

METODA OBLICZANIA NAPRĘŻEN TERMICZNYCH W GRUBOSCIENNYCH ELEMENTACH URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE ZBIORNIKA CIŚNIENIOWEGO REAKTORA WWER - 440.

Streszczenie. Przedstawiono metodę i omówiono program do obliczeń pól naprężeń termicznych. Problem rozwiązano w geometrii osiowo-symetrycznej stosując metodę elementu skończonego. Przedstawiono wyniki obliczeń dla części walcowej zbiornika reaktora na wysokości rdzenia przy niejednorodnym polu temperatury charakterystycznym dla wewnętrznych źródeł ciepła. Dokonano analizy wpływu plateru na naprężenia termiczne. W analizie nie brano pod uwagę naprężeń pochodzących od sił masowych, sił zewnętrznych oraz ciśnienia wewnętrznego.

1. Wstęp

Podczas eksploatacji urządzeń energetycznych, pracujących zwykle pod znacznym ciśnieniem oraz przy wysokich temperaturach występują znaczne naprężenia termiczne. Naprężenia te występują szczególnie wyraźnie podczas stanów nieustalonych, w których temperatura ulega zmianom ze stosunkowo dużymi prędkościami.

Łącznie z oddziaływaniem naprężeń wywołanych siłami masowymi, siłami zewnętrznymi i ciśnieniem wewnętrznym naprężenia termiczne powodują powstawanie cyklicznych obciążeń o zmiennym znaku, których skutkiem jest powstanie pewnej liczby defektów w materiale. Zatem przy projektowaniu urządzeń należy brać pod uwagę wytrzymałość zmęczeniową elementów narażonych na działanie zmiennych cykli naprężeń. Problem ten w przypadku urządzeń jądrowych nabiera szczególnego znaczenia dla zbiornika reaktora i elementów obiegu pierwotnego [1].

Przebyte przez urządzenie podczas eksploatacji cykle obciążeń, w których duży udział mają naprężenia termiczne, wpływają na jego żywotność obniżając zapas wytrzymałości [2].

Opracowanie i wdrożenie metodyki obliczeń pól naprężeń w konkretnym elemencie dla danych stanów eksploatacyjnych, umożliwiającej ocenę wpływu tych naprężeń na żywotność urządzeń pozwoli na zwiększenie pewności ruchu, niezawodności pracy oraz oszacowanie zapasu niezawodności urządzenia w każdym momencie eksploatacji w funkcji przebytych stanów ruchowych.

Niniejszy referat omawia część problematyki związanej z określeniem żywotności urządzeń energetycznych rozwiązywanej w ramach Programu Rządowego Nr 8 [3].

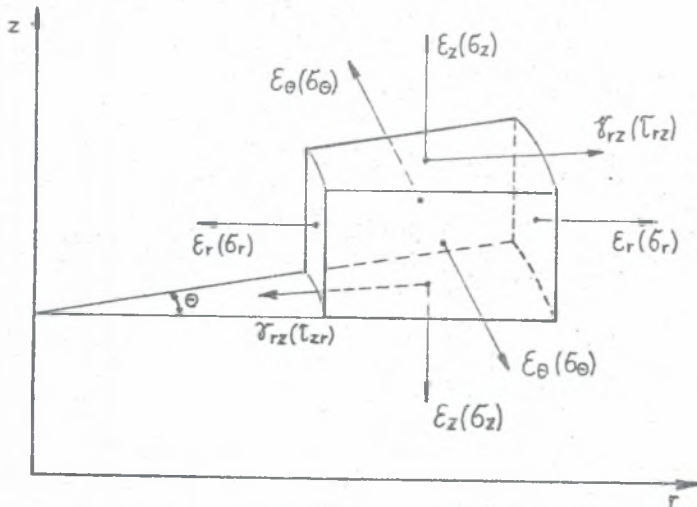
2. Uwagi ogólne, założenia upraszczające

Zagadnienie analizy stanu naprężeń dla dużej części węzłów konstrukcyjnych zbiornika reaktora, a także dla większości elementów urządzeń energetycznych można sprowadzić do analizy układu osiowo-symetrycznego.

W celu określenia naprężeń w bryłach obrotowych odkształconych symetrycznie względem osi obrotu, należy wyznaczyć cztery składowe odkształ-

czenia oraz odpowiadające im naprężenia.

Dla wycinka powłoki walcowej składowe odkształcenia i naprężenia można przedstawić, jak na rys. 1.



Rys.1. Pole odkształceń i naprężeń dla geometrii osiowo-symetrycznej
Fig.1. Strains and stresses in the analysis of axi-symmetric solids

Dla tego przypadku cztery składowe odkształcenia i naprężenia zależą tylko od współrzędnych : promieniowej "r" i osiowej "z".

Model matematyczny pola naprężeń termicznych w węzłach konstrukcyjnych zbiornika reaktora opracowano przy pewnych założeniach :

- pole temperatury w obszarze jest dane, ustalone i osiowo-symetryczne,
- zagadnienie rozważane jest w zakresie prawa sprężystości przy założeniu liniowej zależności pomiędzy odkształceniami i naprężeniami,
- zbiornik pokryty jest od wewnątrz warstwą plateru antykorozyjnego, przyjęto, że materiały zbiornika i plateru są izotropowe, jednorodne i charakteryzują się różnymi własnościami cieplno-mechanicznymi,
- pomija się oddziaływanie sił masowych i zewnętrznych na pole temperatury,
- dla każdego elementu określa się wartość naprężenia zredukowanego w oparciu o hipoteczę energii odkształcenia postaciowego /Hubera/.

3. Metoda elementów skończonych w przypadku rozwiązywania stanu naprężeń

3.1. Ogólny opis metody

W ogólnym przypadku zagadnienie sprowadza się do określenia rozkładu naprężeń oraz ewentualnie odkształceń w obiekcie rzeczywistym o danej geometrii, obciążonym znanymi przyłożonymi siłami oraz zamocowanym w określony sposób.

W metodzie elementów skończonych zagadnienie to rozwiązywane jest w sposób następujący [4] :

- obszar /kontinuum/ zostaje podzielony na pewną liczbę tzw. elementów skończonych,
- zakłada się, że elementy połączone są ze sobą w skończonej liczbie punktów /tzw. węzłów/,
- przemieszczenia punktów węzłowych stanowią podstawowy układ niewiadomych,
- dobiera się funkcje jednoznacznie określające stan przemieszczeń wewnątrz każdego elementu w zależności od przemieszczeń punktów węzłowych,
- funkcje przemieszczeń jednoznacznie definiują stan odkształceń wewnątrz elementów w zależności od przemieszczeń węzłów. Odkształcenia te wspólnie z odkształceniami początkowymi /np. termicznymi/ oraz własnościami sprężystymi i cieplno-mechanicznymi określają stan naprężeń w elemencie, a więc i na jego brzegach.

3.2. Metoda elementów skończonych dla geometrii osiowo-symetrycznej

W tym przypadku na skutek symetrii, w każdym punkcie przekroju poprowadzonego wzdłuż osi symetrii dwie składowe całkowite definiują stan odkształcenia, a tym samym stan naprężenia.

3.2.1. Odkształcenia całkowite

Jak już wspomniano rozpatruje się cztery składowe odkształcenia, a mianowicie ϵ_z , ϵ_r , ϵ_θ , γ_{rz} . Wielkości te definiuje się jako funkcje przemieszczeń punktu, określają one również wektor odkształcenia

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} \quad \dots (1)$$

gdzie: u i v to promieniowe i osiowe przemieszczenia punktu.

Jeżeli przemieszczenia w węzłach elementu są znane to odkształcenia w dowolnym punkcie wewnątrz elementu określa następująca zależność macierzowa [4] /dla elementu "e"/

$$\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e \quad \dots (2)$$

gdzie: $[B]$ - macierz kształtu,

$\{\delta\}^e$ - wektor przemieszczeń węzłów elementu.

Macierz $[B]$ jest macierzą zależną od tzw. funkcji kształtu.

3.2.2. Odkształcenia termiczne

Rozpatruje się cztery składowe wektora odkształcenia początkowego

$$\epsilon_0 = \begin{Bmatrix} \epsilon_{z0} \\ \epsilon_{r0} \\ \epsilon_{\theta 0} \\ \gamma_{r\theta 0} \end{Bmatrix} \quad \dots (3)$$

Dla materiału izotropowego i średniego przyrostu temperatury Δt otrzymuje się :

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta t \\ \alpha \Delta t \\ \alpha \Delta t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots (4)$$

3.2.3. Macierz sprężystości elementu

Macierz sprężystości [D] wiąże odkształcenia $\{\varepsilon\}$ z naprężeniami $\{\sigma\}$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad \dots (5)$$

I tak np. dla zagadnienia osiowo-symetrycznego ze znanego układu równań [5]

$$\begin{aligned} \varepsilon_z - \varepsilon_{z0} &= \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_r}{E} - \nu \frac{\sigma_\theta}{E} \\ \varepsilon_r - \varepsilon_{r0} &= -\nu \frac{\sigma_z}{E} + \frac{\sigma_r}{E} - \nu \frac{\sigma_\theta}{E} \\ \varepsilon_\theta - \varepsilon_{\theta0} &= -\nu \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_r}{E} + \frac{\sigma_\theta}{E} \\ \gamma_{rz} &= 2 \frac{\tau_{rz}}{E} (1 + \nu) \end{aligned} \quad \dots (6)$$

można określić macierz [D] rozwiązując ten układ względem $\{\sigma\}$

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

Macierz [D] jest symetryczna względem przekątnej głównej.

3.2.4. Macierz sztywności elementu

Zgodnie z [4] macierz sztywności elementu można określić całkując po całej objętości pierścienia powstałego przez obrót elementu względem osi

$$[k]^e = \int_{\text{vol}} [B]^T [D] [B] d(\text{vol}) \quad \dots (8)$$

gdzie: vol - to objętość pierścienia.

Macierz [D] ma postać (7), a macierz kształtu [B] składa się z podmacierzy B_i , $i = 1, j, \dots$ liczba węzłów elementu.

Macierz sztywności elementu $[k]^e$ dla geometrii osiowo-symetrycznej oraz prostokątnego elementu skończonego ma wymiar 8×8 i następujące elementy

$$[k]^e = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} & k_{in} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} & k_{jn} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} & k_{mn} \\ k_{ni} & k_{nj} & k_{nm} & k_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

gdzie i, j, m, n to węzły elementu skończonego.

Siły węzłowe od odkształceń termicznych wynoszą

$$\{F\}_{\xi_0}^e = \int_{\text{vol}} [B]^T [D] \{\xi_0\} d(\text{vol}) \quad \dots (10)$$

a wektor odkształceń termicznych $\{\xi_0\}$ ma postać (4) .

Przyrost temperatury w rozpatrywanym elemencie obliczany jest od pewnej temperatury bazowej, dla której przyjmuje się, że naprężenia termiczne są równe zero.

Obliczanie elementów macierzy $[k]^e$ oraz $[F]^e$ wymaga całkowania po całej objętości. Dla trójkątnych elementów skończonych całkowanie to prowadzi się w sposób elementarny, a w przypadku elementów prostokątnych wymaga to całkowania numerycznego ze względu na to, że elementy macierzy $[B]$ są zależne od współrzędnych r i z .

3.2.5. Macierz sztywności całego obszaru $[K]$

Proces budowania macierzy $[K]$ można przedstawić następująco :

- dla każdego elementu wyznacza się macierz kształtu $[B]$,
- określa się dla każdego elementu $[B]^T [D][B]$,
- dokonuje się całkowania po całej objętości elementu,
- elementy macierzy sztywności elementu $[k]^e$ umieszcza się w odpowiednich miejscach ogólnej macierzy sztywności $[K]$.

W podobny sposób określa się wektor kolumnowy sił węzłowych od odkształceń termicznych $\{F\}_{\xi_0}$.

Jest to równoznaczne ze zbudowaniem końcowego układu równań

$$[K] \{\delta\} = \{F\}_{\xi_0} \quad \dots (11)$$

W wyniku rozwiązania powyższego układu równań otrzymuje się poszukiwany zbiór przemieszczeń węzłów wszystkich elementów. Równań tych w geometrii osiowo-symetrycznej jest 2xliczba węzłów. Układ równań (11) jest układem równań liniowych do rozwiązania, którego stosuje się znane metody.

3.2.6. Określenie naprężeń w elementach

W wyniku rozwiązania układu równań (11) otrzymuje się zbiór przemieszczeń wszystkich węzłów, i tak przemieszczenie węzła "i" jest reprezentowane przez dwie składowe : promieniową u_i oraz osiową v_i .

Po określeniu przemieszczeń węzłów można określić naprężenia w elemencie z zależności (5)

$$\{G\}^e = \begin{Bmatrix} G_z \\ G_r \\ G_\theta \\ G_{zr} \end{Bmatrix} = [D] \{ \{\xi\}^e - \{\xi_0\}^e \} - [D][B]^e \{\delta\}^e - [D] \{ \xi_0 \} \quad \dots (12)$$

gdzie: $[B]^e$ - macierz kształtu elementu obliczona dla współrzędnych środka ciężkości elementu.

3.2.7. Program do obliczeń pola naprężeń

W oparciu o przedstawioną wyżej metodę opracowano program do obliczeń pola naprężeń oraz pola przemieszczeń. Przyjęto zasady obliczania naprę-

żeń w środkach ciężkości elementów, a nie uśredniania naprężeń obliczonych w węzłach [9].

Program składa się z szeregu wymiennych segmentów pozwalających dzielić dany obszar na różne elementy skończone czy stosować różne metody całkowania numerycznego. Program dopuszcza możliwość stosowania różnego rodzaju obciążeń zewnętrznych w węzłach czy dowolnego sposobu mocowania węzłów.

4. Dane i wyniki obliczeń

4.1. Dane wejściowe do obliczeń

Do obliczeń przyjęto wycinek części walcowej zbiornika reaktora, kierując się przy wyborze węzła obliczeniowego faktem, że w obszarze tym na skutek występowania wewnętrznych źródeł ciepła, istnieje niejednorodne, zmienne po promieniu i wysokości pole temperatury. Pole to zostało przyjęte wg obliczeń cytowanych w [2]. Geometria rozważanego obszaru wraz z numeracją węzłów i elementów oraz zaznaczeniem warunków brzegowych przedstawiona jest na rys.2. Ilustrację pola temperatur w trzech wybranych przekrojach przedstawia rys.3. W obliczeniach przyjęto: materiał zbiornika - stal perlityczna, materiał plateru - stal austenityczna; szczegółowe dane materiałowe podano w [3], [6], [7], [8].

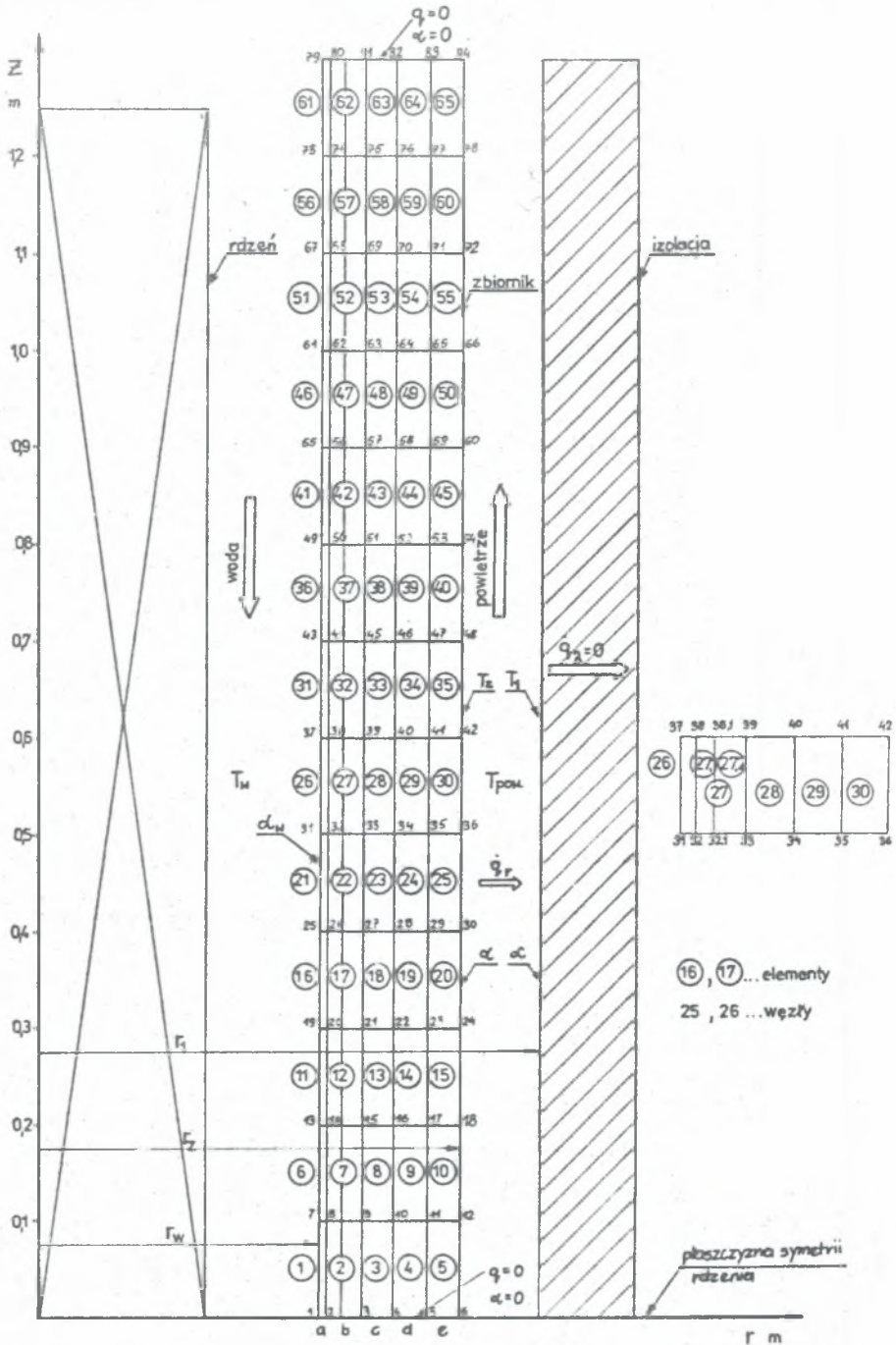
W przeprowadzonych obliczeniach starano się wykazać wpływ plateru i niejednorodnego pola temperatury na naprężenia termiczne w ścianie, dlatego wycinek walcowy wyizolowano z pozostałej części zbiornika, przyjmując, że węzły 1-6 na dolnej granicy obszaru są zamocowane suwliwie, tzn. mają możliwość przemieszczeń tylko w kierunku r , pozostałe węzły nie są obciążone żadnymi siłami zewnętrznymi i mają swobodę przemieszczeń we wszystkich kierunkach.

4.2. Wyniki obliczeń

W wyniku obliczeń przeprowadzonych przy użyciu programu T-STRESS2-MES uzyskano składowe: osiową σ_z , promieniową σ_r , obwodową σ_θ i styczną τ_{rz} naprężeń termicznych w poszczególnych elementach obszaru wydzielonego na rys.2 oraz naprężenia termiczne zredukowane σ_{red} w elementach tego obszaru. Przebieg zmienności składowych: osiowej, obwodowej, promieniowej i stycznej przedstawiono na rys. 4ab, natomiast przebieg wartości naprężenia zredukowanego na rys. 5ab.

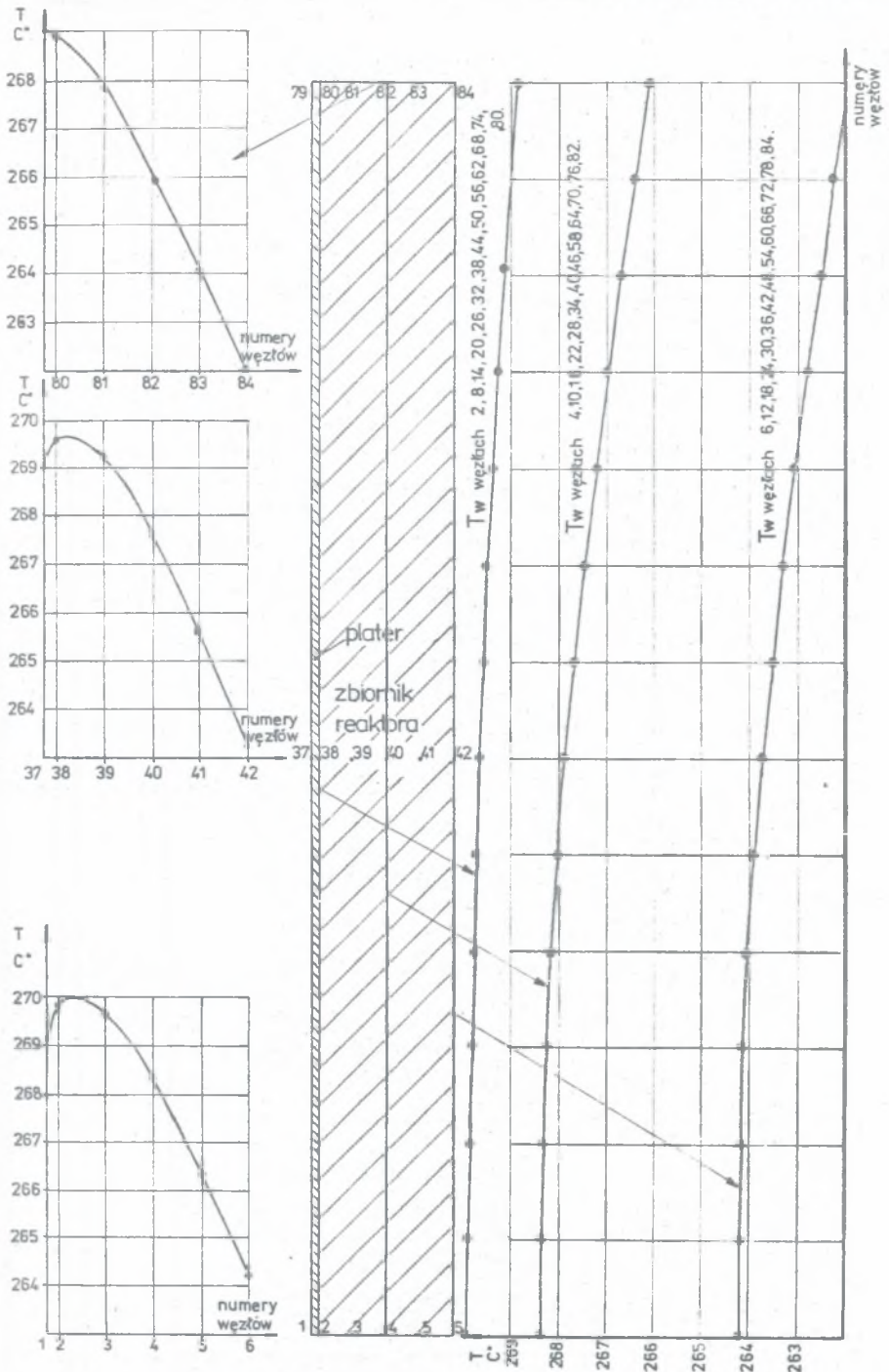
Z przeprowadzonych obliczeń nasuwają się wnioski:

- Główny wpływ na wielkość naprężenia mają składowe σ_z i σ_θ , wpływ pozostałych składowych jest bardzo mały.
- W przypadku układu dwuwarstwowego składającego się z materiałów o różnych własnościach cieplno-mechanicznych, główny wpływ na wartość naprężeń ma współczynnik rozszerzalności liniowej α , natomiast wpływ współczynnika Poissona ν jest niewielki.
- Daje się zaobserwować wpływ zaburzenia stanu naprężenia spowodowany nałożeniem warunków brzegowych, wpływ ten zanika w odległości równej 2-3 warstw od węzłów granicznych obszaru.
- Występuje duży skok naprężeń pomiędzy warstwą plateru i materiałem

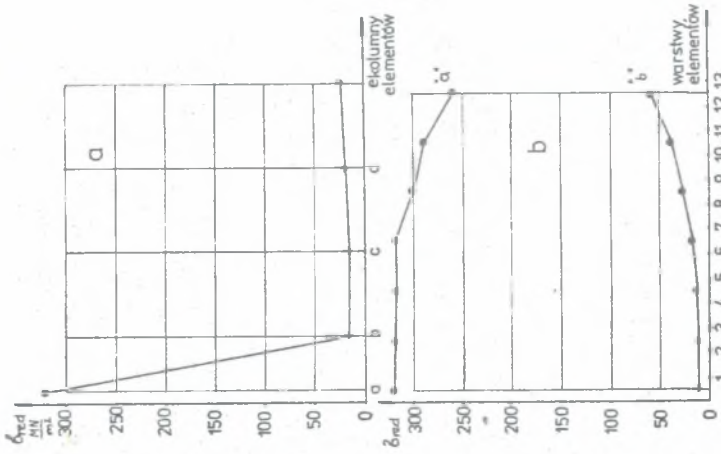


Rys. 2. Geometria układu, numeracja węzłów, podział na elementy, warunki brzegowe

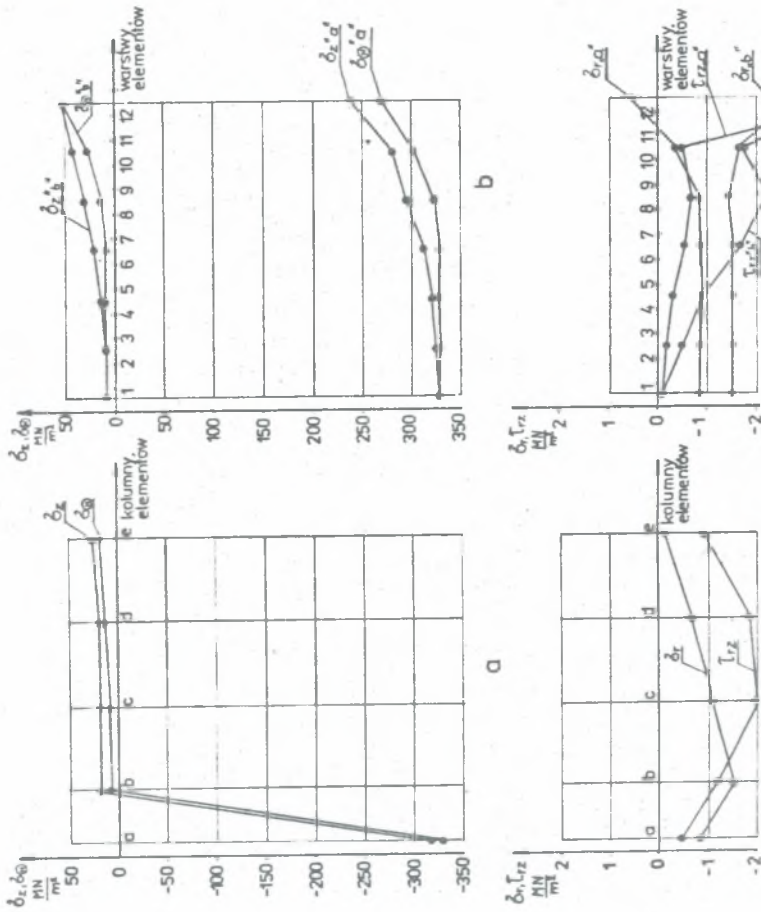
Fig. 2. Geometry, nodes numbers, elements and their numbers, boundary conditions



Rys. 3 Pole temperatury na ścianie zbiornika ciśnieniowego - stan ustalony
 Fig. 3. Temperature distribution in the wall of the pressure vessel - steady state



Rys.5. Przebieg zmienności naprężenia termicznego zredukowanego: a-w przekroju promieniowym 26-30 b-w przekrojach osiowych „a”, „b”
Fig 5. Reduced thermal stress: a in radial cross-section 26:30, b in axial cross-sections „a”, „b”



Rys.4. Przebieg zmienności naprężeń termicznych: a-w przekroju promieniowym 26-30 b-w przekrojach osiowych „a”, „b”
Fig 4. Thermal stress variation: a-in radial cross section 26-30, b-in axial cross sections „a”, „b”

- zbiornika, który wynika zarówno z różnych parametrów cieplno-mechanicznych materiałów, istniejącego pola temperatury, jak i dużej różnicy temperatur pomiędzy stanem beznaprężeniowym za jaki przyjęto stan zimny $t = 0^{\circ}\text{C}$ i rzeczywistą temperaturą pracy ścianki $t = 269^{\circ}\text{C}$. Należy się spodziewać, że po uwzględnieniu wpływu ciśnienia wewnętrznego i sił masowych, pole sumarycznych naprężeń w elemencie ulegnie złagodzeniu, co umożliwi dopuszczenie większych prędkości zmian temperatury elementu.
- Obliczenia wykazały przydatność opracowanego programu T-STRESS2-MES do obliczeń naprężeń termicznych dla obszarów o geometrii osiowo-symetrycznej. Dla opisu elementów o dowolnej postaci geometrycznej zostanie opracowany program dla geometrii trójwymiarowej.
 - Zestaw programów umożliwiających obliczenia ustalonych i nieustalonych pól temperatury, pól naprężeń termicznych i pól naprężeń uogólnionych pozwoli przy uwzględnieniu zmian strukturalnych i własności zmęczeniowych materiałów konstrukcyjnych, wnioskować o żywotności urządzeń zarówno dla energetyki jądrowej, jak i konwencjonalnej.

LITERATURA

- [1] Cz.Groborz, J.Uruski : Określenie węzłów konstrukcyjnych, stanów eksploatacyjnych i pól temperatur w zbiorniku ciśnieniowym reaktora WWER-440. Sprawozdanie z etapu b1 zadania 6.4.6.01 realizowanego w ramach PR-8 /niepublikowane/ Gliwice 1983.
- [2] A.Fic, Cz.Groborz, J.Uruski : Obliczenia pól temperaturowych w wytypowanych węzłach konstrukcyjnych zbiornika reaktora WWER-440 w określonych warunkach i stanach eksploatacyjnych. Sprawozdanie z etapu c1 zadania 6.4.6.01 realizowanego w ramach PR-8 /niepublikowane/ Gliwice 1984.
- [3] Cz.Groborz, J.Uruski : Obliczenia naprężeń termicznych w układzie 2-wymiarowym w wytypowanych węzłach konstrukcyjnych zbiornika reaktora WWER-440 dla potrzeb konstrukcji i eksploatacji. Sprawozdanie z etapu d1 zadania 6.4.6.01 realizowanego w ramach PR-8 /niepublikowane/ Gliwice 1985.
- [4] O.C.Zienkiewicz : Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972.
- [5] S.Timoshenko, J.N.Goodier : Teoria sprężystości. Arkady, Warszawa 1962.
- [6] Gerasimov V.V., Monachov A.S.: Materiały jądrowej techniki. Energoizdat Moskwa 1982.
- [7] Normy rasčeta na pročnost élementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodov atomnych élektrostantsji, opytnych i issledovatel'skich jadernych reaktorov i ustanovok. Metalurgija, Moskwa 1973.
- [8] Ovčinnikov F.Ja., Golubev L.I., Dobrynin V.D. i dr.: Ekspluatacionnye režimy vodo-vodjanych énergetičeskich reaktorov. Atomizdat. Moskwa 1979.
- [9] J.Szargut, J.Skorek, P.Gruszka : Modelowanie matematyczne procesu krzepnięcia i studzenia metalu w procesie ciągłego odlewania. Sprawozdanie z pracy badawczej /niepublikowane/, Gliwice 1980 .

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОСТЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ
СОСУДА РЕАКТОРА ВВЭР - 440

Р е з ю м е

В докладе рассматривается проблема определения термических напряжений в толстостенных элементах энергетического оборудования. Проблему решено методом конечных элементов. Приводится общую характеристику состояния напряжений для модели осево-симметрической, а также даётся алгоритм расчётов применяя метод конечных элементов.

Примерные расчёты сделано для цилиндрической части сосуда ядерного реактора на высоте активной зоны, принимая действительное неоднородное поле температуры. Стенку сосуда принято как несколькослойный элемент сделанный из изотропических материалов разных механических свойств. Даётся тоже краткое описание вычислительной программы. В результате расчётов получено составные термических напряжений в элементах сетки деления зоны, термические напряжения редуцировано, а также перестановки узлов сетки. Обсуждается тоже влияние разных факторов на состояние напряжения.

Приводится методика расчётов, вместе с ранее разработанной методикой расчёта установившихся и неустановившихся полей температуры, это даёт возможность определить поля термических напряжений, а в будущем обобщённого поля напряжений в элементах энергетического оборудования, которых геометрию можно описать в системе осево-симметрической или в трёхразмерной системе, что должно в будущем дать возможность оценить живучесть оборудования.

THERMAL STRESS CALCULATION METHOD FOR THICK-WALLED ELEMENTS
OF POWER EQUIPMENT, ON THE EXAMPLE OF THE PRESSURE VESSEL
OF THE REACTOR WWER - 440

S u m m a r y

The paper deals with the problem of thermal stress calculations for thick-walled elements of power equipment. The problem has been solved making use of the finite element method.

The overall characteristics of the axially symmetrical state of a stress model, as well as the calculation algorithm in the case of applying the finite element method have been presented.

Exemplary calculations have been carried out for the cylindrical part of the nuclear reactor pressure vessel at the depth of the core. For that part, a real, heterogenous temperature distribution has been assumed.

The vessel was treated as a multilayer element made of isotropic material with different thermo-mechanical properties. A short description of the computer program has been given, too.

In result of calculations, the components of thermal stresses in finite element centres, the reduced thermal stress and strains of the nodes have been determine. The influence of various factors has been discussed. The method presented, includint the previously developed method of calculating the steady and transient temperature fields, makes it possible to determine the thermal stress fields, and then also the total stress fields in the respective elements of power equipment, which can be analysed as axially-symmetrical or three-dimensional. The results of computations will form the basis for evalusting the lifetime of the equipment.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Gwynar

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.