

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Объединенный институт машиностроения

М. И. Гитгарц, В. А. Кукареко, А. В. Толстой

**СУБМИКРОСКОПИЧЕСКАЯ
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА
ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ СПЛАВОВ
С УПРУГИМИ МЕЖФАЗОВЫМИ
ДЕФОРМАЦИЯМИ**

Минск
«Беларуская навука»
2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА КРИСТАЛЛАХ СТАРЕЮЩИХ СПЛАВОВ С УПРУГИМИ МЕЖФАЗОВЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ.	6
1.1. Описание модели	7
1.2. Объемные эффекты при упругом выделении дисперсной фазы	9
1.2.1. Объемные эффекты при различии упругих свойств твердого раствора и фазы выделения и влияние на них процессов релаксации.	11
1.3. Интенсивность рассеяния кристаллом с упругоискаженной выделениями решеткой	14
1.3.1. Общее выражение для интенсивности рассеяния	14
1.3.2. Интенсивность правильных отражений I_0	16
1.3.3. Средняя структурная амплитуда f_a и фактор L	17
1.3.4. Интенсивность диффузного рассеяния	19
1.4. Определение постоянных решеток твердого раствора и фазы выделения	25
1.4.1. Влияние процессов релаксации упругих напряжений на величину периода решетки	28
2. ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА МОЩНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛЯХ УПРУГИХ МЕЖФАЗОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ	29
2.1. Общее выражение для интенсивности рассеяния сильно искаженными неоднородными растворами	29
2.2. Влияние упругой анизотропии кубической матрицы на рассеяние кубическими кристаллами, содержащими равноосные включения	34
2.3. Влияние анизотропии включений на рассеяние сильно искаженными кристаллами.	37
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА ВЫДЕЛЕНИЯХ В КРИСТАЛЛАХ.	40
3.1. Межчастичная интерференция рентгеновских лучей на статистически распределенных в кристалле выделениях	40
3.2. Влияние упругих межфазовых деформаций на межчастичную интерференцию рентгеновских лучей на статистически распределенных в кристалле выделениях.	44
3.3. Рассеяние рентгеновских лучей частицами дисперсной фазы с пространственно упорядоченным распределением их в кристалле	49

4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА ПОЛИКРИСТАЛЛАХ ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ Ni–Cr СПЛАВОВ	58
4.1. Общая характеристика сплавов ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ	58
4.2. Дифракционные картины сплава ХН77ТЮР (ЭИ437) и их интерпретация	59
4.2.1. Смещение дифракционных максимумов и закономерности изменения постоянной решетки матричной фазы сплава ХН77ТЮР	63
4.2.2. Влияние размера частиц дисперсной фазы	67
4.2.3. Влияние объемной доли дисперсной фазы	68
4.2.4. Случай присутствия в сплаве двух резко отличающихся по дисперсности фракций выделяющейся фазы	70
4.2.5. Влияние длины волн излучения.	72
4.2.6. Влияние упругой анизотропии кристаллической решетки	75
4.2.7. Дифракционные картины сплавов ХН67ВМТЮ, ХН56ВМТЮ и их интерпретация	77
5. СУБМИКРОСКОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ Ni–Cr и Fe–Ni–Cr СПЛАВОВ	84
5.1. Упругие межфазовые деформации и напряжения в Ni–Cr сплавах	84
5.1.1. Упругие деформации частиц γ' -фазы	84
5.1.2. Искажения кристаллической решетки твердого раствора.	85
5.1.3. Межфазовые напряжения.	87
5.2. Процессы выделения в Ni–Cr сплавах	89
5.2.1. Кинетика процессов выделения γ' -фазы	89
5.2.2. Кинетика роста частиц γ' -фазы.	91
5.2.3. Морфология частиц γ' -фазы.	93
5.2.4. Влияние температуры на упругие межфазовые деформации в сплавах на Ni–Cr основе	96
5.3. Закономерности дисперсионного упрочнения Ni–Cr сплавов	101
5.3.1. Зависимость предела упругости и твердости Ni–Cr сплавов от режимов старения	101
5.3.2. Связь структурных параметров Ni–Cr сплавов с пределом упругости и твердостью на стадии упрочнения	103
5.3.3. Анализ данных по дисперсионному упрочнению Ni–Cr сплавов на основе дислокационных теорий	106
5.3.4. Расчет критического напряжения сдвига от полей упругих межфазовых деформаций в кристаллах с выделениями.	108
5.3.5. Оценка значений прироста критического напряжения сдвига	113
5.4. Связь структурных параметров с пределом упругости и твердостью Ni–Cr сплавов на стадии разупрочнения	117
5.4.1. Влияние размера зерна на процессы разупрочнения сплава ХН67ВМТЮ при длительном изотермическом старении	123
5.4.2. Статистическая модель разупрочнения.	125
5.4.3. Моделирование размещения частиц в зерне	132
5.4.4. Влияние субмикроскопической структуры на циклическую долговечность сплавов на Ni–Cr основе	142
5.4.5. Сопrotивление контактному разрушению при трении Ni–Cr дисперсионно-твердеющих сплавов.	159
5.5. Структура и физико-механические свойства Fe–Ni–Cr сплава 45НХТ	178
5.5.1. Структура дисперсионно-твердеющего сплава 45НХТ	178
5.5.2. Кинетика изменения количественного содержания γ' -фазы и размера ее частиц при старении сплава 45НХТ	179

5.5.3. Структурное состояние матричной фазы	181
5.5.4. Влияние структурного состояния на предел упругости и твердость сплава 45НХТ	186
5.5.5. Связь структурных параметров с пределом упругости и твердостью сплава 45НХТ на стадии упрочнения.	187
5.5.6. Влияние структурного состояния на предел упругости и твердость сплава 45НХТ на стадии разупрочнения.	191
6. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА ПОЛИКРИСТАЛЛАХ СПЛАВОВ МЕДЬ–БЕРИЛЛИЙ	194
6.1. Общая характеристика бериллиевых бронз	194
6.2. Дифракционные картины сплава медь–бериллий и их интерпретация	199
6.2.1. Тонкая структура дифракционных линий матричной фазы сплава БрБ2	207
6.2.2. Влияние структурных параметров на характер преобразования профиля дифракционных линий.	219
6.2.3. Особенности преобразования профиля дифракционной линии (200). . .	221
6.2.4. Изменение периода решетки	224
6.2.5. Уширение дифракционных линий	227
6.3. Релаксация упругих межфазовых деформаций	231
6.4. Стадия протекания превращений по механизму прерывистого выделения . . .	235
6.5. Экстинкционные эффекты при старении бериллиевых бронз	238
6.6. Эволюция структуры и кинетика выделения дисперсной фазы.	242
6.6.1. Кристаллическая структура фазы выделения	244
6.6.2. Кинетика выделения фазы.	250
6.6.3. Размер частиц выделяющейся фазы	251
6.6.4. Объемная доля фазы выделения	253
6.6.5. Особенности процессов зарождения и роста частиц новой фазы	255
6.6.6. Морфология выделения	264
6.7. Структурные превращения при старении микролегированных бериллиевых бронз.	266
6.7.1. Сплав БрБНТ-1,9Мг	267
6.7.2. Сплавы БрБНТ-1,9 и БрБНТ-1,7	272
7. СУБМИКРОСКОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ МЕДЬ–БЕРИЛЛИЙ (БЕРИЛЛИЕВЫХ БРОНЗ)	273
7.1. Природа упрочнения сплавов медь–бериллий.	273
7.1.1. Область макропластических деформаций	274
7.1.2. Область микропластических деформаций.	280
7.2. Роль структурных параметров в формировании механических свойств сплавов медь–бериллий.	287
7.2.1. Твердость	287
7.2.2. Предел прочности	290
7.2.3. Предел текучести.	291
7.2.4. Предел упругости	292
7.2.5. Релаксационная стойкость	295
7.2.6. Циклическая долговечность	297
7.3. Триботехнические свойства бериллиевых бронз	302
7.3.1. Сопротивление контактному разрушению при трении	302
7.3.2. Влияние размерного несоответствия атомов бинарных медных сплавов на сопротивление разрушению при трении	309
7.4. Объемные изменения при старении сплава медь–бериллий	317

7.5. Термомеханическая обработка бериллиевых бронз	320
7.5.1. Влияние деформации на структуру и свойства закаленных бериллиевых бронз	320
7.5.2. Природа изменения интенсивности матричных отражений деформированных закаленных бериллиевых бронз	327
7.5.3. Структурные превращения при старении деформированных бериллиевых бронз	334
7.5.4. Свойства деформированных бериллиевых бронз после старения	341
8. СУБМИКРОСКОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Zr–2,5%Nb	350
8.1. Субмикроскопическая структура сплава Zr–2,5%Nb, подвергнутого интенсивному пластическому деформированию	351
8.2. Субмикроскопическая структура сплава Zr–2,5%Nb, подвергнутого интенсивному пластическому деформированию и ионно-лучевому азотированию	356
8.3. Роль упругих межфазовых деформаций в формировании кристаллической структуры сплава Zr–2,5%Nb	358
8.4. Кристаллографические особенности выделения частиц β -Nb при отпуске деформированного сплава Zr–2,5%Nb	364
8.5. Прочностные свойства, триботехнические характеристики и коррозионная стойкость сплава Zr–2,5%Nb	367
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	376
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	380