

Relaksacje migracyjne w ciałach stałych



NR 2918

Grzegorz Haneczok

Relaksacje migracyjne w ciałach stałych

Redaktor serii: Fizyka i Chemia Metali
Lucjan Pająk

Recenzent
Józef Zbrozczyk

Publikacja będzie dostępna — po wyczerpaniu nakładu — w wersji internetowej:
Śląska Biblioteka Cyfrowa
www.sbc.org.pl

Spis treści

Wstęp	7
1. Równania materiałowe	11
2. Proces relaksacyjny	20
2.1. Relaksacja Debye'a	24
2.2. Dyssypacja energii	29
2.3. Uwagi o teorii odpowiedzi liniowej i twierdzenie o fluktuacji i dyssypacji	30
2.4. Relaksacja niedebye'owska — rozkłady czasów relaksacji	33
2.5. Relaksacja niesprężysta — modelowanie reologiczne	47
2.6. Relaksacja dielektryczna	55
2.7. Dezakomodacja przenikalności magnetycznej	60
3. Procesy dyfuzyjne	64
3.1. Współczynnik dyfuzji i aktywacja termiczna	64
3.2. Błądzenie przypadkowe	71
4. Równania kinetyczne	75
5. Uniwersalna funkcja odpowiedzi — model Coupling	85
6. Techniki eksperymentalne	96
6.1. Relaksacja niesprężysta	96
6.2. Relaksacja dielektryczna	104
6.3. Dezakomodacja przenikalności magnetycznej	110
7. Zastosowania w inżynierii materiałowej	118
7.1. Relaksacja Snoeka — atomy roztworu międzywęzłowego w metalach o strukturze bcc	118

7.2. Relaksacja Zenera — atomy roztworu substytucyjnego	145
7.3. Relaksacja w układzie silnie oddziałujących dipoli — tlenki o strukturze fluorytu	152
7.4. Relaksacja wiskosprężysta	164
7.5. Relaksacja strukturalna w stopach amorficznych na bazie żelaza	176
Literatura	209
Indeks rzeczowy	221
Summary	225
Résumé	226

Wstęp

Relaksacje migracyjne stanowią szeroką klasę procesów relaksacyjnych, w przypadku których mechanizm zjawiska kontrolowany jest przez dyfuzję. Oznacza to, że zawsze mamy tu do czynienia z opisem pewnego procesu migracyjnego w skali atomowej. Taka problematyka dotyczy zarówno różnorodnych materiałów (jak: metale, dielektryki, polimery, magnetyki), jak i odmiennych technik pomiarowych (np.: metody mechaniczne, magnetyczne, elektryczne). Wyróżnienie relaksacji migracyjnych jako odrębnej grupy wydaje się celowe ze względu na dobrze określony, wspólny wielu materiałom, fizyczny opis procesu relaksacyjnego. Oczywiście, opis taki dotyczyć musi bezpośrednio struktury realnej materiałów (z uwzględnieniem obecności defektów i domieszek), a to z kolei ma istotne znaczenie dla zastosowań praktycznych i ewentualnego projektowania materiałowego.

Ogólnie rzecz biorąc, badanie zjawiska relaksacji jako reakcji materiału na niewielkie zaburzenie równowagi termodynamicznej lub powrót do równowagi po usunięciu takiego zaburzenia jest przede wszystkim źródłem informacji o właściwościach materiałowych. Stany nierównowagowe wywołane w kontrolowany sposób (najczęściej w obszarze liniowym) powodują powstanie w materiale pewnych prądów i/lub przesunięć atomów (cząsteczek), które mogą być rejestrowane i analizowane jako odpowiedni proces relaksacyjny. Zrozumienie mechanizmów kontrolujących właściwości materiałowe na poziomie atomowym wydaje się kluczowe dla poszukiwania nowych materiałów o konkretnych, być może nawet zaplanowanych, właściwościach. Dobrym przykładem są tu stopy amorficzne na bazie żelaza — nowoczesne materiały magnetycznie miękkie, które znalazły już liczne zastosowania przemysłowe jako: rdzenie transformatorów, dławiki, ekrany pola elektromagnetycznego itd. Uśrednianie anizotropii magnetokrystalicznej do zera dla mikrostruktury złożonej z nanoziaren żelaza w osnowie amorficznej okazało się kluczowe w poszukiwaniu nowych magne-

tyków miękkich. Osobne zagadnienie stanowi tu, obserwowany dla wielu stopów amorficznych, tzw. efekt wzmocnienia (poprawy) miękkich właściwości magnetycznych.

Relaksacje migracyjne w ciałach stałych są próbą spójnego opisu stosunkowo szerokiej klasy procesów relaksacyjnych. Omawiane zagadnienia wybrano w taki sposób, aby zaprezentować możliwie jednolite podejście do opisu dyfuzji defektów strukturalnych i/lub atomów domieszkowych. Chodzi bowiem o uwypuklenie wpływu struktury defektowej (np.: wakanse, dyslokacje, objętość nadmiarowa) oraz domieszek na makroskopowe właściwości materiałowe. Ważnym aspektem jest tu dyssypacja energii w materiałach jako nieodłączna składowa procesu relaksacyjnego. Całość kończy wykaz najważniejszych, zdaniem autora, publikacji dokumentujących przedstawiony materiał badawczy. Trzeba dodać, że spis literatury w opracowaniu dotyczącym różnorodnych materiałów, z natury rzeczy, nie może być traktowany jako wyczerpujący omawiane zagadnienie. W wyborze technik eksperymentalnych ograniczono się do trzech, dość podstawowych i stosunkowo szeroko stosowanych w praktyce, a mianowicie: relaksacji niesprężystej (pomiar strat mechanicznych, spektroskopii mechanicznej lub — nazwa starsza — tarcie wewnętrzne), relaksacji dielektrycznej i — z obszaru relaksacji magnetycznej — zjawiska dezakomodacji przenikalności. Techniki te pozwalają również, niemal wprost, charakteryzować materiały pod względem ich właściwości użytkowych, np. jako materiały magnetyczne.

Rozdziały 1—5 poświęcone są rozważaniom ogólnym, które pomocne są później w zrozumieniu problemów szczegółowych. Idea równań materiałowych, zaprezentowana w rozdziale 1, stanowi niejako podstawę, na której oparto rozważania bardziej zaawansowane. Sformułowano tu podejście do opisu właściwości materiałowych przez wyznaczanie (i to zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i doświadczalnym) odpowiednich wielkości materiałowych — przenikalności, podatności, przewodnictwa, lub odpowiednich współczynników materiałowych (np. współczynnik dyfuzji) itd. Wzmiankuje się tu również o ogólnych charakterystykach materiałowych (liniowych i nieliniowych).

W obszernym rozdziale 2 dokładnie omówiono sam proces relaksacyjny. Przedstawiono przede wszystkim wyidealizowany model relaksacji typu Debye'a, jako proces bazowy służący do opisu rzeczywistych procesów relaksacyjnych. Relaksacje niedebye'owskie zostały omówione w aspekcie wynikającym z rozmycia czasów relaksacji. Szczegółowo zaprezentowano podstawy teoretyczne i konsekwencje stosowania zarówno rozkładu dyskretnego, jak i ciągłego. Wiele uwagi poświęcono zastosowaniu twierdzenia o fluktuacji i dyssypacji jako ogólnemu podejściu do opisu zjawisk relaksacyjnych. Idea ta polega na tym, że w przybliżeniu liniowym reakcję materiału na przyłożenie zewnętrznego pola zaburzającego można otrzymać przez wyliczenie odpowiednich funkcji korelacyjnych w równowadze, czyli bez zewnętrznego pola. Mate-

riał poniekąd „wie”, jak ma reagować na małe zaburzenie, ponieważ „wie”, w jaki sposób zanikają jego równowagowe fluktuacje termiczne. Szczegółowe zastosowanie tej idei zaprezentowano na przykładzie relaksacji Snoeka, czyli dyfuzji atomów międzywęzłowych w metalach o strukturze bcc, jako dyfuzji w układzie oddziałujących dipoli sprężystych (rozdział 7.1). W trzech ostatnich podrozdziałach rozdziału 2, w aspekcie bardzo ogólnym, przedstawiono trzy istotnie różne przykłady procesów relaksacyjnych jako reakcji materiału na przyłożenie zewnętrznego pola zaburzającego (naprężenie, pole elektryczne i pole magnetyczne), a więc: 1) relaksacji niesprężystej, 2) relaksacji dielektrycznej i 3) relaksacji magnetycznej (dezakomodacji przenikalności magnetycznej).

Rozdziały 3—5 poświęcono problemom, które bezpośrednio wiążą się z relaksacjami migracyjnymi. Omówiono tu kolejno procesy dyfuzyjne, równania kinetyczne i tzw. uniwersalną funkcję odpowiedzi. Całość jest tak pomyślana, aby przedstawić możliwie dokładnie te aspekty problematyki, które znajdą zastosowanie w kolejnych rozdziałach podczas omawiania przykładów szczegółowych. Prezentując problematykę związaną z uniwersalną funkcją odpowiedzi, zrezygnowano z podejścia ogólnego na rzecz ujęcia od strony równań kinetycznych w ramach tzw. modelu Coupling. Wydaje się ono o wiele bardziej pogładowe, a dla zastosowań modelu Coupling nie ma to większego znaczenia. Zwróćmy uwagę, że uniwersalność dotycząca zjawisk materiałowych jest co najmniej zaskakująca. Jednak fakty mówią same za siebie i uniwersalna funkcja odpowiedzi z powodzeniem stosowana jest w bardzo różnorodnych zagadnieniach z obszaru fizyki ciała stałego czy też nauki o materiałach. Zobrazowano to na dwóch przykładach w rozdziale 7 niniejszej pracy — relaksacji niesprężystej i dielektrycznej obserwowanych w tlenkach o strukturze fluorytu (CaF_2) i relaksacji magnetycznej w amorficznych stopach magnetycznie miękkich. W świetle przytoczonych argumentów wydaje się oczywiste, że obserwowana uniwersalność wiąże się z dominującą rolą wszechobecnych w przyrodzie, a szczególnie w procesie dyfuzji, efektów korelacyjnych.

W rozdziale 6 zatytułowanym *Techniki eksperymentalne* zaprezentowano pewne ważne aspekty stosowanych technik pomiarowych w obszarze relaksacji niesprężystej, dielektrycznej i magnetycznej. Szczególną uwagę zwrócono na ideę pomiarów mostkowych, jako wyjątkowo czułych na małe zmiany wielkości mierzonej. Z tego też względu technika ta często stosowana jest w pomiarach wielkości fizycznych w słabych polach. Dokładnie omówiono pewne istotne aspekty pomiarowe niezwykle ważne w przypadku metody magnetycznej (jak np. współczynnik odmagnesowania).

Rozdział 7 — najobszerniejszy, stanowiący niemal połowę całego opracowania — szczegółowo przedstawia konkretne przykłady badania procesów relaksacyjnych dla różnych typów materiałów. Każdy podrozdział poprzedza omówienie charakterystyki samego materiału badań i przedstawienie problemu

badawczego. Wiele uwagi poświęcono różnym teoretycznym modelom opisującym procesy relaksacyjne oraz stosowane tu techniki obliczeniowe. I tak, w rozdziałach 7.1 i 7.2 zaprezentowano oddziaływanie dipoli sprężystych w przybliżeniu średniego pola dla ciała paraspężystego (model relaksacji Zenera) i dla oddziaływań o charakterze przypadkowym — tzw. model RCSI (*random cooperative strain interaction*) dla relaksacji Snoeka.

W rozdziale 7.3 *Relaksacja w układzie silnie oddziałujących dipoli — tlenki o strukturze fluorytu* omówiono krzyżowe eksperymenty z obszaru relaksacji niesprężystej i dielektrycznej. Materiał ten wybrano jako przykład układu silnie oddziałujących dipoli (elektrycznych i sprężystych), a więc układu, w którym powinna mieć zastosowanie uniwersalna funkcja odpowiedzi, związana z efektami korelacyjnymi w procesie dyfuzji.

W rozdziale 7.4 przedstawiono zastosowanie rachunku fraktalnego do zagadnień materiałowych na przykładzie relaksacji wiskosprężystej w stopie typu γ -TiAl oraz ceramice typu ZrO_2 . Przykład ten jest o tyle ciekawy, że pozwala na podstawie pomiarów w temperaturach względnie niskich wnioskować o zachowaniu się materiału w temperaturach znacznie wyższych, gdzie występuje już jego makroskopowe płynięcie.

Rozdział 7.5 poświęcono całkowicie relaksacji strukturalnej w stopach amorficznych na bazie żelaza, które są nowoczesnymi materiałami magnetycznie miękkimi. Zagadnienie to odbiega nieco od tematyki prezentowanej wcześniej, ale jest niezwykle ważne i wchodzi w zakres ogólnie rozumianego terminu „proces relaksacyjny”. Nierównowaga termodynamiczna jest w tym przypadku wywołana sposobem produkcji próbek (np. *melt spinning*), a nie zewnętrznym polem zaburzającym. Omówiono tu różne aspekty zjawiska relaksacji strukturalnej, w tym: optymalizację miękkich właściwości magnetycznych, zjawisko magnetostrykcji w obszarze relaksacji strukturalnej i samą relaksację magnetyczną. W tym ostatnim przypadku przedstawiono zastosowanie modelu Coupling do opisu dyfuzji nadmiarowej objętości swobodnej w układzie silnie skorelowanym.

Indeks rzeczowy

A

aktywacja termiczna 24, 27, 34—41, 64—68, 70, 75, 78—79, 83, 91, 96, 102, 107, 109, 115, 119, 127, 129, 131, 145, 148, 150, 156, 160, 162, 166, 171, 175, 180, 185, 189
anizotropia relaksacji Snoeka 80, 119, 126, 130
magnetokrystaliczna 181, 192, 193
anomalny wykładnik potęgowy 73—74, 88—89
atomy domieszkowe 34, 47, 61, 67, 69—70, 75, 83, 108, 121, 126, 153—158, 162

B

błądzenie przypadkowe 71, 89

C

ciało paraspężyste 132—135, 137, 143, 147—148, 150
czas relaksacji 26, 33, 35—37, 49, 59, 62, 81, 90, 96, 101, 115, 117, 126, 133, 137, 143, 146, 155, 157, 160, 168, 175, 204—205
częstotliwości przejścia 66, 68—70, 75—79, 82—84, 88—90, 94, 126, 150

D

delta Diraca 23, 43, 72
dezakomodacja przenikalności magnetycznej 60, 63, 110, 115—117, 183, 191
dipol elektryczny 14, 55, 59
spężysty 47, 118, 120, 124, 145
długość charakterystyczna 73
dyfuzja 32, 64, 70, 73, 150, 171, 179, 183, 191, 202

dynamiczna podatność uogólniona 23—28, 30, 33, 39, 43, 54, 55, 57—58, 80, 91, 98, 137, 165
dyssypacja energii 18, 25, 29—30, 33, 37, 43, 45, 54, 92, 107, 125, 178

E

energia stabilizacji 61, 193
entalpia aktywacji 24, 34, 41, 67, 70, 78, 83, 91, 95, 102, 119, 127, 129, 146, 149—151, 156, 158, 160, 162, 165—166, 171, 175
entropia aktywacji 34, 41, 67

F

faza amorficzna 64, 85, 94, 111, 115—117, 176—207
nanokrystaliczna 186, 188—189, 194
paraelektryczna 108
paramagnetyczna 186
paraspężysta 132—135
fluktuacje termiczne 32—34, 54, 59, 66—67, 71, 125
funkcja gęstości stanów 135, 137, 141—144
Heaviside'a 20
Langevina 199
relaksacji 21—22, 24, 32, 38, 53, 85, 90
funkcje autokorelacyjne 32, 54—55, 60, 125, 137
korelacyjne 31—33, 54, 125, 133, 136, 199—200, 202, 207
odpowiedzi 19, 22, 31—32, 57, 80, 122, 148

G

graniczny czas relaksacji 24, 34, 156—157, 175

I

indukcja magnetyczna 13—14, 63, 112, 176—177

indukcyjność cewki 110—112, 114

K

kąpiel cieplna 87—88

krystalizacja 178, 180—181, 194, 196, 207

L

luka oktaedryczna w strukturze bcc 47, 67, 69, 119—120, 126

M

magneton Bohra 13

magnetostrykcja 192—193, 196—202

materiały amorficzne 64, 85, 94, 111, 115—117, 176—207

nanokrystaliczne 176, 189, 194

model ciała paraspężystego 132—135

Coupling 85—86, 89, 91—95, 159—160, 202, 204

dwustanowy 77

Herzera 181

Kronmüllera 191

Maxwella 50—51, 164—165, 167

RCSI 135

standardowego ciała niespężystego 52

trzystanowy 80

Voigta 52

modelowanie reologiczne 47, 49—50, 164

moduł Younga 12, 16, 99—100, 178, 185—186

moment magnetyczny 13

N

namagnesowanie 13, 61—63, 112, 186, 188, 191, 199

nanokrystalizacja 178, 181, 185, 194—196, 207

natężenie relaksacji 28, 35, 54, 63, 80, 82, 86, 92, 118, 126, 129—130, 135, 143, 146, 148—151, 159, 166, 178, 180, 183, 203—206

O

objętość nadmiarowa 176—177, 179, 183, 193, 200—201, 205

oddziaływania przypadkowe 135, 143

opóźnienia magnetyczne 111

mechaniczne 49

optymalizacja właściwości magnetycznych 180—181, 183

P

parametr sprzęgnięcia 89, 91—92, 94—95

podatność elektryczna 14, 23, 56—58, 104, 107—108

magnetyczna 13, 23, 62, 110, 176—177

mechaniczna 12, 16, 23, 48, 50, 53, 96, 122, 138, 164

statyczna 24—25, 54, 58, 63, 80, 122, 137—138, 164, 167

uogólniona 23, 25, 28, 33, 58, 80, 91, 98, 137, 165

polaryzacja 15, 17, 31, 56, 59, 67, 109

pomiary mostkowe 105—107, 113—114

prawa Ficka 16, 64—66

prawdopodobieństwo przejścia 70—71, 76, 80

prawo Curie-Weisa 135, 143, 146—147, 150, 176

procesy Markowa 71

przenikalność elektryczna 15, 58, 104—106

magnetyczna 14, 16, 60, 110, 116—117, 178, 180, 182, 192—196, 203—204

R

relacja Arrheniusa 24, 26, 28, 33, 62, 91, 101—103, 117, 127—129, 145, 155—157, 165, 170, 172, 174

Hooke'a 12, 16, 47

Ohma 15

relacje Kramersa-Kroniga 27

relaksacja Debye'a 24, 26, 28, 53—54, 58, 63, 80, 82, 88—89, 91, 95, 102, 108, 119, 125, 131, 143, 193

dielektryczna 55, 58, 104—105, 107, 109, 155—158

niedebye'owska 33—34, 36, 39, 42, 83—85, 88—89, 91, 95, 119, 138—139, 143, 160

niespężysta 47—49, 52, 54—55, 96—101, 103, 121, 133, 155—157, 162

Snoeka 103, 118, 126—131, 138—139, 141—143, 150

strukturalna 94, 176, 178—179, 182, 185—187, 191, 193, 195, 198, 200—201, 203—204, 206

wiskosprężysta 49—50, 52, 164—176
Zenera 145—150
reluktancja magnetyczna 62, 110, 115—116,
179—180, 192, 202—204, 207
rozkład ciągły 35—47
dyskretny 34, 82
gaussowski 38—42, 72, 84, 135, 143
kanoniczny 11—12
prostokątny 36—37, 117, 144
rozkłady czasów relaksacji 33, 35—47,
83—84, 92, 95, 102—103, 109, 117, 148,
151, 166
roztwór międzywęzłowy 118
substytucyjny 145
równania Debye'a 25
kinetyczne 75, 136
równowaga termodynamiczna 11—12, 17, 20,
31—34, 47—48, 55, 60, 64, 75, 79, 82, 89,
121—122, 124, 136, 148, 177—178, 194—195

S

samodyfuzja 150, 171
spektroskopia mechaniczna 101, 172
stany nierównowagowe 18, 20, 32, 75, 178
statyczna funkcja odpowiedzi 19, 22, 31—32,
57, 80, 122, 148
stopy amorficzne 94, 115—117, 176—194
struktura fluorytu 94, 152
suma statystyczna 12

Ś

ścianka domenowa 182

średnia termodynamiczna 12, 31, 55, 60,
121

T

tangens kąta strat 98, 100, 145—146, 158
temperatura Curie 176, 186—187, 196, 200
krytyczna ciała paraspężystego 133,
146, 151
w modelu RCSI 137, 143
twierdzenie o fluktuacji i dyssypacji 30—34,
54—55, 59, 125

U

uniwersalna funkcja odpowiedzi 85—95,
159, 204

W

wakans anionowy w strukturze fluorytu 154
współczynnik dyfuzji 16, 64—66, 70, 72, 88,
93, 127—129, 150
magnetostrykcji 196—201
nasycenia 196, 200
objętościowej 196, 198—199, 201
odmagnesowania 111—113
wygrzewanie optymalizujące 180—182, 185,
188, 191, 194—195, 200—201, 203—205
wykresy Cole-Cole 27, 34, 44, 46, 109
wymuszenie periodyczne 22
statyczne 20

Z

zrelaksowana faza amorficzna 193

Grzegorz Haneczok

Migrational relaxations in solids

S u m m a r y

Migrational relaxation in solids describes a wide class of relaxation processes controlled by diffusion. The first six chapters are devoted to general problems related to the relaxation phenomenon based on which some examples of relaxation processes are presented and discussed. Chapter 1 presents the idea of material equations with a discussion of different material properties (definition of generalized susceptibility, linear and non-linear characteristics etc.). The extensive chapter 2 is devoted to a formal description of a relaxation process. The idealized Debye relaxation is presented as a first step in description of a real relaxation process. Non-Debye relaxations are discussed in the aspect of distribution of relaxation times (discrete and continuous). Special attention is paid to some applications of fluctuation-dissipation theorem as a general approach frequently used in description of relaxation processes. In chapters 3—5 the diffusion phenomenon, kinetic equations and the so-called universal response function are presented and discussed in detail. In this context interactions and correlation effects in diffusion are shown as a main reason leading to non-Debye relaxations. Chapter 6 presents the most important aspects of experimental techniques used in the field of relaxations i.e. anelastic relaxation, dielectric relaxation and magnetic disaccommodation effect (magnetic after-effect). Special attention is paid to application of the idea of bridge measurements as a method very sensitive for small changes of measured quantity.

The most extensive chapter 7 (comprised of 5 sections) is devoted to a detail presentation of well selected relaxation processes characteristic for different class of materials. Each section is preceded by a short description of general material properties important in the field and the essence of the scientific problem. Special attention is paid to application of theoretical models appropriate for a given relaxation process as well as some calculation techniques. Sections 7.1 and 7.2 describe diffusion in interacting elastic dipoles system by applying the mean field approximation in two cases — for the so-called paraelastic body (the Zener relaxation) and for the random interactions i.e. the RCSI model (random cooperative strain interaction) for the Snoek relaxation. In section 7.3 — Relaxation in strongly interacting dipoles system (fluorite structure oxides) — some cross-experiments carried out by applying dielectric and anelastic relaxations are presented and discussed in the context of the application of the universal response function (Coupling model). In section 7.4 an application of the fractal calculus to the viscoelastic relaxation in alloys of type γ -TiAl and ceramics of type ZrO_2 are described in detail. This example is especially interesting because based on the non-destructive low-temperature measurements of viscoelastic relaxation one can conclude about high temperature applications of the examined material where its macroscopic flow is already observe. The last section (7.5) is devoted to structural relaxations in iron based amorphous alloys i.e. in a group of modern soft magnetic materials. This relaxation

phenomenon to the certain extent different from the relaxation processes presented in the preceding sections is very important from application point of view. Different aspects of the structural relaxation i.e. optimization of soft magnetic properties, magnetostriction, and magnetic after-effect are described and discussed. It was shown that correlation effects observed in free volume diffusion via measurements of magnetic after-effect can be well described by the universal response function (Coupling model).

Grzegorz Haneczok

Relaxations de la migration dans les solides

R é s u m é

Les relaxations de la migration dans les solides concernent une assez large classe des processus de relaxation, pour lesquels le mécanisme est contrôlé par la diffusion. Les premiers chapitres (1—5) sont consacrés aux considérations générales qui constituent un point de départ pour l'analyse et discussion des exemples du spécifique processus de la relaxation. Le premier chapitre présente l'idée d'équations matérielles en décrivant des propriétés de types différents (définition de susceptibilité générale, les caractéristiques matériaux linéaire et non-linéaire etc.). Le deuxième chapitre, assez large, est consacré à la description formelle du processus de la relaxation. Un modèle idéalisée de la relaxation de Debye est présenté et discuté avant tout comme le processus servant de base pour la description des phénomènes de relaxation survenant dans les matériaux. Les relaxations non-Debye sont présentés dans l'aspect résultant de la distribution de temps de relaxation — discret et continu. Beaucoup d'attention est consacré à l'utilisation du théorème de fluctuation et dissipation comme une approche générale de la description des phénomènes de relaxation. Dans les chapitres 3—5 on présente successivement les processus de diffusion, des équations cinétiques et la fonction universelle de réponses. Les effets de corrélation dans le processus de diffusion sont discutés comme les facteurs provoquant la relaxation non-debyenne. Le sixième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées dans les études des processus de relaxation — c'est-à-dire la relaxation élastique, diélectrique et magnétique. Une attention particulière a été accordée à des mesures de pont pour être particulièrement sensibles aux petits changements dans les quantités mesurées.

Le septième chapitre, qui représente presque la moitié du toute l'étude est consacré à une présentation précise des exemples concrets de l'examen des processus de relaxation pour des types différents de matériaux. Chaque sous-chapitre contient la caractéristique du matériel examiné et la présentation de l'objectif de recherches. On a accordée beaucoup d'attention à des modèles théoriques décrivant les mécanismes des processus de relaxation ainsi que des techniques de calcul. Dans les sous-chapitres 7.1 et 7.2 on a décrit l'interaction de dipôles élastique en utilisant l'approximation MFA (*mean field approximation*), deux cas ont été considérés: paraélasticité (modèle de relaxation de Zener) et le modèle RCSI (*random cooperative strain interaction*) pour la relaxation de Snoek. La relaxation dans un système de dipôles élastique avec l'intraction forte (les oxydes à structure de fluorite) est présenté dans le sous-chapitre 7.3. Les études de la relaxation élastique et diélectrique sont discutés en détail. Dans le sous-chapitre 7.4 est présenté une application du calcul fractal pour la relaxation viscoélastique. Les résultats obtenus pour le type d'alliage γ -TiAl et pour la céramique type ZrO_2 ont été comparé et discutés. Cet exemple est particulièrement intéressant car des examens dans des températures relativement basses permettent d'estimer les réactions du matériel dans les températures beaucoup plus élevées où on observe déjà un écou-

lement macroscopique. Le dernier sous-chapitre est consacré entièrement à la relaxation structurale dans les alliages amorphes à la base du fer qui sont les modernes matériaux magnétiques doux. Cette question s'éloigne quelque peu de la thématique présentée dans les paragraphes précédents mais elle est très importante quant à l'application. Les aspects différents du phénomène de relaxation structurale, y compris l'optimisation des propriétés magnétiques doux, le phénomène de magnétostriction et la relaxation magnétique sont discutés en détail. Dans ce dernier cas on a présenté l'application du modèle Coupling à la description de la diffusion du volume libre dans un système bien corrélé.

Redaktor: **Barbara Todos-Burny**

Redaktor techniczny i projektant okładki: **Małgorzata Pleśniar**

Skład i łamanie: **Edward Wilk**

Copyright © 2011 by
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
Wszelkie prawa zastrzeżone

ISSN 0208-6336

ISBN 978-83-226-2054-0

Wydawca

Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
ul. Bankowa 12B, 40-007 Katowice

www.wydawnictwo.us.edu.pl

e-mail: wydawus@us.edu.pl

Wydanie I. Ark. druk. 14,25. Ark. wyd. 14,0.
Papier offset. kl. III, 90 g Cena 18 zł (+ VAT)

Druk i oprawa: PPHU TOTEM s.c.
M. Rejnowski, J. Zamiara
ul. Jacewska 89, 88-100 Inowrocław