

**DEGRADACJA WŁASNOŚCI CIEPLNYCH, MECHANICZNYCH I
ELEKTRYCZNYCH IZOLACJI KABLI I CEWEK
NADPRZEWODNIKOWYCH MAGNESÓW STOSOWANYCH W
AKCELERATORACH**

**DEGRADATION OF THERMAL, MECHANICAL AND ELECTRICAL
PROPERTIES OF CABLES AND COILS INSULATION IN SUPERCONDUCTING
MAGNETS USED IN ACCELERATORS**

Mgr inż. Piotr Bogdan

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski

STRESZCZENIE

Wzrost świetlności wiązki w akceleratorze LHC w CERN do wartości $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ będzie wymagał zwiększenia indukcji w magnesach kwadrupolowych do 13 T. Zostanie to zrealizowane poprzez zmianę nadprzewodnika z NbTi na Nb₃Sn. Izolacja elektryczna cewek magnesu z Nb₃Sn będzie wykonywana metodą „wind and react”, w której owinięcie kabla włóknem szklanym przeprowadza się przed procesem przereagowania w temperaturze 650°C. Próżniowa impregnacja żywicą następuje po obróbce cieplnej. Tak wykonane magnesy będą pracowały w rejonach o silnym promieniowaniu jonizującym, przez co w okresie dziesięcioletnim ich izolacja elektryczna pochłonie dawkę dochodzącą do 50 MGy [2].

Celem niniejszej pracy jest analiza mechanizmów degradacji radiacyjnej i ocena przydatności materiałów izolacyjnych, które mają zostać zastosowane w kwadrupolach akceleratora LHC. Wykonano badania porównawcze przed i po napromieniowaniu dawką 50 MGy. Określono wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałość dielektryczną w ciekłym azocie oraz wykonano obserwację mikrostruktury zmian radiacyjnych. Wyznaczono przewodność cieplną i opór Kapicy w zakresie temperatur 1,5 – 2 K, jak i wskazano kierunek zmian tych własności wywołanych promieniowaniem jonizującym. Wyniki przeprowadzonych badań w syntetyczny sposób przedstawia tabela 1. Przebadano następujące materiały: Mix 71, Mix 237, LARP i LONZA CE.

Tabela 1. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań

Nienapromieniowany	Mix 71	Mix 237	LARP	LONZA CE
Napromieniowany				
Wytrzymałość na rozciąganie	422,8 MPa 4 MPa	203,3 MPa 15 MPa	359,8 MPa 123 MPa	357,3 MPa 219 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	18% 2,1%	11,5% 0,8%	15,2% 1,5%	17,6% 3,3%
Wytrzymałość dielektryczna	>85 kV/mm 38,5 kV/mm	78,6 kV/mm 40,6 kV/mm	78,5 kV/mm 53,9 kV/mm	86,9 kV/mm 71,8 kV/mm
Przewodność cieplna	$25,8 \cdot 10^{-3} T - 12,2 \cdot 10^{-3}$	$34,2 \cdot 10^{-3} T - 16,4 \cdot 10^{-3}$	$35,8 \cdot 10^{-3} T - 31,1 \cdot 10^{-3}$	$26,8 \cdot 10^{-3} T - 9,6 \cdot 10^{-3}$
Opór Kapicy	$1462 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,86}$	$3057 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,79}$	$2997 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,79}$	$4114 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,73}$
Puchnięcie po napromieniowaniu	32,9%	4,0%	18,9%	2,8%

Z grupy przebadanych laminatów wyłoniono dwa, zdolne przed i po napromieniowaniu spełnić postawione im minimalne wymagania: wytrzymałość na rozciąganie 40 MPa i wytrzymałość dielektryczna 5 kV/mm [1, 3]. Wykazano tym samym, że istnieją żywice, które ze wzmocnieniem włóknem szklanym typu S, mogą być zastosowane jako izolacja elektryczna kwadrupoli w LHC produkowanych metodą „wind and react”. W obrębie badanej grupy zaobserwowano ogólną zasadę, z której wynika, że promieniowanie ma największy wpływ na spadek wytrzymałości mechanicznej, a następnie elektrycznej.

ABSTRACT

Beam luminosity increase in the LHC accelerator in CERN above $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ will require the induction of quadrupole magnets to be higher than 13 T. This can be achieved by replacing the superconductor with Nb_3Sn . Electrical insulation of magnet coils will be performed by means of the “wind and react” method, where the wire is wound with glass fibre before its reaction in the temperature of 650°C. Vacuum impregnation is performed after heat treatment. Magnets produced in this technology will be operated in areas subject to strong ionising radiation. Consequently, their electrical insulation will absorb the dose of 50 MGy in the period of 10 years [2].

The purpose of this thesis is to analyse the radiation degradation mechanisms and to evaluate the usability of the insulation materials to be used for the production of quadrupoles for the LHC accelerator. Comparative tests were carried out in liquid nitrogen before and after radiation with 50 MGy. The tensile and dielectric strength was determined and the microstructure of radiation changes was analysed. The thermal conduction and Kapitza resistance in the temperature range of 1.5 – 2 K were determined. The nature of changes in the above properties caused by ionising radiation was discussed. The results of the conducted tests are shown in Table 1. The following materials were examined: Mix 71, Mix 237, LARP i LONZA CE.

Table 1. Test results summary

Unirradiated / Irradiated	Mix 71	Mix 237	LARP	LONZA CE
Ultimate Tensile Strength	422.8 MPa 4 MPa	203.3 MPa 15 MPa	359.8 MPa 123 MPa	357.3 MPa 219 MPa
Elongation at Breakdown	18% 2.1%	11.5% 0.8%	15.2% 1.5%	17.6% 3.3%
Dielectric Strength	>85 kV/mm 38.5 kV/mm	78.6 kV/mm 40.6 kV/mm	78.5 kV/mm 53.9 kV/mm	86.9 kV/mm 71.8 kV/mm
Thermal Conductivity	$25.8 \cdot 10^{-3}T - 12.2 \cdot 10^{-3}$	$34.2 \cdot 10^{-3}T - 16.4 \cdot 10^{-3}$	$35.8 \cdot 10^{-3}T - 31.1 \cdot 10^{-3}$	$26.8 \cdot 10^{-3}T - 9.6 \cdot 10^{-3}$
Kapitza Resistance	$1462 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1.86}$	$3057 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1.79}$	$2997 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1.79}$	$4114 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1.73}$
Radiation Swelling	32.9%	4.0%	18.9%	2.8%

From all studied laminates, two were selected as fulfilling the minimum requirements before and after radiation: tensile strength of 40 MPa and dielectric strength of 5 kV/mm [1, 3]. This proves that some resins, with S-glass fibre reinforcement, can be used as electrical insulation for the LHC quadrupoles produced by means of the “wind and react” method. A general principle was developed for the studied group of laminates, indicating that radiation has the strongest effect on the decrease in mechanical strength and the second strongest – on the decrease in electrical strength.

Podpis doktoranta

25.08.2016 P. v. Bogdan

Podpis promotora

A. P. v. [Signature]

