

Jan TALER

Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki
Politechnika Krakowska

NUMERYCZNA I EKSPERYMENTALNA ANALIZA POLA TEMPERATUR I NAPRĘŻEŃ W ZBIORNIKU REAKTORA WODNO-CIŚNIENIOWEGO W CZASIE AWARYJNEGO SCHŁADZANIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono obliczenia pola temperatury i naprężeń w modelu zbiornika ciśnieniowego w warunkach udaru cieplnego, jaki występuje w czasie awaryjnego schładzania zbiornika ciśnieniowego reaktora. Przeanalizowano zachowanie się obwodowej szczeliny występującej na wewnętrznej powierzchni zbiornika. Wyniki obliczeń otrzymane za pomocą metody elementów skończonych porównano z wynikami pomiarów temperatury, odkształceń i przemieszczeń, stwierdzając ich bardzo dobrą zgodność.

1. WSTĘP

Awaryjne schładzanie wodnego reaktora ciśnieniowego jest spowodowane uszkodzeniami obiegu pierwotnego lub wtórnego. W obiegu pierwotnym może to być rozerwanie rur w wytwornicy pary, nieszczelność głównego rurociągu cyrkulacyjnego lub uszkodzenie uszczelnień głównej pompy cyrkulacyjnej. Po stronie obwodu pierwotnego przyczyną włączenia chłodzenia awaryjnego może być pęknięcie rurociągu parowego. Po uruchomieniu awaryjnego chłodzenia woda o niskiej temperaturze omywa wewnętrzną powierzchnię zbiornika, powodując nagłe jej schłodzenie, tzn. wywołując szok cieplny. Powstające w czasie szoku cieplnego w ścianie zbiornika wysokie naprężenia cieplne mogą wraz z naprężeniami pochodzącymi od ciśnienia powodować propagację istniejących już pęknięć w zbiorniku reaktora [1-5]. W celu oceny zachowania się szczelin na wewnętrznej powierzchni zbiornika ciśnieniowego w warunkach szoku cieplnego przeprowadzona została eksperymentalna symulacja chłodzenia awaryjnego [6].

2. BUDOWA STANOWISKA I BADANIA

Schemat układu do symulacji szoku cieplnego w grubościennych zbiornikach cylindrycznych o średnicy zewnętrznej $d_z = 800$ mm i grubości ścianki $g = 200$ mm przedstawiono na rysunku 1. Na wewnętrznej powierzchni cylindra znajdowała się obwodowa szczelina o średniej głębokości początkowej $a = 63$ mm rozciągająca się na całym obwodzie cylindra. Na początku eksperymentu cylinder obciążono siłą osiową rozciągającą równą 100 MN oraz ciśnieniem wewnętrznym równym ok. 30 MPa. To złożone obciążenie symuluje podobny stan naprężeń, jaki istnieje w zbiornikach wodnych reaktorów ciśnieniowych w pobliżu szczelin osiowych, tzn. naprężenia osiowe w ściance cylindra odpowiadają naprężeniom obwodowym w zbiorniku, a naprężenia obwodowe w cylindrze naprężeniom osiowym w zbiorniku reaktora. W ten sposób uniknięto bardzo wysokiego ciśnienia, jakie należałoby wytworzyć w cylindrze, aby odtworzyć stan naprężeń w zbiorniku reaktora dla szczelin wzdłużnych. Następnie, nagrany wcześniej do temperatury ok. 330 °C cylinder, chłodzono wodą o temperaturze 20 °C wtryskiwaną pod wysokim ciśnieniem na wewnętrzną powierzchnię cylindra na długości ok. 1200 mm poprzez 102 dysze o średnicy 4,2 mm znajdujące się w ściance kolektora umieszczonego w osi cylindra. Ciśnienie wewnętrzne i obciążenie osiowe utrzymywano przez ok. 30 min. Warunki obciążenia i temperatura powodują ciągły wzrost pęknięcia. Temperatura wierzchołka szczeliny w chwili zahamowania jej wzrostu, tj. po ok. 10 min od początku szoku, wynosiła ok. 220 °C.

Cylinder wykonano ze stali 22NiMoCr37 o składzie chemicznym wyszczególnionym w tablicy 1.

Tablica 1. Skład chemiczny stali 22NiMoCr37 (wagowy, %)

Table 1. Chemical composition of 22NiMoCr37 steel (weight, percent)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al
0,25	0,23	0,68	0,009	0,011	0,47	0,75	0,71	0,01	0,18	0,007

Własności mechaniczne i ciepłe zestawiono odpowiednio w tablicach 2 i 3. W trakcie trwania eksperymentu mierzono: natężenie przepływu, ciśnienie i temperaturę wody chłodzącej (T_f), siłę rozciągającą cylinder, zmiany długości cylindra ($G8$), odkształcenia osiowe ($D14$) i obwodowe ($Du5$), przemieszczenie brzegów szczeliny na wewnętrznej powierzchni cylindra ($G4$) oraz temperaturę ścianki cylindra (T_{15} do T_{24}) (Rys. 2). Łącznie zainstalowane były 82 punkty pomiarowe. Na rysunku 2 przedstawiono pomiar tylko tych wielkości, które porównano w niniejszej pracy z wynikami obliczeń. Wyniki pomiarów rejestrowano w odstępach od kilku dziesiątych

sekundy do kilku sekund na taśmach magnetycznych, co znacznie ułatwiało później obliczenia.

Tablica 2. Własności wytrzymałościowe stali 22NiMoCr37

Table 2. Tensile properties of 22NiMoCr37 steel

Temperatura [°C]	20	120	160	280	320
Moduł Younga E [MPa]	210000	204000	189000	178000	173000
Granica plastyczności $R_{0,2}^t$ [MPa]	506	503	473	492	452
Wytrzymałość na rozciąganie R_m^t [MPa]	798	770	742	813	793

Tablica 3. Własności cieplne stali 22NiMoCr37

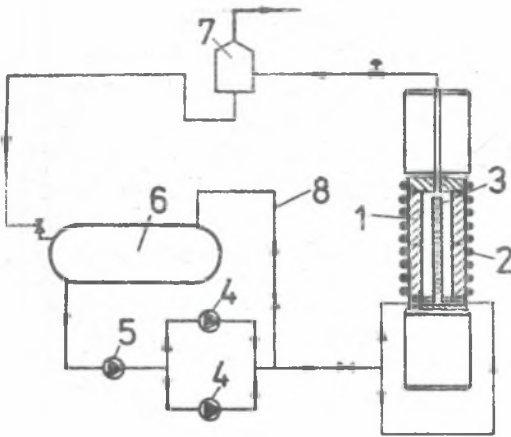
Table 3. Thermal properties of 22NiMoCr37 steel

Temperatura °C	0	100	200	300	400
Przewodność λ [W/mK]	42,1	45,7	47,0	46,4	44,7
Ciepło właściwe c [J/kgK]	461	480	511	555	612
Gęstość ρ [kg/m ³]	7865	7836	7805	7772	7738
Średni współczynnik rozszerzalności temperaturowej $\bar{\beta}$ [1/K]	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$

3. ANALIZA NUMERYCZNA POLA TEMPERATURY I NAPRĘŻEŃ

Z uwagi na nieustalony charakter chłodzenia cylindra jak i nietypowe warunki brzegowe - chłodzenie natryskowe wewnętrznej powierzchni cylindra z równoczesnym przepływem wzdłużnym wody - współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni, niezbędny do obliczania pola temperatury w cylindrze wyznaczono z pomocą metod stosowanych do rozwiązywa-

nia zagadnień odwrotnych przewodzenia ciepła [7, 8] .



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania ciśnieniowego szoku cieplnego ;
1 - cylinder, 2 - kolektor z dyszami, 3 - ogrzewanie oporowe,
4 - pompy wysokociśnieniowe, 5 - pompa niskociśnieniowa,
6 - zbiornik, 7 - rozprężacz, 8 - pętla rozruchowa

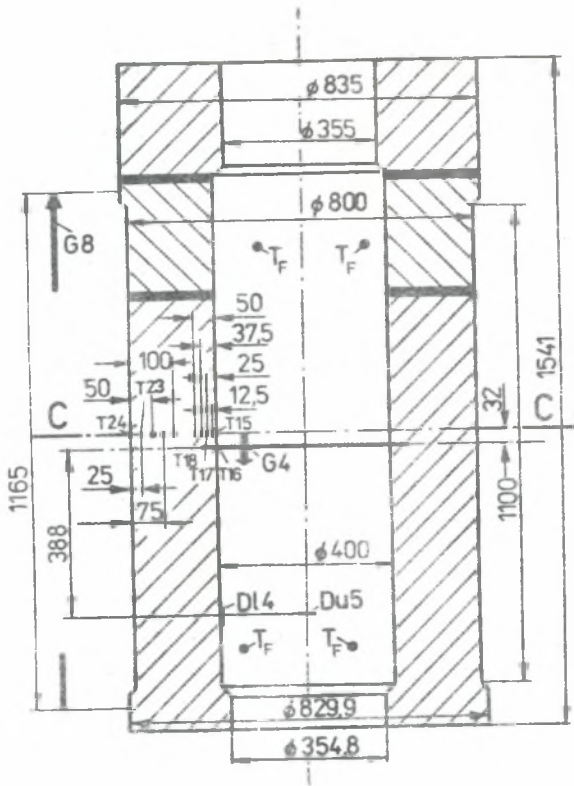
Fig. 1. Schematic diagram of the pressurized-thermal-shock (PTS) facility ;

1 - test cylinder, 2 - spraying device, 3 - electrical resistance heating, 4 - high pressure injection pumps, 5 - low pressure pump, 6 - vessel, 7 - flash box, 8 - starting loop

Zmiany współczynnika wnikania ciepła w czasie wyznaczono w oparciu o zmierzoną w czterech punktach temperaturę ścianki i temperaturę czynnika (rys. 3). Następnie tak wyznaczony współczynnik interpolowano liniowo, wykorzystując go w obliczeniach pola temperatury metodą elementów skończonych.

Również temperaturę czynnika i temperaturę zewnętrznej powierzchni cylindra, zadaną jako drugi warunek brzegowy, interpolowano liniami prostymi (rys. 4, 5 i 6). Należy przy tym zaznaczyć, że szok cieplny nastąpił dopiero po $t_0 = 3580$ s. Do tego czasu cylinder był nagrzewany. Obliczenia pola temperatury i naprężeń w cylindrze przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem programu "ABAQUS" [9] . Model obliczeniowy składał się z 394 izoparametrycznych elementów osiowo-symetrycznych z 8 węzłami, przy czym całkowita liczba węzłów wynosiła 1275.

Podział ścianki cylindra na elementy w pobliżu szczeliny uwidocznił na rysunku 7.

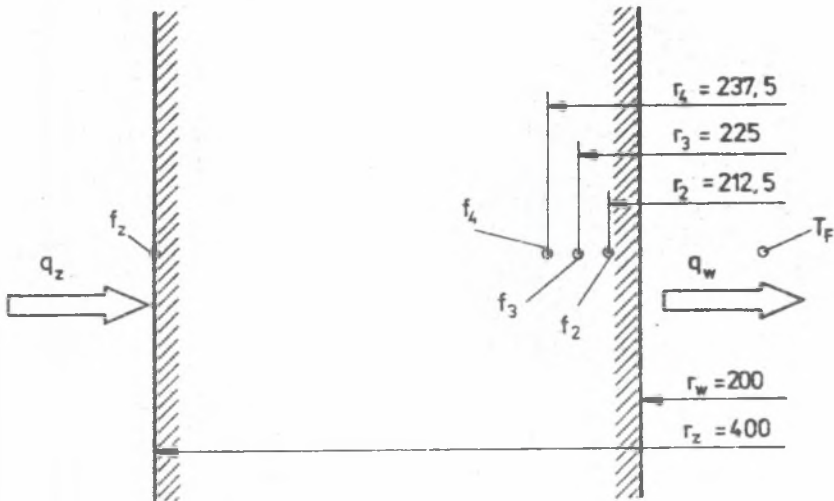


Rys. 2. Przekrój wzdłużny badanego cylindra
 Fig. 2. Geometry of the test vessel

Jako przykład porównania wyników ekperymentalnych z obliczeniowymi na rysunku 8 przedstawiono rozkłady temperatur na grubości ścianki cylindra. Z analizy rysunku widać, że zgodność wyników obliczeniowych z ekperymentalnymi jest bardzo dobra.

W wyniku tak wysokich różnic temperatur na grubości ścianki, w pobliżu wewnętrznej powierzchni cylindra powstają odkształcenia plastyczne. Przy obliczaniu naprężeń, odkształcenia cieplne ϵ_T wyznaczono ze wzoru :

$$\epsilon_T = \bar{\beta} \Big|_T^{T_1} \cdot (T - T_1) \quad (1)$$



Rys. 3. Położenie termoelementów, których wskazania wykorzystano do wyznaczenia warunków brzegowych

Fig. 3. Thermocouple arrangement used to determine the boundary conditions

gdzie :

$$\bar{\beta} \Big|_{T_1}^T = \frac{1}{T - T_1} \int_{T_1}^T \beta(T) dT = \left[\bar{\beta} \Big|_{T_0}^T (T - T_0) - \bar{\beta} \Big|_{T_0}^{T_1} (T_1 - T_0) \right] \frac{1}{T - T_1} \quad (2)$$

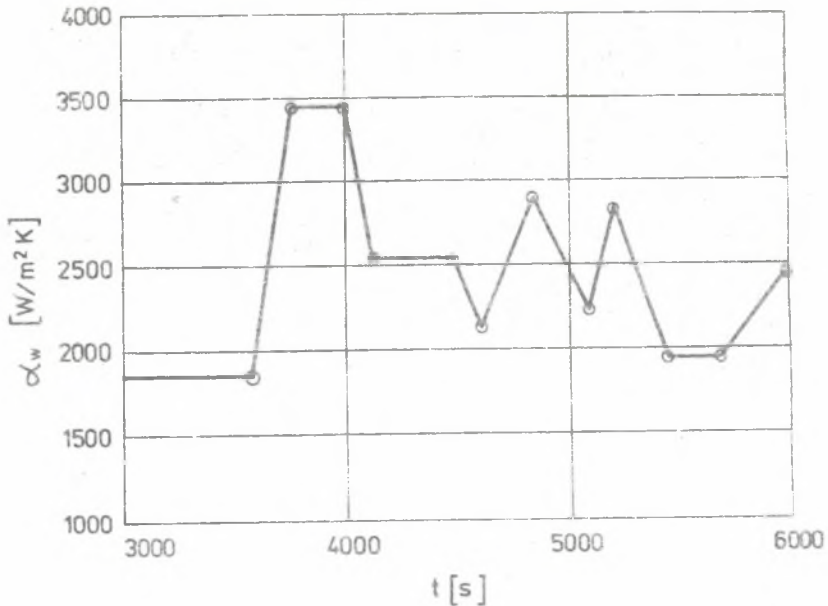
gdzie $\bar{\beta}$ jest średnim współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej w przedziale temperatur $[T_0, T]$.

W danym przypadku temperatura odniesienia T_0 równa była 0°C , natomiast temperatura początkowa $T_1 = 20^\circ\text{C}$.

Wybrane wyniki obliczeń odkształceń na wewnętrznej powierzchni cylindra i ich porównanie z danymi eksperymentalnymi przedstawiono na rysunkach 9-10, przy czym odkształcenie ε wyznaczone ze wzoru :

$$\varepsilon = \varepsilon_c - 13 \cdot 10^{-6} (T|_{r=r_w} - T_1), \quad (3)$$

gdzie ε_c - jest całkowitym odkształceniem obliczonym z pomocą MES, $T(r = r_w)$ - temperaturą wewnętrzną powierzchni cylindra oraz $T_1 = 20^\circ\text{C}$ temperaturę początkową.



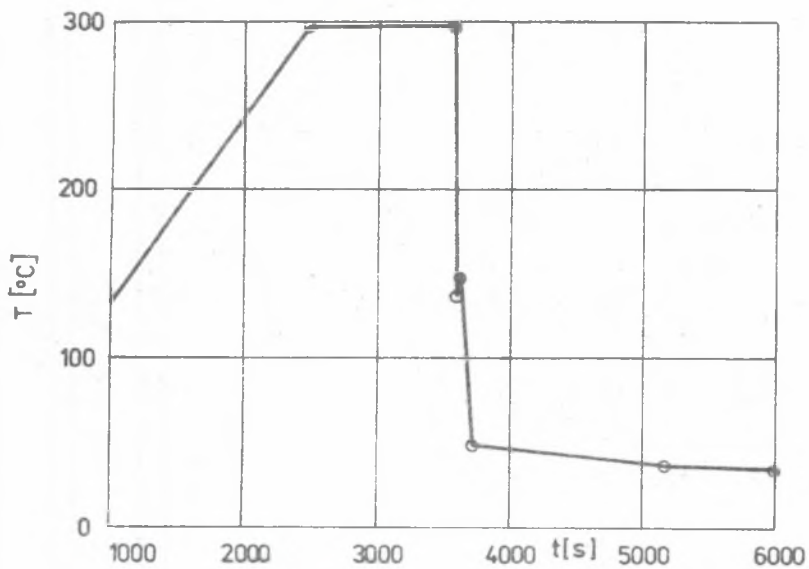
Rys. 4. Zmiany współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni cylindra

Fig. 4. Heat transfer coefficient transient at inside surface of the test cylinder

Porównanie zmierzonego i obliczonego przemieszczenia brzegów szczeliny CMOD (z ang. crack mouth opening displacement) przedstawiono na rysunku 11. Na rysunku 12 wyznaczono przyrost głębokości szczeliny Δa w czasie szoku cieplnego. Krzywa J_R wyznaczona została w temperaturze 220 °C. Średni przyrost głębokości szczeliny wyznaczony metodą frakto-graficzną : $\Delta a = 3,6$ mm niewiele się różni od przyrostu obliczenio-wego $\Delta a = 3,9$ mm (rys. 12).

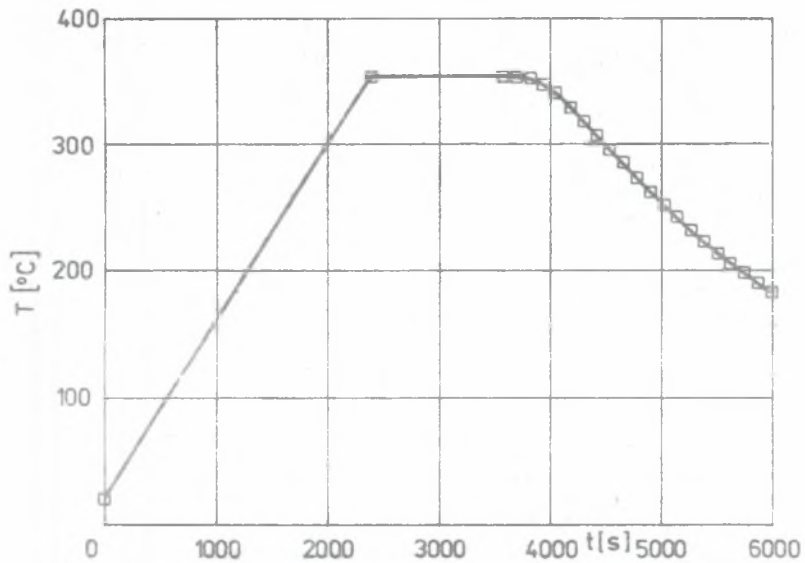
4. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzona eksperymentalna symulacja szoku cieplnego w zbiorniku reaktora oraz obliczenia numeryczne potwierdzają przydatność zastosowa-nych metod pomiarowych i obliczeniowych do wyznaczania pola temperatury, odkształceń i naprężeń oraz opisu zjawisk pęknięcia w czasie awaryjnego chłodzenia reaktora.



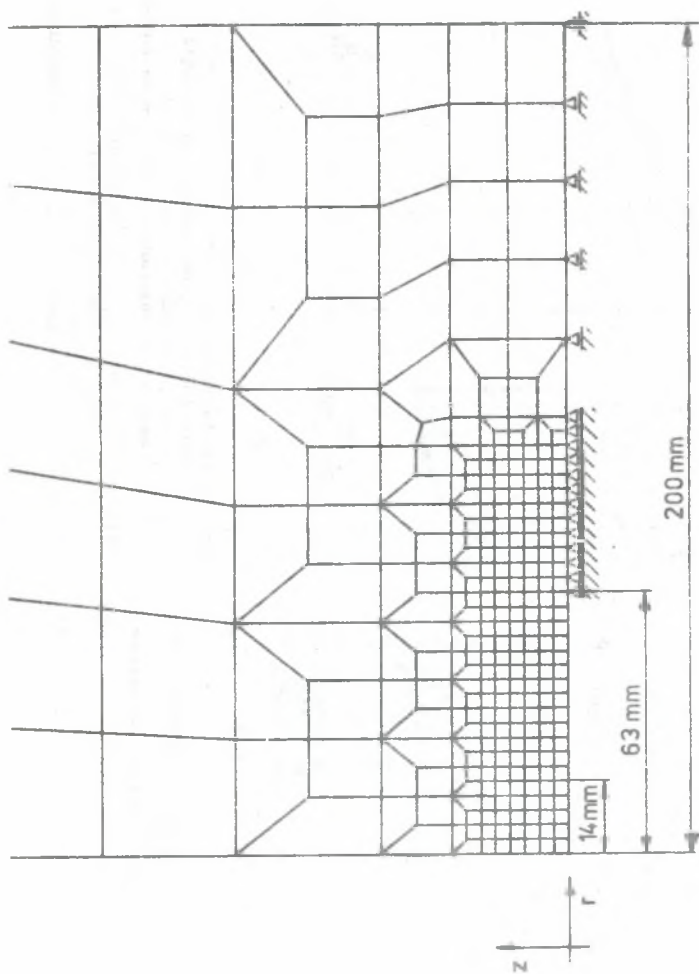
Rys. 5. Zmiany temperatury wody chłodzącej

Fig. 5. Cooling water temperature transient

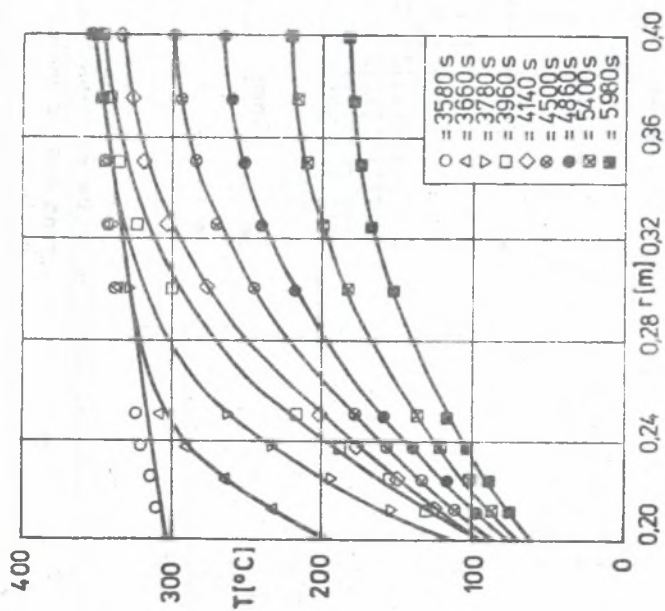


Rys. 6. Zmiany temperatury powierzchni zewnętrznej cylindra

Fig. 6. Outside surface temperature transient

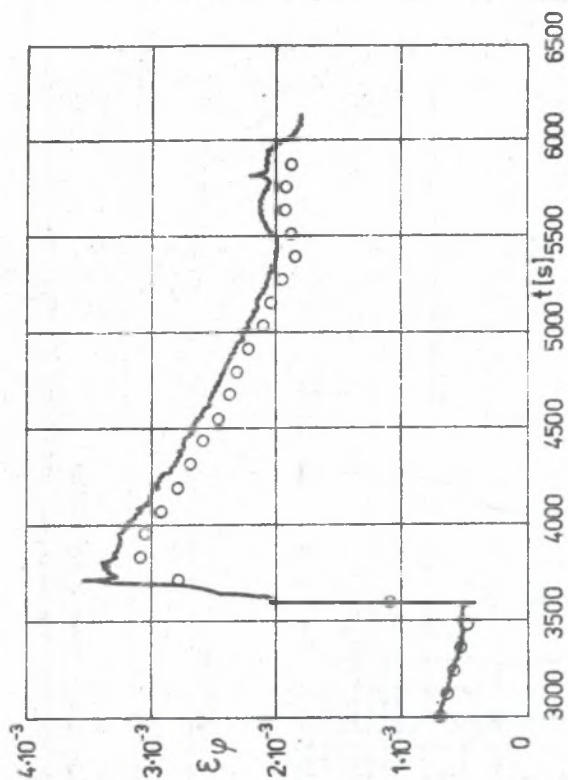


Rys. 7. Podział cylindra na elementy skończone w obszarze szczeliny
 FIG. 7. Finite element mesh of the cylinder showing the detailed modelling of the crack region



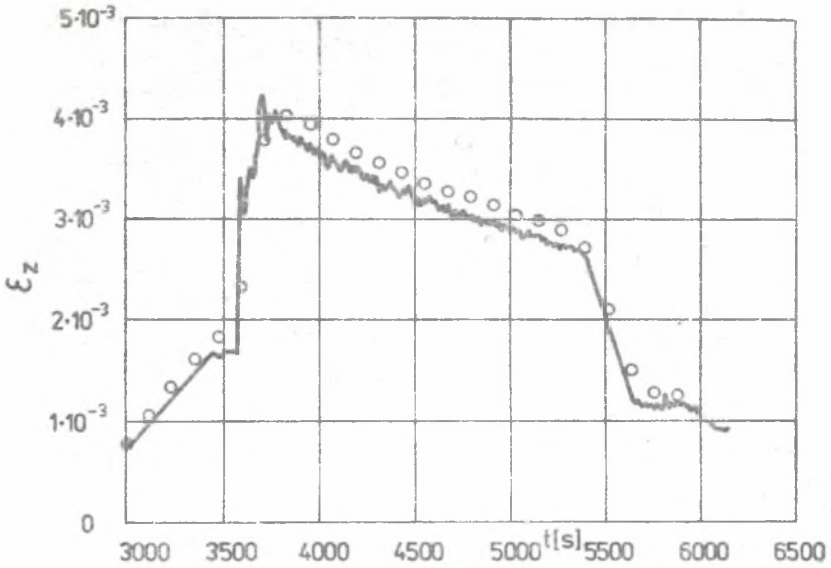
Rys. 8. Porównanie obliczonych i zmierzonych rozkładów temperatury; punkty - pomiar

Fig. 8. Comparison of measured and calculated temperature profiles; — - calculated, points - measured

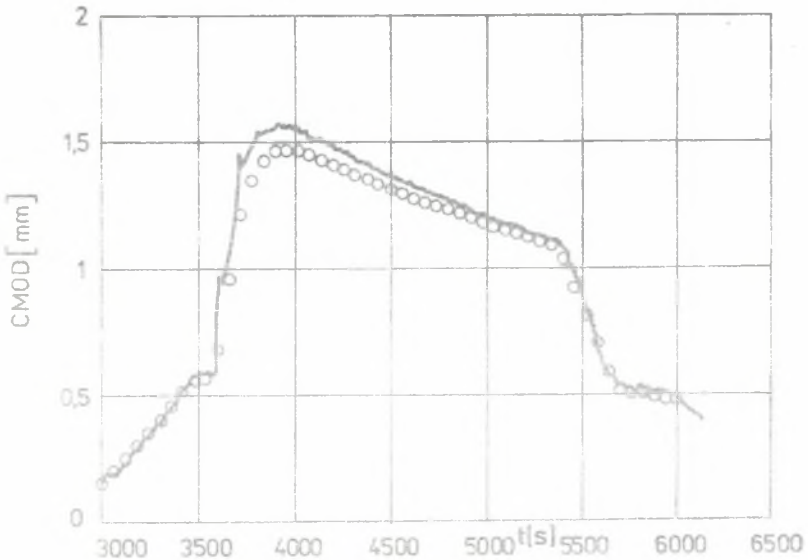


Rys. 9. Porównanie obliczonych i zmierzonych (Du5) wartości odkształcenia obwodowego na wewnętrznej powierzchni cylindra z dala od szczeliny;

— - pomiar, o - obliczenia
 Fig. 9. Comparison of calculated and measured (Du5) circumferential strains at inner cylinder surface away from notch section; — - measured, o - calculated

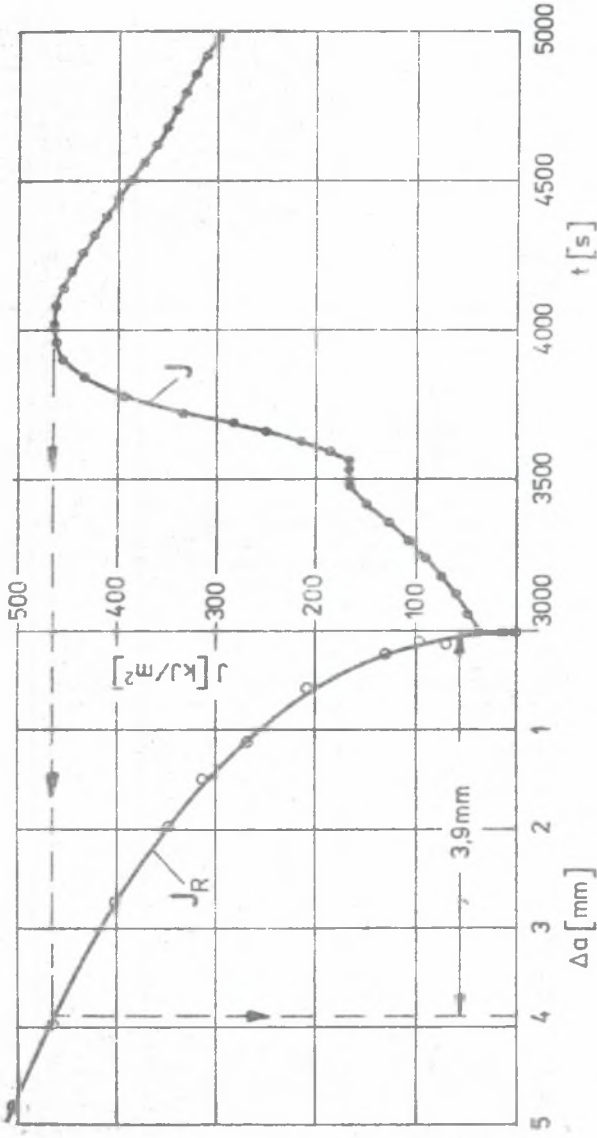


Rys. 10. Porównanie obliczonych i zmierzonych (D14) wartości odkształcenia osiowego na wewnętrznej powierzchni cylindra z dala od szczeliny ; — - pomiar , o - obliczenia



Rys. 11. Porównanie obliczonego i zmierzonego (G4) przemieszczenia brzegów szczeliny ; — - pomiar , o - obliczenia

Fig. 11. Comparison of calculated and measured (G4) crack mouth opening displacements (CMOD) ; — - measured, o - calculated



Rys. 12. Wyznaczenie przyrostu głębokości szczeliny Δa , J_R - krzywa J_R w temperaturze 220 °C
 FIG. 12. Determination of stable crack extension Δa , J_R - crack growth resistance curve at 220 °C

Współczynniki wnikania ciepła w funkcji czasu wyznaczono z pomocą metody stosowanej w zagadnieniach odwrotnych przewodzenia ciepła. Obliczone w ten sposób współczynniki pozwalają na obliczenie z dużą dokładnością nieustalonego pola temperatury w ścianie zbiornika, stanowiącego punkt wyjściowy przy obliczaniu naprężeń cieplnych z pomocą metody elementów skończonych.

Własności cieplne i mechaniczne stali, z której wykonano cylinder doświadczalny, traktowano jako wielkości zależne od temperatury.

LITERATURA

- [1] K.E.Stahlkopf : Pressure vessel integrity under pressurized thermal shock conditions. Nuclear Engineering and Design 80(1984),s.171-180.
- [2] R.H.Bryan, B.R.Bass, S.E.Bolt i in. : Results and conclusions from the first pressurized-thermal-shock experiment. Nuclear and Design 89(1985), s. 145-159.
- [3] K.Kussmaul, A.Sauter : Analytical Parameter Studies Related to Experimental Simulation of RPV-Emergency Cooling Processes. Transactions of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Chicago, August 22-26, 1983, s. 149-156.
- [4] W.T.Kaiser, B.S.Monty : Emergency response guidance for reactor vessel pressurized thermal shock events. The American Society of Mechanical Engineers, 345E.47St., New York, N.Y. 10017, Paper 84-PVP-99, s. 1-8.
- [5] G.Yagawa, Y.Ando, K.Ishihara, T.Iwadate, Y.Tanaka : Stable and unstable crack growth of A508 class 3 plates subjected to combined force of thermal shock and tension. Transact. of the ASME, J. Pressure Vessel Technology 111(1989) August, s. 234-240.
- [6] W.Ehling : Temperatur-, Dehnungs- und Rissaufweitungsmessungen bei dem 3. Versuch zur Notkühlsimulation (NKS3). Teilbericht für das Forschungsvorhaben. FNK. Staatliche Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart, Stuttgart 1988.
- [7] J.Taler : Überwachung der instationären Wärmebeanspruchung in dickwandigen Bauteilen von Kraftwerksblöcken. Brennst.-Wärme-Kraft 39 (1987), s. 484-489.
- [8] J.Taler : A general method of the experimental determination of local transient heat transfer coefficients. Wärme-Stoffübertrag. 23 (1988) s. 283-289.
- [9] ABAQUS. Version 4.8 User's Manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., USA, 1989.

ЧИСЛЕННЫЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР
И НАПРЯЖЕНИЙ В КОРПУСЕ РЕАКТОРА PWR ПРИ АВАРИЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Р е з ю м е

Приведены результаты расчета термических напряжений и напряжений от давления в корпусе реактора при быстром его охлаждению полученные методом конечных элементов. Большое внимание в экспериментальных исследованиях уделено определению термической нагрузки и распространению трещины в корпусе реактора. Сопоставление полученных расчетных и экспериментальных данных показывает, что они хорошо согласуются между собой.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE TEMPERATURE
AND STRESS FIELDS IN THE PWR PRESSURE VESSEL DURING
AN EMERGENCY COOLING

S u m m a r y

The thermal stresses resulting from the rapid cooling of the vessel wall in combination with the pressure stresses have been calculated using a finite element analysis. Special emphasis has been placed in the experiment on measurement of the thermal loading and crack propagation in reactor pressure vessel. Comparison between the experiment and the computer simulation has given very good agreement.