

Bogdan Zając*

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock - Świerk

Badania elementów techniki Jądrowej na podstawie wizualnej oceny uszkodzeń pochwy elementu paliwowego

Research on elements of Nuclear technology based on a visual assessment of vaginal damage to a fuel element

ABSTRACT

Due to the threat to the health and life of people working in nuclear facilities, high demands are placed on the quality and reliability of the construction, construction and operation of the elements of nuclear technology. Many of these elements undergo periodic and ad hoc testing of many non-destructive testing methods. Most often the latest techniques are used for research, often in very complex systems. However, the visual method is still widely used. Devices with image recording and ordinary optical systems are used. In Poland, where we do not yet have an energy reactor and only a research reactor, modern techniques for visual evaluation of elements of nuclear technology are also used.

Keywords: nuclear power, visual testing

STRESZCZENIE

Ze względu na zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi pracujących w obiektach jądrowych postawione są wysokie wymagania co do jakości i niezawodności budowy, konstrukcji i przebiegu eksploatacji elementów techniki jądrowej. Wiele tych elementów poddanych jest okresowym i doraźnym badaniom wieloma metodami badań nieniszczących. Do badań zastosowane są najczęściej najnowsze techniki, często w bardzo skomplikowanych układach. Nadal jednak metoda wizualna jest szeroko stosowana. Zastosowane są urządzenia z rejestracją obrazu i zwykłe układy optyczne. W warunkach Polski, gdzie nie posiadamy jeszcze reaktora energetycznego, a jedynie reaktor badawczy, również stosowane są nowoczesne techniki wizualnej oceny elementów techniki jądrowej.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa; badania wizualne

1. Wstęp

Ze względu na zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi pracujących w obiektach jądrowych postawione są wysokie wymagania co do jakości i niezawodności budowy, konstrukcji i przebiegu eksploatacji elementów techniki jądrowej. Wiele tych elementów poddanych jest okresowym i doraźnym badaniom wieloma metodami badań nieniszczących. Do badań zastosowane są najczęściej najnowsze techniki, często w bardzo skomplikowanych układach. Nadal jednak metoda wizualna jest szeroko stosowana. W referacie przedstawię kilka przykładów badania elementów konstrukcji, urządzeń i elementów elektrowni jądrowych w tym:

- 1) przegląd stalowej okładziny betonowej osłony reaktora GINNA,
- 2) przegląd prętów paliwowych mocowanych w reaktorze
- 3) ocena wizualna powierzchni koszulki elementu paliwowego.

2. Przegląd stalowej okładziny betonowej osłony reaktora GINNA

Przepisy dotyczące zabezpieczeń komercyjnych elektrowni jądrowych wymagają od elektrowni, aby okresowo sprawdzały całą powierzchnię obudowy bezpieczeństwa reaktora.

Elektrownia jądrowa Rochester Gas & Electric GINNA, zlokalizowana w Ontario, w stanie Nowy Jork nad jeziorem

Ontario składa się z ciśnieniowego reaktora wodnego (PWR) i dwóch wytwornic pary. Betonowa konstrukcja zabezpieczająca ma ponad 30 lat (Rys. 1).



Rys. 1. Kopuła bezpieczeństwa reaktora elektrowni jądrowej GINNA.

Fig. 1. Safety dome of the reactor of the GINNA Nuclear Power Plant.

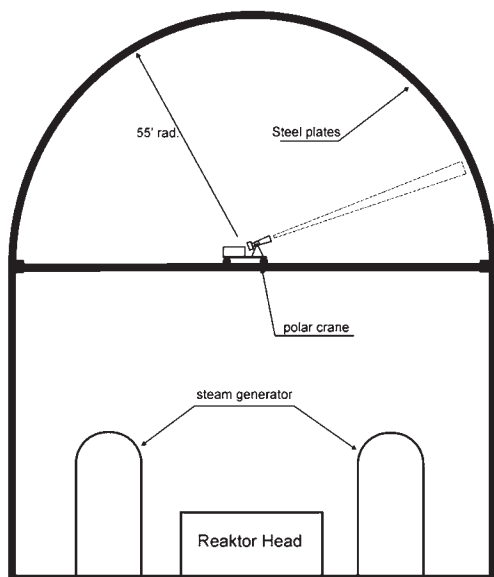
Kopuła o promieniu wewnątrz 55' (~17 m), na powierzchni około 12 000 stóp kw. (ok. 1115 m²) od wewnątrz pokryta była blachą stalową, którą należało sprawdzić.

Ponieważ badania te wymagają określenia ogólnego stanu mechanicznego i strukturalnego elementów, zgodnie z ASME Sekcja XI Podrozdział 1 ustalono dla tego typu

*Autor korespondencyjny. E-mail: b.zajac.pl@gmail.com

badania, poziom czułości VT-3. Oznacza to, że badania wymagają wykrycia artefaktów o wymiarze $0.105'$ (ok. 2,7 mm). W przypadku stwierdzenia podejrzanych wskazań, należy wykonywać dodatkowe ekspozycje, stosując większe zbliżenia. Dla dodatkowych badań przyjęto poziom czułości VT-1 wg ASME Sekcja XI Podrozdział 1 [2]. Wymaga się wówczas wykrycia artefaktów o wymiarze $0.044'$ (ok. 1,1 mm).

Do oceny stanu technicznego zdecydowano się wykorzystać fotoaparat wyposażony w obiektyw o zmiennej ogniskowej 600 mm. Fotoaparat ustawiono w środku półkolistej kopuły, wykorzystując do tego celu suwnicę. (Rys 2). Na statywie fotoaparatu zamocowano dwa reflektory halogenowe o mocy 750 W, pozwalają one na doświetlenie obserwowanej powierzchni. Na statywie zamocowano również 2 wskaźniki laserowe (czerwone) ułatwiające kalibrację przestrzenną na powierzchni kopuły. Na każdym ze zdjęć ukazany został obszar o powierzchni $(3 \times 4')$ 12 stóp kwadratowych (912 x 1219 mm).



Rys. 2. Usytuowanie kamery do badań kopuły.
Fig. 2. The location of the camera for the dome's inspection.

Badania można było przeprowadzić tylko w ściśle określonym terminie (przegląd okresowy - co 10 lat) i przez ograniczony czas (40 godzin).

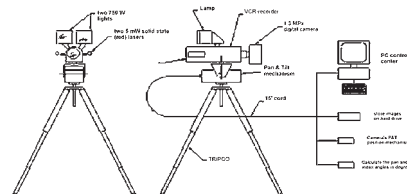
Aby spełnić wymagania czasowe napisano specjalne oprogramowanie sterujące pozycją aparatu na statywie. Oprogramowanie pozwalało na krokowe obracanie fotoaparatu w taki sposób, aby wykonać panoramę całego obwodu kopuły (360°), za każdym obrotem podnosząc obiektyw o ustalony kąt, aż do 90° . Dodatkowo uwzględniono 10% zachodzenia obrazów na siebie. Zdjęcia rejestrowane były na zewnętrznym dysku twardym i wyświetlane na zewnętrznym monitorze.

Kontroler obserwując otrzymane zdjęcia na monitorze, zatwierdza wynik. W przypadku problemów z interpretacją, kontroler zaznacza zdjęcie do powtórzenia z większym powiększeniem (poziom VT-1).

W sumie wykonano 1 253 zdjęć w ciągu 11 godzin. Znacznie skróciło to i ułatwiło ocenę stanu kopuły przy

jednoczesnym zmniejszeniu kosztów. System podlega nadal ciągłej modernizacji.

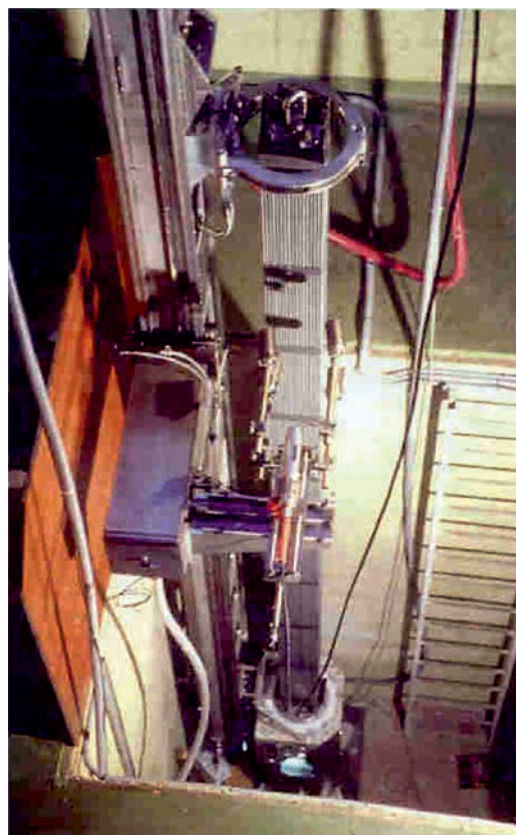
Po bardzo udanej inspekcji stalowej obudowy kopuły Elektrowni Jądrowej GINNA, wykonano trójwymiarowy model kopuły. System skanowania powierzchni kopuły przedstawiono na Rys. 3. Ponadto, zdecydowano się użyć tego samego systemu obrazowania i protokołu przechwytywania danych dla zewnętrznej powierzchni budynku obudowy bezpieczeństwa dla innych elektrowni tego typu.



Rys. 3. System skanowania powierzchni kopuły [1].
Fig. 3. Dome surface scanning system [1].

3. Przegląd prętów paliwowych mocowanych w reaktorze

W elektrowni Jądrowej Palo Verde w pobliżu Phoenix w Arizonie [3] w czasie wymiany prętów paliwowych (Rys.4) stwierdzono, że jednego zespołu paliwowego nie można zdemontować ze względu na jego zablokowanie w dolnej kratownicy płyty ustalającej pozycję prętów. Deformacja ta powstała w na skutek niedokładnie przeprowadzonego poprzedniego montażu zespołu prętów paliwowych.



Rys. 4. Zestaw prętów paliwowych w suchym basenie transportowym [3].
Fig. 4. Set of fuel rods in a dry transport pool [3].

Naprawę zdeformowanej kratownicy przeprowadzono pod wodą, za pomocą specjalistycznego robota wyposażonego w manipulatory, pod nadzorem specjalnie do tego celu skonstruowanego zespołu kamer.

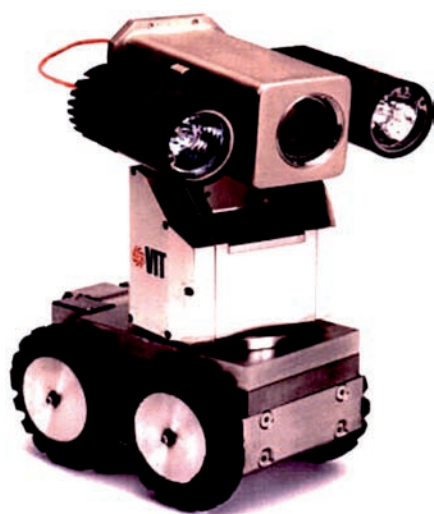
Trudne i czasochłonne prace związane z naprawą panelu okazały się również bardzo drogie. Spowodowały one również przedłużenie czasu przestoju reaktora, zagrożenie dla załogi obsługującej manipulatory (narażenie na pochłonięcie zwiększonej dawki promieniowania) oraz uszkodzenie (pogorszenie jakości obrazu) części kamer obserwujących przebieg prac [4].

Organ Nadzoru Jądrowego nakazał sprawdzenie, czy w pozostałych podzespołach nie doszło do podobnych uszkodzeń oraz zarekomendował wizualny nadzór nad ich ponownym montażem w reaktorze.

Firma Everest VIT, Inc. dostarczyła wodoszczelne kamery CCD o wysokiej rozdzielczości z obiektywem zmiennoogniskowym o regulowanym pochyleniu i obrotem (panoramą) (Rys. 5). Firma dostarczyła również robota ROVVER 4.0, z kolorowym przetwornikiem obrazu CCD, sterowany elektrycznie cienkim kablem z kevlaru (Rys. 6).



Rys. 5. Kamera Ca -Zoom.
Fig. 5. Camera Ca-Zoom.



Rys. 6. Robot ROVVER 4.0.
Fig. 6. Robot ROVVER 4.0.

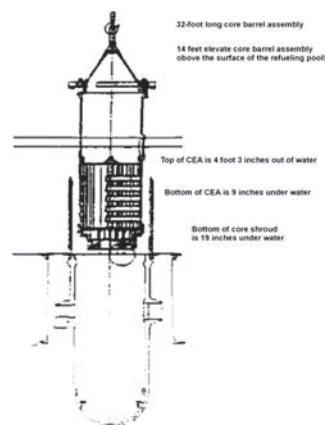
Zespół prętów paliwowych został wyciągnięty ze zbiornika na wysokość około 2m (Rys. 7).

Dwie kamery Ca-Zoom na przeciwległych rogach zestawu paliwowego dokonywały przegląd krytycznego rejonu. Jednocześnie robot ROVVER poruszał się poniżej zestawu dokonując przegląd od spodu.

Przeгляд dokonany z wykorzystaniem kamer z zoomem, pozwolił na szczegółowe badanie krytycznych obszarów z dużej odległości z wyjątkowo dobrą jakością obrazu .

Przeгляд przeprowadzany za pomocą kamer i robota skrócił czas badań do 30 minut, był bezpieczny dla obsługi i znacznie ograniczał wielkość dawki pochłoniętej przez aparaturę.

Realizując zalecenia Organu Nadzoru Jądrowego, skonstruowano System Zdalnego Monitoringu Zestawu Paliwowego składający się z 14 kamer. 7 kamer znajdowało się w powietrzu i 7 znajdowało się w wodzie. Kamery w powietrzu zapewniały dokładną lokalizację zestawu prętów paliwowych nad zbiornikiem reaktora oraz umożliwiały dobrą widoczność operatorowi suwnicy. Kamery pod wodą umożliwiały obserwację zestawu prętów paliwowych ze wszystkich stron, ze szczególnym uwzględnieniem zobrazowania prętów naprowadzających. Wszystkie kamery podłączone zostały do monitorów znajdujących się w sterowni reaktora.



Rys. 7. Zestaw prętów paliwowych wyciągnięty ze zbiornika reaktora [4].
Fig. 7. A set of fuel rods removed from the reactor vessel [4].

Zastosowanie mobilnych kamer VIT Ca-Zoom oraz robota ROVVER umożliwiło prawidłowe i szybkie przeprowadzenie montażu (demontażu) prętów paliwowych ze zbiornika reaktora i przede wszystkim zmniejszyło czas zagrożenia ludzi napromieniowaniem.

4. Ocena wizualna powierzchni koszulki elementu paliwowego

Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ dostało zlecenie od Zakładu Reaktora MARIA dokonać ocenę stanu powierzchni koszulki elementu paliwowego oraz wykonania pomiarów wymiarów geometrycznych rysy na powierzchni koszulki elementu paliwowego (Rys. 8).

Szczególną uwagę zwrócono na fakt, że dla tego typu elementu bardzo istotna jest, obok długości i szerokości rysy, również jej głębokość.



Rys. 8. Koszulka elementu paliwowego.
Fig. 8. Coating of the fuel rod.

W większości przypadków podczas badań wizualnych mierzone są jedynie wymiary liniowe: długość i rzadziej szerokość uszkodzeń. Zlecenie pomiaru wymiarów geometrycznych rysy na powierzchni koszulki elementu paliwowego z oceną jej głębokości było wyzwaniem.

Dlatego też szczególnie wiele nadziei pokładano w wykorzystaniu układów pomiarowych stanowiących wyposażenie wideoendoskopu XLG 3 VideoProbe udostępnionego do badań przez firmę Everest VIT Polska.

Badania nieniszczące metodą wizualną powierzchni koszulki elementu paliwowego prowadzono na terenie reaktora MARIA w NCBJ Świerk. Badania prowadzono okiem nieuzbrojonym, mikroskopem cyfrowym Delta Optical Smart (Rys. 9) oraz wideoendoskopem XLG 3 VideoProbe (Rys. 10) z użyciem różnych obiektywów - obiektywem zwykłym, obiektywem pomiarowym stereo oraz obiektywem pomiarowym 3D.



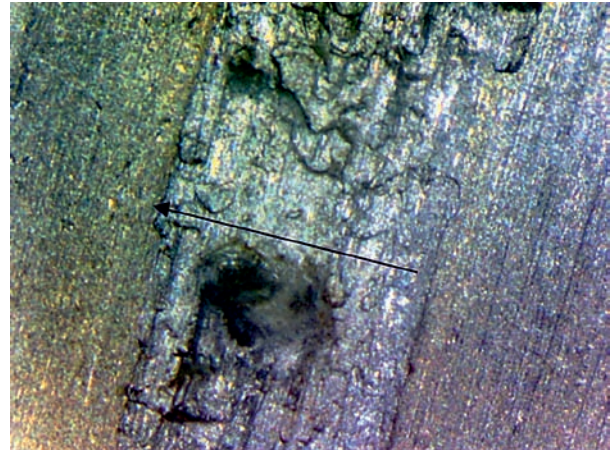
Rys. 9. Mikroskop cyfrowy Delta Optical.
Fig. 9. Delta Optical digital microscope.

Badania rozpoczęto od przeglądu wzrokowego. Stwierdzono, że: rysa jest długa i o nierównych krawędziach. Usytuowana jest ona na powierzchni zewnętrznej 6-tej rury elementu paliwowego, mniej więcej w środku odległości pomiędzy żebrami dystansującymi. Długość rysy pomierzona zwijaną miarką metalową wynosi około 530 mm.



Rys. 10. Wideoendoskop XLG 3 VideoProbe.
Fig. 10. Videoendoscope XLG 3 VideoProbe.

Następnie przeprowadzono obserwację rysy za pomocą mikroskopu cyfrowego Delta Optical Smart. Wykorzystując możliwości techniczne mikroskopu przeprowadzono przegląd rysy stosując powiększenie w zakresie 50x-250x. W kilku wybranych miejscach wykonano zdjęcia odcinków rysy. W wyniku tych obserwacji potwierdzono, że materiał w rejonie rysy jest silnie poszarpany, a rysa ma nierówne krawędzie. Wykorzystując oprogramowanie mikroskopu cyfrowego dokonano pomiaru szerokości rysy, która wynosiła od około 0,97 mm do 1,06 mm (Rys. 11).

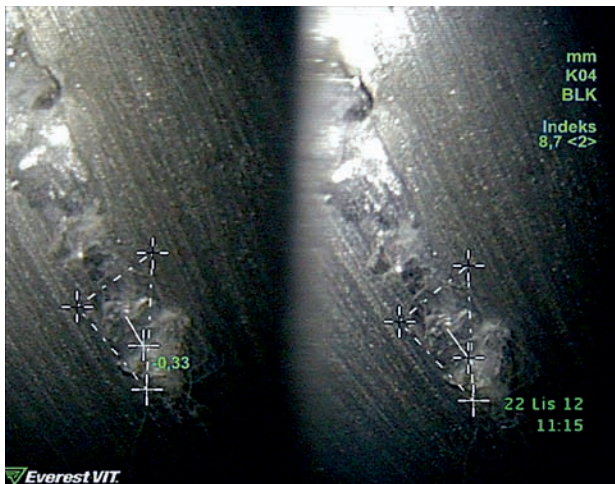


Rys. 11. Szerokość rysy około 0,97mm (Mikroskop cyfrowy).
Fig. 11. The width of the scratches is approximately 0.97 mm (Digital microscope).

Następnie przystąpiono do badań za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą stereo. Na podstawie oględzin wzrokowych wybrano miejsca, w którym rysa wydawała się najgłębsza i za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą stereo dokonano w tym miejscu pomiaru ich głębokości (Rys. 12).

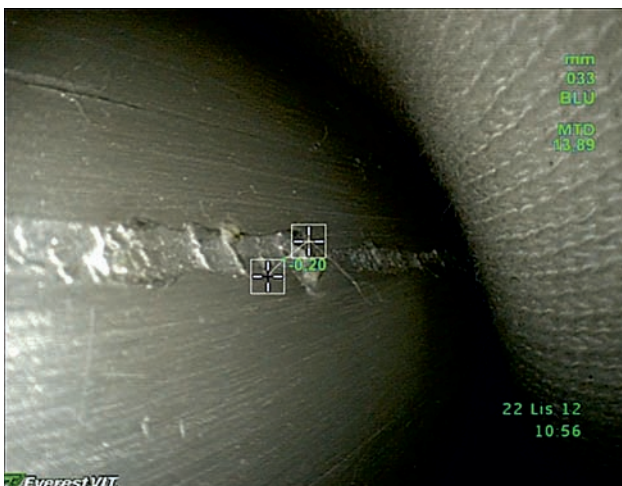
Kolejnym etapem badań były pomiary wymiarów geometrycznych rysy za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą 3D. W wybranych punktach pomiarowych oceniono głębokość rysy

na około od 0,12 mm do 0,20 mm (Rys. 13). Na rysunku 14 przedstawiono przekrój poprzeczny rysy z pomierzoną głębokością rysy.



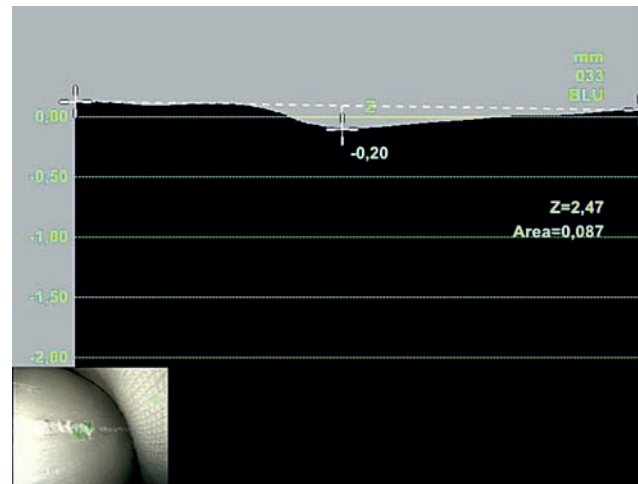
Rys. 12. Głębokość rysy w najgłębszym miejscu –metoda stereo (0,33 mm).

Fig. 12. Depth of scratches in the deepest place - stereo method (0.33 mm).



Rys. 13. Pomiar głębokości rysy – metoda 3D (0,20 mm).

Fig. 13. Depth scratch measurement - 3D method (0.20 mm).



Rys. 14. Przekrój poprzeczny rysy–metoda 3D (0,20 mm).

Fig. 14. Cross section scratches - 3D method (0.20 mm).

5. Podsumowanie

Duży postęp, jaki dokonał się w technice badań wizualnych, a szczególnie zdalnych badaniach wizualnych (RVI) pozwala na przeprowadzanie badań w środowiskach o wysokim natężeniu promieniowania, wymagających użycia systemów wideo odpornych na promieniowanie. Systemy te z reguły są kosztowne i wymagają stosowania osłon. Wydarzenia takie jak w Palo Verde oraz w reaktorze GINNA, umożliwiły zaprojektowanie i wykorzystanie specjalnych systemów badań wizualnych. Systemy te wykorzystujące przetworniki CCD o dużych możliwościach powiększania, zapewniły lepszą jakość oglądania, mniejsze nakłady na przeglądy i konserwację elementów elektrowni jądrowej, a szczególnie przyczyniły się do zwiększenia bezpieczeństwa ludzi pracujących przy obsłudze elementów silnie promieniujących.

6. Literatura

- [1] Bruce A. Pellegrino, "Development of a Large-Area Visual Inspection Device for Nuclear Containment Building Inspection" XVII WCNDT Shanghai, China, 2008
- [2] ASME BVPN, Section XI, Division 1, Table IWF-2500-1
- [3] William Ryder, "Remote handling and robotic inspections of Palo Verde reactor vessel internals" NDT.net., Vol.3 No.8; 1999;
- [4] J. J. Serena, "SICOM: On -Site inspection systems" IAEA-TE-1277, pp. 32-40, 2001