

Bogdan Zając, Grzegorz Olszewski, Natalia Piotrowska\*

Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ, Otwock

# Ocena szerokości szczeliny dylatacyjnej w blokach grafitowych reaktora Maria

## Assessment of the expansion provision width in the Maria reactor graphite blocks

### ABSTRACT

The paper focuses on the assessment of the width of the expansion provision within the graphite blocks placed in MARIA nuclear reactor of the National Centre for Nuclear Research in Świerk, after their long-lasting operation in the reactor. The nominal width of the expansion provision before placing in the reactor was approximately 30mm. As a result of an interaction between the fast neutrons and the graphite within the reactor, there occurs an incremental swelling of the graphite, causing its porosity and deterioration of its physical properties. This results in narrowing of the expansion provision. Tests aimed at assessing the expansion provision were conducted with the use of radiographic testing. Due to the difficulties arising from applying classical radiographic testing (irradiation of the graphite blocks), digital radiography instruments were employed and the testing was only possible in so called Hot Cells placed above the reactor.

**Keywords:** graphite block, expansion provision, nuclear reactor

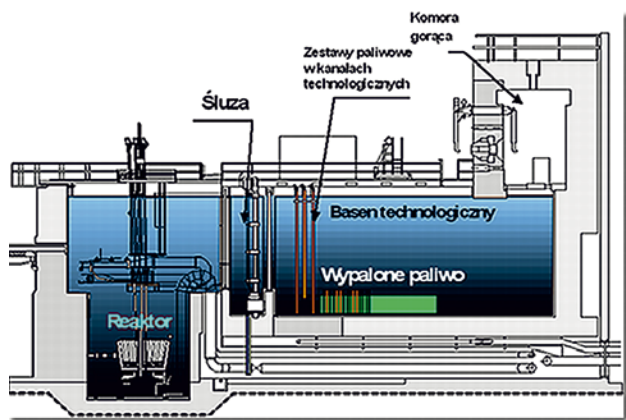
### STRESZCZENIE

Przedmiotem pracy była ocena szerokości szczeliny dylatacyjnej w blokach grafitowych reaktora MARIA NCBJ po ich długotrwałej eksploatacji w reaktorze. Nominalna szerokość szczeliny dylatacyjnej bloku grafitowego przed eksploatacją w reaktorze wynosiła ok. 30 mm. W czasie długotrwałej pracy reaktora, w wyniku interakcji pomiędzy szybkimi neutronami a grafitem następuje powolne pęcznienie grafitu powodujące porowatość i pogorszenie jego własności fizycznych. Efektem pęcznienia grafitu pod wpływem oddziaływania z neutronami następuje zmniejszenie się szczeliny dylatacyjnej. Badania szerokości szczeliny dylatacyjnej przeprowadzono metodą radiograficzną. Ze względu na trudności z zastosowaniem radiografii klasycznej (bloki grafitowe były napromieniowane) do badań wykorzystano płyty obrazowe i aparaturę do badań radiografią cyfrową. Badania bloków były przeprowadzone w tzw. Komorach Gorących nad reaktorem MARIA.

**Słowa kluczowe:** blok grafitowy, szczelina dylatacyjna, reaktor jądrowy

### 1. Wstęp

Jedyny w Polsce badawczy reaktor jądrowy MARIA znajduje się w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku k. Otwocka. Reaktor zbudowany zgodnie z dokumentacją radzieckiego reaktora MR w Instytucie Kurczatowa w Moskwie uruchomiony został w Polsce w grudniu 1974 roku. Nazwę MARIA nadano mu na cześć Marii Skłodowskiej-Curie [1].



Rys. 1. Przekrój podłużny reaktora MARIA

Fig. 1. Longitudinal section of the MARIA reactor

Rdzeń reaktora, kanały paliwowe i inne elementy związane z rdzeniem reaktora są umieszczone w basenie

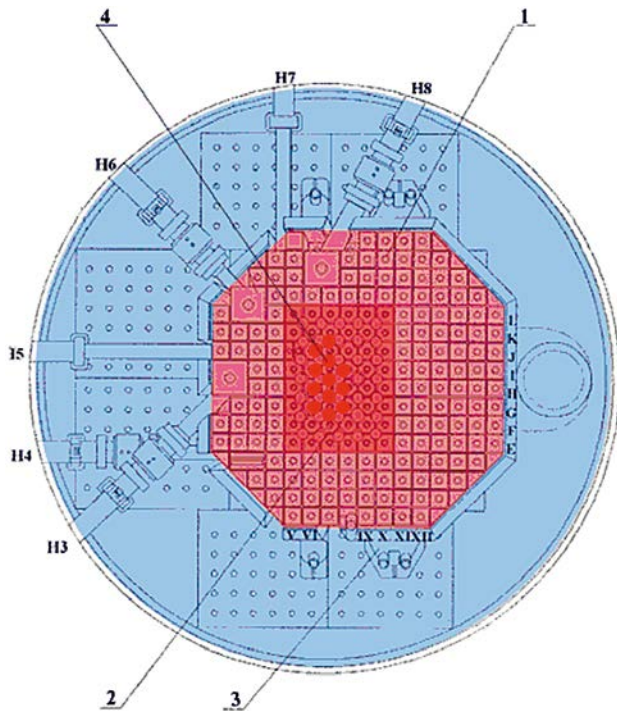
pod 7 metrową warstwą wody zapewniającą osłonę przed promieniowaniem oraz umożliwiającą chłodzenie tych elementów rdzenia, które nie posiadają specjalnych obiegów chłodzenia (np. elementy paliwowe). Obok basenu reaktora jest basen technologiczny do okresowego przechowywania wypalonego paliwa. Pełni on również rolę podwodnej drogi transportowej do komór gorących i komory demontażowej. Baseny oddzielone są śluzą. Pionowy przekrój przez basen reaktora MARIA jest przedstawiony na rysunku 1.

Charakterystyczną cechą reaktora MARIA jest stożkowa konstrukcja rdzenia reaktora. Układ stożkowy pozwala na zainstalowanie nad rdzeniem większych elementów reaktora i urządzeń doświadczalnych. W matrycy bloków berylowych o wysokości 110 cm znajdują się kanały paliwowe zawierające zestawy z paliwem jądrowym. Rury z elementem paliwowym umieszczone są w rdzeniu reaktora między blokami berylowymi moderatora. Mają one indywidualne podłączenia układu chłodzącego oraz oddzielne zawory odcinające na wejściu i wyjściu wody chłodzącej, przepływającej pod ciśnieniem. Berylowa matryca rdzenia reaktora jest otoczona reflektorem wykonanym z bloków grafitowych. Między blokami grafitowymi znajdują się szczeliny ok. 1,5 mm, przez które może swobodnie przepływać chłodziwo. Przekrój poziomy rdzenia reaktora MARIA z zaznaczonymi podstawowymi elementami jest przedstawiony na rysunku 2

Bloki grafitowe zamknięte w koszulkach z cienkiej blachy aluminiowej mają kształt ściętych ostrosłupów o podstawie kwadratowej (Rys. 3). Górny wymiar bloku wynosi 140 mm, dolny zaś 120 mm. Wysokość bloków wraz z nakładkami

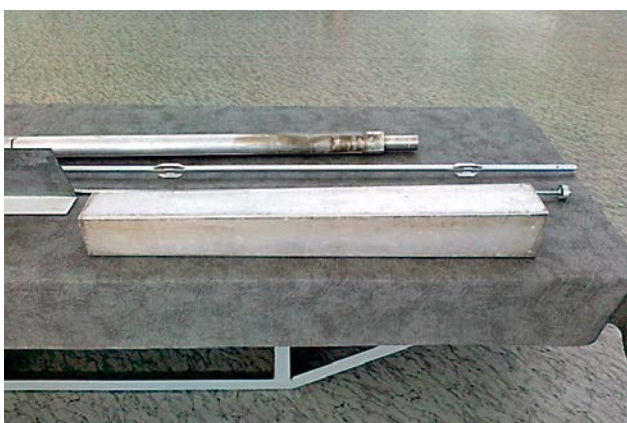
\*Autor korespondencyjny. E-mail: bogdan.zajac@ncbj.gov.pl

wynosi 1585 mm. Ze względu na możliwość pracy bloku w temperaturze przekraczającej 1000 K, grafit został odgazowany w próżni w temperaturze około 1000 K i nasycony azotem [2]. Szczelina dylatacyjna między osłoną, a grafitem też jest wypełniona azotem. Nominalna szerokość szczeliny dylatacyjnej bloku grafitowego przed eksploatacją w reaktorze wynosiła około 30 mm.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny rdzenia reaktora MARIA: 1 - bloki grafitowe reflektorów, 2 - bloki berylowe w rdzeniu reaktora, 3 - osłona komór jonizacyjnych, 4 - zestawy paliwowe, H3÷H8 - zakończenia kanałów do wyprowadzania wiązek

Fig. 2. Cross section of the MARIA reactor core: 1 - Graphite block; 2 - Beryllium block; 3 - Ionization chamber shielding; 4 - Fuel elements; H3÷H8 - ends of channels for outputting neutron beam



Rys. 3. Blok grafitowy

Fig. 3. Graphite block

W czasie długotrwałej pracy reaktora, w wyniku interakcji pomiędzy szybkimi neutronami a grafitem, atomy węgla odrywane z sieci krystalicznej zostają przesunięte do jej wnętrza.

W wyniku tego zjawiska struktura krystaliczna grafitu

ulega uszkodzeniu i zwiększa on swoją objętość, absorbując i gromadząc jednocześnie część energii neutronów. Następuje powolne pęcznienie grafitu powodujące porowatość i pogorszenie jego własności fizycznych. [3]

Ze względu na pęcznienie grafitu pod wpływem interakcji z neutronami szczelina dylatacyjna zmniejsza się. Warunkiem bezpiecznej eksploatacji reaktora jest niedopuszczenie do zbytniego zmniejszenia tej szczeliny.

Celem pracy było określenie wielkości szczeliny dylatacyjnej w wybranych przez Zleceniodawcę blokach grafitowych po ich długotrwałej eksploatacji w reaktorze MARIA.

## 2. Wybór metody badania

Ze względu na zastosowaną nieprzezroczystą osłonę bloku grafitowego wykonaną z cienkiej blachy aluminiowej, do oceny wielkości szczeliny dylatacyjnej zastosować można było jedną z dwóch metod badań objętościowych - metodę ultradźwiękową lub metodę radiograficzną. Ze względu na przewidywane trudności podczas badań ultradźwiękowych takie jak: niejednakowy stopień sprężenia akustycznego z badanym przedmiotem, długotrwały proces oceny, a przede wszystkim trudności w przeprowadzeniu samych pomiarów za pomocą manipulatorów ze względu na narażenie kontrolera na promieniowanie jonizujące zdecydowano się na badania radiograficzne.

W przypadku prześwietlania bloków grafitowych promieniowaniem X badanie metodą radiograficzną z zastosowaniem klasycznych błon napotyka na podstawowy problem badawczy, bloki grafitowe na skutek przebywania w reaktorze są napromienione. Błony rentgenowskie stykając się z powierzchnią bloków podczas ich prześwietlania narażone są na dodatkowe promieniowanie jonizujące. Promieniowanie to powoduje wstępne zaczernienie błony, co w konsekwencji obniża kontrastowość otrzymanych zdjęć i w znacznym stopniu utrudnia interpretację obrazów.

Dlatego zdecydowano się zastosować radiografię cyfrową pośrednią jako metodę dającą szansę uzyskania bardziej wiarygodnych wyników badań.

W radiografii cyfrowej pośredniej, zdjęcie wykonuje się identycznie jak w radiografii klasycznej. Natomiast kasety, zamiast błony RTG zawierają bardzo czułe płyty obrazowe, zwane płytami fosforowymi, płytami luminoforowymi lub płytami IP, które zapamiętują obrazy. Po ekspozycji naświetlona płyta obrazowa zamiast do wywoływarci korzystającej z odczynników chemicznych, tak jak to było w radiografii klasycznej, wkładana jest do specjalnego czytnika, skanera CR. Czytnik za pomocą technologii laserowej, wykorzystując zjawisko fotostymulowanej luminescencji, skanuje płytę przetwarzając otrzymany sygnał analogowy na wyświetlany na monitorze cyfrowy obraz RTG. Po odczycie i zarejestrowaniu w pamięci komputera lub rejestratora obraz na płycie jest automatycznie czyszczony i płyta obrazowa nadaje się do ponownego użycia.

Metoda radiografii cyfrowej posiada szereg zalet [4]:

- Główną zaletą metody radiografii cyfrowej jest to, że płyty obrazowe mają szeroki zakres dynamiczny. Tolerancja naświetlenia jest nawet do 1000 razy większa niż klasycznej błony rentgenowskiej. Daje to dużą

tolerancję na zmienne warunki ekspozycji i większą swobodę wyboru dawki ekspozycyjnej. W konsekwencji umożliwia to znaczne zmniejszenie ilości powtórnych zdjęć.

- Cyfrowy obraz radiograficzny może być następnie kopiowany i powielany bez utraty jakości oraz daje możliwość wysyłania go pocztą elektroniczną i odczytywania na dowolnym komputerze.
- Dzięki programowi komputerowemu dostępne są narzędzia analityczne, zdolność do wzmocnienia i powiększania, możliwość porównywania wielu obrazów i wykonywania różnorodnych funkcji podczas przeglądania obrazów. Np. możliwość dokonywania pomiarów liniowych z dużą dokładnością. Jednocześnie nie następuje pogorszenie jakości obrazu z czasem.
- Bardzo istotną zaletą jest też cyfrowa archiwizacja danych. Szybkie magazynowanie i wywoływanie radiogramu z archiwum, a także tworzenie dodatkowych kopii bezpieczeństwa
- Do uzyskania zdjęć nie jest potrzebna ciemnia ani obróbka chemiczna; system jest przyjazny dla środowiska.
- Uzyskuje się skrócenie czasu ekspozycji od 5 do 20 razy w porównaniu z klasyczną błoną rentgenowską.
- Ograniczenie ilości ekspozycji i związane z tym większe bezpieczeństwo pracy przy jednocześnie minimalnym obszarze kontrolowanym.
- Możliwość wielokrotnego używania płyt obrazowych, nawet do 1000 razy.
- Mniejsza fizyczna przestrzeń potrzebna do magazynowania wyników badań.
- Szeroki zakres dynamiczny umożliwia badanie i ocenę elementów o bardziej skomplikowanych kształtach, o większym zakresie grubości, korzystając tylko z jednej ekspozycji.

### 3. Przebieg badania

Ze względu na brak w Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ wymaganej do przeprowadzenia powyższych badań niezbędnej aparatury wynajęto do tego celu ekipę firmy NDT-NET Sp. z o.o.

Do badań jako źródło promieniowania X zastosowano generator impulsów promieniowania rentgenowskiego XRS-3 firmy Golden Engineering Inc. (Rys. 4). Jest to małe przenośne, zasilane z baterii urządzenie o wymiarach 350 x 115 x 190 mm i wadze około 5,5 kg. Dzięki czemu urządzenie można było bardzo wygodnie obsługiwać w niewielkich przestrzeniach komory demontażowej reaktora MARIA.

Obraz zapisywano na elastycznych płytach obrazowych Flex GP SO 170 firmy Kodak o wymiarach 20 x 25 cm i 25 x 30cm. Odczyt z płyt obrazowych dokonywano na specjalnym skanerze VMI 3600 SF firmy VMI. Ponieważ skanowana za pomocą lasera płyta obrazowa nie miała żadnego kontaktu z ruchomymi elementami systemu, znamionowa fizyczna rozdzielczość wynosiła 50  $\mu\text{m}$ , a 16 bitowy przetwornik skanera VMI, rozróżniał aż 65 000 odcieni szarości.

Do oceny szerokości szczeliny dylatacyjnej Zleceniodawca wytypował 20 sztuk bloków grafitowych po długotrwałej eksploatacji w reaktorze.

Każdy z bloków grafitowych personel Zakładu Eksploatacji Reaktora MARIA transportował ze zbiornika przechowawczego (technologicznego) reaktora do komory demontażowej, gdzie ustawione było stanowisko badawcze (Rys. 5).



Rys. 4. Generator impulsów promieniowania rentgenowskiego XRS-3

Fig. 4. XRS-3 X-ray pulse generator

Stanowisko badawcze składało się ze źródła promieniowania XRS-3 ustawionego na podeście w pobliżu tunelu transportowego oraz osłony w kształcie litery U zbudowanej z 2. warstw cegieł ołowianych, za którą chowane były płyty obrazowe.



Rys. 5. Personel Zakładu Eksploatacji Reaktora MARIA transportuje blok grafitowy do komory demontażowej

Fig. 5. The personnel of the MARIA Reactor Operating Plant transports the graphite block to the dismantling chamber

Na czas ekspozycji wysuwano poszczególne bloki z tunelu transportowego komory demontażowej w taki sposób, aby spodziewana szczelina dylatacyjna znalazła się na wysokości źródła promieniowania XRS-3. Następnie manipulatorem wyjmowano zza ołowianej osłony mniejszą płytę obrazową i przytykano do tylnej, względem źródła promieniowania, powierzchni bloku grafitowego. Prześwietlano blok promieniowaniem rentgenowskim o energii 3. paczek po 99 impulsów każda. Po ekspozycji chowano płytę za osłonę ołowianą. Następnie powtarzano proces dla drugiej, większej płyty obrazowej i po ekspozycji również chowano ją za osłonę ołowianą. Po badaniach blok grafitowy przenoszono do basenu zbiornika przechowawczego reaktora. Dopiero wówczas wyjmowano obie płyty obrazowe zza osłony ołowianej.

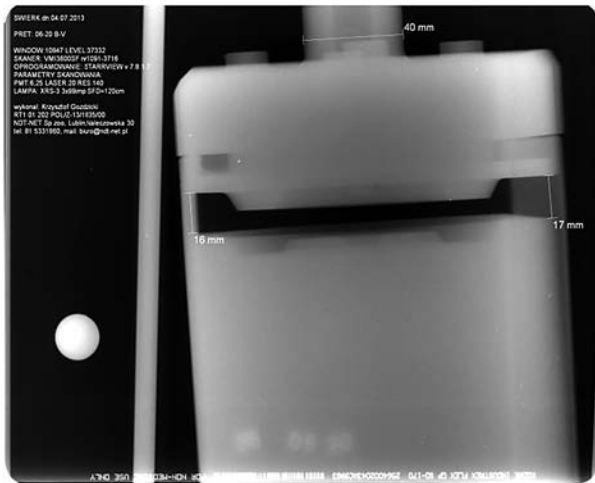
Zapis z płyt obrazowych odczytywano na skanerze CR VMI 3600 SF i rejestrowano w jego pamięci. Po zarejestrowaniu obrazu zapisy na płytach obrazowych usuwano i płyty gotowe do kolejnych naświetleń przenoszono do komory demontażowej reaktora za osłonę ołowianą.

Przeprowadzono w ten sposób badania wszystkich 20. bloków grafitowych.

#### 4. Wyniki badania

Pomiary wielkości szczeliny dylatacyjnej w blokach grafitowych dokonywano na zdjęciach radiograficznych metodą porównawczą.

Początkowo do skalowania układu pomiarowego skanera planowano wykorzystać kulki stalowe o średnicy 18mm (przyklejone do płyt obrazowych 20 x 25 cm i 25 x 30 cm) lub krążek (moneta) o średnicy 22 mm (przyklejony do płyty obrazowej 25 x 30 cm). (Rys. 6).



Rys. 6. Radiogram bloku grafitowego z oznaczoną szczeliną dylatacyjną

Fig. 6. Radiograph of a graphite block with a marked expansion provision width

Po wstępnych próbach, zdecydowano się jednak jako wymiar odniesienia wykorzystać tuleję uchwytu bloku grafitowego o średnicy 40 mm, znajdującą się w górnej jego części. Tuleja zawsze znajdowała się na środku elementu badanego oraz ze względu na swój okrągły kształt dawała jednakowy obraz bez względu na kierunek promieniowania względem płyty obrazowej.

Większy wymiar tulei (40 mm) od kulek stalowych (18 mm) lub monety (22 mm) oraz niezależność obrazu od kierunku promieniowania pozwalała na większą dokładność otrzymywanych wyników pomiarów szczeliny dylatacyjnej w bloku grafitowym.

Na zarejestrowanych zdjęciach za pomocą oprogramowania STARRView v. 7.8.1.7 dokonano pomiaru szczeliny dylatacyjnej w poszczególnych blokach grafitowych.

Minimalne wymiary szczeliny dylatacyjnej oszacowane na poszczególnych zdjęciach bloków po ich długotrwałej eksploatacji wynosiły od 15 mm do 28 mm.

#### 5. Podsumowanie

Uzyskanie czytelnych radiogramów i dobrej widoczności szczeliny dylatacyjnej pomimo istniejącego dodatkowego promieniowania jonizującego pochodzącego od badanych bloków grafitowych potwierdziło prawidłowo dobraną technikę badawczą.

Zastosowanie radiografii cyfrowej z wykorzystaniem metody obróbki obrazu pozwoliło szybko i dokładnie oszacować szerokość szczeliny dylatacyjnej w blokach grafitowych. Pozwoliło również na wykonanych radiogramach dokonać opisu warunków badania.

Oszacowana szerokość minimalnej szczeliny dylatacyjnej wynosiła dla poszczególnych bloków grafitowych od 15mm do 28mm. Wiedza o szerokości szczeliny dylatacyjnej danego bloku grafitowego pozwoli na określenie dopuszczalnego czasu jego eksploatacji oraz na dobór miejsca przyszłego ulokowania bloku. Bloki z małą szczeliną można przesunąć w inne mniej narażone na promieniowanie miejsce.

#### 6. Literatura/References

- [1] Katarzyna Bzymek, Barbara Trzeciak, Tomasz Cetner, Jan Gładysz Reaktor MARIA – Budowa i zastosowanie, NCBJ
- [2] Tadeusz Hilczer; „Energetyka jądrowa- Reaktory jądrowe”, wykład monograficzny, NCBJ
- [3] M J Crick, G.S. Linsley, An Assessment of the Radiological Impact of the Windscale Reactor Fire, Oct., 1957, Nov., 1982 N National Radiological Protection Board (NRPB) Report.
- [4] Bartłomiej Józwiak, Tadeusz Morawski, „Aktualne możliwości zastosowania przemysłowej radiografii komputerowej”, Badania-Nieniszczące-Nr-03-12-2006