546[.11 : .3](049.3)

ВОДОРОД В МЕТАЛЛАХ

Hydrogen in Metals/Ed. G. Alefeld.[1] J. Völkl.— Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978.— Vol. I. Basic Properties, 427 p. Vol. II. Application-oriented Properties, 387 p.

Двухтомник «Водород в металлах» посвящен одной из актуальных проблем современной физики твердого тела — взаимодействию водорода с металлами; в нем рассмотрены основные свойства металл-водородных систем.

Проблема водорода в металлах приобрела в последнее время особенно большое значение в связи с развитием атомной и водородной энергетики, созданием будущих термоядерных реакторов, где везде присутствие водорода, образующегося в результате

различных процессов, может приводить к изменению ряда физических свойств металлов. Возникнув в чисто прикладных аспектах, проблема водорода в металлах стала в настоящее время одной из основных фундаментальных проблем современной физики твердого тела. Достаточная модельная простота металл-водородных систем, которая обусловлена малым размером, массой и простым электронным строением водорода, позволяет исследовать широкий круг интересных аспектов физики твердого тела, к которым относится электронная структура и магнитные свойства металлов, различные вопросы физики фазовых переходов, квантовая и надбарьерная диффузия водорода в металлах и т. д. Многие из этих вопросов рассмотрены в данной книге.

Первый том состоит из тринадцати обзорных статей, написанных на высоком научном уровне квалифицированными специалистами, плодотворно работающими в области исследования водорода в металлах. Общую редакцию книги осуществляли Г. Альфельд и Ж. Вёлкль.

В первой статье этого тома рассмотрены основные термодинамические и кинетические вопросы теории фазовых переходов в металл-водородных системах. Большое место в этой статье уделено анализу упругой энергии взаимодействия водородных атомов в металле, которая играет важную роль в теории фазовых переходов. Исследование проведено в континуальном приближении теории упругости и в микроскопическом приближении в рамках решеточной модели.

Очень полезной является обзорная статья Г. Пейсла о деформации решетки металла, обсуловленной водородными атомами. Рассматривая водородный атом как центр дилатации, автор с помощью привлечения экспериментальных методов диффузионного рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей, а также по изменению макроскопической деформации металла, систематизировал величины искажений решетки вблизи водородных атомов в ниобии, тантале, ванадии, палладии и в других металлах.

В одной из статей этого тома с помощью метода нейтронной спектроскопии излагаются результаты изучения колебаний решетки в металлических гидридах.

Большое внимание в книге уделено исследованию изменений электронных свойств металл-водородных систем при наличии гидридных соединений. При этом приводятся подробные сведения об изменении решеточной структуры, электронной удельной теплоемкости, сверхпроводимости в системах PdH_x, TiH, CrH, MnH, VH_x.

В первом томе достаточно подробно обсуждаются вопросы использования современных ядерно-физических методов исследования в задачах физики твердого тела. Так, интересный обзор представлен по исследованию с помощью метода Мёссбауэра некоторых металл-водородных систем: гидридов переходных, редкоземельных металлов и актинидов. В другой обзорной статье анализируется возможность использования метода ядерного магнитного резонанса в изучении диффузионной подвижности атомов водорода в металлах и в исследовании электронной структуры металла. Другим ядерным методом, который рассматривается в книге, является метод квазиупругого рассеяния нейтронов. С помощью этого метода предлагается исследовать некоторые свойства металлических гидридов.

Для выявления определенных физических свойств водорода в ферромагнитных металлах и сплавах, по мнению автора одной из статей этого тома, удобным является метод магнитной релаксации. Этот метод позволяет с высокой степенью точности по измерению магнитной восприимчивости системы определить величины активационных барьеров водородных атомов в этих ферромагнитных системах.

На интересные свойства положительных ионов, которые представляются как легкие изотопы водорода, обратил внимание в своей статье о мю-ионах А. Зигер.

Достаточно полный обзор в книге сделан В. Веллесом по магнитным свойствам металлических гидридов и гидрированным интерметаллическим соединениям, который включает значительный класс металл-водородных систем.

В книге представлены также две обзорные статьи по диффузии водорода в металлах, причем одна из них посвящена теоретическим аспектам явления, а другая — эксперименту. В теоретическом обзоре дано последовательное изложение диффузионных процессов для легких межузельных атомов в решетке при различных ее температурах, начиная с квантовых эффектов когерентного туннелирования при низких температурах и кончая аномальными эффектами при высоких температурах. В этой статье также обсуждается теория «поляронов» малого радиуса и ее различные модификации.

В статье, посвященной эксперименту, описаны экспериментальные методики и приведены величины коэффициентов диффузии водорода при малых и общих его концентрациях в ряде металлов.

Второй том включает в себя восемь обзорных статей, которые ориентированы в основном на исследование с общих физических принципов некоторых прикладных аспектов металл-водородных систем. При этом первые четыре статьи связаны с рассмотрением термодинамики и фазовых переходов в металл-водородных системах. В первой водной статье один из редакторов этого сборника Г. Альфельд обсуждает интересную техническую проблему о возможности использования металлических гидридов в качестве преобразователей тепловой энергии. Для этого предлагается

с помощью изменений температуры и давления водорода создать в металл-водородных системах некоторый циклический режим работы, при котором в определенных интервалах температур и давлений могли бы образовываться одни гидриды и исчезать другие.

В следующей статье содержится обзор совокупности фазовых диаграмм некоторых металл-водородных систем, которые могут иметь место в ванадии, тантале, ниобии и т. д. Большое внимание при этом уделено выявлению тех температурных и концентрационных областей, в которых возникают различные структуры и новые фазы. Здесь же попутно обсуждаются вопросы, связанные с морфологией фаз и некоторыми методами приготовления исследуемых металлических образцов.

Отдельную статью составители этого сборника посвятили поведению водорода в достаточно хорошо изученном металле — палладии и его сплавах. В этой статье подробно рассмотрена термодинамика палладий-водородных систем, проанализированы возникающие фазовые диаграммы в таких системах, а также обсуждены вопросы, связанные с неидеальностью поведения растворенного водорода в палладии. Здесь же на примере тройных систем в приближении взаимодействия ближайших соседей, и попытка исследовать термодинамику палладиевых сплавов, которые содержат растворенный водород. Значительное место в этой статье также уделено диффузионной подвижности водорода в палладии и его сплавах.

О новых свойствах, которые возникают в металл-водородных системах, находящихся под высоким давлением водорода, сообщил в своей статье Барановский. Им, в частности, отмечено, что с увеличением давления водорода, начиная с давлений в несколько десятков килобар, в таких системах наблюдаются интересные изменения целого ряда свойств таких, как электросопротивление, сверхпроводимость, теплопроводность, диффузионная подвижность водорода и т. д.

Важной проблеме — хранению водорода в системах — посвятил свою обзорную статью Р. Висвол. В последнее время эта проблема превращается в одну из важнейших технических задач, успешное решение которой позволит в будущем широко использовать водород в качестве одного из дешевых источников энергии. Одним из эффективных способов хранения водорода в металлах является образование в них различных гидридов. В этой статье Р. Висвол представил достаточно подробный обзор гидридов и их свойств. Им проанализирована термодинамика гидридов, рассмотрена кинетика возможных химических реакций, в которые может вступать водород в сплавах, образуя гидриды. Здесь же указаны те физические условия, при которых возможно образование гидридов в целом классе металлов и их сплавов, начиная от щелочных, щелочноземельных металлов и кончая металлами третьей группы, а также титаном, ванадием, ниобием, танталом и другими. В этой же статье также обсуждаются некоторые возможные пути дальнейшего применения в технике запасенного в металле водорода, который рассматривается в этом случае как аккумулятор запасенной энергии.

Очень важной проблемой, которая затрагивается в одной из статей этого тома, является проблема сверхпроводимости в металл-водородных системах. Помимо общего рассмотрения влияния водорода на сверхпроводимость, в этой статье особое место уделено специальным методам приготовления исследуемых сверхпроводников, а также изучению сверхпроводящих свойств металлов и сплавов в зависимости от концентрации и давления водорода. Для физиков-теоретиков, занимающихся вопросами сверхпроводимости, особенно полезным будет интересный материал, представленный в статье по изменениям электронных и фононных свойств этих сверхпроводящих металл-водородных систем.

Следующая статья этого тома посвящена исследованию подвижности водорода под действием различных движущихся сил, которые могут создаваться электрическими и температурными полями, а также полями упругих напряжений. В статье проанализирована микроскопическая природа этих сил и на основе обширных экспериментальных результатов в ряде металлов выявлены величины эффективного заряда и «теплоты переноса», которые в основном характеризуют величину подвижности водорода при наличии этих полей.

В большинстве случаев при изучении поведения водорода в металлах исследователи исходят из того, что металл является достаточно совершенным и не содержит никаких дефектов структуры. Однако в ряде случаев под действием различных процессов (механические воздействия, облучение) в металле могут накапливаться достаточно большие концентрации различного рода дефектов (дислокаций, пор, трещин и т. д.), которые существенным образом будут влиять на поведение водорода в металле, являясь для него своеобразными ловушками. Последняя статья в этом томе как раз и рассматривает возможные механизмы захвата водорода различными дефектами структуры металла. В этой статье выясняется природа ловушек водорода, анализируется взаимодействие его с порами, дислокациями, примесями, а также с теми полями упругих напряжений, которые могут возникать в металлах. При этом для некоторых металлов приводятся соответствующие величины энергий связи и активационных барьеров движения образовавшихся комплексов водород — примесь.

В целом двухтомник «Водород в металлах» представляется очень интересным и необычным изданием. Каждый том снабжен обширным библиографическим материа-

лом по самым различным аспектам поведения водорода в металлах, который в основном основан на журнальных публикациях и материалах конференций последних лет. Все это повышает ценность этой книги, которая может служить хорошим справочным пособием для всех специалистов, занимающихся этой областью исследования. Подробное обсуждение в этой книге различных современных ядерно-физических методов, которые применяются в изучении поведения водорода в металлах, делает эту книгу также очень полезной для специалистов по ядерной физике.

А. И. Рязанов