

LESZEK MALINOWSKI

**STABILNOŚĆ TERMICZNA
TECHNICZNYCH NADPRZEWODNIKÓW**

Szczecin 1991

Recenzenci

Edward Kostowski
Bogumił Staniszewski

Opracowanie redakcyjne

Jolanta Orkisz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Szczecińskiej
z dnia 14.11.1991 r.

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ

Wyd. I. Nakład 200+23 egz. Ark. wyd. 6,2. Ark. druk. 6,3

Papier offsetowy kl. III 70g B₁. Oddano do druku 14.11.1991 r.

Druk ukończono w styczniu 1992 r. Zamówienie nr 378/91

ZAKŁAD POLIGRAFICZNY POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ "ZAPOL"
71-062 Szczecin, al. Piastów 42 a

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	6
WAŻNIEJSZE OZNACZENIA UŻYTE W PRACY	8
1. WPROWADZENIE	12
1.1. Krótkie kalendarium rozwoju nadprzewodnictwa	12
1.2. Praktyczne wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa	14
1.3. Charakterystyka technicznych nadprzewodników	14
1.3.1. Materiały	14
1.3.2. Konstrukcja technicznych nadprzewodników	14
1.3.3. Właściwości cieplne technicznych nadprzewodników w niskich temperaturach	16
1.3.3.1. Przewodność cieplna	16
1.3.3.2. Pojemność cieplna	18
1.4. Stabilizacja nadprzewodników	20
1.4.1. Wstęp	20
1.4.2. Przyczyny niestabilności nadprzewodników	20
1.4.3. Metody stabilizacji	22
1.5. Sposoby chłodzenia elektromagnesów nadprzewodzących	23
1.6. Podstawowe równania wykorzystywane do opisu zjawisk cieplnych w technicznych nadprzewodnikach	25
1.6.1. Wstęp	25
1.6.2. Równanie przewodnictwa cieplnego	25
1.6.3. Charakterystyka chłodzenia	26
1.6.4. Charakterystyka wewnętrznego źródła ciepła	28
1.7. Parametry stabilności termicznej nadprzewodników	30
1.7.1. Wstęp	30
1.7.2. Graniczny prąd dla przewodu stabilnego całkowicie	30
1.7.3. Graniczny prąd i graniczna długość strefy oporowej dla przewodu stabilnego częściowo	31
1.7.4. Energia krytyczna przewodu	32
2. CEL PRACY	35
3. WKŁAD AUTORA W ROZWÓJ TEORII TERMICZNEJ	

STABILNOŚCI NADPRZEWODNIKÓW	36
3.1. Równanie przewodnictwa cieplnego dla procesów szybkozmiennych	36
3.1.1. Wstęp	36
3.1.2. Bezwładne źródło ciepła	36
3.1.3. Nowe równanie przewodnictwa cieplnego	37
3.2. Analityczna metoda wyznaczania minimalnego prądu propagacji strefy oporowej (MPC)	37
3.2.1. Wstęp	37
3.2.2. Równania podstawowe	38
3.2.3. Minimalny prąd propagacji	40
3.2.4. Obliczenia i porównanie wyników z wynikami eksperymentów	41
3.2.5. Wnioski	44
3.3. Analityczna metoda wyznaczania energii krytycznej w oparciu o teorie minimalnej strefy propagacji	44
3.3.1. Wstęp	44
3.3.2. Ogólna zależność na przyrost entalpii w strefie oporowej	45
3.3.3. Energia krytyczna dla modelu uwzględniającego wrzenie pęcherzykowe i błonowe przy stałych parametrach termofizycznych przewodu	46
3.3.3.1. Opis modelu	46
3.3.3.2. Gradient bezwymiarowej temperatury w strefie oporowej	48
3.3.3.3. Bezwymiarowa energia krytyczna	48
3.3.4. Energia krytyczna dla modelu ze stałymi parametrami termofizycznymi przewodu i stałym współczynnikiem wnikania ciepła	49
3.3.5. Wyniki obliczeń	50
3.3.6. Wnioski	52
3.4. Analityczne metody wyznaczania energii krytycznej przewodu uwzględniające nieustalona wymianę ciepła	55
3.4.1. Nadprzewodnik izolowany cieplnie	55
3.4.1.1. Wstęp	55
3.4.1.2. Model matematyczny strefy oporowej	56

3.4.1.3.	Analityczne rozwiązanie równania przewodnictwa cieplnego	59
3.4.1.4.	Energia krytyczna przewodu	60
3.4.1.4.1.	Uwagi ogólne	60
3.4.1.4.2.	Rozległe lub długotrwałe zakłócenia	61
3.4.1.4.3.	Punktowe, krótkotrwałe zakłócenia	65
3.4.1.5.	Wnioski	67
3.4.2.	Nadprzewodnik w bezpośrednim kontakcie z chłodziwem	69
3.4.2.1.	Wstęp	69
3.4.2.2.	Model matematyczny strefy normalnej	69
3.4.2.3.	Analityczne rozwiązanie modelu	73
3.4.2.4.	Obliczenia oraz porównanie wyników z wynikami ekspery- mentalnymi i obliczeń numerycznych	75
3.4.2.5.	Wnioski	78
3.5.	Numeryczny model cieplny strefy oporowej	79
3.5.1.	Wstęp	79
3.5.2.	Równania podstawowe	79
3.5.3.	Właściwości cieplne przewodu	80
3.5.4.	Wnikanie ciepła do chłodziwa	80
3.5.5.	Metoda obliczeń	81
3.5.6.	Wyniki obliczeń i ich dyskusja	83
3.5.7.	Wnioski	87
4.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	89
	LITERATURA	91
	SUMMARY	98

STRESZCZENIE

Jedną z najważniejszych właściwości technicznych nadprzewodników jest ich stabilność, czyli możliwość samoczynnego powrotu przewodu do stanu bezoporowego po utracie właściwości nadprzewodzących przez część lub cały przewód w wyniku lokalnej dyssypacji energii w przewodzie. Stabilność nadprzewodnika ilościowo określają parametry graniczne, zwane wskaźnikami lub parametrami stabilności, wyznaczające obszar bezpiecznej (stabilnej) pracy nadprzewodnika. Parametry stabilności są wykorzystywane podczas projektowania i eksploatacji urządzeń nadprzewodnikowych.

We wprowadzającej części pracy, po krótkim omówieniu konstrukcji i właściwości technicznych nadprzewodników, scharakteryzowano najczęściej stosowane parametry stabilności oraz sposoby ich wyznaczania.

Zasadniczą część pracy rozpoczęto od sformułowania nowego równania przewodnictwa cieplnego, które może być wykorzystywane do opisu szybkozmiennych zjawisk cieplnych w nadprzewodnikach. Równanie to uwzględnia skończoną prędkość strumienia ciepła oraz relaksację wewnętrznego źródła ciepła.

W dalszej części pracy kolejno omówiono opracowane przez autora metody analityczne wyznaczania parametrów stabilności, przede wszystkim najczęściej wykorzystywanego z nich - energii krytycznej przewodu.

Przedstawiona analityczna metoda wyznaczania minimalnego prądu propagacji uwzględnia pełną charakterystykę wrzenia chłodziwa oraz umożliwia wykonanie obliczeń dla dowolnej zależności przewodności cieplnej przewodu od temperatury.

Zaproponowana ogólna metoda analityczna wyznaczania energii krytycznej jako przyrostu entalpii w strefie normalnej obejmuje zarówno quasi-stacjonarną minimalną strefę propagacji, jak i niestacjonarne strefy oporowe. Metoda ta uwzględnia wrzenie pęcherzykowe i błonowe chłodziwa.

Opracowana analityczna metoda obliczania energii krytycznej przewodu adiaternicznego uwzględnia nieustalone przewodzenie ciepła w przewodzie, zmienność współczynnika przewodzenia ciepła i pojemności cieplnej przewodu z temperatura oraz skończony wymiar i skończony czas działania zakłócenia energetycznego.

Podana analityczna metoda wyznaczania energii krytycznej przewodu będącego w bezpośrednim kontakcie z chłodziwem uwzględnia nieustaloną wymianę ciepła w przewodzie i chłodziwie oraz skończony wymiar i skończony czas działania zakłócenia.

W końcowej części pracy omówiono niestacjonarny model numeryczny strefy normalnej uwzględniający ścisłą zależność przewodności i pojemności cieplnej przewodu od temperatury, strefę podziału prądu, nieustalone wnikanie ciepła do chłodziwa oraz nieliniowość charakterystyki wrzenia chłodziwa w stanie ustalonym.

W pracy przeprowadzono również badanie wpływu podstawowych wielkości charakteryzujących nadprzewodnik i warunki jego pracy na wartość parametrów stabilności zaproponowanymi metodami analitycznymi i metodami numerycznymi wyciągając szereg ogólnych wniosków. Dokonano także porównania wyników obliczeń własnych z wynikami pomiarów i obliczeń zaczerpniętymi z literatury stwierdzając w większości przypadków ich dobra zgodność.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA UŻYTE W PRACY

- a - dyfuzyjność cieplna, cm^2/s
- a - efektywna pojemność cieplna warstwy pary, $\text{J}/(\text{cm}^2\text{K})$
- A - pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodu, cm^2
- A_s - pole powierzchni przekroju poprzecznego materiału normalnego, cm^2
- B - indukcja magnetyczna, T
- c - pojemność cieplna, $\text{J}/(\text{cm}^3\text{K})$
- c - pojemność cieplna przewodu, $\text{J}/(\text{cm}^3\text{K})$
- c_n - pojemność cieplna nadprzewodnika, $\text{J}/(\text{cm}^3\text{K})$
- c_s - pojemność cieplna materiału normalnego, $\text{J}/(\text{cm}^3\text{K})$
- E - ciepło odprowadzone do chłodziwa przypadające na 1cm^2 powierzchni bocznej przewodu, J/cm^2
- E_a - energia potrzebna do ogrzania odcinka przewodu o długości $2l$ do temperatury T_{c1} , J
- E_c - energia krytyczna przewodu, J
- E_h - przyrost entalpii w strefie oporowej, J
- E_i - energia zakłócenia energetycznego, J
- f - udział objętościowy materiału normalnego w przewodzie
- g - kwadrat gradientu temperatury w MPZ, K^2/cm^2
- G - gęstość strumienia ciepła Joule'a w odniesieniu do bocznej powierzchni przewodu, W/cm^2
- G_i - gęstość strumienia ciepła pochodzącego z dyssypacji energii zakłócenia, W/cm^2
- G_m - maksymalna wartość $G(T)$ - cały prąd w matrycy i stabilizatorze, W/cm^2
- h - współczynnik wnikania ciepła, $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$
- h_s - współczynnik wnikania ciepła dla wrzenia stacjonarnego, $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$
- h_{sf} - współczynnik wnikania ciepła dla ustalonego wrzenia błonowego, $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$

- h_{sn} - współczynnik wnikania ciepła dla ustalonego wrzenia pęcherzykowego, $W/(cm^2K)$
 h_{in} - współczynnik wnikania ciepła dla nieustalonego wrzenia pęcherzykowego, $W/(cm^2K)$
 I - całkowity prąd transportowany przewodem, A
 I_c - prąd krytyczny nadprzewodnika dla $T = T_o$, A
 I_s - prąd w stabilizatorze, A
 I_{MP} - minimalny prąd propagacji strefy normalnej, A
 j - bezwymiarowy prąd
 J - gęstość prądu, A/cm^2
 k - przewodność cieplna przewodu, $W/(cmK)$
 k_s - przewodność cieplna materiału normalnego, $W/(cmK)$
 k_n - przewodność cieplna nadprzewodnika, $W/(cmK)$
 $2l$ - długość odcinka przewodu, na który działa zakłócenie energetyczne, cm
 l_{MPZ} - długość minimalnej strefy propagacji, cm
 L_o - liczba Lorenza, V^2/K^2
MQE - energia krytyczna przewodu, J
 P - obwód zwilżony przewodem, cm
 q_v - wydajność wewnętrznego źródła ciepła (statyczna), W/cm^3
 q_{vd} - dynamiczna wydajność wewnętrznego źródła ciepła, W/cm^3
 Q - gęstość strumienia ciepła oddawanego do chłodziwa, W/cm^2
 Q_s - gęstość ustalonego strumienia ciepła oddawanego do chłodziwa, W/cm^2
 Q_t - gęstość nieustalonego strumienia ciepła oddawanego do chłodziwa, W/cm^2
 t - czas, s
 t_i - czas działania zakłócenia energetycznego, s
 t_k - czas relaksacji gęstości strumienia ciepła, s
 t_q - czas relaksacji wydajności wewnętrznego źródła ciepła, s
 t_1 - czas trwania nieustalonego wrzenia pęcherzykowego, s
 T - temperatura, K
 T_c - temperatura krytyczna nadprzewodnika dla zerowego prądu, K

- T_d - temperatura Debye'a, K
 T_{c1} - temperatura krytyczna dla danego prądu, czyli temperatura początku podziału prądu, K
 T_m - najwyższa temperatura w minimalnej strefie propagacji, K
 T_o - temperatura chłodziwa, K
 $T_1(0,t)$ - maksymalna temperatura w strefie normalnej dla danego czasu, K
 T_{1m} - temperatura graniczna, K
 x - współrzędna liniowa wzdłuż przewodu, cm
 X - bezwymiarowa współrzędna wzdłuż przewodu
 y - bezwymiarowy czas w splocie funkcji

Litery greckie

- α - kryterium stabilności Stekly'ego
 α - bezwymiarowy parametr
 β - bezwymiarowy parametr
 γ - bezwymiarowy parametr
 ΔT - różnica temperatur przewodu i chłodziwa, $T - T_o$, K
 ε_a - bezwymiarowa energia potrzebna do ogrzania odcinka przewodu o długości $2l$ do temperatury T_{c1}
 ε_c - bezwymiarowa energia krytyczna
 ε_h - bezwymiarowy przyrost entalpii w strefie oporowej
 ε_i - bezwymiarowa energia zakłócenia
 ε_{MPZ} - bezwymiarowy przyrost entalpii w minimalnej strefie propagacji
 ε_{TPZ} - minimalny przyrost entalpii w nieustalonej strefie oporowej
 κ - kwadrat bezwymiarowego gradientu temperatury
 Θ - bezwymiarowa temperatura
 Θ - odpowiednik bezwymiarowej temperatury, wzór (3.53a)
 Θ_{1m} - bezwymiarowa temperatura graniczna
 ρ - oporność właściwa stabilizatora, Ωcm
 τ - bezwymiarowy czas (liczba Fouriera)

- τ_i - bezwymiarowy czas działania zakłócenia energetycznego
 τ_m - bezwymiarowy czas, po którym $\Theta_1(0,\tau)$ osiąga wartość Θ_{1m}
 ϕ - bezwymiarowy parametr
 ψ - bezwymiarowy parametr

Indeksy

- c - dotyczy parametrów (wielkości) krytycznych
 i - dotyczy impulsu zakłócającego
 sr - dotyczy wartości średniej

Skróty użyte w pracy

- MPC - minimalny prąd propagacji
MPZ - minimalna strefa propagacji
MQE - energia krytyczna przewodu
TPZ - nieustalona strefa oporowa

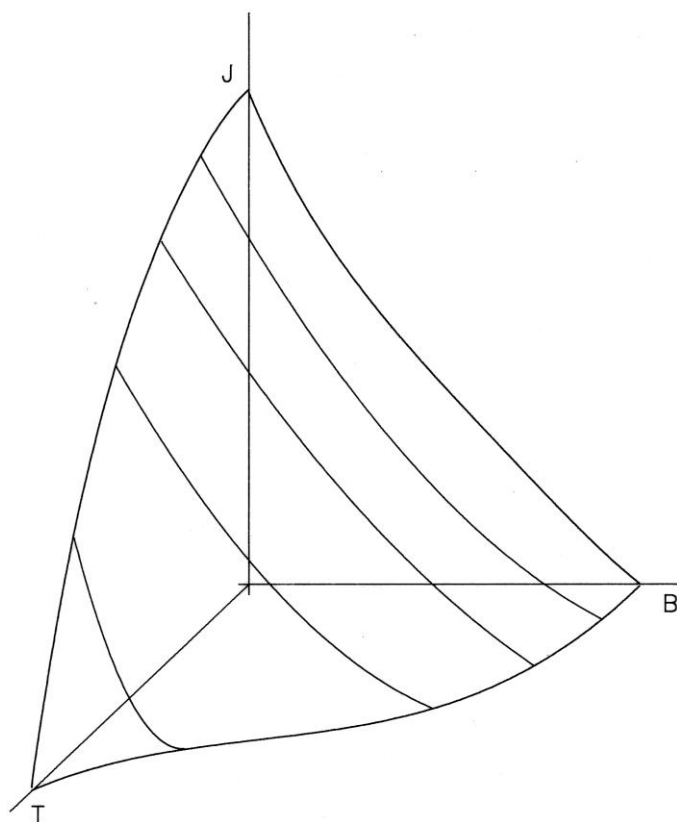
1. WPROWADZENIE

1.1. Krótkie kalendarium rozwoju nadprzewodnictwa

Nadprzewodnictwo, czyli zjawisko bezoporowego przewodzenia prądu elektrycznego, zostało odkryte w 1911 r. przez H. Kamerlingha Onnesa, który badając oporność elektryczną czystych metali w temperaturze rzędu kilku K zauważył, że w odpowiednio niskiej temperaturze oporność niektórych z nich skokowo spada do zera. Metale posiadające tę właściwość zostały nazwane nadprzewodnikami.

Nadprzewodniki wydawały się być doskonałymi materiałami na elektromagnesy, gdyż teoretycznie umożliwiały generowanie bardzo silnych pól magnetycznych bez strat w uzwojeniach. Okazało się jednak, że czyste metale, jedyne znane w tamtym czasie nadprzewodniki, traciły właściwości nadprzewodzące w obecności bardzo słabych pól magnetycznych lub podczas przewodzenia bardzo niewielkich prądów. Stwierdzono, że granicą pomiędzy stanem nadprzewodnictwa a stanem normalnym jest charakterystyczna dla każdego nadprzewodnika powierzchnia $T_{c1} = T_{c1}(B, J)$ (rys. 1.1), tzw. powierzchnia krytyczna. Współrzędne punktów leżących na tej powierzchni nazwano odpowiednio temperaturą krytyczną, indukcją krytyczną i krytyczną gęstością prądu.

Dopiero 50 lat później odkryto, że nadprzewodnikami są także stopy metali i związki międzymetaliczne. Ze względu na odmienne właściwości w porównaniu z czystymi metalami te grupy nadprzewodników nazwano nadprzewodnikami II rodzaju. Wśród nadprzewodników II rodzaju są także takie, które nie tracą właściwości nadprzewodnictwa podczas transportu bardzo dużych prądów w obecności bardzo silnych pól magnetycznych. Jednak elektromagnesy wykonane z tych materiałów charakteryzowały się niestabilnością, tzn. uzwojenia w niekontrolowany sposób przechodziły w stan normalny podczas pracy z parametrami znacznie niższymi od krytycznych. Przyczyną tego były samoistne dyssypacje energii wewnątrz urządzenia powodujące lokalny wzrost temperatury nadprzewodnika powyżej temperatury krytycznej. Ponieważ nadprzewodniki tego typu mają w stanie normalnym bardzo wysoki opór elektryczny, przepływający prąd powodował lawinowy rozrost strefy normalnej.



Rys. 1.1. Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika.

Dopiero odkrycie w 1964 r. [25] przewodu stabilizowanego materiałem normalnym umożliwiło budowę niezawodnych elektromagnesów nadprzewodzących wytwarzających pola magnetyczne o indukcji rzędu kilkunastu tesli. Stabilizacja nadprzewodnika materiałem normalnym polega na zespoleniu nadprzewodnika z materiałem niewykazującym właściwości nadprzewodnictwa w temperaturze pracy nadprzewodnika, lecz posiadającym w tej temperaturze wysoką przewodność elektryczną i cieplną, który spełnia rolę niskooporowego bocznika dla wysokooporowego nadprzewodnika w stanie normalnym.

W 1986 r. odkryto nową generację nadprzewodników - materiały ceramiczne [4]. Materiały te zachowują właściwości nadprzewodnictwa w temperaturach wyższych od temperatury wrzenia azotu pod ciśnieniem atmosferycznym wynoszącej około 77,3 K. Jeżeli wykorzystując te nowe nadprzewodniki uda się wyprodukować niezawodne kable nadprzewodzące, mogące prze-

nosić wysokie prądy, wówczas prawdopodobnie szybko zwiększy się przemysłowe zastosowanie nadprzewodnictwa [13], gdyż do chłodzenia układów nadprzewodnikowych będzie można stosować znacznie tańszy od helu kriogeniczny azot. Jednocześnie w poważnym stopniu obniżone zostanie zapotrzebowanie mocy na utrzymanie układu w odpowiednio niskiej temperaturze.

1.2. Praktyczne wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa

Zjawisko nadprzewodnictwa jest wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki i techniki, nadprzewodniki są elementami różnorodnych urządzeń i przyrządów [55], lecz podstawowym obszarem ich zastosowania jest wytwarzanie silnych pól magnetycznych [6,65]. Elektromagnesy nadprzewodzące już są lub będą w przyszłości stosowane w procesach kontrolowanej syntezy termojądrowej, w generatorach MHD, w układach gromadzenia energii, w prądnicach i silnikach elektrycznych, do separacji magnetycznej, itd.

1.3. Charakterystyka technicznych nadprzewodników

1.3.1. Materiały

W chwili obecnej największe znaczenie praktyczne mają dwa materiały nadprzewodzące II rodzaju: stop niobu z tytanem Nb-Ti i związek niobu z cyną Nb₃Sn. Parametry krytyczne dla tych materiałów podano w tabelicy 1.1. Do stabilizacji nadprzewodników najczęściej używa się miedzi lub aluminium. Właściwości standardowych nadprzewodników i stabilizatorów przedstawiono w tabelicy 1.2 [59].

1.3.2. Konstrukcja technicznych nadprzewodników

Techniczny nadprzewodnik zbudowany jest z co najmniej dwóch materiałów: nadprzewodnika i materiału normalnego. Materiał normalny może spełniać w przewodzie podwójne zadanie: stabilizatora i tworzywa konstrukcyjnego. Najprostszy techniczny nadprzewodnik to pojedynczy drut składający się z normalnej matrycy i centralnie umieszczonego w niej włókna nadprzewodzącego. Przykłady technicznych nadprzewodników o bardziej złożonej konstrukcji przedstawiono na rys. 1.2 [65] oraz 1.3 [69]. Nadprzewodnik z rys. 1.2 ma 61 włókien nadprzewodzących Nb-Ti o średnicy 50 μm osadzonych w miedzianej matrycy. Nadprzewodniki takiej konstrukcji stosowane są m.in. na uzwojenia niewielkich cewek laboratoryjnych. Techniczny

nadprzewodnik, pokazany na rys. 1.3, przeznaczony jest dla dużego elektromagnesu. Rdzeń przewodu stanowi 18 żył umieszczonych w miedzianej osłonie. Każda żyła składa się z 332 299 włókien nadprzewodzących Nb₃Sn o średnicy 5µm osadzonych w matrycy z brązu i jest oddzielona od miedzianej osłony barierą antydyfuzyjną z tantalu. Do rdzenia przymocowane są z dwóch stron warstwy stabilizatora tak ukształtowane, że w przewodzie utworzone są wzdłużne i poprzeczne kanały chłodzące.

Tablica 1.1

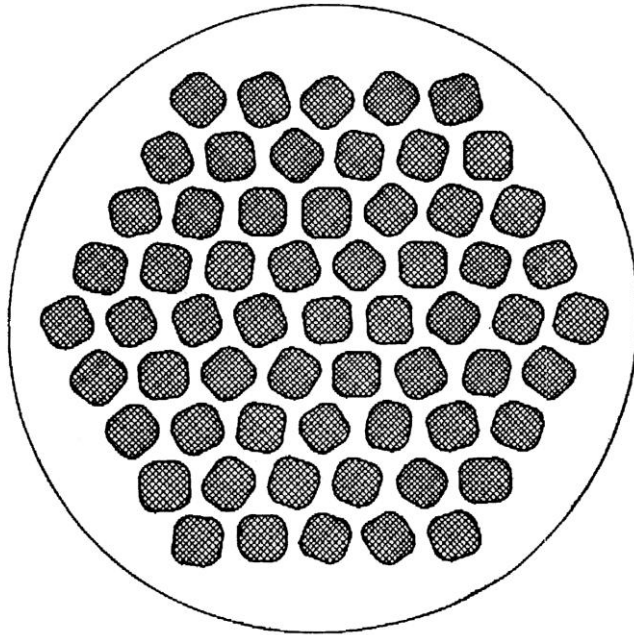
Parametry krytyczne wybranych materiałów nadprzewodzących

Lp.	Materiał	Temperatura krytyczna K	Krytyczna gęstość prądu A/cm ²	Krytyczna indukcja magnetyczna T
1	Nb-Ti	9,8 (przy 0 A/cm ² , 0 T)	5×10^4 (przy 0 A/cm ² , 0 T)	12 (przy 4,2 K, 0 A/cm ²)
2	Nb ₃ Sn	18,15 (przy 0 A/cm ² , 0 T)	2×10^5 (przy 0 A/cm ² , 0 T)	22 (przy 4,2 K, 0 A/cm ²)

Tablica 1.2

Właściwości wybranych nadprzewodników i stabilizatorów w temperaturze 4,2 K i przy zerowym polu magnetycznym

Lp.	Materiał	Gęstość kg/cm ³	Pojemność cieplna J/(cm ³ K)	Przewodność cieplna W/(cmK)	Opór właściwy Ωcm
1	Nb-Ti	$5,6 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	-
2	Nb ₃ Sn	$8,9 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-4}$	-
3	Cu (OFHC)	$9,0 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-4}$	2,5	$2,0 \times 10^{-8}$
4	Al	$2,7 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{-4}$	5,7	$2,7 \times 10^{-8}$



Rys. 1.2. Przekrój przez techniczny nadprzewodnik stosowany na uzwojenia niewielkich cewek [65]

1.3.3. Właściwości cieplne technicznych nadprzewodników w niskich temperaturach

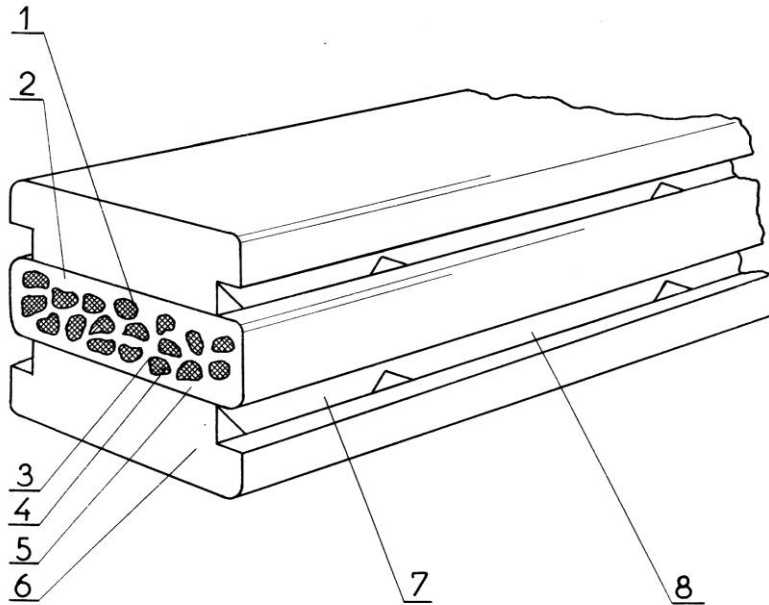
1.3.3.1. Przewodność cieplna

Zastępcza przewodność cieplna technicznego nadprzewodnika w kierunku równoległym do osi przewodu można obliczyć z zależności

$$k = f k_s + (1 - f) k_n \quad (1.1)$$

w której f jest udziałem objętościowym materiału normalnego w przewodzie, a k_s oraz k_n odpowiednio przewodnością cieplną materiału normalnego i przewodnością cieplną nadprzewodnika. Ponieważ $k_s \gg k_n$ drugi składnik sumy (1.1) zazwyczaj się pomija i oblicza k z następującej prostszej zależności

$$k \cong f k_s \quad (1.2)$$



Rys. 1.3. Przekrój przez nadprzewodnik przeznaczony dla dużego elektromagnesu: 1 - bariera antydyfuzyjna z tantalu; 2 - osłona miedziana; 3 - matryca z brązu; 4 - włókna nadprzewodzące Nb_3Sn ; 5 - rdzeń przewodu $5,4 \text{ mm} \times 11\text{mm}$; 6 - miedziany stabilizator $3\text{mm} \times 11\text{mm}$; 7 - wzdłużny kanał chłodzący $1\text{mm} \times 1 \text{ mm}$; 8 - poprzeczny kanał chłodzący $1\text{mm} \times 3\text{mm}$ [69]

W czystych metalach, czyli materiałach, z których wykonywane są stabilizatory, dominującym mechanizmem transportu ciepła jest przewodzenie elektronowe. Zazwyczaj elektronowa oporność cieplna oblicza się jako sumę

$$1/k_e = 1/k_i + 1/k_o \quad (1.3)$$

gdzie $1/k_i$ jest opornością spowodowaną oddziaływaniami elektron - fonon, a $1/k_o$ opornością, której przyczyną jest rozpraszanie elektronów na niedoskonałościach sieci. Na podstawie rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych przyjmuje się [6]

$$1/k_i = aT^n \quad n = 2 \div 3, \text{ dla } T < 40 \text{ K} \quad (1.4)$$

$$1/k_o = bT^{-1} \quad \text{dla wszystkich temperatur} \quad (1.5)$$

Nie popełniając dużego błędu można założyć, że oporność cieplna czystych metali k_m w temperaturach poniżej 20 K jest jedynie wynikiem rozpraszania elektronów na niedoskonałościach sieci. Stąd dla $T < 20$ K

$$k_m \cong k_o = \frac{1}{b} T \quad (1.6)$$

Współczynnik proporcjonalności $1/b$ w równaniu (1.6) można wyznaczyć przez porównanie (1.6) z prawem Widemanna-Franza-Lorenza

$$k_m = \frac{L_o}{\rho} T \quad (1.7)$$

Liczba Lorenza L_o jest praktycznie niezależna od indukcji zewnętrznego pola magnetycznego [19]. Natomiast wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej wzrasta magnetorezystancja stabilizatora oraz zgodnie z równaniem (1.7) maleje jego przewodność cieplna, np. wzrost indukcji od 0 do 5T powoduje spadek przewodności cieplnej miedzi o 25÷75%.

1.3.3.2. Pojemność cieplna

Zastępczą pojemność cieplną technicznego nadprzewodnika można wyznaczyć z zależności analogicznej do (1.1)

$$c = f c_s + (1 - f) c_n \quad (1.8)$$

Pojemność cieplna metali jest sumą pojemności cieplnej sieci krystalicznej i pojemności cieplnej elektronów swobodnych. Pojemność cieplną sieci określa funkcja Debye'a, która dla niskich temperatur ($T \ll T_d$) upraszcza się do postaci

$$c_d = aT^3 \quad (1.9)$$

Z kolei pojemność cieplna elektronów swobodnych jest proporcjonalna do temperatury

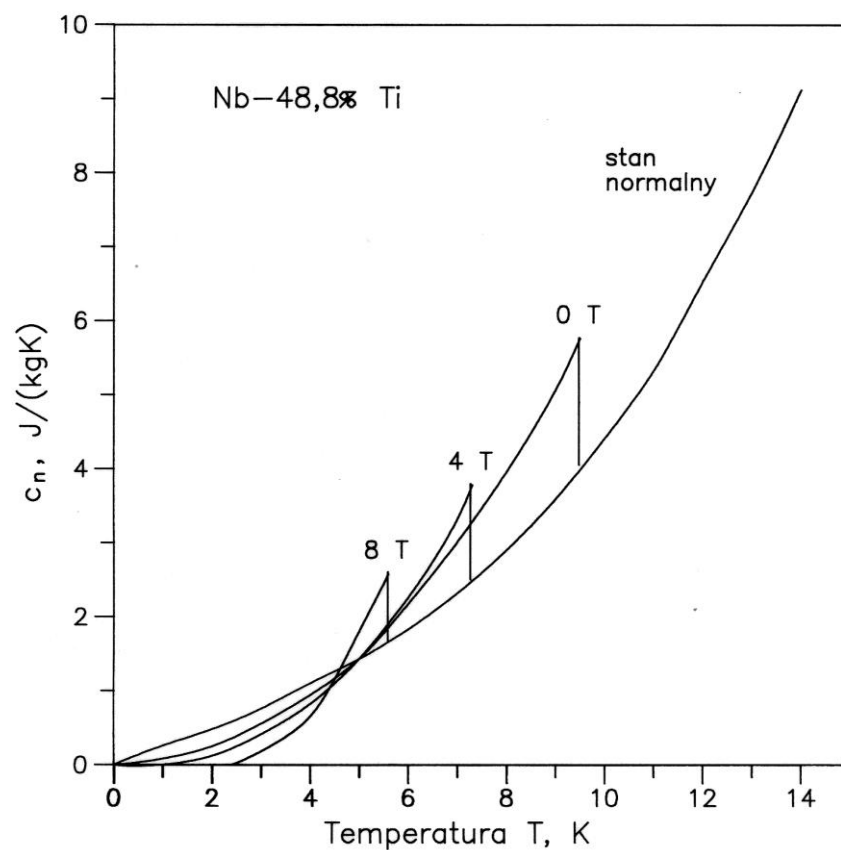
$$c_e = bT \quad (1.10)$$

stąd całkowita pojemność cieplna metali

$$c_m = c_d + c_e \cong aT^3 + bT \quad (1.11)$$

Przy przejściu nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego w stan normalny następuje około 25% spadek jego pojemności cieplnej. Na rysunku 1.4 [15] przedstawiono przykładową zależ-

ność ciepła właściwego Nb-Ti od temperatury dla różnych indukcji zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 1.4. Zależność ciepła właściwego Nb-Ti od temperatury dla różnych indukcji zewnętrznego pola magnetycznego [15]

(...)

LITERATURA

1. Anashkin O.P., Keilin V.E., Lyikov V.V.: Stability of compound superconductors under localized heat pulses. *Cryogenics* **19** (1979) No. 2, pp. 77-80.
2. Anashkin O.P., Varlakhin V.A., Keilin V.E., Krivikh A.V., Lyikov V.V.: Experimental investigation of training and degradation in superconducting magnet systems. *IEEE Transactions on Magnetics* **13** (1977) No. 1, pp. 673-677.
3. Baynham D.E., Edwards V.W., Wilson M.N.: Transient stability of high current density superconducting wires. *IEEE Transactions on Magnetics* **17** (1981) No. 1, pp. 732-735.
4. Bednorz J.G., Müller K.A.: Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B* **64** (1986), pp. 189-19.
5. Bejan A., Tien C.L.: Effect of axial conduction and metal-helium heat transfer on the local stability of superconducting composite media. *Cryogenics* **18** (1978) No. 7, pp. 433-441.
6. Brechna H.: *Superconducting magnet systems*. Springer - Verlag, Berlin 1973.
7. Broom R.F., Rhoderick M.A.: Thermal propagation of a normal region in a thin superconducting film and its application to a new type of bistable element. *British Journal of Applied Physics* **11** (1960) No. 7, pp. 292-296.
8. Cesnak L.: Minimum propagating currents of stabilized superconductors. *Cryogenics* **23** (1983) No. 12, pp. 662-666.
9. Chen W.Y., Alcorn J.S., Hsu Y-H., Purcell J.R.: Stability analysis of Nb-Ti-Ta-based high field conductor cooled by pool boiling below 4 K. *IEEE Transactions on Magnetics* **17** (1981) No. 1, pp. 57-60.
10. Chen W.Y., Purcell J.R.: Dynamic simulation of normal zone evolution in a superconducting composite. *Applied Physics Letters* **31** (1977) No. 2, pp. 127-129.
11. Chen W.Y., Purcell J.R.: Numerical study of normal - zone evolution and stability of composite superconductors. *Journal of Applied Physics* **49** (1978) No. 6, pp. 3546-3553.
12. Chilcott T.C., Donaldson G.W.: The recovery of superconducting systems. *IEEE Transactions on magnetics* **15** (1979) No. 1, pp. 49-52.
13. Collings E.W.: Design considerations for high T_c ceramic superconductors. *Cryogenics* **28** (1988) No. 11, pp. 724-733.
14. Cornelissen M.C.M., Hoogendoorn C.J.: Thermal stability of superconducting magnets: static criteria. *Cryogenics* **24** (1984) No. 12, pp. 669-675.
15. Dresner L.: Propagation of normal zones in composite superconductors. *Cryogenics* **16** (1976) No. 11, pp. 675-681.
16. Dresner L.: Quench energies of potted magnets. *IEEE Transactions on Magnetics* **21** (1985) No. 2, pp. 392-395.

17. Eckels P.W.: Superconductor stability and helium heat transfer: the minimum propagating zone relationship in design. *Cryogenics* **29** (1989) No. 6, pp. 625-629.
18. Edwards V.W, Scott C.A., Wilson M.N.: The control of 'training' in 'racetrack' shaped superconducting magnets. *IEEE Transactions on Magnetics* **11** (1975) No. 2, pp. 532-535.
19. Fevrier A., Morize D.: The effect of magnetic field on the thermal conductivity and electrical resistivity of different materials. *Cryogenics* **13** (1973) No. 10, pp. 603-606.
20. Ishibashi K., Wake M., Kobayashi M., Katse A.: Propagation velocity of normal zones in a SC braid. *Cryogenics* **19** (1979) No. 8, pp. 467-471.
21. Ishibashi K., Wake M., Kobayashi M., Katse A.: Thermal stability of high current density magnets. *Cryogenics* **19** (1979) No. 11, pp. 633-638.
22. Iwasa Y., Apgar B.A.: Transient heat transfer to liquid helium from bare copper surfaces in a vertical orientation - I: Film boiling regime. *Cryogenics* **18** (1978) No. 5, pp. 267-275.
23. Jayakumar R.: Critical energy of superconducting composites. *Cryogenics* **27** (1987) No. 8, pp.421-424.
24. [24] Jayakumar R.: Values of critical energy for superconducting composites. *Cryogenics* **29** (1989) No. 2, pp. 139-145.
25. Kantrowitz A.R., Stekly Z.J.J.: A new principle for the construction of stabilized superconducting coils. *Applied Physics Letters* **6** (1965) No. 3, pp. 56-67.
26. Keilin V.E., Klimenko E.Yu., Kremlev M.G., Samoilov B.N.: Stability criteria for current in combined (normal + superconducting) conductors. *Les Champs Magnetiques Intenses. Colloque Intern., Grenoble 1966*, pp. 231-236.
27. Keilin V.E., Romanowsky V.R.: The dimensionless analysis of the stability of composite superconductors with respect to thermal disturbances. *Cryogenics* **22** (1982) No. 6, pp. 313-317.
28. Kremlev M.G.: Minimum propagating current in composite conductors. *Cryogenics* **7** (1967) No. 10, pp. 267-270.
29. Kwasnitza K., Barbisch B., Hulliger F.: Metallic materials for superconductor stabilization with very high specific heat and good thermal conductivity. *Cryogenics* **23** (1983) No 12, pp.649-652.
30. Maddock B.J., James G.B., Norris W.T.: Superconducting composites: heat transfer and steady state stabilization. *Cryogenics* **9** (1969) No. 8, pp. 261-273.
31. Malinowski L.: Minimalny prad propagacji strefy oporowej w kriogenicznie stabilizowanych nadprzewodnikach. *Chlodnictwo* **20** (1985) Nr 11, s. 22-24.
32. Malinowski L.: Energia krytyczna dla kriogenicznie stabilizowanych nadprzewodnikow. *Zbior Referatow Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Warszawa-Jablonna 1986*, s. 182-187.

33. Malinowski L.: Numeryczna symulacja powstawania stref normalnych w kriogenicznie stabilizowanych nadprzewodnikach (komunikat). Streszczenia Prac XIII Ogólnopolskiego Seminarium Kriogeniki, Wrocław 1986, s.15.
34. Malinowski L.: Równanie przewodnictwa cieplnego dla procesów szybkozmiennych. Zbiór Referatów XXV Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice", Gliwice-Kudowa, 1986, część I, s. 262-269.
35. Malinowski L.: Analityczna metoda obliczania energii krytycznej stabilizowanych nadprzewodników. Zbiór Referatów XIII Zjazdu Termodynamików, Częstochowa 1987, s. 441 - 446.
36. Malinowski L.: Kryteria stabilności kriogenicznej nadprzewodników. Zbiór Referatów I Sympozjum "Zagadnienia Energetyczne w Mechanice", Bielsko-Biała 1987, s. 147-154.
37. Malinowski L.: Numeryczny model cieplny stabilizowanego nadprzewodnika. Zbiór Referatów XXVI Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice", Gliwice 1987, s. 267-274.
38. Malinowski L.: Stabilność termiczna drutów nadprzewodzących. *Archiwum Termodynamiki* **9** (1988) Nr 3/4, s. 167-180.
39. Malinowski L.: Thermal wave propagation within a medium with the inert heat source. *Wärme- und Stoffübertragung* **22** (1988) No. 3/4, pp. 185-188.
40. Malinowski L.: Analytical method for calculation of critical energy of technical superconductors taking into account transient heat transfer. *Cryogenics* **30** (1990) No. 1, pp. 27-31.
41. Malinowski L.: Analytical method for calculation of critical energy of technical superconductors based on the minimum propagating zone theory. *Cryogenics* **30** (1990) No. 9, pp. 765-769.
42. Malinowski L.: Energia krytyczna technicznych nadprzewodników. *Chłodnictwo* **25** (1990) Nr 9, s. 3-4.
43. Malinowski L.: Critical energy of thermally insulated composite superconductors. *Cryogenics* **31** (1991) No. 6, pp.444-449.
44. Malinowski L.: Effect of relaxation of internal heat source capacity on the temperature field in the semi-infinite body. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **18** (1991) No. 4, pp. 523-530.
45. Martinelli A.P., Wipf S.L.: Investigation of cryogenic stability and reliability of operation of Nb₃Sn coils in helium gas environment. *Proceedings 1972 Applied Superconductivity Conference IEEE* **72** 1973, pp. 331-340.
46. Nechiporenko I. N.: Normal zone propagation within a superconducting magnetic system and cryostabilization of superconductivity. *Cryogenics* **23** (1983) No. 10, pp. 549-553.
47. Nick W.: Theoretical studies of stability in pool boiling helium I. *Proceedings of the Workshop on Stability of Superconductors, Saclay (France) Nov. 16 - 19, 1981*, pp. 139-150.

48. Nick W., Krauth H., Ries G.: Cryogenic stability of composite conductors taking into account transient heat transfer. *IEEE Transactions on Magnetics* **15** (1979) No. 1, pp. 359-362.
49. Özisik M.N., Vick B.: Propagation and reflection of thermal waves in a finite medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **27** (1984) No. 10, pp. 1845-1854.
50. [50] Pasztor G., Schmidt C.: Dynamic stress effects in technical superconductors and the 'training' problem of superconducting magnets. *Journal of Applied Physics* **49** (1978) No. 2, pp. 886-899.
51. Schmidt C.: Transient heat transfer to liquid helium and temperature measurement with a response time in the microsecond region. *Applied Physics Letters* **32** (1978) No. 12, pp. 827-829.
52. Schmidt C.: The induction of a propagating normal zone (quench) in a superconductor by local energy release. *Cryogenics* **18** (1978) No. 10, pp. 605-610.
53. Schmidt C.: Transient heat transfer and recovery behavior of superconductors. *IEEE Transactions on Magnetics* **17** (1981) No. 1, pp.738-741.
54. Schmidt C.: Review of steady state and transient heat transfer in pool boiling helium I. *Proceedings of the Workshop on Stability of Superconductors, Saclay (France) Nov. 16-19, 1981.*
55. Smolinski S.: *Nadprzewodnictwo-zastosowania.* WNT Warszawa 1983.
56. Stekly Z.J.J., Zar J.L.: Stable superconducting coils. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **12** (1965) No. 3, pp. 367-372.
57. Superczynski M.J.: Heat pulses required to quench a potted superconducting magnet. *Transactions on Magnetics* **15** (1979) No. 1, pp. 325-327.
58. Turowski P.: The stability behaviour of a Cu-stabilized NbTi-multifilamentary conductor under different cooling conditions. *Cryogenics* **24** (1984) No. 11, pp. 629-635.
59. Veringa H.J.: *Intrinsic stability of technical superconductors.* Praca doktorska THT Twente University Enschede, The Netherlands, 1981.
60. Vernotte M.P.: Les paradoxes de la théorie continue de l'équation de la chaleur. *Comptes Rendus* **246** (1958) No. 22, pp. 3154-3155.
61. Waltman D.J., Superczynski M.J., McDonald F.E.: Energy pulses required to quench potted superconducting magnets at constant field. *IEEE Transactions on Magnetics* **17** (1981) No. 1, pp. 1056-1059.
62. Whetstone C.N., Boom R.W.: Nucleate cooling stability for superconductor-normal metal composite conductors in liquid helium. *Advances in Cryogenic Engineering* **13** (1968), pp. 68-79.
63. Williams J.E.C.: The minimum propagating current of a composite superconductor. *Physics Letters* **19** (1965) No. 2, pp. 96-97.

64. Wilson M.N.: Stabilization of superconductors for use in magnets. *IEEE Transactions on Magnetics* **13** (1977) No. 1, pp. 440-446.
65. Wilson M.N.: *Superconducting Magnets*. Clarendon Press, Oxford 1983.
66. Wilson M.N., Iwasa Y.: Stability of superconductors against localized disturbances of limited magnitude. *Cryogenics* **18** (1978) No. 1, pp. 17-25.
67. Wilson M.N., Walters C.R., Lewin J.D, Smith P.F.: Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composites. *Journal of Physics D* **3** (1970), pp. 1517-1585.
68. Wipf S.L.: Stability of the superconductive operating mode in high current-density devices. *IEEE Transactions on Magnetics* **15** (1979) No. 1, pp. 379-382.
69. Zbasnik J.P. *et al*: Construction and testing of the Nb₃Sn coils. *Advances in Cryogenic Engineering* **29** (1984), pp. 95-103.