

**ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ
СТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ В НИХ
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ**

А. А. ВОРОБЬЕВ

Кристаллические и стеклообразные структуры с ионным типом связи, а также материалы, содержащие обе эти фазы, широко распространены в природе, находят большое применение в технике и народном хозяйстве. Разработано огромное количество керамических и других искусственных материалов с ионными связями, применяемых в электро-радиотехнике, строительстве и других областях хозяйства и техники.

В принципе теперь известны фундаментальные законы для описания структуры и свойств материалов. Ранее классификация электрических, механических, тепловых, оптических, химических и других свойств материалов с ионным типом связи производилась путем раздельного описания рассматриваемых процессов, происходящих в структурах при данных условиях и внешнем воздействии. Изолированное рассмотрение свойств ионных структур приводило к созданию теории данного процесса, например, электрического пробоя и характеристики электрической прочности диэлектрика и не давало возможности оценить свойства материала в целом. Отсутствие единой физической теории свойств материалов, взаимосвязи свойств между химическим составом и структурой вещества затрудняло разработку инженерных расчетов и выбор материалов для применения в сложных условиях нагрузок и разработку новых материалов с заранее заданными свойствами.

М. Борн и Хуан Кунь в динамической теории кристаллической решетки высказали положение, что нормальные механические, тепловые, оптические и электрические свойства вещества могут быть описаны с помощью свободной энергии. Однако величина свободной энергии системы не может быть измерена или вычислена. Не зная значение этой величины, невозможно оценить и сравнить между собой свойства тел различного химического состава и после их различной обработки. А. А. Воробьев, пользуясь термодинамическими понятиями, теоретически и экспериментально показал, что свойства вещества характеризуются энергией взаимодействия между слабосвязанными структурными элементами, на которые разлагается тело при его распаде. Для ионных кристаллических структур такой характеристикой будет энергия решетки, для тел с ковалентными связями — энергия атомизации, для стеклообразных структур — теплота или температура стеклования. Наименьшая энергия взаимодействия в слоистых структурах характеризуется энергией скалывания и так далее. Для ионных кристаллических структур с помощью энергии решетки можно описать свойства как не-

нарушенных, так и дефектных кристаллических структур, так как равновесная концентрация дефектов и их устойчивость тоже связаны с энергией решетки. Равновесная концентрация дефектов растет с уменьшением энергии решетки. Устойчивость дефектов понижается с уменьшением энергии решетки. Чем больше энергия решетки, тем выше устойчивость структуры при внешних воздействиях, тем выше ее механическая, электрическая, оптическая, химическая, тепловая и радиационная устойчивость. Эти простые закономерности, полученные в исследованиях, позволили проводить научную классификацию материалов с ионным типом связи и предсказывать направления выбора химического состава для получения материалов высокой устойчивости при внешнем воздействии. Такая корреляция хорошо соблюдается для реальных диэлектриков, так как степень нарушения их структуры и равновесная концентрация дефектов, определяющая многие свойства, обуславливаются энергией кристаллической решетки. Когда энергия внешнего воздействия будет равна или больше энергии решетки, то устойчивость структуры нарушается; образуются дефекты, их концентрация начинает расти. Одновременно с образованием дефектов происходит их отжиг. При некоторых условиях внешнего воздействия, скорость образования дефектов может превысить скорость их отжига. Концентрация дефектов начнет расти. Превысит равновесную для данной температуры, начнется процесс накопления дефектов. Это условие может быть выбрано критерием устойчивости тела. Разрушение тела при внешних воздействиях, например, в поле радиации или электрическом поле, описывается не как катастрофический процесс, а как динамический, развивающийся во времени. Скорость развития процесса накопления дефектов и разрушения тела растет с увеличением интенсивности внешнего воздействия. Однако скорость прорастания трещины разрушения тела не может превышать некоторой предельной, величина которой тем больше, чем больше энергия решетки. Предполагается, что процесс разрушения ненарушенных структур проходит следующие стадии: образование и залечивание нарушений структуры, накопление нарушений и образование микрповреждений тела, накопление, коагуляция микрповреждений и образование начальной трещины разрушения; ее развитие и окончание разрушения тела. С повышением интенсивности внешнего воздействия электрического поля, механического напряжения, время прохождения каждой стадии уменьшается, что влечет уменьшение полного времени разрушения диэлектрика. Общее энергетическое описание процессов нахождения повреждений структуры и разрушения тела позволило решить и частные задачи — разрушение в электрическом поле высокой напряженности, а также под действием облучения. Описание механического разрушения путем накопления нарушений было дано С. Н. Журковым.

Теория электрической прочности твердых диэлектриков с ионными связями, разработанная А. А. Воробьевым и Е. К. Завадовской, дает правильную зависимость прочности от энергии решетки, скорости нагружения, толщины и других параметров.

Радиационные нарушения твердых тел при малых дозах, когда образуются радиационные дефекты структуры, представляют собой первую стадию разрушения. При больших дозах могут быть достигнуты вторая стадия повреждения структуры и третья стадия процесса разрушения вплоть до распада тела на отдельные куски.

Разработанная теория свойств ионных кристаллических структур приводит к практически важным интересным выводам о связи между свойствами твердых тел с преимущественно ионными связями, их химическим составом и технологией изготовления.

Теоретически показано, что с увеличением энергии решетки повышаются практически важные механические, электрические, тепловые

и т. д. свойства кристаллических тел с ионным типом связи. Корреляция между энергией решетки и свойствами тел экспериментально прослежена для широкого диапазона давлений, температур, условий облучения.

Сформулированы закономерности изменения свойств ионных структур в нормальных условиях, а также при повышенных температурах и давлениях в недрах Земли и при облучении. Найдены закономерности, определяющие устойчивость тел при механическом или электрическом нагружении, нагревании, растворении или облучении. Связь электрических, механических, тепловых и других свойств с энергией решетки прослежена в большом числе типов ионных соединений и удовлетворительно согласуется с выводами теории.

Показано, что устойчивость тел против внешних воздействий повышается с увеличением энергии решетки, а их обрабатываемость уменьшается.

Ослабление тела при нагружении определяется поглощенной телом энергией, а остаточные изменения свойств тел — значением энергии, запасенной при внешнем воздействии. С увеличением энергии решетки уменьшается значение поглощенной энергии, растет значение запасенной. При прочих одинаковых условиях значения поглощенной и запасенной телом энергии определяют его прочность и обрабатываемость и технологические свойства материалов.

Необратимое изменение свойств твердых диэлектриков в условиях их службы, называемое старением, представляет значительный практический интерес, так как старение изоляции во многих случаях сопровождается нарушением работы соответствующих конструкций.

Разработана общая теоретическая концепция старения диэлектриков под действием электрических и механических нагрузок, облучения, температуры и влияния химических агентов. Термодинамический подход к описанию старения материалов основан на изложенных выше флуктуационных представлениях. В течение времени действия данного внешнего фактора, понижающего потенциальные барьеры в структуре, происходит образование дефектов и одновременно происходит их температурный отжиг, залечивание. Старение диэлектрика развивается в том случае, когда происходит накопление дефектов и образование повреждений тела или образование новых химических соединений.

С целью создания физико-химических и физико-энергетических научных основ описания свойств материалов и их старения и обработки с использованием высокоинтенсивных факторов воздействия на тело механических, химических, физических факторов, в том числе излучения, требовалось развитие теории взаимодействия с твердым телом непрерывных и импульсных потоков энергии высокой интенсивности, разработка научных основ процессов, протекающих в материалах при действии на них сильных электрических, статических и импульсных полей и других внешних факторов. Необходимы были научные данные, на основе которых можно разработать методы расчетов процессов, протекающих в твердом теле, определение путей направленного воздействия для получения заданного эффекта обработки материалов и тел и определение скоростей их старения. Такие исследования с тридцатых годов выполнялись в Томске.

Основой квантовой структуры любой системы является ее энергетический спектр. Разработка способов физического и химического воздействия на материалы должна строиться с учетом структуры ее электронного спектра и распределения плотности электронов. Поэтому изучалась химическая связь на основе исследования электронной плотности, электрических, магнитных, тепловых и люминесцентных свойств твердых диэлектриков и полупроводников и установление взаимосвязи между химическим составом материалов, их структурой и свойствами.

Систематизирование материалов по результатам исследования электронных и ионных свойств кристаллов, рассматриваемых совместно, позволило полнее понять и описать радиационные свойства и формулировать научные основы учения о старении и обработке материалов. Томскими физиками экспериментально показано, что энергетика ионных, электронных и дырочных процессов и ионных соединений связана или имеет корреляцию с химическим составом энергетической решетки и условиями опыта.

Практически и теоретически интересно изучение изменения свойств и старения диэлектриков под действием тепла, излучения, электрического поля и химических факторов. В наших исследованиях различных материалов и их композиции в условиях эксплуатации применялась термодинамическая оценка устойчивости соединений, которая производилась с помощью термохимических параметров, энергии решетки, дебаевской температуры, теплоты стеклования, теплоты атомизации и других характеристик.

В качестве энергетической характеристики при старении диэлектрика можно принять изменение внутренней энергии единицы объема твердого диэлектрика при его фазовом переходе из стандартного состояния в новое состояние, например, при пробое, когда происходит переход вещества в объеме канала в состояние частичной ионизированной газовой плазмы.

Действие частиц высоких энергий сопровождается образованием радиационных дефектов структуры. Процессы образования дефектов могут быть обратимыми, когда их отжиг происходит за счет температурных флуктуаций, и необратимыми. В последнем случае в материале происходит образование центров окраски или радиолиз, или фазовые превращения.

Дефекты структуры обуславливают изменения некоторых практически важных физических и химических свойств твердых диэлектриков, в том числе электропроводности, потерь, изменяют адсорбционные и другие свойства и могут существенно влиять на их обрабатываемость вообще и процесс разрушения в частности.

Потоки частиц высоких энергий вызывают нарушения структуры твердого тела, образование ее дефектов. Увеличение концентрации дефектов сопровождается их коагуляцией, образованием повреждений. Накопление повреждений сопровождается макроскопическими разрушениями тела.

Собственно радиационное старение диэлектриков, то есть необратимое изменение свойств, определяется значением концентрации дефектов, радиационно-химического выхода и фазовыми превращениями в материалах. Характеристики перечисленных процессов определяются радиационной устойчивостью диэлектрика. Используя радиационное воздействие на диэлектрические материалы, можно удобно изменять концентрацию дефектов и, следовательно, степень повреждения их структуры.

В настоящее время предложены теории, позволяющие рассчитывать накопление концентрации простейших радиационных дефектов — F -центров окраски в изоляторах. Изучено старение кристаллов галогидных солей, окислов, фторидов, нитридов, оксигалогидов, сульфатов, щелочных и щелочноземельных металлов, стекол и полимеров различных составов, резин, керамических и других диэлектрических материалов.

Образование дефектов в диэлектриках сопровождается поглощением части потока подводимой энергии. После прекращения облучения часть дефектов рекомбинирует и свободная энергия тела уменьшается. Изменение свойств тела при облучении определяется значением поглощенной энергии. Изменение свойств диэлектрика после облучения оп-

ределяется запасенной в дефектах энергией. Так как значение поглощенной энергии много выше, чем значение запасенной энергии, соответственно изменение свойств диэлектриков при облучении будет значительно сильнее, чем изменение свойств тел после облучения. Поэтому измерение изменения свойств материалов после их облучения не может характеризовать устойчивость тел в поле облучения.

При изучении динамики разрушения тела, как и всякого другого процесса, теория должна объяснить и дать возможность рассчитать возможность перехода тела из одного состояния в другое и скорости таких переходов. Для решения этих вопросов удобным является термодинамический подход.

Можно составить уравнение для описания изменения энергии системы при разрушении тела на куски или структурные частицы материала и скорости перехода систем из одного состояния в другое при разных внешних условиях, например, при воздействии сильных электрических полей.

Скорость перехода можно рассчитать и определить время, необходимое для установления термодинамического равновесия. Такого макроскопического инженерного описания, например, процесса электрического разрушения, не было.

В теории пробоя собственно рассматривали только начальную стадию разряда, образование свободных электронов и возникновение значительного тока.

Явление пробоя твердого тела в электрическом поле представляет собой проплавление, механическое или электрохимическое его разрушение. Разрушение тела происходит за счет энергии электрического поля и может быть описано как образование дефектов и накопление нарушений в материалах при внешнем воздействии. В известных теориях пробоя разрабатывается процесс начала и развития разряда в теле. Как правило, считается, что пробой заканчивается проплавлением тела. Хрупкое механическое разрушение при пробое не может быть объяснено проплавлением.

Теория разрушения диэлектриков и полупроводников при импульсном электрическом пробое отсутствовала.

Для разработки теории электроимпульсного разрушения тел представляет интерес их хрупкое разрушение в электрическом поле, которое может происходить вследствие действия пондермоторных сил. Теория этого явления разработана А. А. Воробьевым и Е. К. Завадовской для идеальной кристаллической решетки.

В наших исследованиях физически обоснована связь механической прочности при хрупком разрушении и импульсной энергетической прочности. Разработана теория зависимости прочности от длительного действия нагрузки.

Разрушение тела может происходить при накоплении повреждений структуры за счет энергии поля, когда:

а) в полях высокой напряженности возникают сильные электронные токи в диэлектриках, которые вместе с ионами структуры образуют плазму в твердом теле; в участках образования плазмы высокой концентрации тело теряет прочность;

б) в участках большей напряженности поля понижается потенциальный барьер, разделяющий ионы, что способствует оставлению ими своих мест в узлах решетки; при высокой напряженности поля ускоряются активационные процессы переходов ионов в междоузлия;

в) присоединение электронов превращает ионы в атомы, которые за счет тепловых флуктуаций выходят затем в междоузлия. Под действием ударной ионизации электронами, в электрическом поле происходит повреждение структуры. Одновременно за счет теплового движения атомов идет отжиг дефектов. Когда нарушается состояние дина-

мического равновесия между скоростями образования дефектов и отжига их, то начинается лавинообразное накопление дефектов, образование нарушений структуры и процесс вступает в стадию повреждения материала и разрушения тела. Напряженность поля, при которой возникает этот процесс, измеряет электрическую прочность твердого диэлектрика.

Возможна также следующая гипотеза многостадийного разрушения соединений с ионным типом связи. Под действием ускоренных электронов или квантов излучения из области разряда происходит возбуждение электронов в анионах и образование экситона или отделение электрона и ионизация атома. Такая частица теряет свои связи в решетке. Действием тепловых флуктуаций возбужденный анион или атом, ставший атомом или катионом, выводится из своего места в узле решетки.

Приведенные процессы возбуждения электронных состояний в атомах распространяются в диэлектрике со скоростью света. Поэтому можно объяснить любую скорость развития разряда меньшей скоростью света в этой среде.

Оптическое возбуждение электрона, связанное с экситонным поглощением, в ионных соединениях имеет в основе те же физические процессы, то есть переход электрона от аниона к катиону, что и при реакции термического разложения — детонации взрывчатых веществ с ионным типом связи.

Детонация, так же как и разрушение тела при пробое, может происходить за счет ионизации и потери химической связи в молекулах.

Пробой детонирующих веществ будет сопровождаться выделением энергии при экзотермической реакции и взрывным действием.

Ю. Н. Вершинин развил метод энергетического анализа и применил его для разработки количественного способа определения импульсной электрической прочности твердых диэлектриков со сложной молекулярной структурой. Его метод расчета основан на рассмотрении фазовых превращений вещества в первичном канале пробоя и описании процесса разрушения вещества с помощью удельной энергетической характеристики, численно равной изменению внутренней энергии единицы объема диэлектрика при его переходе из стационарного состояния в состояние частично ионизированной газовой плазмы.

Развитое в исследованиях Ю. Н. Вершинина видоизменение энергетического описания процессов электрического разрушения диэлектриков, предложенное ранее А. А. Воробьевым, позволяет с удивительной для практики точностью рассчитать импульсную электрическую прочность твердых диэлектриков сложного химического состава при микросекундной экспозиции и толщине слоя от 100 микронов и выше.

Подводимая к диэлектрику энергия затрачивается на процессы старения материала, образование дефектов структуры, а при начале разрушения также и на образование новых поверхностей и различных вторичных процессов, как-то: на упругие колебания и кинетическую энергию разлетающихся частиц тела из зоны его разрушения, свет, тепло, звук, пластическую деформацию и другие процессы, на которые затрачиваются энергии. Для осуществления эффективного разрушения с высоким к. п. д. существенно выбрать режим работы, увеличить долю энергии, идущей на скол, образование новых поверхностей и уменьшение потерь энергии на вторичные процессы. На основе метода экспериментального анализа можно изучать влияние режимов воздействия на тело и выбрать, в каком режиме будет наибольший энергетический к. п. д. процессов разрушения твердого диэлектрика.

Более устойчивыми диэлектриками при действии механических, термических, химических, электрических и радиационных нагрузок являются структуры с большей энергией связи между частицами. В частности, устойчивость кристаллических ионных диэлектриков растет с

повышением энергии решетки, для ковалентных кристаллов — с повышением теплоты атомизации, стекол и полимеров — с повышением температур стеклообразования или размягчения материалов.

Предложенное общее термодинамическое описание процессов старения диэлектриков конкретизируется при описании частных задач. Найдены подходящие способы описания старения однородных и неоднородных и многокомпонентных диэлектриков. В. С. Дмитриевским, на основе представлений о накоплении нарушений и повреждений в электрическом поле, разработана теория долговечности изоляции гибких кабелей и сделаны весьма важные практические рекомендации по увеличению срока службы кабелей.

В изложении рассматриваемых задач старения и обрабатываемости имеется общий подход с позиций динамической теории кристаллической решетки, согласно которой все нормальные свойства твердых кристаллов связаны с изменением свободной энергии системы, или, как это показано в наших работах, с энергией кристаллической решетки.

Увеличение энергии связи частиц в теле, характеризующее возрастанием энергии решетки, температуры стеклования и т. д., сопровождается повышением практически важных свойств тел: увеличением устойчивости, ухудшением обрабатываемости и уменьшением старения тел при механическом, электрическом, химическом тепловом или радиационном воздействиях.

Указанные корреляции между энергетикой решетки и устойчивостью тел с ионной структурой прослежены в широком диапазоне изменения воздействия и свойств тел. Энергетика ионных, электронных и других процессов в ионном соединении, связана с химическим составом соединений.

Учение о взаимосвязи свойств диэлектриков и их обусловленность энергетикой структуры, выдвинутая и разработанная в наших исследованиях, позволит определить научные основы разработки новых электроизоляционных материалов на основе свойств элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Высокопрочными диэлектрическими материалами являются вещества с большой энергией связи между частицами.

Закономерности, определяющие взаимосвязи свойств тел и корреляции их с энергетикой структуры, дают научные основы для описания обрабатываемости, устойчивости и старения диэлектриков с общих позиций теории твердого тела.

Старение диэлектриков, как необратимое остаточное изменение их свойств, происходящее при внешнем воздействии на тело различных факторов, также удовлетворительно описывается при энергетическом рассмотрении процессов.

В соединениях, частицы которых имеют меньшую энергию связи во время действия внешних факторов, наблюдаются большие изменения свойств, чем в соединениях с большей энергией связи между частицами. После прекращения воздействия в телах с меньшими связями путем тепловых флуктуаций происходит более быстрый отжиг имевших место изменений, чем в телах с большей энергией связи. В телах с меньшей энергией связи между частицами остаточные изменения получаются меньше, чем в телах с большей энергией связи между частицами. Остаточные изменения в телах с большей энергией связи получаются относительно меньшими, но сохраняются они дольше, чем в телах с меньшей энергией связи. Тела с большей энергией связи труднее обрабатываются, но лучше сохраняют результаты воздействия, имеют большую память.

Эти идеи, высказанные и разработанные томскими учеными, получили удовлетворительное подтверждение на практике и имеют большое значение для систематизации и правильного описания свойств материалов при интенсивных внешних воздействиях, например, работающих в

поле излучения, или высоких температурах и механических напряжениях, высоких напряженностях электрического поля.

В настоящее время все большее значение приобретает исследование ионных и электронных свойств твердых тел. Электронные и ионные свойства кристаллических структур получили научное описание с единой позиции. Зная только одну величину энергии кристаллической решетки, по данным рассматриваемой теории можно сказать, какое химическое соединение в рассматриваемом ряду будет иметь больший коэффициент отражения или поглощения электромагнитных волн, поглощения электронов, позитронов и других частиц, значение ионной электропроводности, потерь, концентрации дефектов, теплопроводности, растворимости, температуры плавления и т. д.

Такие возможности для классификации свойств материалов только по одной физической характеристике представляют большие практические удобства и широко применяются.

Взаимосвязь свойств твердых диэлектриков и их обусловленность энергетикой решетки представляют собой научную идею весьма большого значения.

В процессе исследовательских работ были открыты многие интересные физические закономерности, описанные затем в литературе, и сделаны многочисленные практические рекомендации, применяемые на практике часто даже без ссылки на первоначальные научные идеи, высказанные в Томске.

В том числе укажем, например, предложение о фторировании полимеров как способ повышения их устойчивости, опубликованный нами в 1945 году; пути повышения прочности твердых диэлектриков путем выбора материалов с большей энергией связи между частицами, в частности, для повышения прочности стекол замещением калия или натрия литием или бария — магнием и многое другое. В приведенных выше результатах исследований при энергетическом описании физических процессов в материалах, они рассматривались как с макроскопической стороны, так и микроскопической.

Долголетние исследования микроскопического и макроскопического описания физических процессов, в частности, термодинамического описания тех же процессов в различных материалах, позволило установить плодотворность каждого из них и области наиболее успешного их применения.

Интересно отметить, что энергия кристаллической решетки, выбранная нами для описания свойств ионных кристаллических процессов в их корреляции между свойствами тел и их микроскопической структурой, отражает обе стороны. Как термодинамическая характеристика, энергия решетки представляется макроскопической величиной. С другой стороны, в теории твердого тела энергия кристаллической решетки определяется через ионные радиусы и валентность, поэтому она является микроскопической характеристикой вещества.

Последнее десятилетие успешно развивается микроскопическое направление в описании физических процессов, а также свойств материалов и проектировании новых веществ на атомно-молекулярной основе. Пользуясь энергетическим спектром электронов в атомах, можно описать энергетику молекулы и энергетический спектр электронов в ненарушенных кристаллах, из которых построены эти атомы. Эти соответствующие теории дали возможность вычислить температуру плавления и температуру кипения простых тел. Зная химический состав некоторых соединений, часто геометрически можно предвычислить межатомное расстояние и число ближайших соседей на основе экспериментального определения радиусов атомов или ионов и их упаковки в структуре. Физическая теория позволила ввести разделение твердых тел на металлы, изоляторы и полупроводники. Классификация сделана по виду энерге-

тического спектра электронов в этих веществах. Микроскопическая теория позволила описать и соответствующие переходы от плотно упакованной структуры ионных кристаллов к более сложным каркасным структурам типа SiO_4 , TiO_6 , где полиэдры, тетраэдры, октаэдры и т. д. монтируются со специальными углами в узлах структуры. Заполняя пустоты в каркасах цепочками различных ионов, можно получить еще более сложные ионные структуры. Может быть несколько вариантов расположения различных атомов для искомой структуры с заданными свойствами. Поэтому можно говорить об оптимальном проектировании материалов и схем на атомно-молекулярной основе, включая проектирование живых систем и управление жизненными функциями простейших организмов.

Раньше в деятельности материаловедов-физиков была характерна их специализация и обособленность. В настоящее время разработка новых материалов на основе молекулярно-атомного понимания процессов в телах и их свойств объединяет специалистов различных технологий и наук.

В последнее десятилетие развернулись оживленные дискуссии по поводу возможной роли в определении свойств тел, кристаллической структуры, химического состава, ближнего порядка, энергии взаимодействия и корреляции между структурой и свойствами вещества. Важность короткодействующих сил в кристаллической структуре видна на примере роли локализованных d -электронов в создании материалов с заданными свойствами. Внешние электроны S и P оболочки образуют главные энергетические зоны в кристаллах при расщеплении атомных энергетических уровней электронов вследствие эффектов взаимодействия между термами. Частично заполненная d -оболочка обуславливает магнитные свойства вещества. Электронная проводимость материала образуется посредством энергетически разрешенных электронных переходов. Кристаллическая структура определяется распределением электронной плотности в рассматриваемой системе.

Значительный интерес представляет стеклообразное состояние, в котором, как и в жидкости, отсутствует первоначальный дальний порядок в расположении частиц. Высокая вязкость стекла обеспечивает экспериментальные возможности сохранения различия метастабильных состояний и фаз, что открывает широкие возможности в изготовлении материалов с различными свойствами, например, непробиваемость стекла — керамической изоляции кабелей и конденсаторов, изготовление светофильтров с интересными свойствами и многое другое. Стеклообразное состояние может предоставить также и большие возможности при изучении молекулярного строения живых систем.

Современный физик располагает удивительными экспериментальными средствами, позволяющими наблюдать микродефекты в кристаллической структуре; исследования по ионной проводимости, оптическому поглощению, сравнение плотности тела, определяемой макроскопической плотностью, определенной рентгеновскими методами, дают сведения о вакансиях, внедренных и смещенных атомах в структуре. Значительные возможности в определении микродефектов структуры открывают применение ионного микроскопа, явления каналирования протонов, электронов, позитронов. Эти средства и методы позволяют производить наблюдения за образованием вакансий, их связей, дислокаций и некоторых других микронарушений в решетке в процессе их появления при действии внешних факторов, например, температуры, высоких механических напряжений и высоких электрических полей. Энергетический анализ физических процессов свойств диэлектрических материалов и результаты, найденные с его помощью, не только явились необходимым этапом в развитии теории и практики физики диэлектриков, но сохранили свое научное значение в настоящее время.

Для интенсификации производственных процессов все большее значение приобретает усовершенствование старых и разработка новых способов обработки металлов.

Развиваемый в наших исследованиях общий подход описания свойств твердого тела с позиции динамической теории кристаллических структур, согласно которой все нормальные свойства тел описываются свободной энергией или приближенно энергией кристаллической решетки, позволит сформулировать и некоторые общие положения по описанию обрабатываемости диэлектриков. Заметим, что добыча материалов в горной промышленности связана с их разрушением; в обрабатывающей промышленности механическая обработка связана с удалением припусков, избытков материала на заготовке, то есть опять-таки с разрушением тел. Подводимая к телу энергия расходуется на образование дефектов, их коагуляцию, создание микротрещин, их рост и накопление свободной энергии. Одновременно в материале происходит рекомбинация дефектов, которая сопровождается рассеиванием части запасенной энергии. Чем короче длительность и выше интенсивность внешнего воздействия, тем меньше энергии будет рассеиваться в окружающую среду. Поэтому к. п. д. процесса разрушения материалов повышается с уменьшением времени воздействия внешнего разрушающего фактора. Это общее теоретическое положение приводит к выводу о высоком к. п. д. методов и средств импульсного разрушения материалов, обеспечивающих максимальную скорость прорастания трещины хрупкого излома в данном материале. Установлено, что скорость распространения трещины разрушения растет с увеличением прочности материала. Термодинамическое рассмотрение процессов, происходящих в нагруженных материалах, позволило также объяснить и процессы их упрочнения при отжиге, радиационной обработке, искровой обработке поверхности, имеющих широкое применение в практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев. Техника высоких напряжений. М.-Л., ГЭИ, 1945.
2. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская. Энергетическая прочность твердых диэлектриков. М.-Л., ГИЗТТ, 1956.
3. А. А. Воробьев. Изоляционные свойства, прочность и разрушение диэлектриков. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1960.
4. А. А. Воробьев. Физические свойства ионных кристаллических диэлектриков. Книга 1, Томск, Изд-во ТГУ, 1960.
5. А. А. Воробьев. Физические свойства ионных кристаллических диэлектриков. Книга 2, Томск, Изд-во ТГУ, 1961.
6. А. А. Воробьев. Нарушение электрической прочности диэлектриков и их пробой. Томск, Изд-во ТГУ, 1962.
7. Б. В. Будылин, А. А. Воробьев. Действие разрушений на ионные структуры. М., Госатомиздат, 1962.
8. А. А. Воробьев, Б. А. Кононов. Прохождение электронов через вещество. Томск, Изд-во ТГУ, 1966.
9. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. Электрический пробой и разрушение диэлектриков. М., Изд-во «Высшая школа», 1966.
10. А. А. Воробьев. Механические и тепловые свойства щелочногалоидных монокристаллов. М., Изд-во «Высшая школа», 1968.
11. А. А. Воробьев. Ионные и электронные свойства щелочногалоидных кристаллов. Томск, Изд-во ТГУ, 1968.
12. А. А. Воробьев. Центры окраски в щелочногалоидных кристаллах. Томск, Изд-во ТГУ, 1968.
13. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, А. В. Кузьмина. Запасенная энергия в щелочногалоидных соединениях. Томск, Изд-во ТГУ, 1969.
14. А. А. Воробьев. Энергетическое описание устойчивости свойств, обрабатываемость и старение диэлектриков. Томск, Изд-во ТГУ, 1970.