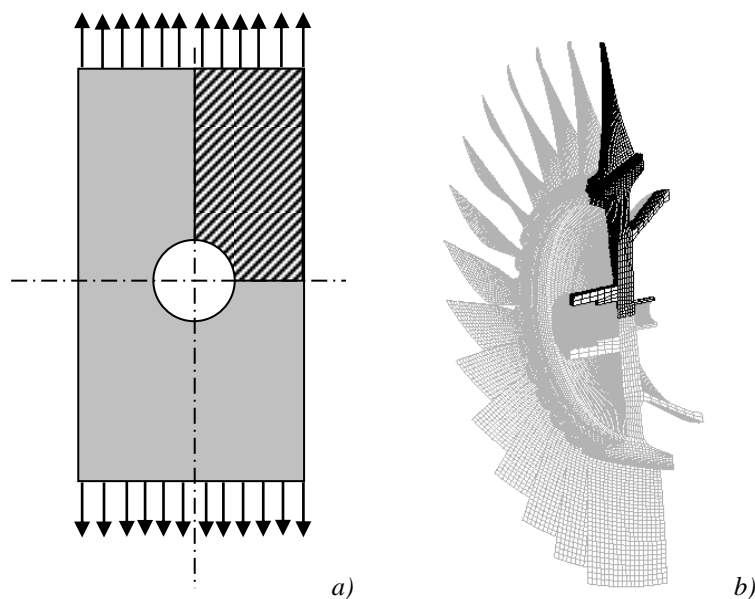
W trakcie budowy modelu wykorzystana też może być symetria konstrukcji (symetria kształtu i właściwości materiałowych przy równoczesnej symetrii lub antysymetrii warunków brzegowych). Poza trójwymiarową osiową symetrią spotykamy często osiową symetrię w modelach płaskich (rys. 3.2a), płaszczyznową w modelach trójwymiarowych. Wyróżniane są też inne rodzaje symetrii, np. tzw. symetria cykliczna w budowie wirników (rys. 3.2b).

Wykorzystanie symetrii pozwala na analizę powtarzalnego segmentu struktury, a więc prowadzenie obliczeń z większą dokładnością i z mniejszymi kosztami (zaangażowaną mocą obliczeniową komputera i czasem obliczeń).

Uwzględnienie w modelach obliczeniowych symetrii wiąże się bezpośrednio z przyjęciem odpowiednich warunków brzegowych modelu na liniach (powierzchniach) symetrii.

3.2. WARUNKI BRZEGOWE

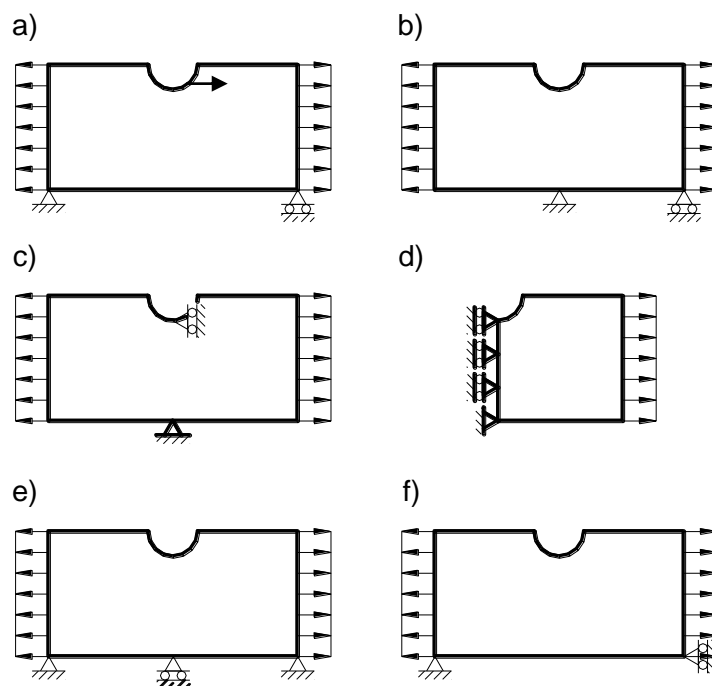
Warunki brzegowe w większości zaawansowanych programów MES można podawać w odniesieniu do modelu geometrycznego (na liniach, powierzchniach, bryłach, punktach węzłowych



Rys. 3.2. Obszar analizy dla obiektu 2D z dwoma osiami symetrii i z symetria cykliczną

obszaru analizy) lub w odniesieniu do modelu dyskretnego (na elementach i węzłach). Pierwszy sposób ma tę przewagę, że zmiana dyskretyzacji nie wymusza redefiniowania warunków brzegowych.

Modele MES stosowane do analizy naprężeń można rozwiązywać dopiero po uwzględnieniu przemieszczeniowych warunków brzegowych odpowiadających istniejącemu sposobowi podparcia konstrukcji. Gdy mamy do czynienia z obciążeniami *samoźrównoważonymi* (rys. 3.3) niezbędne jest odebranie takiej liczby stopni swobody modelu, aby nie dopuszczać do możliwości jego ruchu jako ciała sztywnego a jednocześnie nie ograniczać swobody deformacji. W przeciwnym przypadku rozwiązanie byłoby niejednoznaczne; pole przemieszczeń mogłoby być efektem deformacji struktury i dowolnego pola przemieszczeń odpowiadającego ruchowi modelu jako bryły sztywnej.



Rys.3.3. Tarcza obciążona w sposób samoźrównoważony oraz prawidłowe (a, b, c, d) i błędne (e, f) przykłady podparć w modelach MES

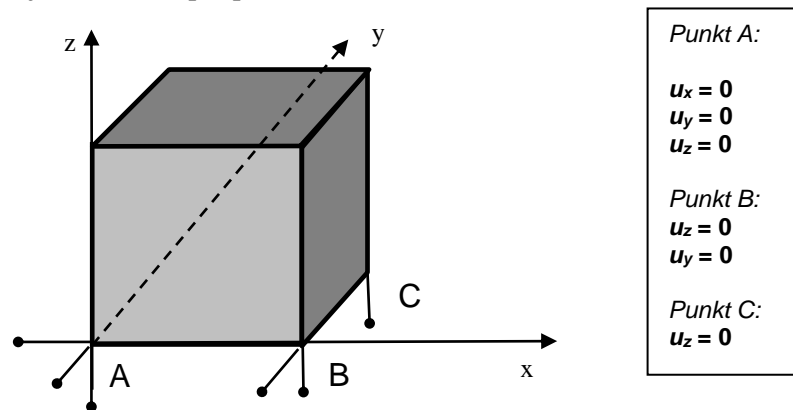
Matematycznym odzwierciedleniem tej niejednoznaczności jest fakt, że globalna macierz sztywności układu równań MES bez uwzględnienia przemieszczeniowych warunków brzegowych jest macierzą osobliwą.

W przypadku dwuwymiarowym konieczne jest więc odebranie modelowi konstrukcji 3 stopni swobody, a w przypadku trójwymiarowym 6 stopni swobody. Zwykle realizowane jest to przez narzucenie warunku, że w wybranych węzłach odpowiednie składowe wektora przemieszczenia mają wartość zero. Prawidłowe podparcie tego typu można zrealizować na wiele sposobów.

Przykłady prawidłowych i nieprawidłowych warunków podparcia dla obciążenia samorzównoważonego w zagadnieniu dwuwymiarowym przedstawione są na rysunku 3.3.

Typowe podparcie obiektu trójwymiarowego (3D) w przypadku obciążeń samorzównoważonych przedstawione jest na rys. 3.4.

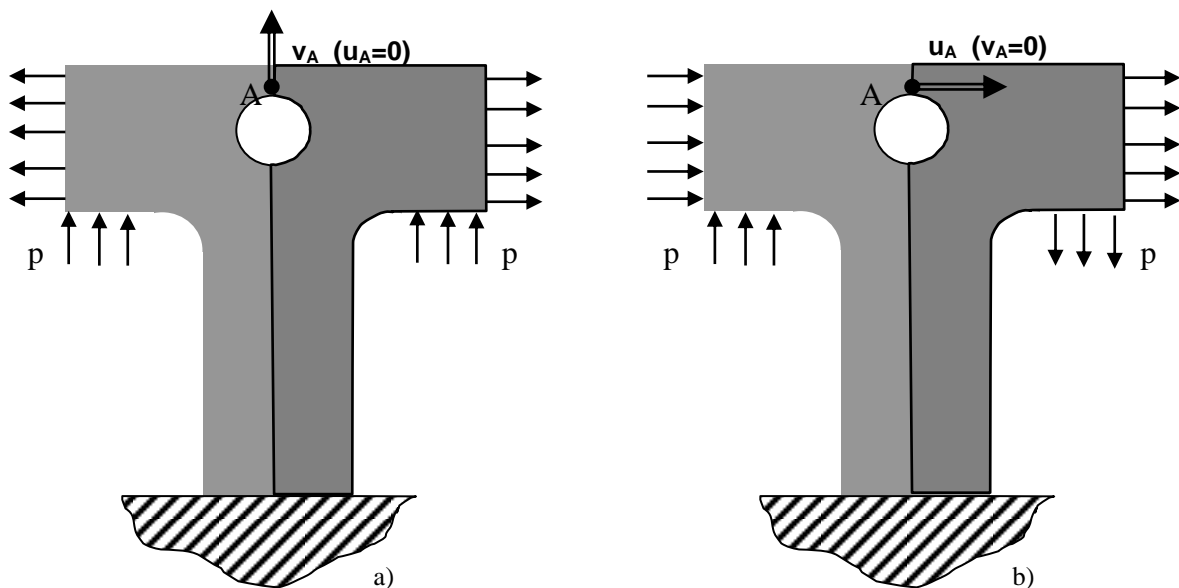
W większości analizowanych obiektów mamy jednak do czynienia z rzeczywistym podparciem statycznie wyznaczalnym lub statycznie niewyznaczalnym. Wówczas model powinien odzwierciedlać jedynie fizycznie istniejące warunki podparcia.



Rys. 3.4. Przykład statycznie wyznaczalnego podparcia obiektu trójwymiarowego

Symetryczne i antysymetryczne przemieszczeniowe warunki brzegowe

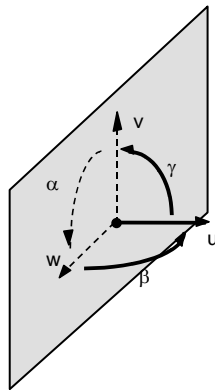
W wielu przypadkach analizowana konstrukcja charakteryzuje się symetrią kształtu (osiową, płaszczyznową, cykliczną). Jeśli dodatkowo obciążenia pozostają symetryczne lub antysymetryczne (rys. 3.5) to analizowana może być tylko powtarzalna, symetryczna część modelu. Omawiane już to było w punkcie 1. Jednak wówczas na brzegu analizowanej części odpowiadającym linii lub płaszczyźnie symetrii należy założyć tak zwane *symetryczne lub antysymetryczne warunki podparcia*.



Rys. 3.5. Dwuwymiarowy model symetrycznej konstrukcji obciążonej: a) symetrycznie, b) antysymetrycznie

Przeanalizujemy na przykład model konstrukcji z rysunku 3.5 przy symetrycznym i antysymetrycznym obciążeniu. Z zasady jednoznaczności rozwiązania wynika, że w przypadku symetrycznego obciążenia punkty leżące na osi symetrii nie mogą przemieścić się w kierunku prostopadłym do osi symetrii, a w przypadku antysymetrycznego obciążenia te same punkty nie mogą przemieszczać się w kierunku tej osi.

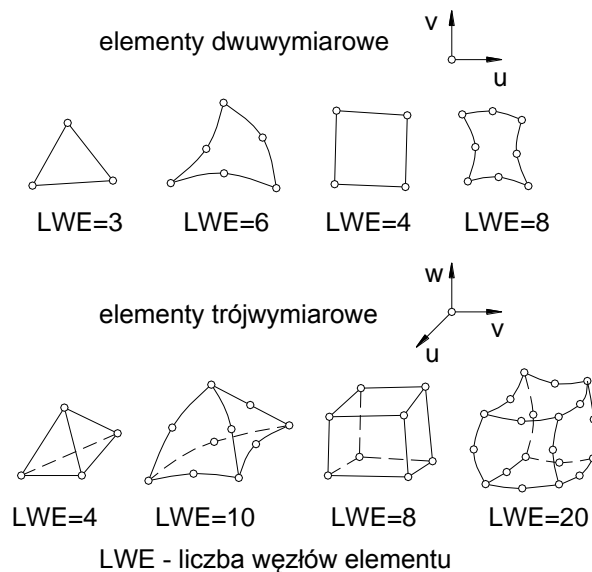
Tego typu przypadki są bardzo częste w analizach konstrukcji inżynierskich, dlatego programy MES mają zwykle procedury zautomatyzowanego przyjmowania symetrycznych i antysymetrycznych warunków brzegowych. W przypadku trójwymiarowym (rys. 3.6) symetryczne warunki brzegowe oznaczają, że na płaszczyźnie symetrii narzucamy warunki $u=0$, $\beta=0$, $\gamma=0$. W przypadku antysymetrycznego obciążenia mamy $v=0$, $w=0$, $\alpha=0$.



Rys. 3.6. Przemieszczenia uogólnione (stopnie swobody) na płaszczyźnie symetrii unieruchamiane w przypadku symetrycznego obciążenia ($u=0$, $\beta=0$, $\gamma=0$) i antysymetrycznego obciążenia ($v=0$, $w=0$, $\alpha=0$)

3.3. WYBÓR ELEMENTU SKOŃCZONEGO

Analizując za pomocą metody elementów skończonych dowolną konstrukcję: prętową, powłokową, dwu- lub trójwymiarową wybieramy odpowiedni element skończony, jaki ma być zastosowany do obliczeń. Przykłady elementów stosowanych w dwu- i trójwymiarowych zadaniach analizy naprężeń przedstawione są na rys. 3.7.



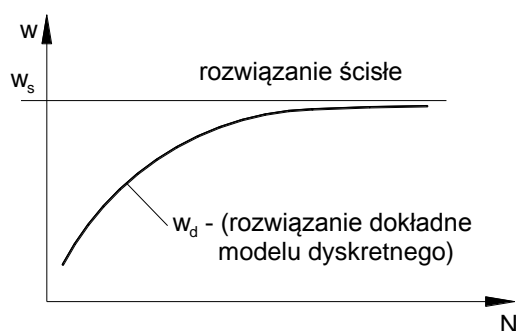
Rys. 3.7. Wybrane elementy skończone dla zagadnień dwu- i trójwymiarowych

Elementy, w których na krawędziach mamy więcej niż dwa węzły, pozwalają na uzyskanie dokładniejszych rozwiązań, dają możliwość lepszego odwzorowania krzywoliniowego brzegu ciała i dokładniejszej aproksymacji pola przemieszczeń wewnątrz elementu. Większa liczba węzłów na krawędzi elementu umożliwia aproksymację pola przemieszczeń wzdłuż tej krawędzi przez wielomian wyższego stopnia. W przypadku dwóch węzłów na krawędzi (tylko na końcach), składowe wektora przemieszczenia zmieniają się wzdłuż krawędzi liniowo, a odkształcenia i naprężenia w tym kierunku są stałe. W przypadku 3 węzłów na krawędzi składowe wektora przemieszczenia są funkcjami kwadratowymi, a odkształcenia i naprężenia funkcjami liniowymi. Dla uzyskania wymaganej dokładności obliczeń wykorzystać więc trzeba większą liczbę elementów skończonych o prostych funkcjach kształtu lub mniejszą liczbę elementów o bardziej złożonych funkcjach modelujących. Jednak stosowanie bardzo złożonej aproksymacji na przykład za pomocą wielomianów stopnia czwartego i wyższych jest niekorzystne. Rozwiązanie MES w takim przypadku jest wrażliwe na zaburzenia. Dlatego w trudnych, nieliniowych zadaniach polecane jest wykorzystywanie elementów skończonych o prostych funkcjach kształtu.

Wybierając z dostępnej biblioteki elementów skończonych dany typ elementu, który będzie zastosowany w modelu należy sprawdzić jego opis i zapoznać się z uwagami dotyczącymi zakresu zastosowań.

3.4. DYSKRETYZACJA (PODZIAŁ NA ELEMENTY SKOŃCZONE)

Poprawnie zbudowany model dyskretny metody elementów skończonych gwarantuje zbieżność rozwiązania numerycznego w_d do rozwiązania ścisłego w_s (rys. 3.1) przy zagęszczaniu siatki dyskretyzacyjnej (zwiększaniu liczby elementów i stopni swobody modelu). Typowa zależność między rozwiązaniem ścisłym a rozwiązaniem dokładnym modelu dyskretnego przedstawiona jest schematycznie na rys. 3.8.

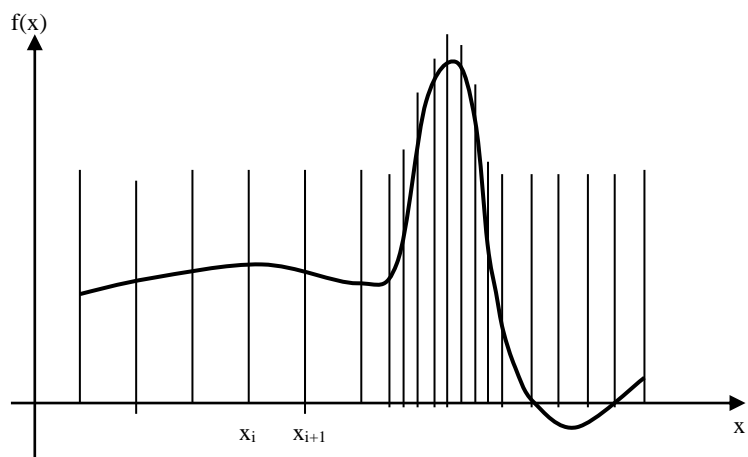


Rys. 3.8. Typowa zależność rozwiązania modelu dyskretnego w_d od liczby stopni swobody modelu N

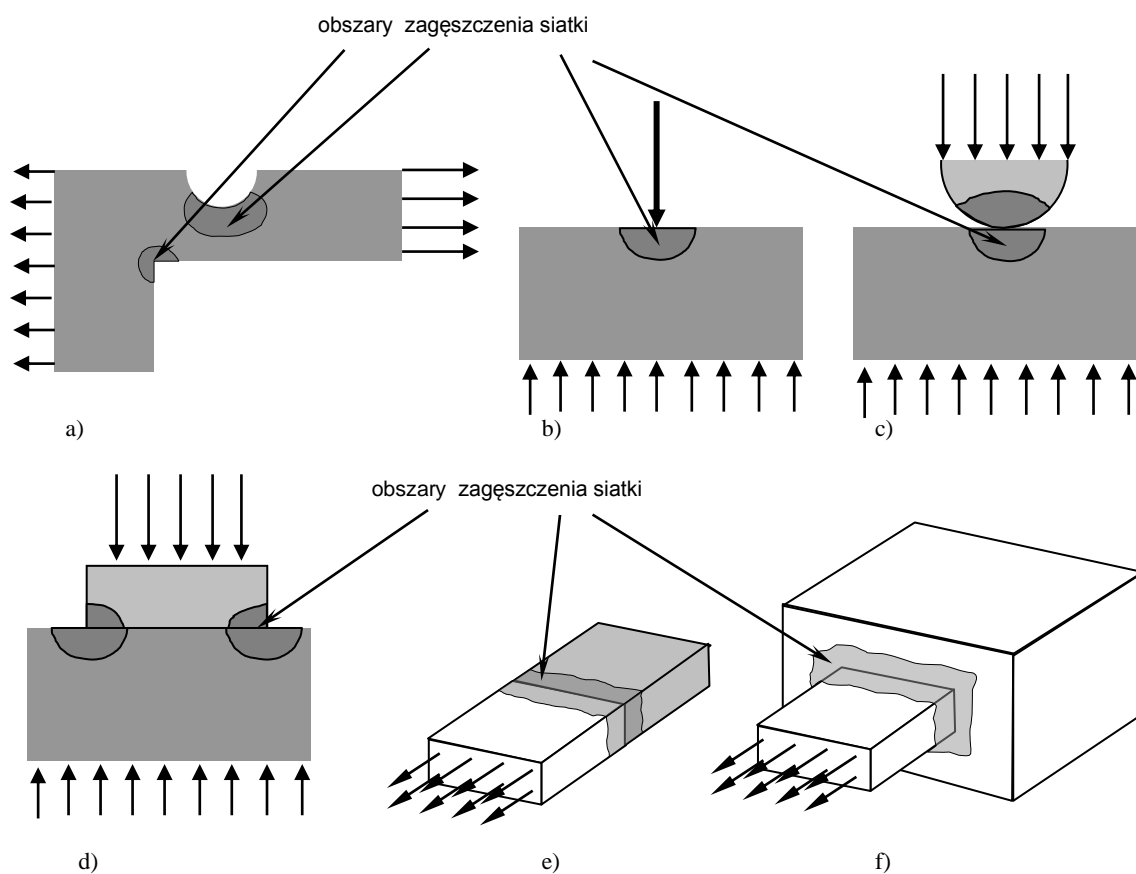
Siatka elementów skończonych o równomiernej gęstości (rozmiarach elementów) jest zwykle nieefektywna. Jej automatyczne równomierne zagęszczanie prowadzi do zwiększania liczby stopni swobody modelu, a więc również zwiększania kosztów obliczeń i wzrostu błędów obliczeń numerycznych (pochodzących z zaokrągleń).

Zależności związane z gęstością dyskretyzacji w MES są analogiczne do występujących przy aproksymacji funkcji jednej zmiennej za pomocą funkcji sklepanych (w najprostszym przypadku linii łamanej). W podobozarach, gdzie aproksymowana funkcja wykazuje dużą zmienność gęstość dyskretyzacji powinna być większa, a tam gdzie zmiany funkcji są małe dyskretyzacja może być bardziej zgrubna (rys. 3.9).

W mechanice konstrukcji zagęszczona dyskretyzacja wymagana jest więc w tych fragmentach modelu, gdzie spodziewać się możemy koncentracji naprężeń (rys. 3.10), a więc w krawędziach, narożach, miejscach nagłej zmiany obciążenia, na granicach połączeń materiałów o różnych właściwościach itp.

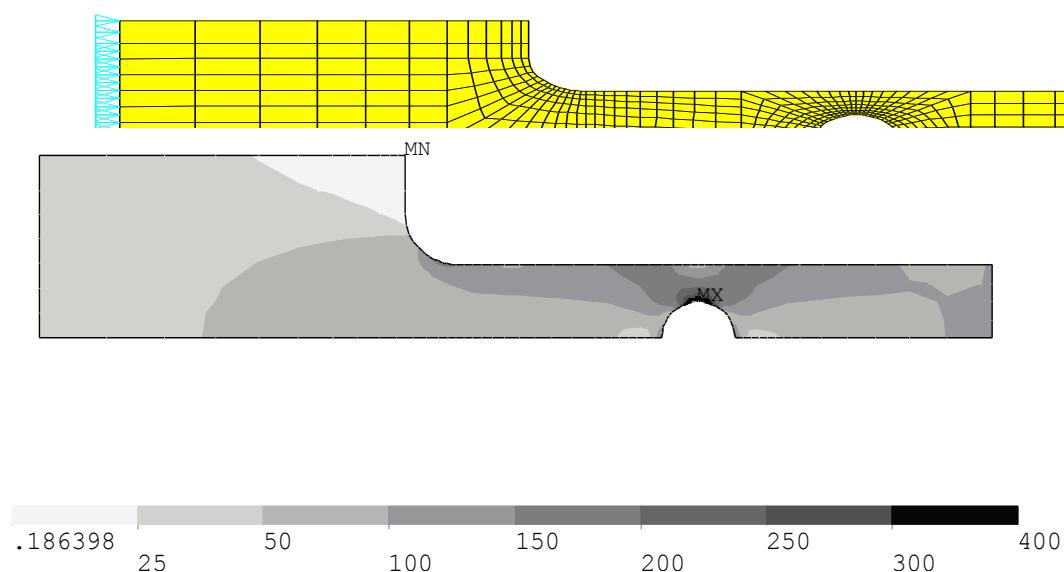


Rys. 3.9. Gęstość dyskretyzacji przy zadaniu aproksymacji funkcji jednej zmiennej



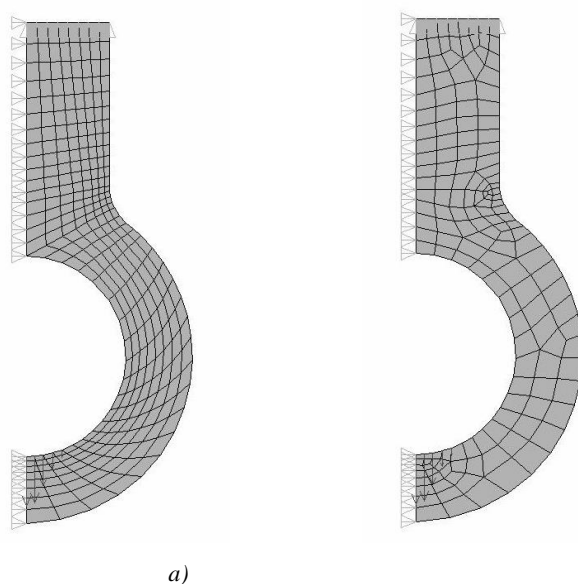
Rys. 3.10. Podobszary, w których wymagana jest zagęszczona siatka elementów skończonych:
a) karby, b) miejsca przyłożenia obciążeń skupionych, c), d) zadania kontaktowe,
e) granica między ośrodkami o różnych właściwościach, f) skokowa zmiana kształtu

Przykład dyskretyzacji dostosowanej do przewidywanego rozkładu pola naprężeń przedstawiony jest na rys. 3.11.



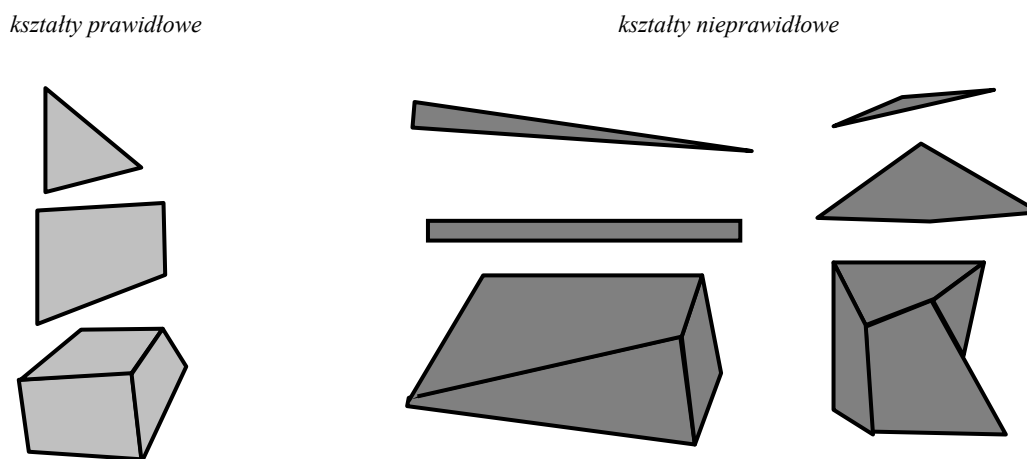
Rys. 3.11. Model MES rozciąganego elementu konstrukcyjnego i rozkład naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa (MPa)

Podział na elementy skończone przeprowadzany jest w programach MES za pomocą złożonych algorytmów. Algorytmy automatycznej dyskretyzacji wymagają podania szeregu parametrów, które wpływają na efekt końcowy (np. wymagana długość krawędzi elementu, wskazane lokalizacje i kierunki zagęszczenia siatki, liczba elementów skończonych wzdłuż wybranych linii). W szczególności wyróżniamy tzw. podział regularny (*mapped meshing*) i podział swobodny (*free meshing*). Zwykle znacznie lepsze rezultaty (dokładność wyników w stosunku do kosztów obliczeń) daje podział regularny (rys. 3.12). Jednak jest on trudniejszy do otrzymania i często wymaga pomocniczego podzielenia analizowanego obszaru na podobszary. W przypadku niektórych, bardzo skomplikowanych kształtów analizowanych obszarów algorytmy automatycznego podziału mogą zawieść. Wówczas rozwiązaniem może być nieznaczna modyfikacja kształtu lub podział na podobszary i stopniowa dyskretyzacja całego modelu. Innym wariantem, rzadko obecnie stosowanym, jest bezpośrednie utworzenie siatki węzłów i elementów skończonych, bez wykorzystania modelu geometrycznego typu *solid*.



Rys. 3.12. Podziały: regularny (a) i nieregularny (b) przeprowadzone przy tej samej dyskretyzacji konturu obszaru

Elementy skończone powinny w obszarze dyskretyzacji płynnie zmieniać swoje wymiary i nie przybierać kształtów silnie zdeformowanych (kąty wewnętrzne bardzo małe lub bliskie 180°, znaczne kierunkowe wydłużenia). Elementy zdegenerowane (rys. 3.13) przyczyniają się do występowania dużych lokalnych błędów w ocenie pól naprężeń, a w niektórych przypadkach uniemożliwić mogą całkowicie obliczenia.



Rys. 3.13. Przykłady elementów skończonych o poprawnych kształtach i kształtach zdegenerowanych – prowadzących do dużych błędów obliczeń

3.5. OCENA WYNIKÓW I WIARYGODNOŚĆ MODELI I OBLICZEŃ MES

Rozwiązanie układu równań metody elementów skończonych oznacza wyznaczenie przemieszczeń wszystkich węzłów. Następnie obliczane są odkształcenia i naprężenia wewnątrz kolejnych elementów skończonych.

Uzyskane naprężenia są ciągłe jedynie wewnątrz elementów [3]. Są to tak zwane naprężenia elementowe (*element solution*). Poprawienie obrazu otrzymanych naprężeń uzyskać można przez uśrednienie (wygładzenie) wyników. Dla każdego węzła znajdujemy wartość średnią każdej składowej stanu naprężenia i dalej pole naprężeń prezentujemy zgodnie z zasadami aproksymacji pola przemieszczeń. Tak uśrednione pole naprężeń staje się ciągłe (nie ma skoku wartości na granicach między elementami) i nazywane jest polem naprężeń węzłowych (*nodal solution*). W ten sposób wygładzony obraz naprężeń jest zwykle bliższy rozwiązaniu dokładnemu niż wyjściowy obraz naprężeń elementowych. Różnica między tymi sposobami prezentacji wyników pokazana jest na rysunku 3.14.

Korzystając z MES należy zawsze pamiętać, że mamy do czynienia z metodą przybliżoną. Uzyskane wyniki są obarczone błędem, którego wielkość zależy od wielu czynników. Dla krótkiego, jakościowego omówienia najważniejszych przyczyn wpływających na błędy rozwiązań przyjmijmy następujące oznaczenia, odpowiadające zgodnie z rys. 3.1 różnym etapom analizy MES:

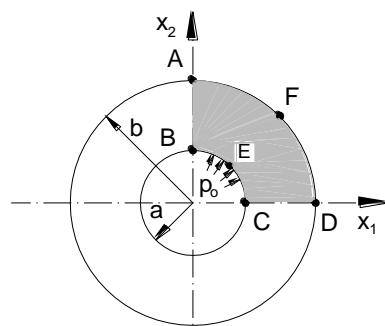
- w_r – wynik rzeczywisty,
- w_s – rozwiązanie ściśle ciągłego modelu matematycznego problemu,
- w_d – rozwiązanie dokładne modelu dyskretnego MES,
- w_n – wynik numeryczny, otrzymany po przeprowadzeniu obliczeń.

Mamy zazwyczaj $w_r \neq w_s \neq w_d \neq w_n$.

Różnice poszczególnych wyników definiują błędy różnych etapów analizy:

$$\varepsilon_s = w_s - w_r \quad \text{– błąd wybranego modelu matematycznego,}$$

$$\varepsilon_d = w_d - w_s \quad \text{– błąd modelu dyskretnego,}$$



$$a = 1 \cdot 10 \text{ m}^2$$

$$b = 2.5 \cdot 10 \text{ m}^2$$

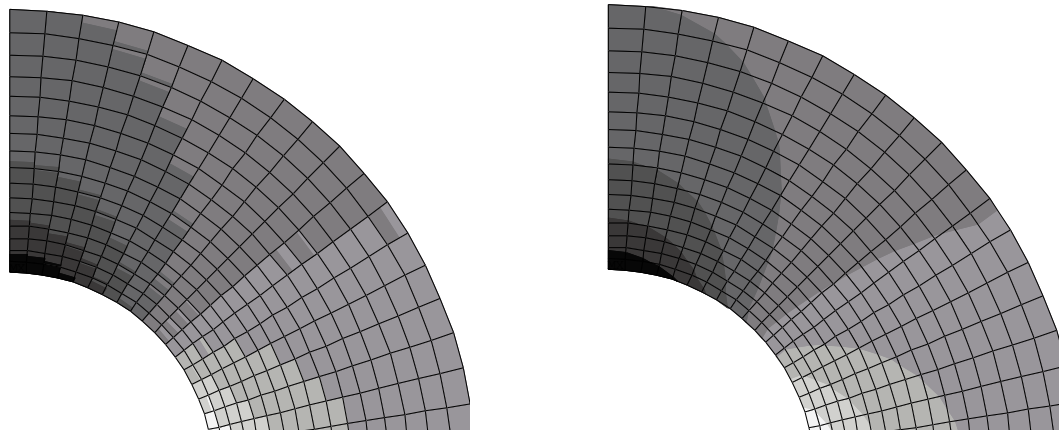
$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$p_0 = 100 \text{ MPa}$$

naprężenie σ_x w elementach skończonych

naprężenie σ_x uśrednione w węzłach



Rys. 3.14. Przybliżony charakter rozwiązania MES ilustrowany przez rozkład naprężenia σ_x . Naprężenia w elementach skończonych i naprężenia uśrednione

$$\varepsilon_n = w_n - w_d \quad \text{-- błąd obliczeń numerycznych,}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s + \varepsilon_d + \varepsilon_n = w_n - w_r \quad \text{-- błąd całkowity.}$$

Często dyskusja o błędach w analizie MES zawężana jest do omówienia czynników wpływających na błąd modelu dyskretnego ε_d . Regułą jest, że w metodzie elementów skończonych uzyskujemy znacznie lepszą dokładność aproksymacji pola przemieszczeń niż pola naprężeń (które otrzymywane jest w wyniku różniczkowania pola przemieszczeń).

Najważniejszym, z praktycznego punktu widzenia, kryterium efektywności obliczeń jest błąd całkowity ε_c .

Znajomość czynników wpływających na błąd ε_c jest niezbędna przy podejmowaniu decyzji na każdym z kroków analizy (rys. 3.1). Zwiększając dokładność analizy MES dążymy zazwyczaj do zrównoważonego zmniejszania błędów. Oznacza to, że na przykład w sytuacji, gdy stosujemy model prętowy w analizie ramy podwozia to nieuzasadnione jest szukanie poprawy wiarygodności wyników w daleko idącym zagęszczaniu liczby elementów prętowych. Dokładniejszy wynik w analizie naprężeń uzyskać można przez zastosowanie dyskretyzacji z zastosowaniem trójwymiarowych elementów powłokowych i bryłowych.

Podkreślić należy, że wynik obliczeń MES powinien zawsze być weryfikowany przez uproszczone, nawet bardzo zgrubne obliczenia analityczne, a także przez sprawdzenie fizycznej poprawności niektórych elementów rozwiązania (np. zgodność wyników z narzuconymi warunkami brzegowymi, ciągłość pól przemieszczeń i odkształceń, równowaga wybranych fragmentów itp.).

Przy szacowaniu błędów całkowitych szczególną uwagę należy zwrócić na błąd modelu matematycznego ε_s , który wraz z doskonaleniem współczesnych algorytmów MES staje się coraz bardziej istotny (błędy obliczeń ε_n oraz dyskretyzacji ε_d mogą być znacząco zredukowane). Wartość ε_s nie jest błędem w zwykłym znaczeniu. Przyjmujemy, że jego miarą jest różnica między rozwiązaniem ścisłym w_s a rezultatem, który obserwowany może być w rzeczywistej konstrukcji. Na

tę różnicę ma wpływ dokładność danych liczbowych opisujących kształt obiektu analizy i stopień jego idealizacji, wiarygodność właściwości materiałowych, warunków obciążenia i podparcia a także przyjęty opis teoretyczny badanych zjawisk. Gwarancją utrzymania tego błędu na akceptowanym poziomie jest wiedza i doświadczenie inżyniera, które pomagają w podjęciu decyzji czy model powinien być na przykład liniowy czy nieliniowy, jedno-, dwu- czy trójwymiarowy.

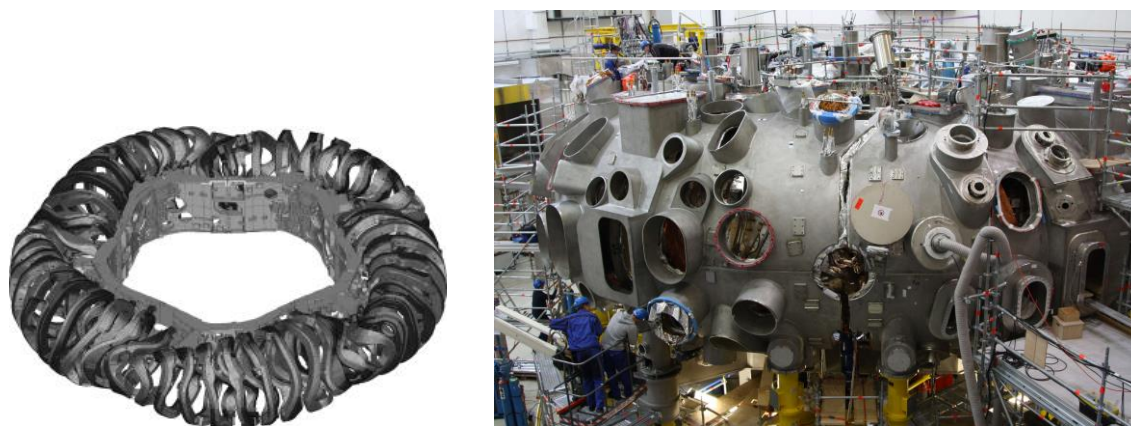
3.6. PRZYKŁAD ANALIZY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ MES

3.6.1. OPIS ZAGADNIENIA. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA POŁĄCZEŃ ŚRUBOWYCH W STRUKTURZE NOŚNEJ REAKTORA W7X

Przedstawiony poniżej przykład ilustruje zastosowanie metody elementów skończonych do analizy i projektowania wytrzymałościowego elementów konstrukcyjnych poddanych złożonym przypadkom obciążeń.

Celem projektu Wendelstein 7-X [4] było zbudowanie reaktora syntezy termojądrowej typu stellator. W tym urządzeniu kanał plazmy jest pod kontrolą pola magnetycznego pochodzącego z układu 35 cewek nadprzewodzących, symetrycznie rozmieszczonych w 5 identycznych częściach (rys. 3.15). Każda cewka jest utwierdzona do praktycznie nieodkształcalnej części centralnej za pomocą dwóch wsporników nazywanych Central Support Elements (CSE), które przenoszą obciążenia wynikające z działania pól elektromagnetycznych oraz ciężkości.

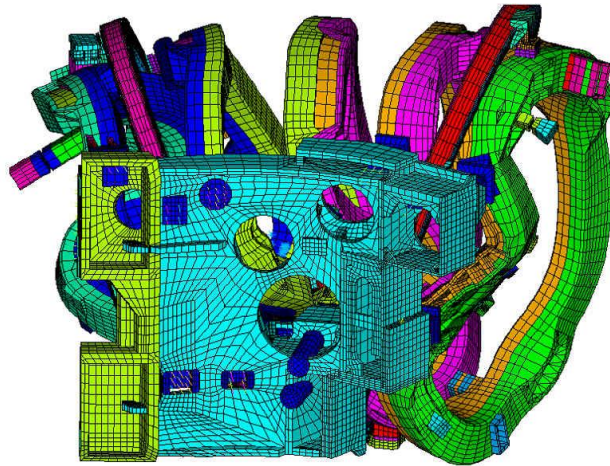
Podczas pracy w temperaturze eksploatacji 4K cewki reaktora W7-X są obciążane przez bardzo duże siły i momenty, które przenoszone są do centralnego pierścienia nośnego. W związku z tym, szczegółowe obliczenia połączeń CSE (rys. 3.17) były ważnym elementem oceny wytrzymałościowej struktury W7-X [4,8].



Rys. 3.15. Pierścień centralny wraz z cewkami reaktora W7X i urządzenie podczas procesu montażu

Celem pracy była analiza mechanicznego zachowania połączeń CSE przy użyciu szczegółowych modeli MES. Analizy rozkładu obciążeń w obrębie całej struktury przeprowadzono wcześniej w Instytucie Fizyki Plazmy w Niemczech za pomocą modelu globalnego MES (rys. 3.16), rozważając powtarzalny segment centralnego pierścienia i 7 cewek oraz uwzględniając odpowiednie warunki symetrii. Złożoność obliczeniowa globalnego modelu nie pozwalała na wystarczającą gęstość siatki dyskretyzacyjnej. W efekcie model ten nie dostarczał dokładnych informacji na temat wytrzymałości małych, ale ważnych części połączeń, takich jak śruby, podkładki, kliny, spoiny itp.

Aby umożliwić wiarygodną analizę deformacji i naprężeń w poszczególnych elementach struktury zostały opracowane szczegółowe modele MES wszystkich czternastu połączeń CSE (dla każdej cewki indywidualnie projektowane połączenie górne i dolne). Modele zostały zbudowane i były analizowane na Politechnice Warszawskiej przy współpracy z Instytutem Fizyki Plazmy (IPP) w Greifswaldzie, za pomocą systemu ANSYS oraz specjalnie zbudowanych procedur wykorzystujących parametryczny

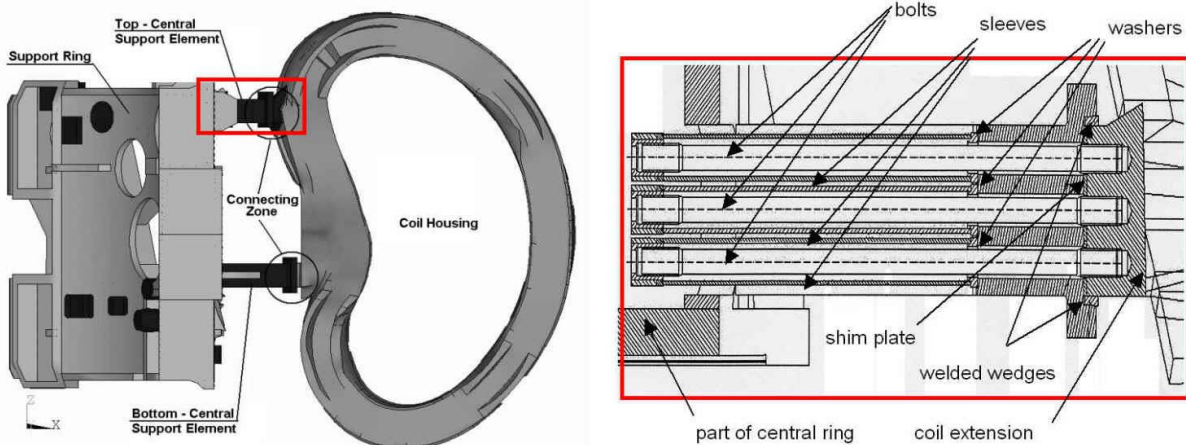


Rys. 3.16. Globalny model MES segmentu pierścienia wspierającego z cewkami.

język programowania (Ansys Parametric Design Language). Początkowo modele 3D połączeń, w tym śruby, podkładki, nakrętki itp. analizowano stosując standardowe metody. W drugim etapie parametryzowano modele w celu umożliwienia oceny wpływu zmian wymiarów poszczególnych elementów i parametrów montażu (naciągi wstępne śrub) na wytrzymałość połączeń. Analizy przeprowadzono biorąc pod uwagę historię obciążeń (naciąg montażowy, chłodzenie do temperatury pracy 4K, obciążenia operacyjne), właściwości sprężysto-plastyczne materiałów w funkcji temperatury, oddziaływania kontaktowe z tarcieniem na powierzchniach łączonych komponentów.

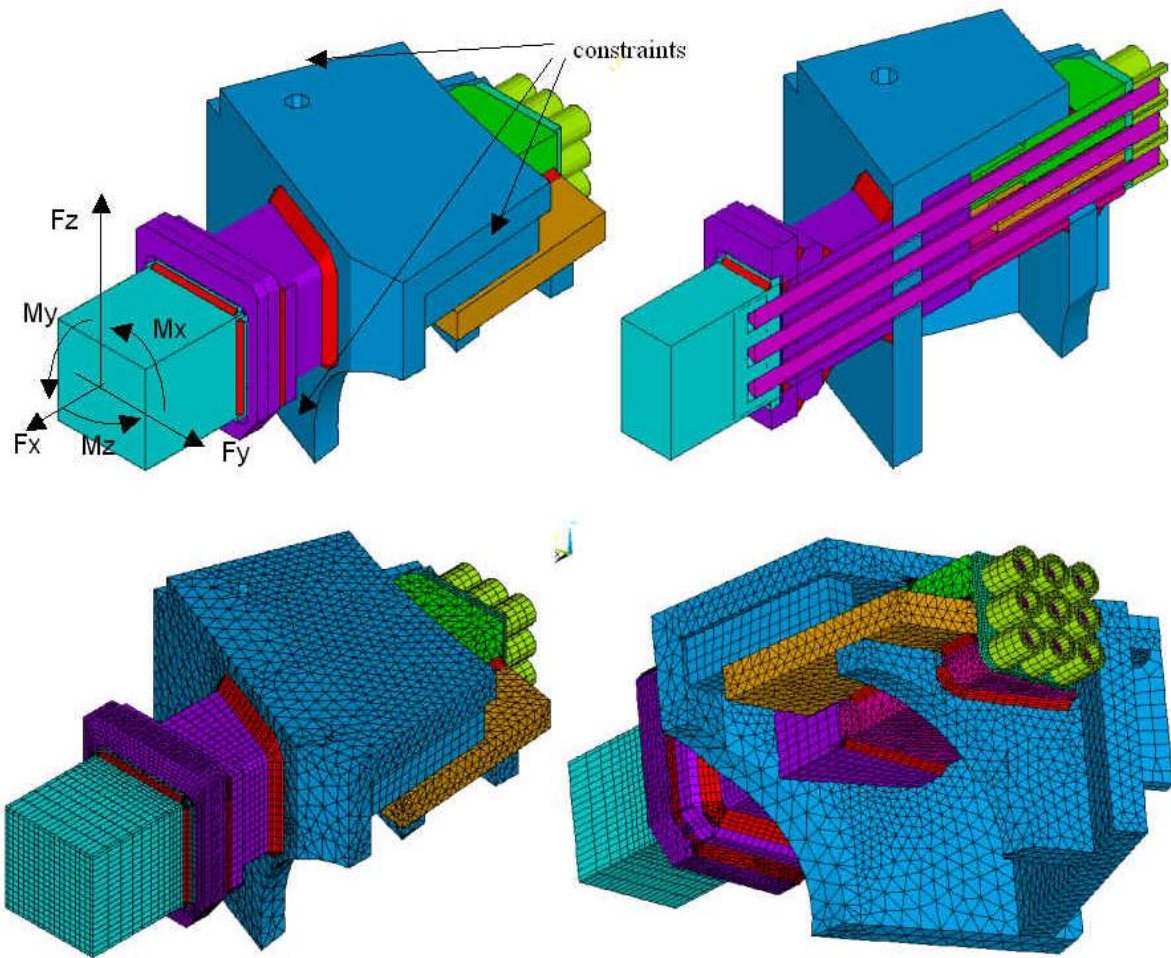
3.6.2. MODELE MES POŁĄCZEŃ MOCUJĄCYCH CEWKI

Przeprowadzone symulacje dotyczyły nieliniowego zachowania analizowanych połączeń spowodowane nieliniowością materiału (patrz p. 6.11), dużymi deformacjami (patrz p. 6.9) i oddziaływaniem kontaktowym (patrz p. 6.12).



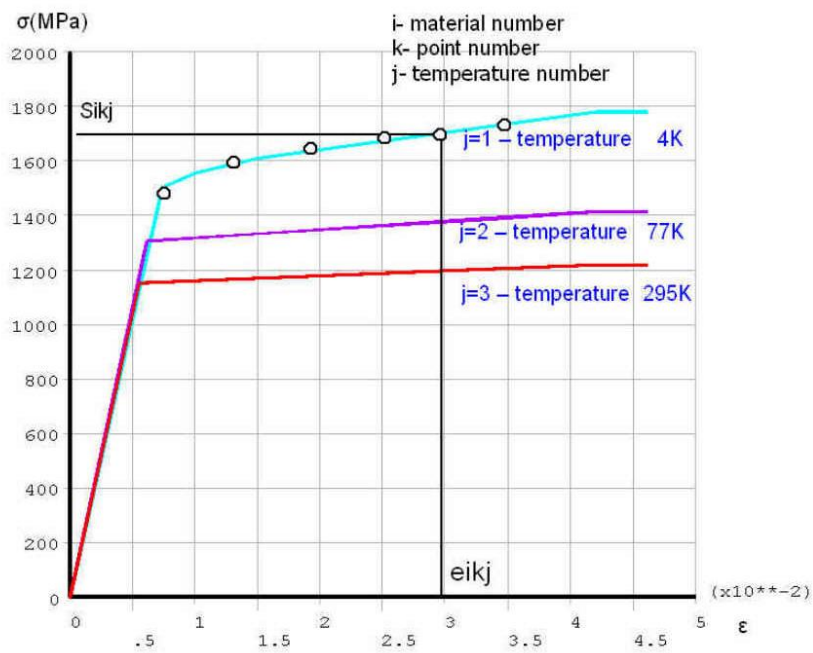
Rys. 3.17. Typowe połączenie sworzniowe pomiędzy cewką a centralnym pierścieniem wspierającym

Dla każdego z połączeń (rys. 3.17) zbudowano oddzielny model MES (rys. 3.18) reprezentujący jak najdokładniej cechy geometryczne połączenia. Modele zostały zbudowane za pomocą programu ANSYS na podstawie modeli CAD i rysunków technicznych. W modelach uwzględniono także spawy, w tym spoiny pachwinowe mocujące kliny (stabilizujące połączenia po montażu). W modelowaniu tych spoin (w kolorze czerwonym na rys. 3.18), a także innych potencjalnie niebezpiecznych stref, użyto szczególnie gęstej siatki regularnej aby uzyskać dostatecznie dokładne informacje o rozkładzie naprężeń.



Rys. 3.18. Model MES jednego z połączeń CSE

Do modelu wprowadzono dokładne informacje o zależnościach naprężenie odkształcenie dla poszczególnych materiałów w charakterystycznych temperaturach (4K, 77K, 295K). Relacje między naprężeniem i odkształceniem (rys. 3.19) dla każdego z materiałów zostały opisane w postaci dwóch



Rys.3.19. Model parametryczny zależności σ - ϵ

zestawów parametrów S_{ikj} , e_{ikj} reprezentujących punkty krzywych σ - ϵ , gdzie i oznacza numer materiału ($i = 1,2,3$), k – numeru punktu na wykresie, j – temperaturę.

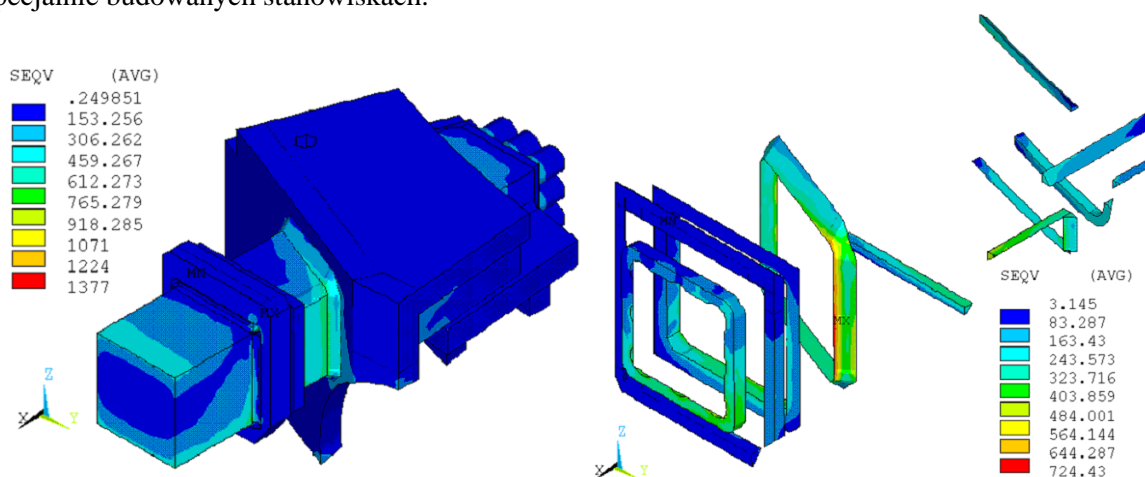
Tarcie pomiędzy częściami konstrukcji odgrywa bardzo ważną rolę w połączeniu. W przypadku wystąpienia odkształceń plastycznych oraz kiedy oddzielne części struktury są w kontakcie z tarcem, historia obciążenia ma wpływ na wyniki końcowe. W obliczeniach uwzględniono rozpatrywane przypadki obciążania za pomocą sekwencji obciążeń w postaci kroków (Load Steps) i podkroków.

Typowa historia obciążenia składała się z pięciu kroków (Load Steps):

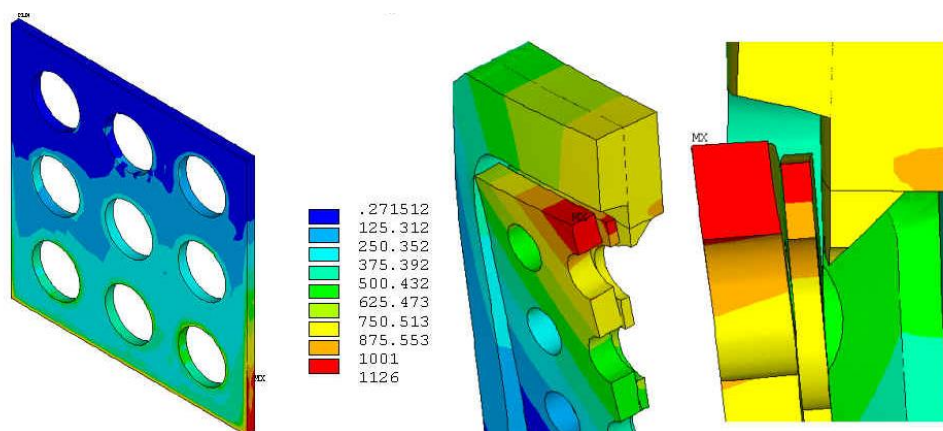
1. naciąg wstępny sworzni w temperaturze otoczenia,
2. chłodzenie do temperatury pracy 4K,
3. 85% rozpatrywanego przypadku obciążenia zewnętrznego,
4. 100% rozpatrywanego przypadku obciążenia zewnętrznego,
5. 120% rozpatrywanego przypadku obciążenia zewnętrznego.

3.6.3. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia umożliwiły określenie stanu naprężenia i odkształcenia we wszystkich istotnych składnikach modeli i ocenę deformacji konstrukcji. Analizowano informacje o szczelinach na powierzchniach kontaktu. Ocenione zostały naprężenia w obrębie wszystkich elementów konstrukcji. Ponadto w każdym z połączeń analizowano siły działające na kliny. Szczególną uwagę skupiono na rozkładach naprężeń w spoinach (rys. 3.20). Część wyników weryfikowana była eksperymentalnie na specjalnie budowanych stanowiskach.



Rys. 3.20. Rozkład naprężeń zredukowanych w połączeniu i jego spawach w temperaturze pracy 4K.



Rys. 3.21. Rozkład naprężeń zredukowanych w podkładce i deformacje w jej okolicy w temperaturze pracy 4K.

Przygotowano specjalne procedury (makroinstrukcje) do standaryzacji procesu postprocessingu umożliwiające szybkie sprawdzanie i porównywanie uzyskiwanych wyników.

Analizy wytrzymałościowe połączeń pozwoliły na wprowadzenie m.in. następujących zmian konstrukcyjnych:

- indywidualne ustalenie wymiarów klinów i długości tulei i śrub,
- ustalenie sił naciągu wstępnego każdej ze śrub w temperaturze pokojowej.