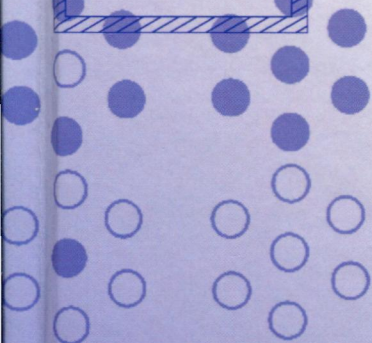
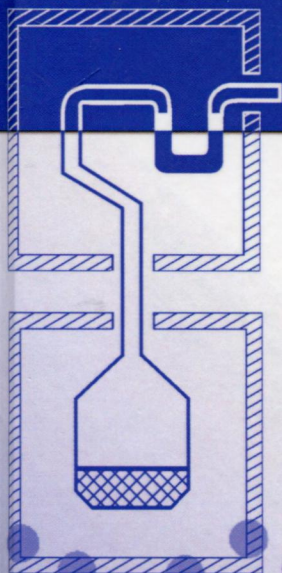


# ТЕРМОДИНАМИКА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ



А. Г. Морачевский, Е. Г. Фирсова

**А. Г. МОРАЧЕВСКИЙ,  
Е. Г. ФИРСОВА**

# **ТЕРМОДИНАМИКА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

---

Учебное пособие



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР  
2021

ББК 24.5я73

М 79

**Морачевский А. Г., Фирсова Е. Г.**

**М 79** Термодинамика жидких металлов и сплавов: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 240 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-2293-7**

В учебном пособии изложены вопросы, связанные с термодинамическим описанием одно-, двух- и трехкомпонентных металлических систем в жидком состоянии. Изложены основные методы экспериментального исследования термодинамических свойств жидких сплавов. Рассмотрена структура и термодинамические свойства индивидуальных жидких металлов. Обсуждается связь между фазовой диаграммой и термодинамическими свойствами в жидком состоянии двойных металлических систем. Особое внимание уделено системам с образованием интерметаллических соединений, их структуре и свойствам в жидкой фазе. Рассмотрены методы аналитического представления концентрационной зависимости термодинамических функций в двойных жидких металлических системах. Описаны наиболее распространенные методы расчета термодинамических свойств жидких тройных металлических систем на основании данных о граничных двойных системах.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по магистерской программе «Материаловедение наноматериалов и компонентов электронной техники» направления подготовки магистров «Техническая физика». Оно может быть также использовано при обучении студентов направлений подготовки «Материаловедение и технологии материалов», «Металлургия», в системах повышения квалификации, в учреждениях дополнительного профессионального образования.

ББК 24.5я73

Издается в авторской редакции

**Рецензенты:**

*Л. Б. ЦЫМБУЛОВ* — доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией металлургии — начальник сектора пиromеталлургии ООО «Институт Гипроникель»;

*А. А. ПОПОВИЧ* — доктор технических наук, профессор, директор Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета.

**Обложка**  
*Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2021  
© А. Г. Морачевский, Е. Г. Фирсова, 2021  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2021

## Оглавление

Предисловие.....	6
Введение .....	8
<b>1. Термодинамическое описание процесса образования сплава из чистых компонентов .....</b>	<b>13</b>
1.1. Парциальные и интегральные величины.....	13
1.2. Относительные термодинамические функции .....	19
1.3. Идеальный раствор и избыточные термодинамические величины.....	21
1.3.1. Термодинамические функции идеального раствора... 21	
1.3.2. Избыточные термодинамические функции .....	23
1.4. Активность и коэффициент активности. Интегрирование уравнения Гиббса-Дюгема для двухкомпонентных систем .....	25
1.5. Закон Генри. Термодинамические свойства разбавленных растворов.....	30
1.6. Выбор стандартного состояния. Переход от одного стандартного состояния к другому.....	37
1.7. Приближенные модели растворов .....	43
1.7.1. Регулярные растворы.....	43
1.7.2. Атермические растворы .....	47
1.8. Особенности концентрационной зависимости термодинамических функций. Функции стабильности и избыточной стабильности .....	48
<b>2. Основные экспериментальные методы исследования термодинамических свойств жидких металлических систем .....</b>	<b>52</b>
2.1. Общая характеристика методов исследования.....	52
2.2. Метод электродвижущих сил.....	54
2.2.1. Цепи с расплавленными электролитами .....	56

2.2.2. Цепи с твердыми электролитами с катионной проводимостью .....	58
2.2.3. Цепи с твердыми электролитами с анионной проводимостью .....	64
2.3. Методы измерения давления насыщенного пара .....	71
2.3.1. Статические методы .....	72
2.3.2. Динамический метод измерения давления насыщенного пара .....	77
2.3.3. Кинетические методы измерения давления насыщенного пара .....	81
2.4. Метод исследования гетерогенных равновесий (циркуляционный метод) .....	88
2.5. Калориметрические методы исследования .....	93
2.5.1. Общие сведения о классификации калориметров .....	95
2.5.2. Проведение калориметрических измерений .....	98
2.5.3. Примеры калориметрических исследований различных процессов .....	101
2.6. Методы измерения плотности .....	108
<b>3. Термодинамические свойства и особенности строения жидких металлов и двухкомпонентных сплавов .....</b>	<b>113</b>
3.1. Индивидуальные жидкие металлы.....	113
3.1.1. Структура жидких металлов .....	113
3.1.2. Плотность и молярный объем жидких металлов ....	122
3.1.3. Теплоемкость жидких металлов .....	126
3.1.4. Энтропия жидких металлов. Изменение энтропии при плавлении и испарении металлов.....	131
3.2. Термодинамические свойства жидких двухкомпонентных металлических систем .....	136
3.2.1. Связь между характером отклонений от идеального поведения и межатомным взаимодействием ..	136
3.2.2. Классификация жидких двойных металлических систем.....	138
3.2.3. Системы с образованием интерметаллических соединений в твердом состоянии. Ассоциация в жидкой фазе .....	143
3.2.4. Системы с образованием твердых растворов .....	183
3.2.5. Системы эвтектического типа .....	188

3.2.6. Системы с областью расслоения в жидком состоянии.....	192
3.3. Аналитическое представление концентрационной зависимости термодинамических функций в жидких двойных металлических системах.....	195
<b>4. Термодинамические расчеты в трехкомпонентных системах ..</b>	<b>203</b>
4.1. Интегрирование уравнения Гиббса-Дюгема для трехкомпонентных систем .....	203
4.2. Приближенные методы расчета термодинамических свойств тройных систем по данным о граничных двойных системах .....	208
4.2.1. Геометрические модели .....	208
4.2.1.1. Симметричные модели .....	209
4.2.1.2. Асимметричные модели .....	214
4.2.2. Полиномиальные методы расчета термодинамических свойств трехкомпонентных систем.....	217
4.2.3. Применение правила Здановского и метода изопотенциалов к жидким трехкомпонентным металлическим системам .....	220
4.2.3.1. Правило Здановского .....	220
4.2.3.2. Метод изопотенциалов .....	223
4.3. Термодинамическое описание взаимного влияния компонентов в жидких тройных металлических системах ....	225
Рекомендуемая литература .....	234