

Wojciech Lis*

Laboratorium Badawcze HL LAB Sp. z o.o.

Betatron 30MeV do badań radiograficznych grubościennych odlewów i złączy spawanych stosowany w pracowni akceleratorowej HL LAB w Śremie

Betatron 30MeV for radiographic testing of thick-walled castings and welded joints used at the HL LAB Research Laboratory in Śrem

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono charakterystykę pracowni akceleratorowej. Opisano zasadę działania i parametry techniczne mobilnego betatronu radiograficznego 30MeV stosowanego w pracowni akceleratorowej Laboratorium Badawczego HL LAB w Śremie. Opisano konstrukcję głównych podzespołów funkcjonalnych urządzenia. Przedstawiono przykładowe zdjęcia błon radiograficznych odlewów grubościennych wykonanych betatronem.

Słowa kluczowe: betatron 30MeV; badania RT; odlewy grubościenne; ASTM E186; ASTM E280

1. Pracownia akceleratorowa

Cechy charakterystyczne pracowni akceleratorowej, w której zainstalowany jest betatron (Rys. 1):

- wymiary pracowni: 21,0 m × 13,0 m × 20,0 m (długość × szerokość × wysokość);
- wymiary głównego wejścia do pracowni akceleratorowej: 4,5 m × 5,1 m (szerokość × wysokość);
- waga drzwi osłonowych głównego otworu wejściowego: 63,5 t;
- maksymalna grubość ściany pracowni akceleratorowej: 1,8 m;
- maksymalny DOR suwnicy w pracowni akceleratorowej: 32,0 t;
- tor szynowy o normalnym rozstawie w posadzce pracowni akceleratorowej.

ABSTRACT

The paper presents the characteristics of the accelerator laboratory. It describes the operating principle and technical parameters of the 30MeV mobile radiographic betatron used in the accelerator laboratory of the HL LAB Research Laboratory in Śrem. The design of the main functional components of the device is described. It presents sample images of radiographic films of thick-walled castings made with the betatron.

Keywords: 30MeV betatron; RT testing; thick-walled castings; ASTM E186; ASTM E280



Rys. 1. Widok pracowni akceleratorowej od środka.

Fig. 1. View of the accelerator laboratory from the inside.

2. Ogólny opis Betatronu BRM-30Ś [2]

Betatron BRM-30Ś jest akceleratorem przeznaczonym do badań radiograficznych grubościennych wyrobów stalowych o grubości ścianek od 50 do 350 mm. Może być stosowany również do radiografii wyrobów uranowych, z mas plastycznych, a także do radiografii elementów betonowych i żelazobetonowych. Mobilność urządzenia polega na możliwości operowania wiązką promieniowania X wewnątrz

*Autor korespondencyjny.

E-mail: wojciech.lis@hl-lab.pl

pracowni akceleryacyjnej w przestrzeni o wymiarach $9,0 \times 8,0 \times 3,7$ m za pomocą podnośnika zainstalowanego do suwnicy. Sterując ustawieniami głowicy można łatwo przechodzić z jednej ekspozycji na drugą bez konieczności manipulowania obiektem badanym.

3. Zasada działania betatronu [1, 3]

Betatron jest akceleratorem cyklicznym, w którym elektrony przyspieszone są na torze kołowym przez wirowe pole elektryczne, które powstaje wskutek zmian w czasie pola magnetycznego.

Obwód magnetyczny betatronu ze szczeliną powietrzną, w której odbywa się akceleracja elektronów przedstawia rys. 2. Centralna część obwodu obejmująca szczelinę powietrzną jest symetryczna względem osi Y-Y. Gdy przez cewki wzbudzające obwodu przepływa prąd elektryczny powstaje w nim pole magnetyczne o indukcji B , którego linie są krzywymi zamkniętymi. Zmiana w czasie pola magnetycznego wywołuje powstanie wirowego pola elektrycznego E , którego linie również są krzywymi zamkniętymi. Jeżeli pole magnetyczne w szczelinie powietrznej betatronu jest symetryczne względem osi Y-Y to linie sił związanego z nim wirowego pola elektrycznego są okręgami koncentrycznymi leżącymi w płaszczyznach prostopadłych do osi symetrii pola magnetycznego ze środkiem na tej osi. Wirowe pole elektryczne jest proporcjonalne do szybkości zmian pola magnetycznego. W polu elektromagnetycznym jak na Rys. 2. na elektron poruszający się z prędkością V_e będą działały siły F_e i F_m .

Siła F_e działa na elektron, pole elektryczne, przy tym będzie ona równa iloczynowi natężenia pola E i ładunku elektronu e .

$$F_e = -e \times E \quad (1)$$

Kierunek siły F_e przyspieszającej elektron jest zgodny z kierunkiem natężenia pola elektrycznego, a zwrot jest przeciwny. Elektron, który dokona jednego obiegu wzdłuż okręgu o długości 1,5 m w wirowym polu elektrycznym o natężeniu $0,2 \text{ V/cm}$, co jest bliskie wartościom średnim występującym w betatronie, uzyskuje przyrost energii 30 eV. By uzyskać energię 30 MeV elektron powinien pokonać milion obiegów. Średnia energia jaką może uzyskać elektron w czasie jednego obiegu w betatronie jest ograniczona częstotliwością zmian pola magnetycznego oraz nasyceniem w żelazie obwodu magnetycznego.

Pole magnetyczne działa na elektron siłą F_m , siła ta jest równa iloczynowi indukcji magnetycznej B , szybkości elektronu V_e i ładunku elektronu e .

$$F_m = B \times V_e \times e \quad (2)$$

Wektory V_e i B są do siebie prostopadłe. F_m jest prostopadła do płaszczyzny, w której leżą wektory B i V_e . Pole magnetyczne zakrzywia tor elektronu, nie zmieniając jego energii kinetycznej. W szczególnym przypadku w równomiernym polu magnetycznym elektron porusza się po okręgu koła o promieniu r , dla którego występuje równowaga między siłą odśrodkową określoną zależnością:

$$F_o = m \times V_e^2 / r \quad (3)$$

(gdzie: m – masa elektronu) i siłą F_m , zakrzywiającą tor.

Okrąg spełniający powyższy warunek nazywamy orbitą stabilną.

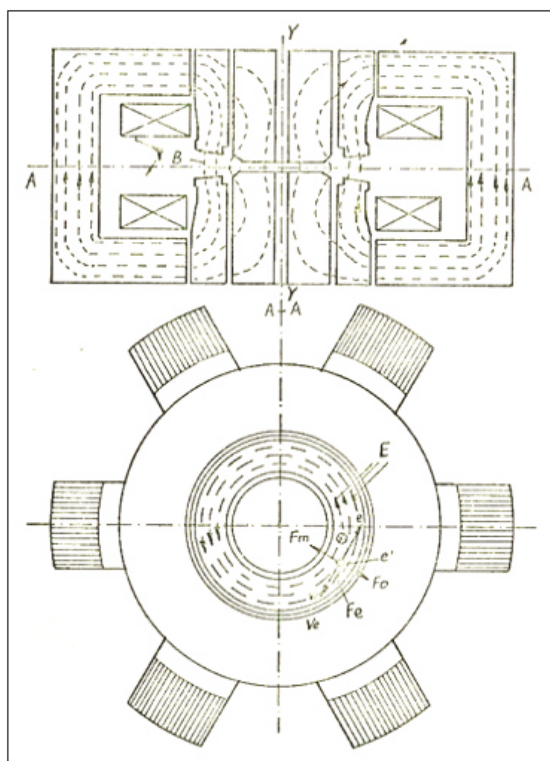
Orbita stabilna może także istnieć w osiowo symetrycznym polu elektromagnetycznym opisanym wyżej. Elektron na tej orbicie winien uzyskiwać przyrosty energii kinetycznej wywołane działaniem pola elektrycznego odpowiednie do przyrosty indukcji magnetycznej na tej orbicie tak, by w każdej chwili był spełniony warunek równowagi między siłą odśrodkową proporcjonalną do masy i kwadratu prędkości i siłą dośrodkową (zakrzywiającą tor) proporcjonalną do indukcji magnetycznej i prędkości.

Uzyskanie orbity stabilnej w osiowo-symetrycznym polu magnetycznym wymaga odpowiedniego doboru przestrzennego rozkładu pola magnetycznego o symetrii osiowej – średnia indukcja magnetyczna B_{sr} wewnątrz obszaru objętego orbitą stabilną musi być dwa razy większa od indukcji lokalnej na tej orbicie B_o , tj.:

$$B_{sr} = 2B_o \quad (4)$$

(warunek 1:2).

Warunek ten nie jest wystarczający dla długotrwałej akceleracji elektronów na orbicie stabilnej, gdyż w przestrzeni próżniowej, w której odbywa się akceleracja są resztki gazów, które powodują wytrącanie elektronów z orbity stabilnej w wyniku zderzeń, a także symetria osiowa pola magnetycznego nie jest idealna. Elektrony wytrącone z orbity stabilnej mogą na nią wrócić, gdy w polu magnetycznym będą istniały siły działające na elektrony wytrącone z orbity stabilnej powodując powrót na tą orbitę. Są to tzw. siły fokalizujące. Siły fokalizujące występują w osiowo-symetrycznym polu magnetycznym w obszarze, w którym



Rys. 2. Schemat obwodu magnetycznego betatronu. [3]

Fig. 2. Diagram of the betatron magnetic circuit. [3]

odbywa się akceleracja, gdy pole magnetyczne w tym obszarze maleje w funkcji promienia r zgodnie z zależnością:

$$B_r = B_o (r_o / r)^n \quad (5)$$

gdzie:

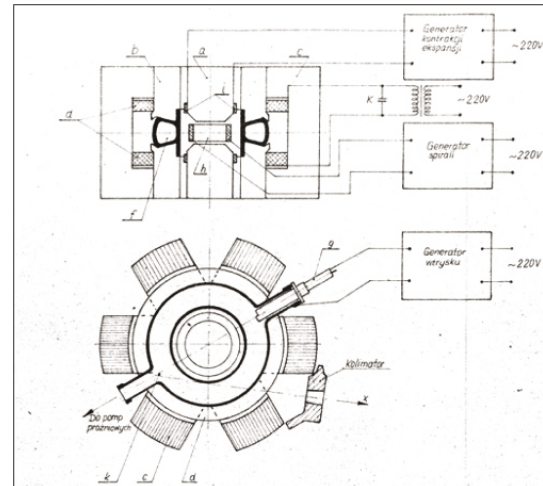
B_r – jest indukcją pola magnetycznego na promieniu r ,

B_o – indukcją na orbicie stabilnej o promieniu r_o ,

n – jest wykładnikiem pola, który powinien być zawarty w przedziale między zerem i jednością.

Znacznie bardziej skomplikowanym procesem fizycznym niż akceleracja na orbicie stabilnej jest wprowadzenie elektronów na tę orbitę – tzw. wychwyt. Betatron pracuje impulsowo. Elektrony uzyskiwane z żarzonej katody w działku elektronowym są w nim wstępnie przyspieszane napięciem impulsowym przyłożonym między anodę i katodę działka, a następnie są wtryskiwane do toroidalnej komory akceleracyjnej stycznie do tzw. orbity chwilowej. Celem ułatwienia wychwytu elektronów w akcelerację, a głównie by ułatwić elektronom ominięcie działka elektronowego po pierwszym obiegu, można wytworzyć w czasie wtrysku dodatkowe impulsowe pole magnetyczne (tzw. pole spirali), które powoduje wzrost pola magnetycznego na orbicie chwilowej (w przypadku, gdy wtrysk odbywa się na zewnątrz orbity stabilnej) szybszy niż wzrost energii elektronu i zmniejszenie promienia orbity chwilowej umożliwiające elektronom ominięcie działka. Przy wtrysku od wewnątrz orbity stabilnej dodatkowe pole spirali winno powodować zmniejszenie pola magnetycznego na orbicie chwilowej. Po wejściu na orbitę stabilną elektrony dokonują wielu obiegów w wirowym polu elektrycznym i są przyspieszane. Po osiągnięciu przez przyspieszone elektrony wymaganej energii sprowadza się je na antykatodę, by w wyniku procesów hamowania otrzymać impuls wysokoenergetycznego promieniowania X. Dokonuje się to w sposób następujący – wytwarza się dodatkowe impulsowe pole magnetyczne, które powoduje, że warunek 1:2 spełniony dla orbity stabilnej, na której odbywała się akceleracja jest teraz spełniony dla orbity np. mniejszej. Elektrony przechodzą na tą nową orbitę i trafiają na umieszczoną tam antykatodę. Proces polegający na kurczeniu orbity nazywamy kontrakcją, natomiast proces odwrotny polegający na zwiększeniu orbity stabilnej ekspansją orbity.

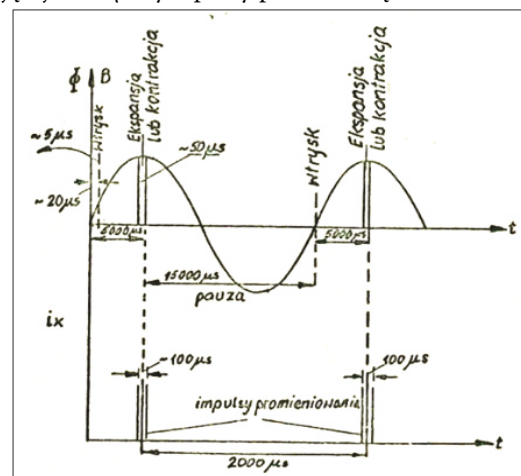
Rys. 3. przedstawia szkic elektromagnesu (obwodu magnetycznego betatronu). Elektromagnes ten składa się z dwóch biegunów wewnętrznych (a), dwóch biegunów zewnętrznych (b) oraz sześciu jarzm (c). Części te wykonane są z blachy transformatorowej sklejonych żywicą epoksydową. Obwód magnetyczny zawiera także dwie cewki wzbudzące (d). Między nabiegunnikami biegunów zewnętrznych znajduje się toroidalna rura akceleracyjna (f), w której utrzymywana jest wysoka próżnia. W rurze akceleracyjnej umieszczone jest działko elektronowe (g) oraz antykatoda (k). W obwodzie magnetycznym są poza tym umieszczone cewki pomocnicze (h) tzw. spirali oraz cewki kontrakcji lub ekspansji (i). Cewki wzbudzące betatronu zasilane są napięciem sinusoidalnie zmiennym (najczęściej o częstotliwości 50 Hz).



Rys. 3. Schemat obwodu magnetycznego betatronu oraz układy pomocnicze. [2]

Fig. 3. Diagram of the betatron magnetic circuit and auxiliary systems.[2]

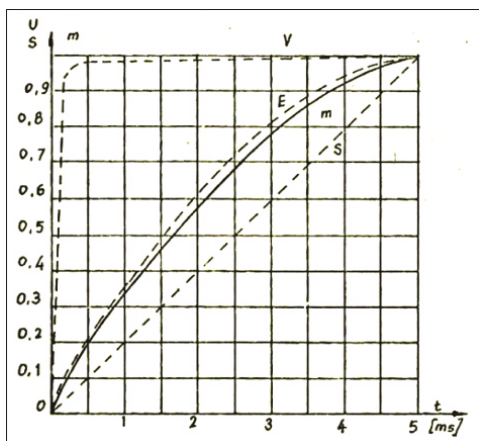
Kolejność procesów fizycznych w cyklu pracy betatronu objaśnia Rys. 4. Indukcja magnetyczna w szczelinie, w której znajduje się rura akceleracyjna zmienia się sinusoidalnie. W kilkadziesiąt mikrosekund po przejściu przez zero indukcji magnetycznej od wartości ujemnych do dodatnich do rury akceleracyjnej wtryskiwana jest przez działko elektronowe porcja elektronów. Tuż przed wtryskiem elektronów do cewki tzw. spirali podawany jest krótkotrwały impuls prądu, który powoduje powstawanie pola magnetycznego wspomagającego wchodzenie elektronów na orbitę stabilną. Następnie elektrony są akcelerowane przez 1/4 okresu (5000 μ s) i osiągają energię maksymalną. Wówczas podaje się impuls prądu do cewki kontrakcji, który powoduje zmniejszenie promienia i sprowadzenie wiązki szybkich elektronów na antykatodę. W wyniku zahamowania elektronów otrzymuje się krótkotrwały impuls promieniowania X. Skurczenie (lub rozszerzenie) orbity można także spowodować wcześniej, gdy energia elektronów przyspieszonych jest mniejsza od maksymalnej. W ten sposób uzyskuje się regulację energii promieniowania. Po pauzie trwającej 1500 μ s cykl pracy powtarza się.



Rys. 4. Objaśnienie cyklu pracy betatronu. [3]

Fig. 4. Explanation of the betatron operating cycle.[3]

Na Rys. 5. pokazano, jak w czasie akceleracji trwającym 5 ms zmieniają się w betatronie 30 MeV – energia elektronów (E), masa (m), prędkość (V) oraz droga przebyta (S). Elektrony wtryskiwane z energią 50 keV mają prędkość około 0,5 prędkości światła i masę bliską spoczynkowej. Po akceleracji do energii 30 MeV elektrony uzyskują prędkość 0,999 prędkości światła i masę 60 razy większą od masy spoczynkowej. W czasie akceleracji elektrony przebywają drogę około 1500 km.



Rys. 5. Zmiana energii elektronów (E), masy (m), prędkości (V) oraz drogi przebytej (S) w czasie akceleracji. [3]

Fig. 5. Change in electron energy (E), mass (m), velocity (V) and distance travelled (S) during acceleration. [3]

4. Parametry techniczne urządzenia [3]

4.1 Parametry podstawowe akceleratora

- producent: Instytut Badań Jądrowych POLATOM (Świerk 1977);
- energia promieniowania $\rightarrow$ 30 MeV;
- maksymalna grubość badania wyrobu metalowego: 350 mm;
- moc dawki promieniowania w osi wiązki w odległości 1m od antykathody $\rightarrow$ 0,43 mA/kg (100R/min);
- stabilizacja nastawionej wartości energii z dokładnością $\pm$ 50 keV;
- próżnia w komorze akceleracyjnej $\rightarrow$ $2 \div 5 \times 10^{-7}$ Tr;
- zasilanie z sieci niskiego napięcia 380/220 V, dopuszczalne wahania napięcia zasilania $\pm$ 2,5%;
- wymiary gabarytowe głowicy ruchomej $2,2 \times 1,9 \times 1,9$ m;
- ciężar głowicy ruchomej akceleratora z konstrukcją do przenoszenia $\rightarrow$ 5500 kg;
- chłodzenie akceleratora wodne i powietrzne wydatek wody chłodzącej około 350 l/h;
- wydatek powietrza chłodzącego – 3 wentylatory każdy o wydatku 18 m³/min;
- całkowity ciężar głowicy (wraz z ramą i widelcem): 5 500 kg;
- wymiary gabarytowe głowicy z widelcem: $2,0 \times 2,2$ m.

4.2 Parametry wiązki promieniowania

- kąt stożkowy wiązki promieniowania $\rightarrow$ 11°;
- wymiary pola napromieniowania w odległości:
- 100 cm $\rightarrow$ $\varnothing$ 19,0 cm,

- 150 cm $\rightarrow$ $\varnothing$ 28,5 cm,
- 200 cm $\rightarrow$ $\varnothing$ 38,0 cm,
- 250 cm $\rightarrow$ $\varnothing$ 47,5 cm;
- wymiary ogniska wiązki $\rightarrow$ $0,2 \times 0,3$ mm;
- kolimator okrągły stożkowy wyposażony w filtry miedziane o osłabieniu 0,3 dla energii 30 MeV – 0,3;
- tło promieniowania poza wiązką nie przekracza 1% promieniowania w wiązce;
- oś wiązki promieniowania X symulowana wiązką światła.

4.3 Parametry ruchowe głowicy [4]

- głowica jest przemieszczona w polu o wymiarach: 9,0 m $\times$ 8,0 m $\times$ 3,7 m;
- obrót głowicy w osi poziomej: 120° ($+30^\circ$ do -90°);
- obrót głowicy w osi pionowej: 150° ($\pm 75^\circ$).

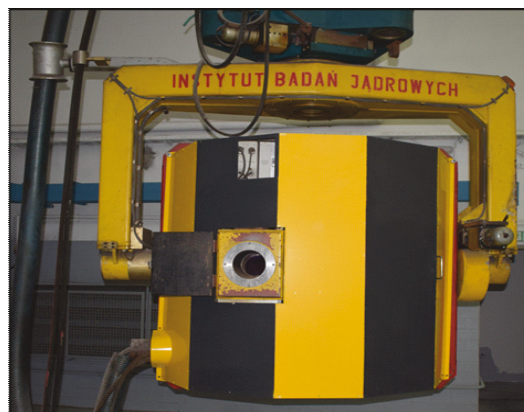
4.4 Warunki pracy

- temperatura pracy: $+15 \div 30^\circ\text{C}$;
- wilgotność względna otoczenia: do 75 %;
- betatron jest przystosowany do pracy ciągłej ośmiogodzinnej;
- czas nagrzewania przed pierwszym uruchomieniem: 15 min.

5. Podzespoły funkcjonalne betatronu [3]

Betatron radiograficzny składa się z następujących podzespołów funkcjonalnych:

- głowica betatronu (Rys. 6 i 7), która jest podwieszona przy pomocy podnośnika i suwnicy na hali akceleratorowej. Głowica betatronu obejmuje obwód magnetyczny betatronu, podzespoły elektroniczne i elektryczne oraz wkład próżniowy i kolimator. Głowica betatronu jest podzespołem, w którym generowane jest promieniowanie X. Na suwnicy głowicy betatronu znajdują się układy zasilania i sterowania napędów głowicy betatronu. Na głowicy betatronu zainstalowany jest układ zabezpieczenia sygnalizacji i sterowania betatronu.

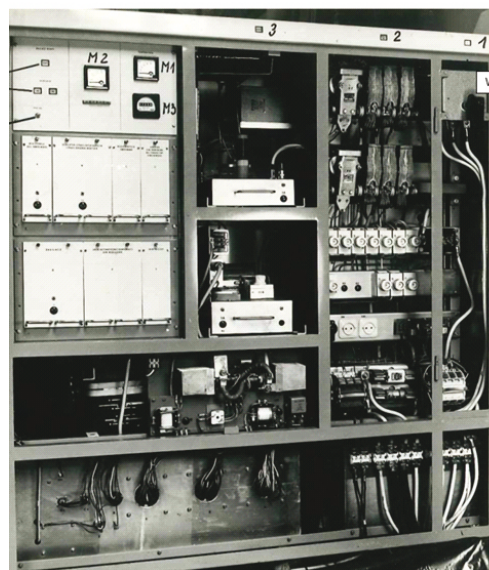


Rys. 6. Głowica betatronu (z osłonami) widok z przodu.

Fig. 6. Betatron head (with shields), front view.

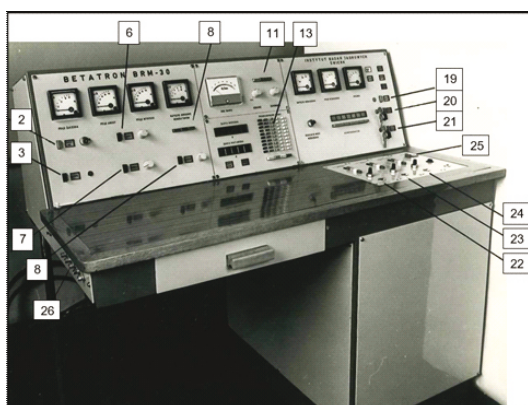


Rys. 7. Głowica betatronu (z osłonami) widok z tyłu.
Fig. 7. Betatron head (with shields), rear view.



Rys. 9. Szafa sterownicza betatronu.
Fig. 9. Betatron control cabinet.

- pulpit sterowniczy, z którego steruje się wszystkimi wielkościami fizycznymi potrzebnymi do pracy betatronu, umożliwia sterowanie i kontrolę pracy betatronu. Znajdują się na nim wszystkie elementy nastawcze i przyrządy pomiarowe konieczne do prowadzenia pracy przy pomocy betatronu (Rys. 8).



Rys. 8. Pulpit sterowniczy betatronu BRM-30Ś.
Fig. 8. Control panel of the BRM-30Ś betatron.

- szafa sterownicza - zawiera rozdzielnię napięcia zasilającego 3×380V, 50 Hz oraz styczniki i przekaźniki włączające napięcie zasilające poszczególne podzespoły i obwód magnetyczny betatronu. Ponadto w szafie sterowniczej znajdują się wszystkie przekaźniki systemu zabezpieczeń i sygnalizacji ostrzegawczej oraz bloki układu zasilającego pompę jonowo – sorpcyjną, bloki układów pomocniczych, tyrystorowy stabilizator napięcia zasilającego obwód magnetyczny i generator kontrakcji z zasilaczem. W szafie sterowniczej umieszczono również miernik napięcia zasilającego, miernik temperatury wody chłodzącej obwód magnetyczny oraz licznik czasu pracy betatronu. Połączenie szafy sterowniczej z pulpitem i głowicą betatronu dokonane jest kablami wielożyłowymi zakończonymi odpowiednimi złączami.

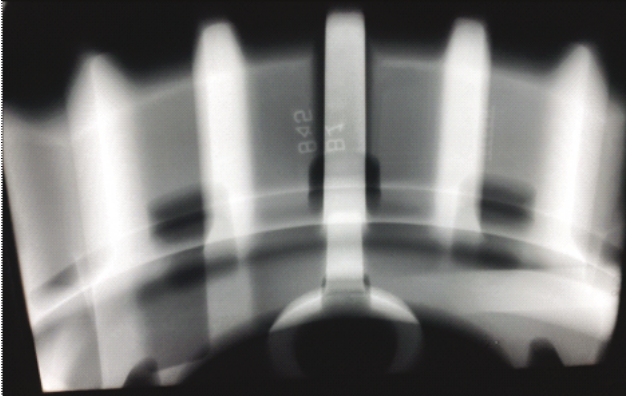
- zespół regulacji położenia głowicy – głowicę betatronu podwieszono przy pomocy podnośnika trójkolumnowego do suwnicy wyposażonej w wózek. Dzięki takiej konstrukcji można przemieszczać głowicę betatronu w trzech kierunkach, przy czym konstrukcja podnośnika ogranicza do minimum wahania głowicy przy przemieszczaniu poziomym dzięki dużej sztywności. Rozmieszczenie elementów układu pokazano na Rys. 10.. Układ sterujący, dwa nawrotne regulatory obrotów oraz układ prostowniczy zasilający hamulec elektromagnetyczny umieszczone są we wspólnym bloku BS na wózku suwnicy. Pozostałe elementy zespołu regulacji położenia głowicy umieszczone są na widelcu oraz ramie. Sterowanie wszystkich napędów głowicy odbywa się z kasy sterowniczej podwieszonej pod suwnicą. Przewidziano także możliwość ręcznego obracania głowicy względem jej osi poziomej i pionowej.



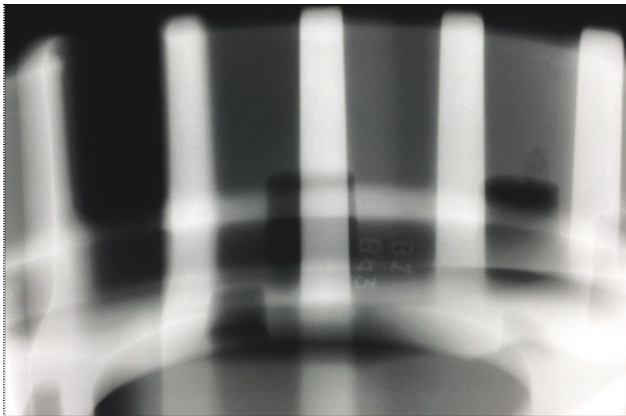
Rys. 10. Rozmieszczenie elementów zespołu regulacji głowicy.
Fig. 10. Layout of the head adjustment assembly components.

6. Przykładowe błony radiograficzne z betatronu

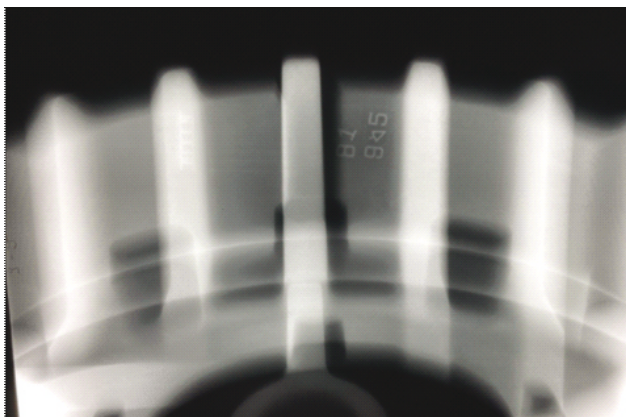
Poniżej przedstawiono obrazy błon radiograficznych wykonanych betatronem BRM-30Ś z negatospoku utrwalone aparatem cyfrowym (Rys. 11-19).



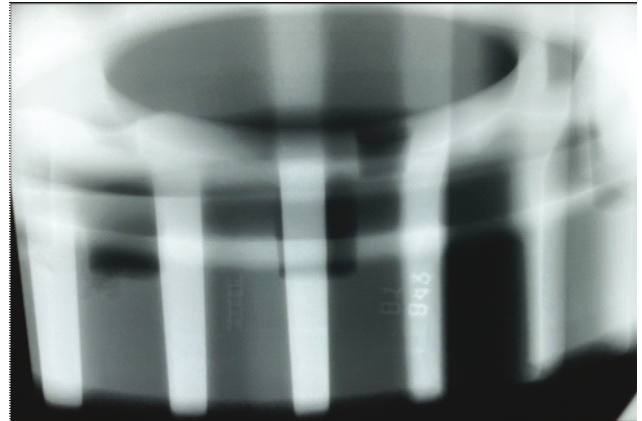
Rys.11. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 11. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.



Rys.12. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 12. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.



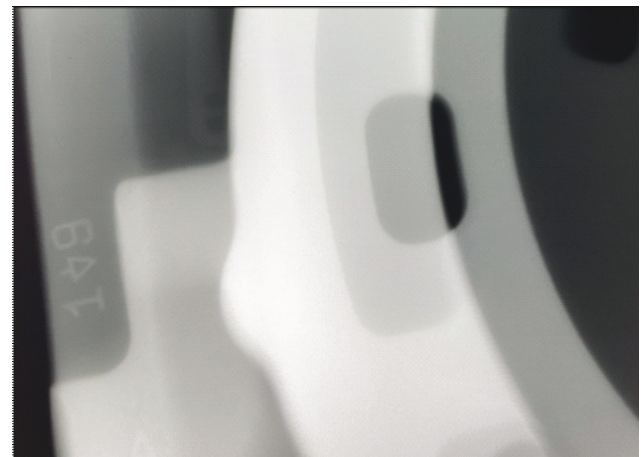
Rys.13. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 13. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.



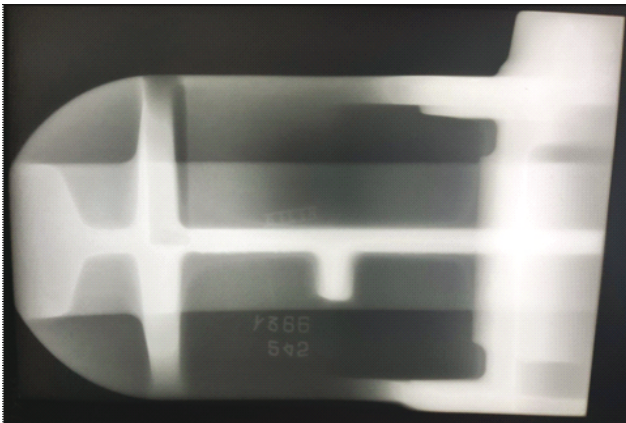
Rys.14. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 14. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.



Rys.15. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 15. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.

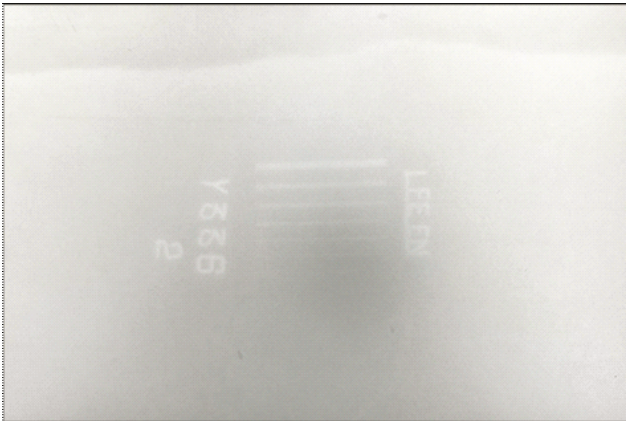


Rys.16. Obraz radiogramu obudowy wirnika odlew żeliwny.
Fig. 16. Radiograph image of the rotor housing, cast iron.



Rys.17. Obraz radiogramu łapy maźnicy kolejowej odlew z żeliwa sferoidalnego. **) Błona udostępniona przez PGO S.A. Odlewnia Żeliwa Oddział w Śremie.

Fig. 17. Radiograph image of a railway axle box, cast from ductile iron. **) Film provided by PGO S.A. Iron Foundry Branch in Śrem.



Rys.18. Obraz radiogramu tulei odlew żeliwny. **) Błona udostępniona przez PGO S.A. Odlewnia Żeliwa Oddział w Śremie.

Fig. 18. Radiograph image of a cast iron sleeve **) Film provided by PGO S.A. Iron Foundry Branch in Śrem.



Rys.19. Obraz radiogramu koła zamachowego odlew żeliwny. **) Błona udostępniona przez PGO S.A. Odlewnia Żeliwa Oddział w Śremie.

Fig. 19. Radiograph image of a cast iron flywheel. **) Film provided by PGO S.A. Iron Foundry Branch in Śrem.

7. Literatura

- [1] J. Janiczek, R. Kielsznia, M. Wolski, Zastosowanie betatronu do kontroli grubościennych spoin i odlewów stalowych Instytut Badań Jądrowych, Raport nr INR-1204/II/B, Warszawa 1970.
- [2] R. Kielsznia, J. Olszewski, Betatron do badań radiograficznych Instytut Badań Jądrowych, Raport nr INR 1795/II/B/B, Warszawa 1978.
- [3] R. Kielsznia, J. Olszewski, E. Jankowski, B. Soczówka, O. Kalinowski, Dokumentacja techniczno-ruchowa betatronu radiograficznego typ BRM-30Ś: Tom I – Opis urządzenia, Instytut Badań Jądrowych, Zakład Doświadczalny Aparatury Unikalnej, Zakład Fizyki Ciała Stałego, Świerk 1977.
- [4] O. Kalinowski, Dokumentacja techniczna podnośnika podsuwnicowego Betatronu BRM-30Ś, Instytut Badań Jądrowych, Zakład Doświadczalny Aparatury Unikalnej, Świerk 1974.