

В заключение мы должны вновь вернуться к проблеме управляемого синтеза и попытаться кратко сформулировать ее настоящее состояние и вероятное будущее.

Разработку этой проблемы можно сравнить с трудным подъемом по лестнице с очень крутыми ступенями. Высоту каждой такой ступени можно измерить, только поднявшись на нее. Ко времени Второй женеvской конференции мы обладали большим запасом идей, но фактически могли создавать плазму с температурой порядка миллионов градусов, существующую всего лишь в течение нескольких микросекунд. Это была первая ступень «лестницы» управляемого синтеза. Устойчивое длительное сохранение плазмы в гибридном магнитном поле, осуществление эффективного омического нагре-

ва в стабилизированных кольцевых системах и успешная разработка нового метода «турбулентного» нагрева плазмы означают подъем на вторую ступень. Следующая (но еще не последняя) ступень будет достигнута тогда, когда удастся создать устойчивую высокотемпературную плазму с такой высокой плотностью, что она сможет служить мощным нейтронным источником, превосходящим по своей экономичности ускорительные устройства. В сущности только на этой стадии слова «управляемый термоядерный синтез» приобретут реальное значение.

Будем надеяться, что к открытию Четвертой женеvской конференции подъем на третью ступень термоядерной лестницы будет завершен.



Применение изотопов и источников излучения в исследованиях в области физических наук*

П. Л. Грузин

Достижения ядерной физики используются в различных областях науки и техники. Общим итогом работы ученых и инженеров в данном направлении можно считать создание новой отрасли науки — прикладной ядерной физики, основу которой составляют такие вопросы, как физика изотопов и ядерных излучений, применение изотопов и ядерных излучений в промышленности и научных исследованиях, использование реакторов и радиоизотопных источников излучения в исследованиях свойств вещества и влияния ионизирующих излучений на его поведение и технологические процессы. Применение изотопов и ядерных излучений в области физики, химии и технических наук позволило решить ряд научных и практических задач.

По проблеме использования ядерно-физических методов в литературе публикуется большое число научных работ, большинство которых касается применения изотопов и источников ядерных излучений в области физики, химии и технических наук. В настоящем обзоре излагаются новые результаты некоторых исследова-

ний только по наиболее важным вопросам рассматриваемой проблемы. Наряду с данными, полученными в СССР, в доклад включены результаты отдельных исследований, проводившихся в других странах, представивших свои материалы*.

Достижения ядерной физики широко используются в научных исследованиях начиная с 1945—1950 гг. В последние годы ядерно-физические методы получили дальнейшее развитие как в СССР, так и в других странах. Так же, как и прежде, большое число исследований проводится в области физики и химии.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ

Важными задачами исследований в области физики являются такие вопросы, как изучение природы сил межатомного взаимодействия, дефектов кристаллической структуры, характера атомных перемещений, спектра колебаний атомов в кристаллической решетке, картины микрораспределения элементов. С явлением диффузии связаны плавление и затвер-

* Доклад № 298, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964.

* При составлении доклада использованы материалы Австралии, Бельгии, ПНР, Канады, Японии.

давание кристаллических тел, деформация и рекристаллизация металлов, прочность и разупрочнение сплавов при высоких температурах. Характером распределения примесей и структурных дефектов решетки определяются такие фундаментальные свойства металлов, как пластичность, твердость, прочность, коррозионная стойкость, а также многие теплофизические и магнитоэлектрические свойства металлов и ионных кристаллов. Применение изотопных и радиационно-физических методов исследования позволило существенно продвинуться в понимании деталей ряда актуальных научных вопросов.

Диффузия в твердых телах и жидкостях

Первые определения параметров самодиффузии с применением естественно-радиоактивных изотопов были выполнены в 1920 г. [1]. Искусственные радиоактивные изотопы впервые были использованы для изучения самодиффузии в 1937 г. [2]. Значительного развития достигли эти работы в последние годы.

Использование радиоактивных и стабильных изотопов в исследованиях по диффузии имеет принципиальное научное и практическое значение. Это позволяет существенно упростить эксперименты по диффузии, а также открывает новые возможности в изучении механизма поступательного перемещения атомов в твердом теле и жидкостях.

Разработан ряд оригинальных радиоизотопных методов изучения диффузии, отличительная черта которых — возможность определения констант диффузии и чисел переноса при низком уровне диффузионной подвижности и низкой концентрации диффундирующего элемента, а также возможность разделять потоки граничной и объемной диффузии в поликристаллах. Методы отличаются высокой чувствительностью и точностью. Константы диффузии определяются на основе данных радиометрического и масс-спектрометрического определения концентрационных и кинетических кривых диффузии.

При изучении объемной диффузии в твердых телах надежные результаты дает метод интегральной радиоактивности остатка образца [3—12]. В отдельных случаях он позволяет обнаруживать граничную диффузию в поликристаллических телах. Коэффициент диффузии определяется по данным измерения интегральной радиоактивности остающейся части плоского образца при последовательном сня-

тии с него слоев. Наиболее просто метод осуществляется, когда изотоп диффундирующего вещества имеет γ -излучение, либо мягкое β -излучение ($E_\beta < 0,2 \text{ Мэв}$).

К другой группе относятся методы, основанные на определении изменения интегральной радиоактивности образца без его разрушения. Представляются перспективными два частных метода: метод отношения интегральных радиоактивностей и метод кинетической кривой интегральной радиоактивности [14—16]. Первый из них основан на экспериментальном определении отношения интенсивностей мягкой и жесткой частей спектра излучения образца. Опыты ставятся так, чтобы при диффузии существенно убывала интенсивность только мягкой части спектра. Отношение интенсивностей служит мерой протекания диффузии. Просто метод осуществляется тогда, когда изотоп имеет β - и γ -излучение. В данном методе исключается необходимость учитывать изменения размеров образца, испарение изотопа, изменения геометрических условий и другие факторы. Метод оказывается особенно полезным при снятии кинетической кривой отношения интегральных радиоактивностей.

Находит применение также метод, в котором выражение для кинетической кривой интегральной радиоактивности образца получено с учетом одновременного протекания объемной и граничной диффузии в поликристаллическом теле [17, 18].

Изучена в широкой области температур самодиффузия в металлах, в том числе в таких технически важных, как железо, никель, титан, цирконий, хром, молибден, вольфрам [10, 19—25]. Получены результаты, позволяющие установить некоторые закономерности, касающиеся уровня диффузионной подвижности различных металлов, граничной диффузии и диффузии металлоидов в сталях. Установлено, что уровень диффузионной подвижности металлов связан с их температурой плавления и структурным состоянием (рис. 1). В сталях диффузионная подвижность легирующих элементов и некоторых металлоидов (фосфора, серы, углерода) резко отличается по своему уровню. Фосфор, например, по уровню диффузионной подвижности занимает промежуточное положение между легирующими элементами и углеродом (рис. 2). На основе полученных результатов сделаны выводы, направленные на улучшение технологии выплавки и термообработки сплавов и полупроводниковых материалов [26—29].

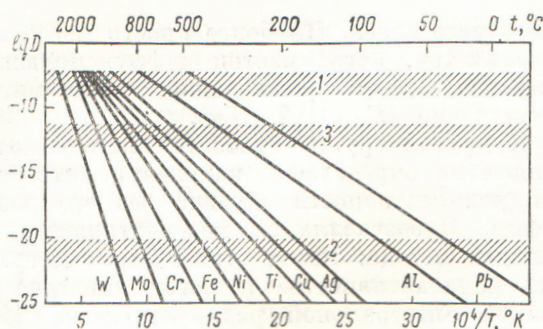


Рис. 1. Уровни диффузионной подвижности металлов. Области 1; 2; 3 — уровни подвижности протекания процессов плавления и рекристаллизации металлов и твердых растворов.

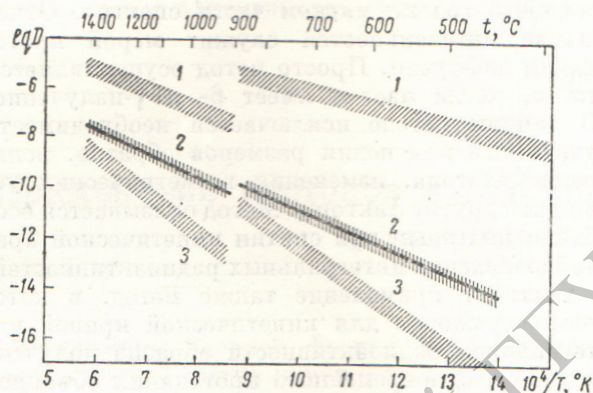


Рис. 2. Уровни диффузионной подвижности углерода (1; 1), фосфора (2; 2) и легирующих элементов (3; 3).

Таким образом, следует отметить, что в области физики благодаря использованию радиоизотопных методов получены принципиально важные научные данные по одному из коренных вопросов кинетической теории твердого тела и жидкостей.

Распределение элементов в сплавах

В исследованиях значительное место отводится изучению картины распределения элементов в микрообъемах сплавов. Такие данные позволяют уточнить режимы термической и механической обработки сталей и сплавов, обеспечивающие получение определенных свойств металла. Наряду с известными методами изучения структуры сплавов все более широкое применение находит метод контактной автораддиографии, основанный на использовании радиоактивных изотопов и нейтронного облучения.

Получены данные по влиянию фазовых превращений, рекристаллизации деформации, легирования и других факторов на распределение элементов в сталях, сплавах и полупроводниковых материалах [30—32]. Особое значение имеют результаты, касающиеся микро-распределения примесей и легирующих элементов в сплавах на основе циркония и титана [33]. Показано, что жаропрочность и коррозионная стойкость циркониевых и титановых сплавов в известной степени определяется наличием возникающих при $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -превращении концентрационных неоднородностей в микрообъемах. Автораддиографические данные по ликвации ряда элементов в сталях и сплавах позволили внести изменения в технологию их обработки [34, 35].

Метод контактной автораддиографии применяется в исследованиях процесса течения металла при горячей и холодной деформации [36, 37]. Полученные данные позволили установить влияние различных параметров процесса деформирования (усилий и скорости деформации, калибровки прокатных валков и др.) на глубину и характер очага деформации, а также на перераспределение примесей и легирующих элементов в деформируемом металле (рис. 3). Эти результаты необходимы для решения ряда задач, связанных с повышением прочностных характеристик изделий, получаемых методом деформирования, а также с разработкой новых технологических процессов, таких, например, как термомеханическая обработка, экструзия при сверхвысоких давлениях и др.

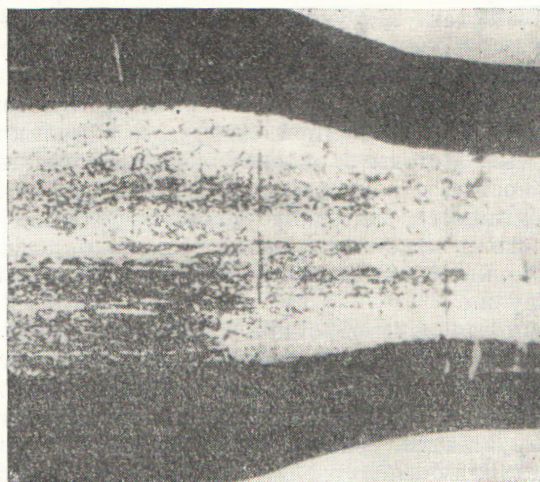


Рис. 3. Автораддиограмма продольного сечения очага деформации раската после 13-го пропуска.

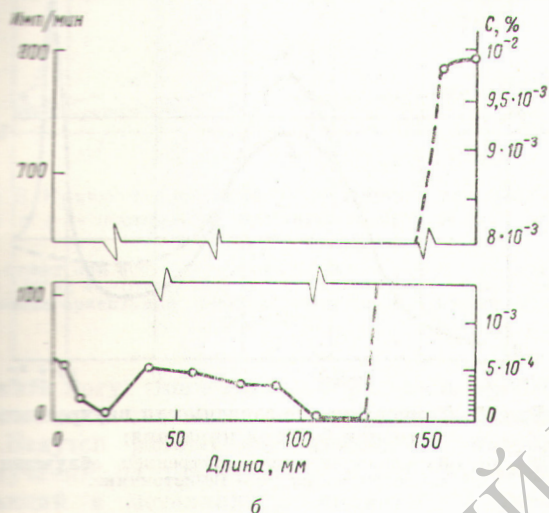
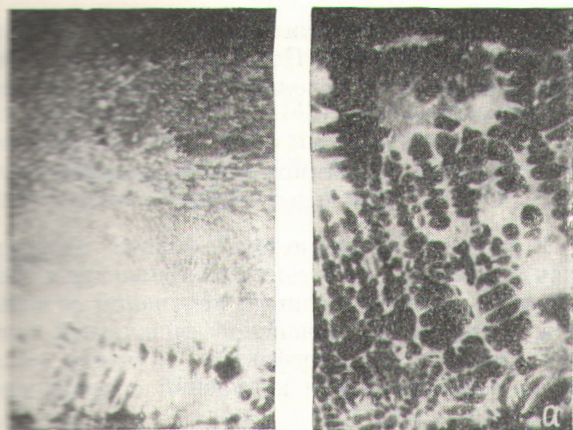


Рис. 4. Распределение примесей в слитках, полученных зонной плавкой:

а — авторadiограмма распределения самария в алюминии [39]; б — распределение примесей углерода по длине слитка железа [38].

С применением метода авторadiографии проведены интересные исследования процесса очистки металлов зонной плавкой (рис. 4) [38, 39]. Это позволяет уточнить технологию зонной плавки при низком содержании примесей. Проведены эксперименты по усовершенствованию известных методов авторadiографии [40]. Получены интересные результаты по распределению серы в чугунах. Установлено, что она концентрируется в графитовых хлопьях. Метод авторadiографии впервые применен в исследованиях макромозаики и плотности дислокаций. Установлено, что в монокристаллах Al — Cu имеется макромозаика дендритного типа (рис. 5), а в монокристаллах Al — Zn — дислокационного типа.



Рис. 5. Авторadiограмма распределения Cu^{64} в сплавах Al — Cu [40].

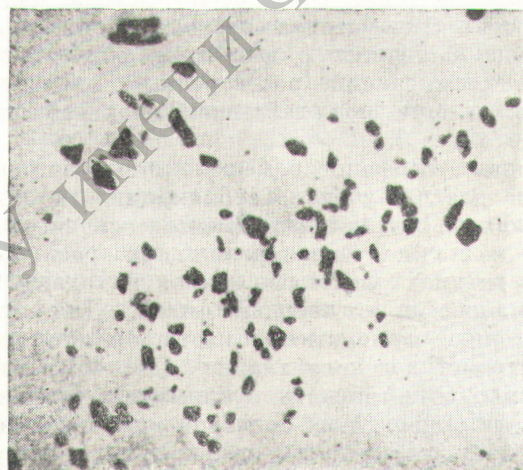


Рис. 6. Авторadiограмма распределения бора в цирконии.

Получены нейтронные авторadiограммы, характеризующие распределение малых добавок бора в циркониевых сплавах (рис. 6). Эти данные представляются интересными с точки зрения улучшения свойств сплавов.

Межатомное взаимодействие в металлах

Применение методов ядерной физики позволяет определять степень ионизации атомов в твердых телах (радиометрическое определение чисел переноса), парциальные магнитные моменты атомов в сплавах (методом дифракции нейтронов), распределение электронов вокруг ядра атомов и среднее квадратичное сме-

щение атомов в кристаллической решетке (определение величины эффектов резонансного поглощения γ -излучения мессбауэровских изотопов), термодинамические активности (радиометрическое определение упругости пара) и характеристики фононного спектра (методы дифракции нейтронов и определения спектров резонансного поглощения γ -излучения). По всем этим вопросам получен фактический материал. В частности, определены парциальные магнитные моменты атомов компонентов ряда сплавов (железо — углерод, никель — хром и др.) [41], получены данные для ряда сплавов по влиянию фазового состава и других факторов на спектр резонансного поглощения γ -излучения изотопа Sn^{119} .

Важные сведения о состоянии атомов в твердых растворах дают исследования переноса растворенных элементов под действием электрического тока. Применение метода радиоактивных индикаторов позволяет определять с высокой точностью незначительные изменения концентрации растворенных элементов, происходящие под действием электрического тока [42, 43].

Ценные сведения о межатомном взаимодействии дает изучение сублимации металлов и сплавов. В этих экспериментах основным моментом является измерение при различных температурах упругости пара, находящегося в равновесии с твердой фазой. Для этого применяют радиоактивные изотопы и метод масс-спектрометрического анализа [44, 45]. Таким путем можно изучать сублимацию тугоплавких металлов. Масс-спектрометрический анализ дает возможность исследовать структуру частиц газовой фазы. Результаты, полученные в последние годы, позволили выяснить вопросы, касающиеся термодинамики сплавов тугоплавких металлов, полупроводниковых соединений и других материалов.

В последние годы получили развитие работы по использованию мессбауэровских радиоактивных изотопов для изучения свойств и поведения металлов в различных условиях. Используются как механические, так и электродинамические установки.

Эффект Мессбауэра применяется как для изучения самих дефектов, так и их влияния на кристаллическую решетку. Исследовался эффект на ядрах Sn^{119} , в матрицах ванадия, золота, платины, таллия [46, 47]. На атомах растворителя в сплавах на основе олова обнаружена зависимость величины вероятности эффекта от концентрации примеси, что свидетель-

ствует об изменении силовых констант в твердых растворах [47]. Показана связь эффекта с температурой плавления и атомным объемом вещества.

Природа радиационных нарушений в твердых телах

В области радиационной физики проводились исследования в таких направлениях, как изучение действия ядерных излучений на свойства материалов, выяснение физической природы радиационных дефектов, изучение механизма взаимодействия излучений с веществом.

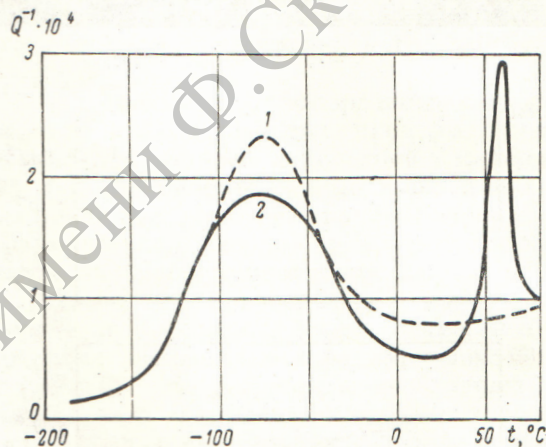


Рис. 7. Температурные зависимости внутреннего трения Q^{-1} для циркония:

1 — до облучения; 2 — при внутреннем облучении α -частицами на Po — Ве-источнике.

а также разработка методов радиационной обработки твердых тел излучениями различных видов и применение этих методов в исследованиях, связанных с выяснением механизма действия различных факторов на свойства твердых тел (прочность, пластичность, электрические и магнитные свойства). Разработаны методы радиационной обработки металлов, основанные на использовании полоний — бериллиевых источников нейтронов и изотопных γ -установок, а также методы внутреннего облучения металлов α -частицами и осколками деления ядер [48].

Получены данные о влиянии отдельных видов излучений на упругие и неупругие свойства, на механические свойства монокристаллов и поликристаллических образцов меди, циркония, титана, хрома и молибдена. Показано на цирконии влияние γ -облучения и других видов излучения на пик внутреннего трения типа Бордони (рис. 7), а также влияние

малых доз γ -облучения на амплитудную зависимость внутреннего трения монокристаллов меди, поликристаллического молибдена и других металлов (рис. 8) [49]. Установлено, что при облучении металлов малыми дозами γ -излучения радиоактивного Co^{60} ($10^8 - 10^9$ p) возникают парные дефекты Френкеля, которые при

быть осуществлены в промышленном масштабе при использовании мощных источников ионизирующих излучений.

Исследования в области радиационной химии*

Возможность использования мощных источников излучения стимулировала дальнейшее развитие исследований в радиационной химии. Большое число работ направлено на развитие теории радиационно-химических превращений.

Проведено много исследований по изучению элементарных радиационных процессов в газах, жидкостях и твердых органических соединениях. Результаты этих работ позволили решить ряд теоретических вопросов радиационной химии, что способствовало расширению использования мощных радиационных установок, особенно в области химии полимеров.

Важные результаты получены по выяснению механизма радиационных процессов в водных растворах [40, 50—54]. Так, например, восстановление некоторых комплексных соединений платины, палладия и родия в водных растворах при облучении приводит к образованию чернил, отличающейся по каталитической активности от приготовленной обычными методами. Исследование радиолиза концентрированных растворов показало, что серная кислота разрушается в результате как прямого, так и косвенного действия излучения, тогда как хлорная только вследствие прямого действия. Механизм радиолиза включает промежуточное образование радикалов и возбужденных молекул.

Калориметрическим методом показано, что полимеризация акрилонитрила при -196°C протекает непосредственно в твердой фазе в момент облучения без энергии активации, и высказано предположение, что эта полимеризация обусловлена короткоживущими активными центрами, гибнущими сразу после выключения пучка.

Начальная скорость полимеризации тетрафторэтилена (ТФЭ) в твердом состоянии вблизи точки плавления на порядок выше, чем в жидкости при той же температуре, причем эффективная энергия активации в кристалле равна 0,6—1,6 ккал/моль, а в жидкости — 6 ккал/моль

* Соавторы этой части доклада А. Д. Абкин, Х. С. Багдасарьян, Н. А. Бах, Н. Я. Бубен, В. В. Воеводский, В. И. Гольданский, П. И. Долин, В. Л. Карпов, Л. С. Полак, С. Я. Пшежецкий, В. Л. Тальрозе, Н. Н. Туницкий, Б. Л. Цетлин, Б. В. Эршлер.

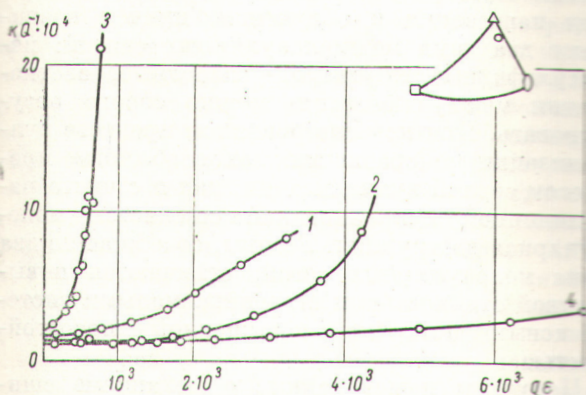


Рис. 8. Кривые зависимости Q^{-1} от амплитуды колебаний ε (k и q — постоянные величины) для монокристалла меди:

1 — отжиг при 800°C ; 2 — γ -облучение ($\sim 10^8$ p); 3 — отжиг при 150°C ; 4 — отжиг при 200°C . (В правом верхнем углу показана ориентация монокристалла по отношению к оси образца).

отжете могут приводить к образованию петель дислокаций сравнительно большой плотности.

Ведутся работы по воздействию ядерных излучений на протекание физико-химических реакций в металлах и сплавах. Изучено, в частности, воздействие γ - и электронного облучения на процесс старения сплава медь — бериллий. В ряде работ изучено взаимодействие радиационных дефектов с дислокациями в сталях, упрочненных термомеханической обработкой.

II. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ХИМИИ

Применение радиоактивных изотопов и ядерных излучений существенно расширяет границы практических возможностей химии. Исследование действия ядерных излучений на химические вещества и процессы составляет предмет новой области химической науки — радиационной химии. Установлена принципиальная возможность управления с помощью радиационного воздействия ходом химических превращений и получения новых материалов, что имеет практическое значение. Высокоэффективные радиационно-химические процессы могут

[55]. Установлено, что при облучении твердого ТФЭ образуются парамагнитные и заряженные частицы. Ряд зависимостей указывает на ионный механизм полимеризации ТФЭ в твердом состоянии [46].

Показано, что полимеризация ацетальдегида, пропиоальдегида и триоксана под действием рентгеновского и γ -излучений наиболее эффективно протекает в кристалле при температурах на 10–30° ниже точки плавления [57]. Исследована полимеризация акрилонитрила, диметилбутадиена и циклогексадиена в канальных соединениях включения мочевины и тиомочевины и установлена стереорегулярность получаемых полимеров [58].

Установлены значительные кинетические эффекты и увеличение молекулярного веса при полимеризации акрилонитрила при –78° в присутствии Cu_2O , NiO и $\text{NiO} - \text{Li}$, а также MgO . Аналогичный эффект наблюдался при полимеризации метилметакрилата в присутствии MgO . Полимер обладает стереорегулярностью. Увеличения скорости реакции в присутствии TiO_2 и Cr_2O_3 не наблюдается ни для одного мономера. В отсутствие добавок полимеризация этих систем проходит в тех же условиях по радикальному механизму.

Исследование полимеризации в массе при 0° С и 1–30 рад/сек показало, что для фтор- и фторхлорзамещенных этилена G равно $10^3 - 10^6$, в то время как полимеризация перфторпропилена в жидком и твердом состояниях приводит к образованию низкомолекулярных продуктов со степенью полимеризации не выше 20, причем в момент фазового перехода скорость полимеризации не меняется. В условиях радиации при дозах $10^7 - 10^9$ рад получены твердые полимеры из различных мономеров аллилового ряда, не полимеризующихся, как известно, под действием обычных инициаторов. В отличие от действия обычных инициаторов при воздействии радиации на производные боразола образуются растворимые продукты со степенью полимеризации ~ 9 , содержащие в цепи боразольные циклы. Осуществлена также радиационная полимеризация окиси дифенилвинилфосфина в расплаве [59, 60].

Для создания новых минерально-органических, в частности, ионообменных препаратов, осуществлена газофазная полимеризация мономеров, дающих полимеры с ионообменными функциональными группами, на неорганических сорбентах. Полученные комбинированные ионообменники обладают рядом преимуществ [61].

Этим же методом осуществлена полимеризация виниловых мономеров, олефинов и мономеров ацетиленового ряда на различных синтетических волокнах [62]. Показано, что привитый полимер образуется в ориентированном состоянии.

Комбинированную реакцию вулканизации можно осуществить совместным действием серы при нагревании и облучении, причем возникают два типа межмолекулярных связей: полисульфидные и углерод-углеродные, соотношения между которыми можно строго регулировать. При комбинированном процессе вулканизации по сравнению как с обычным процессом серной вулканизации, так и с чисто радиационной вулканизацией снижается молекулярная деструкция. Резины, содержащие два типа молекулярных сеток, отличаются повышенной стойкостью к старению, малыми гистерезисными потерями и повышенной износостойкостью.

Получены новые данные о механизме сшивания полидиметилсилоксанов и определены радикалы, участвующие в этом процессе. Показано, что скорость рекомбинации аномально возрастает в точках фазового перехода. Исследована радиационная вулканизация различных видов каучуков в латексах, причем найдено, что процесс проходит с более высоким выходом, чем в каучуке в массе. При одновременном введении в полимер термостабилизатора и антирада обнаружено явление синергетизма, т. е. комбинированные добавки обладают более сильным действием, чем это следует из аддитивности.

Исследованы процессы радиационного сшивания в ряду смешанных полиэфиров себаценовой и терефталевой кислот с этиленгликолем при переменном составе звеньев. Установлено, что крайний член ряда — полиэтилен-терефталат — при низких и средних дозах деструктурирует, а при высоких — сшивается. По мере того как содержание звеньев терефталевой кислоты в ряду сополимеров убывает, выход сшивания растет.

Радиационная хемосорбция изучалась на примере системы $\text{H}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Показано, что в поле γ -излучения происходит интенсивная диссоциативная адсорбция, причем число адсорбционных центров для атомов водорода на поверхности Al_2O_3 зависит от условий предварительной тренировки катализатора [63].

Радиолит алканов, адсорбированных на различных окисных катализаторах, содержащих Al_2O_3 , протекает по цепному механизму при

температурах реакции выше 150° [56]. Радиолиз циклогексана исследован на поверхности ряда сорбентов, являющихся как изоляторами, так и полупроводниками. При этом наблюдается антибатность электропроводности и скорости образования водорода. При одновременном действии радиации ($\sim 10^8$ рад) и катализаторов в отличие от термокаталитических процессов происходит обращение ряда каталитической активности. На ряде катализаторов, близких по своим свойствам к изоляторам, обнаружено появление парамагнитных центров и адсорбированных радикалов C_2H , [63]. Исследованы реакции радиолитического разложения углерода и радиационного синтеза аммиака, адсорбированных на различных оксидах (Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO , MgO , NiO , и CuO), не являющихся катализаторами без облучения, но эффективно повышающих выход благодаря передаче энергии [64].

Рассмотрен один из возможных механизмов передачи энергии излучения от твердого тела к адсорбированному веществу, основанный на допущении статистического распределения энергии в локальных областях и концентрации ее в отдельных «горячих» точках поверхности [65].

Применение радиоактивных изотопов в катализе и другие вопросы

Изучаются различные физико-химические свойства радиоактивных твердых тел. Введение изотопа S^{35} в сульфат калия влияет на скорость изотопного обмена серы в системе $K_2SO_4 - SO_3$ при высоких температурах [66]. Величина адсорбции органических красителей на осадке сульфата бария, содержащего добавки Ra или S^{35} , отличается от адсорбции на нерадиоактивном препарате вследствие того, что на поверхности образцов $BaSO_4$ за счет эмиссии β -частиц возникают положительные заряды, а на осадке $(Ba, Ra) SO_4$ вследствие эмиссии α -частиц — отрицательные заряды. Обнаружено, что адсорбция паров органических веществ увеличивается на радиоактивном сорбенте ($BaSO_4$) [67]; изменяется растворимость химических соединений, содержащих радиоактивные изотопы (оксалат церия с диоксидной Ce^{144} , окись иттрия с добавкой Y^{90} или Y^{91} и др.) [68, 69].

Введение радиоактивных изотопов в ряде случаев позволяет повысить эффективность катализаторов. На сульфате магния, содержащем S^{35} , значительно возрастает скорость

дегидратации циклогексанола [70], на трикальцийфосфатном катализаторе, $Ca_3(PO_4)_2 \times H_2O$, с добавками Ca^{45} или P^{32} в несколько раз увеличивается скорость дегидратации изопропилового спирта (рис. 9) [71].

Электронно-микроскопические исследования показали, что на поверхности радиоактивных образцов обнаруживаются многочисленные дефекты и неровности [72]. В процессе

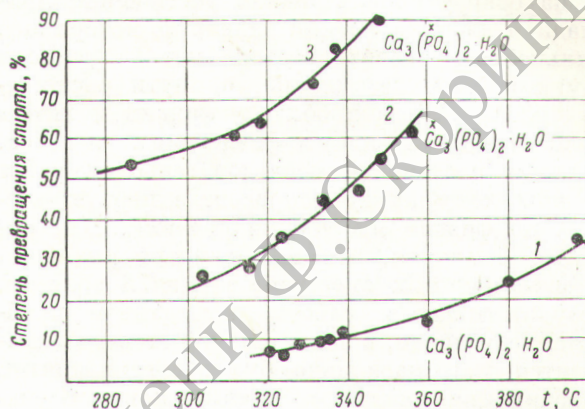


Рис. 9. Скорость дегидратации изопропилового спирта на трикальцийфосфатном катализаторе. Образцы катализаторов:

1 — нерадиоактивный; 2 — 58,1 мкюри/г Ca^{45} ; 3 — 52,2 мкюри/г P^{32} . (Крестиком помечены элементы, содержащие радиоактивные изотопы).

образования твердой фазы из жидкой или газообразной среды излучение радиоактивных изотопов приводит к возникновению большого числа новых центров кристаллизации. Однако связанное с указанными явлениями увеличение поверхности радиоактивных препаратов не объясняет всех особенностей их свойств. Важную роль играют непрерывно возникающие в объеме и на поверхности радиоактивных образцов электрические заряды.

В последнее время установлено влияние излучения радиоактивных изотопов на электрохимические свойства металлов [73]. У радиоактивных образцов железа и Ст.-2 обнаружена значительно более высокая скорость коррозии в воде и влажном воздухе, чем у нерадиоактивных образцов тех же металлов.

Заключение

Применение изотопов и ядерных излучений в физике и химии помогло решению ряда научных и практических задач, имеющих принципиальное значение. Выяснены многие вопросы, касающиеся теории состояния вещества,

механизма и кинетики физико-химических процессов, созданы новые технологические процессы, методы исследования, а также средства контроля и автоматического регулирования параметров производственных процессов. Все это — одно из важнейших достижений использования атомной энергии в мирных целях.

Возможности научно-технического прогресса на основе использования достижений прикладной ядерной физики далеко не исчерпаны. Дальнейшее развитие этой новой отрасли науки пойдет, несомненно, по пути расширения исследований в области физики и химии с применением ядерно-физических методов, а также постановки исследовательских работ по широкому кругу вопросов, в первую очередь по физике ядерных излучений. Нет никакого сомнения, что нас ожидает ряд важнейших научных открытий в данной области. Результативность работы по данной проблеме, безусловно, в значительной степени определится тем, насколько будут совершенными координация усилий и личный контакт ученых различных стран.

Автор выражает большую благодарность Викт. И. Спицыну, Н. А. Бах, П. С. Савицкому, В. И. Синицыну, Ю. Ф. Бабиковой, Ю. А. Поликарпову, А. А. Васильеву, Ю. Д. Жарову и другим советским ученым за предоставление материалов и помощь в подготовке доклада, а также официальным лицам и ученым ряда зарубежных стран, подготовившим и приславшим материалы для доклада. Автор выражает также благодарность В. С. Суетинову за помощь, оказанную при оформлении доклада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Groh, Nevesy. J. Ann. Phys., 63 (1920); 65 (1921).
2. А. М. Заглубский. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 6 (1937).
3. П. Л. Грузин. «Докл. АН СССР», 86, 289 (1952).
4. П. Л. Грузин и др. «Инж.-физ. ж.», I, 64 (1958).
5. П. Л. Грузин и др. «Заводск. лаборатория», № 4 (1955).
6. П. Л. Грузин. «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук», 6 (1953).
7. П. Л. Грузин и др. «Физика металлов и металловедение», 4, 94 (1957).
8. П. Л. Грузин и др. В сб. «Проблемы металловедения и физики металлов». Вып. 5. М., Металлургиздат, 1958, стр. 327.
9. П. Л. Грузин, Ю. А. Поликарпов. В сб. «Металлургия и металловедение чистых металлов». Вып. 2. М., Атомиздат, 1960, стр. 259.
10. П. Л. Грузин, Ю. Д. Жаров, Ю. А. Поликарпов. В сб. «Передовой научно-технический и производственный опыт». Вып. 4. М., ЦИТЭИН, 1962, стр. 23.
11. П. Л. Грузин, В. В. Мураль. «Физика металлов и металловедение», 17, 384 (1964); 16, 551 (1963).
12. P. Lacombe, P. Guiraldenq, C. Lemonie. Conference Radioisotopes. Copenhagen, 1960.
13. Г. Б. Федоров, В. М. Рачинский, Е. А. Смирнов. См. [9], вып. 3, 1961, стр. 203.
14. П. Л. Грузин, Д. Ф. Литвин. «Докл. АН СССР», 94, 1 (1954).
15. В. Т. Борисов и др. «Заводск. лаборатория», № 9, 1070 (1959).
16. В. Т. Борисов и др. См. [8], вып. 5, 1958, стр. 381.
17. С. Г. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. М., Физматгиз, 1960.
18. В. Т. Борисов, В. М. Голиков. «Заводск. лаборатория», № 2, 178 (1956).
19. R. Betts, J. Davies. Материалы, присланные Канадой для настоящего доклада.
20. П. Л. Грузин, Г. Б. Федоров. См. [9], вып. 1, 1959, стр. 219.
21. Е. В. Борисов и др. Там же, стр. 213.
22. П. Л. Грузин и др. См. [8], вып. 5, 1958, стр. 366.
23. П. Л. Грузин, Г. Г. Рябова. См. [9], вып. 2, 1960, стр. 134.
24. Г. Б. Федоров, Ф. И. Жомов. Там же, вып. 3, 1961, стр. 43.
25. М. А. Губарева, Л. М. Мороз. В сб. «Процессы диффузии, структура и свойства металлов». М., Изд-во «Машиностроение», 1964, стр. 15.
26. С. З. Бокштейн. Там же, стр. 5.
27. П. Л. Грузин. «Металловедение и термическая обработка металлов», 10 (1960).
28. П. Л. Грузин, В. В. Мураль. «Физика металлов и металловедение», 17, 792 (1964).
29. Б. И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., Физматгиз, 1961.
30. П. Л. Грузин и др. См. [10], вып. 3, 1960.
31. З. А. Алиярова и др. «Докл. АНАзерб. ССР», 6, 467 (1959).
32. Г. Г. Рябова и др. См. [10], вып. 47, 1961.
33. Г. Г. Рябова, П. Л. Грузин. См. [9], вып. 3, 1961, стр. 26.
34. И. Е. Болотов. «Физика металлов и металловедение», 11, 420 (1961); 11, 427 (1961).
35. С. З. Бокштейн и др. Исследование строения металлов методом радиоактивных изотопов. М., Оборонгиз, 1959.
36. П. Л. Грузин. «Атомная энергия», 11, 379 (1961).
37. Н. А. Чельшев. «Тр. научно-технического общества черной металлургии», 23 (1960).
38. П. Л. Грузин и др. См. [9], вып. 2, 1960, стр. 276.
39. Материалы, присланные Японией для настоящего доклада.
40. Материалы, присланные Польской Народной Республикой для настоящего доклада.
41. В. И. Гоманьков и др. «Физика металлов и металловедение», 14, 26 (1962).
42. Ю. Ф. Бабикова, П. Л. Грузин. См. [9], вып. 1, 1959, стр. 200; вып. 2, 1960, стр. 128.

43. Ю. Г. Миллер, К. П. Гуров. «Физика твердого тела», 3, 2870 (1961).
44. Е. З. Винтайкин и др. Труды Всесоюзной научно-технической конференции по применению радиоактивных и стабильных изотопов и излучений в народном хозяйстве и науке. Металлургия и металлосодержание. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 339.
45. Ан. Н. Несмеянов. Там же, стр. 331.
46. В. А. Брюханов, Н. Н. Делягин, Ю. Коган. ЖЭТФ, 45, 1372 (1963).
47. В. А. Брюханов, Н. Н. Делягин, Ю. Коган. ЖЭТФ, 46, 825 (1964).
48. П. Л. Грузин, А. Н. Семенхин. «Атомная энергия», 15, 169 (1963).
49. Ю. Д. Жаров и др. Релаксационные явления в металлах и сплавах. Труды III Всесоюзной научной конференции. М., Металлургиздат, 1963, стр. 221.
50. В. И. Спицын и др. «Докл. АН СССР», 144, 344, 588 (1962).
51. Л. Т. Бугаенко и др. Там же, 149, 1099 (1962).
52. М. А. Брук и др. Там же, 149, 1322 (1963).
53. Р. Кекельсберг. Материалы, присланные Бельгией для настоящего доклада.
54. В. В. Воеводский. «Кинетика и катализ», 2, 14 (1961).
55. П. В. Зимаков и др. В сб. «Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР». Том 1. М., Гостехиздат, 1961, стр. 219.
56. Б. С. Пшежецкий и др. «Высокомолекулярные соединения», 3, 925 (1961); 4, 728 (1962).
57. В. В. Коршак и др. Там же, 5, 1447 (1963).
58. О. Л. Главати и др. «Нефтехимия», 3 (1963).
59. Е. Б. Егоров и др. «Докл. АН СССР», 146, 1360 (1962).
60. С. А. Доматов, Л. С. Полак. «Нефтехимия», 3, 683 (1963).
61. А. Б. Власов и др. «Докл. АН СССР», 144, 382 (1962).
62. Ю. А. Колбановский, Ю. В. Пепеляев. «Кинетика и катализ», 1 (1964).
63. Ю. А. Колбановский и др. «Нефтехимия», 3, 124 (1963).
64. В. И. Владимиров и др. «Докл. АН СССР», 148, 101 (1963).
65. Радиолит углеводородов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
66. Викт. И. Спицын, И. Е. Михайленко. «Докл. АН СССР», 121, 319 (1958).
67. Л. Д. Белякова и др. «Радиохимия», 4, 410 (1962).
68. Викт. И. Спицын, И. Г. Мощанская. «Докл. АН СССР», 133, 859 (1960).
69. Викт. И. Спицын, И. Е. Зимаков. Там же, 138, 130 (1961).
70. А. А. Баландин и др. Там же, 121, 495 (1958).
71. Викт. И. Спицын и др. Там же, 146, 1128 (1962).
72. Викт. И. Спицын и др. Там же, 139, 1163 (1961).
73. Викт. И. Спицын и др. Там же, 143, 1406 (1962).

УДК 533.9.07

Основные технические характеристики экспериментальной термоядерной установки «Токамак-3»

М. А. Гашев, Г. К. Густов, К. К. Дьяченко, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Монозон,
А. В. Попкович, Б. К. Ратников, Б. В. Рождественский, Н. Н. Румянцев, Г. Л. Саксаганский,
Ф. М. Спесаква, А. М. Столов, Н. С. Стрельцов, А. Х. Явно

Описана экспериментальная термоядерная установка «Токамак-3», предназначенная для исследования тороидального квазистационарного разряда в сильном продольном магнитном поле. Приводятся основные параметры систем магнитных полей, системы питания и вакуумной системы установки, а также некоторые конструктивные данные и схемы.

Экспериментальная термоядерная установка «Токамак-3» предназначена для исследования тороидального квазистационарного разряда в сильном продольном магнитном поле.

Инженерные исследования и проектирование установки выполнены Научно-исследовательским институтом электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова по физическому заданию отдела плазменных исследований Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. Физи-

ческое задание разработано под непосредственным руководством Н. А. Явлинского, принимавшего активное участие в решении ряда инженерных вопросов создания установки.

Общий вид установки показан на рис. 1, конструктивная схема — на рис. 2.

Тороидальный разряд в вакуумной камере создается вихревым электрическим полем и является эквивалентным вторичным витком импульсного трансформатора. Для подавления неустойчивости образующегося при разряде плазменного шнура используется сильное продольное магнитное поле тороидального соленоида, внутри которого расположена вакуумная камера. На магнитопроводе импульсного трансформатора (см. рис. 2) размещены первичная обмотка вихревого поля, обмотки размагничи-