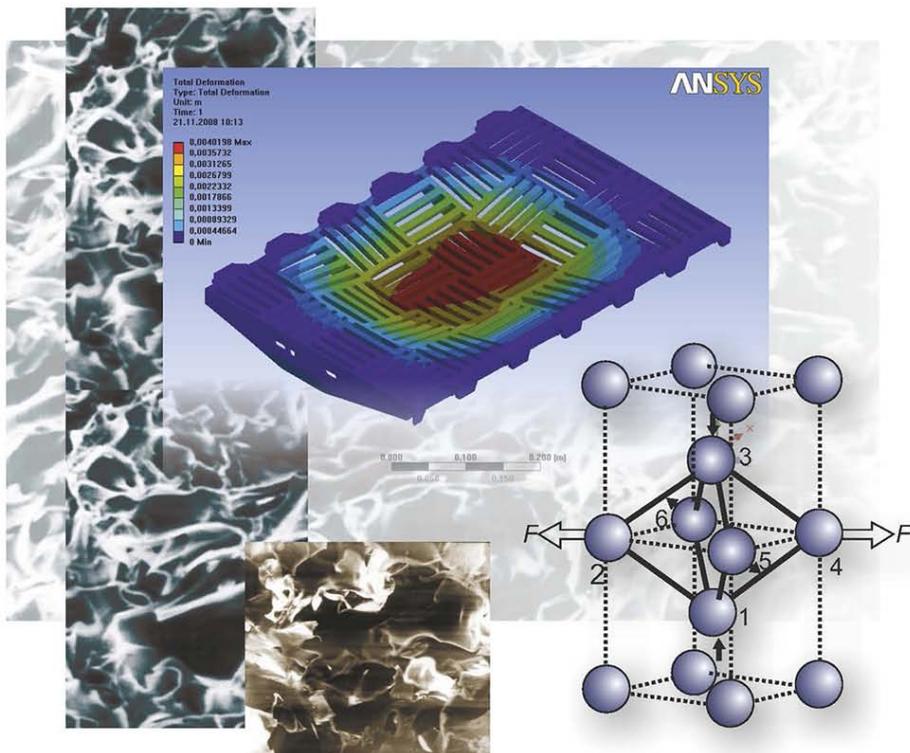


ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМАТИКУ УМНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Введение в систематику умных материалов / Л. С. Пинчук [и др.]; под. общ. ред. Л. С. Пинчука. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 399 с. – ISBN 978-985-08-1540-8.

Совокупность умных материалов систематизирована методами таксономии по признакам, присущим кибернетическим системам. Это позволило расположить многообразие умных материалов и технических систем, как разработанных, так и еще не созданных, в единой таблице и обосновать трехэтапный процесс их создания: регистрация изменений структуры материала при эксплуатации; выбор механизма целесообразной коррекции структуры с помощью канала обратной связи; реализация выбранного механизма коррекции на основе достижений естественных наук.

Приведены энергетические характеристики внешних воздействий, которые испытывают материалы при эксплуатации. Предложена феноменологическая модель умного материала, в котором первичную перестройку структуры корректирует обратная связь, инициирующая в материале вторичные физико-химические процессы, происходящие за счет изменения внутренней энергии материала. Рассмотрены основные классы умных материалов и технических систем, разрабатываемых и нашедших применение в машиностроении, радиоэлектронике, медицинской технике и других сферах человеческой деятельности.

Книга предназначена для научно-технических работников, инженеров и конструкторов, занятых разработкой перспективных материалов. Она будет полезна студентам, магистрантам и аспирантам при изучении дисциплин материаловедческого профиля.

Табл. 7. Ил. 84. Библиогр.: 326 назв.

А в т о р ы:

Л. С. Пинчук, В. А. Гольдаде, С. В. Шилько, А. С. Неверов

Р е ц е н з е н т ы:

академик НАН Беларуси С. А. Астапчик,
член-корреспондент НАН Беларуси Ю. М. Плескачевский,
доктор технических наук В. П. Гольцев

ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень развития современного общества достигнут в значительной мере благодаря реализации в технических изделиях идей и методов кибернетики – науки об общих законах получения, хранения, передачи и переработки информации. Кибернетические системы, рассматриваемые вне зависимости от их материальной природы, представляют собой совокупность взаимосвязанных компонентов, которые воспринимают, запоминают, перерабатывают информацию или обмениваются ею. Они вошли в структуру всех основных объектов техники, в том числе материалов, которым со второй половины XX в. стали придавать функции кибернетической системы.

Термины «smart materials», «intelligent materials» и равнозначный им термин «умный материал» были предложены в связи с необходимостью в специальных материалах, осуществляющих взаимодействие элементов электронных устройств, которые передают, обрабатывают и хранят информацию, с электромагнитными полями. С начала 1950-х годов интенсивно развивается твердотельная электроника, технологическую основу которой составили полупроводники, в 1960-х возникло самое перспективное ее направление – микроэлектроника, следующим уровнем которой в 1990-х годах стала молекулярная электроника. Она оперирует молекулами, выполняющими функции элементов электронного устройства. Проблемы конструирования миниатюрных электронных систем, заключенных в структуру материала, недавно казавшиеся почти не разрешимыми, теперь имеют доступные методы решения в связи с успехами микроэлектроники и нано-

технологии, исследующей структурные элементы размером 0,1–100 нм. В связи с этим двумя ключевыми словами материаловедения XXI в. можно считать нано- и умный материал.

В результате этих исследований сформировалась междисциплинарная инфраструктура материаловедения умных материалов, специалисты которого слово «умный» в кавычках уже не пишут. Строгое определение этого термина будет дано позже, пока же отметим, что умный материал выполняет свою функцию в техническом изделии, проявляя признаки искусственного интеллекта. Он воспринимает изменение своей структуры в процессе эксплуатации, обрабатывает эту информацию, на основе чего автоматически корректирует структуру, инициируя вторичные физико-химические процессы за счет энергии внешних воздействий с помощью системы обратной связи. Последняя является одним из базовых понятий кибернетики и обуславливает приспособляемость объектов природы и техники к внешним условиям. Обратная связь формирует имеющие физическую, химическую или биологическую природу сигналы, благодаря которым структура материала целенаправленно корректируется соответственно изменению внешних условий так, что технический ресурс изделия повышается.

Номенклатура умных материалов, созданных в период становления электронной техники, естественным образом расширялась. В ответе материалов на внешние воздействия теперь реализована вся совокупность явлений, существующих в природе. Стремительно выросла группа умных материалов для машиностроения – триботехнических, антикоррозионных, герметизирующих и др. Множество умных систем возникло в медицине и биотехнологии. К настоящему времени в научной литературе и сети Internet накопилось огромное количество разрозненных (часто рекламных) сведений об умных материалах. Возникла задача систематизации этой быстро стареющей и постоянно пополняемой информации. Она не потеряла актуальности, несмотря на то что по проблемам создания и эксплуатации умных материалов написано более ста книг, в числе которых монографии [1–18]. Они приведены здесь для того, чтобы показать многооб-

разие проблем, сопутствующих разработке умных технических систем. Большинство этих книг вторично процитировано в следующих главах.

Несмотря на растущий интерес к этой теме, до сих пор нет универсальной классификации умных материалов, которой могли бы пользоваться инженеры и технологи. Привнесенная в материаловедение из электроники структурно-функциональная схема умных систем в виде триады сенсор–актюатор–процессор [1] нуждается в материальном наполнении. Модель умного материала не будет полной без учета физико-химических процессов, во-первых, являющихся его естественной реакцией на внешние воздействия, и во-вторых, инициированных обратной связью, потребляющей энергию внешнего воздействия. Множество факторов, которые нужно учесть при систематизации умных материалов, обусловило преобладание описательного подхода к этой проблеме. Примером служит представленная в работе [19] попытка систематизации умных материалов по критериям структурных признаков и связей, функциональных характеристик, принципов самоорганизации и множеству других, которая тем не менее не учитывает природы физико-химических процессов, протекающих в материалах, энергетических и технологических аспектов их формирования.

Цель настоящей книги состоит в систематизации совокупности умных материалов и технических систем методами таксономии по признакам, присущим кибернетическим системам. Это позволит представить всю совокупность умных материалов, разработанных и еще не созданных, в единой таблице и обосновать трехэтапный процесс их разработки: регистрация изменений структуры материала при эксплуатации, выбор механизма коррекции структуры с помощью обратной связи, реализация выбранного механизма путем использования достижений естественных (физических, химических, биологических) наук.

Авторы стремились уйти от налета сенсационности, сопутствующего значительной части информации об умных материалах, и дать естественнонаучное обоснование методов их систематизации и моделирования. Надеемся, что эта работа поможет

перевести создание умных материалов из категории эвристического озарения на профессиональную инженерно-технологическую основу, позволяющую специалистам разрабатывать умные материалы и технические системы в процессе ежедневной рутинной работы.

Введение и гл. 1, 2, 4 написаны Л. С. Пинчуком, В. А. Гольдаде и А. С. Неверовым; параграфы 3.1, 3.2, 3.5, гл. 5 и заключение – Л. С. Пинчуком; параграфы 3.3 и 3.4 написаны С. В. Шилько.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику С. А. Астапчику и профессору В. П. Гольцеву за внимание и помощь при рецензировании этой работы, а также члену-корреспонденту НАН Беларуси Ю. М. Плескачевскому – за критические замечания, которые учтены в последнем варианте рукописи.

КОНЦЕПЦИЯ УМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Умный материал (УМ) отличается от обычного материала тем, что элементы его структуры во время эксплуатации выполняют функции кибернетической системы, рационально приспособлявая материал к изменяющимся условиям работы. Человечество прошло длинный путь от использования приготовленных природой материалов до создания УМ. Ниже даны формулировки понятий материаловедения, предшествующих определению УМ, дополняющих его и включенных в этот термин, а также понятий кибернетики, используемых при описании УМ. Приведены энергетические характеристики внешних воздействий, которые испытывают технические материалы при эксплуатации. Энергия этих воздействий используется в УМ для «ремонта» эксплуатационных повреждений.

1.1. Ретроспекция

История совершенствования материалов диалектически связана с историей развития общества. Стремление открывать новые материалы во все исторические эпохи было вызвано желанием людей улучшить свою жизнь.

Наименование исторических этапов по названиям «сделавших эпоху» материалов (каменный, медный, бронзовый и железный века) отражает значение материалов в древней истории человечества. Следующее поколение материалов начало свой жизненный цикл со второго тысячелетия н. э., когда для привода машин стали использовать энергию падающей воды. Быстрые

темпы развития металлургии кардинально изменили уровень техники и технологии материалов. Эта эпоха истории материалов завершилась в XXI в. разработкой трех основных процессов производства стали, названных по имени изобретателей бессемеровским, мартеновским и томасовским. На рубеже XIX и XX веков появились первые продукты промышленности пластических масс, сыгравших выдающуюся роль в истории техники. Тем не менее ожидаемый «век пластмасс» так и не наступил. Интерес к керамическим материалам, которые люди впервые стали использовать еще в эпоху неолита, возродился в 1930-е годы благодаря разработке и успехам технологии порошковой металлургии. Так в сферу общественного производства вошли все основные типы материалов, которыми сейчас располагает человечество. Научно-техническая революция, произошедшая в конце 1940-х годов, привела к созданию на этой материально-сырьевой базе принципиально новых материалов – сверхпроводников, полупроводников, синтетических алмазов и др.

К этому времени у материаловедов окончательно сформировалось мнение, что естественные ресурсы работоспособности традиционных технических материалов исчерпаны. Первыми это ощутили создатели техники, работающей в экстремальных условиях: при высоких температурах (двигатели), глубоком вакууме (космические аппараты), сверхскоростном трении (вооружение) и др. Главным направлением материаловедения второй половины XX в. стала разработка композиционных материалов, сочетающих компоненты разной природы. Сегодняшняя тенденция совершенствования композиционных материалов состоит в их формировании методами нанотехнологий. В настоящее время лучшими техническими материалами являются УМ, однако таких материалов очень мало.

Началом истории УМ считают 1834 г., когда французский физик и математик А. Ампер, один из основоположников электродинамики, написал книгу «Очерки по философии наук» («Essais sur la philosophie des Sciences»). В ней были перечислены все известные в то время науки. Под № 83 в списке наук значилась кибернетика. Этим греческим словом Ампер назвал науку

о способах управления обществом, используя термин, которым в древности обозначали науку о вождении кораблей (kybernētes – кормчий).

Кибернетика, которую сейчас определяют как науку об общих законах получения, хранения, передачи и обработки информации [1], родилась в США в связи с созданием ЭВМ. Н. Винер, профессор математики Массачусетского технологического университета, использовал слово «кибернетика» в написанной им в 1948 г. книге [2]. В ней обобщены закономерности, относящиеся к системам управления – биологическим, техническим и социальным (последние были рассмотрены им особо в книге «Кибернетика и общество», вышедшей в 1954 г.). Это знаменательное событие в истории науки было подготовлено многочисленными работами специалистов в области математики, механики, автоматического управления, вычислительной техники, физиологии высшей нервной деятельности.

Первые представления о регулировании как о подчинении системы определенному порядку, возникли в биологии. Предпосылки принципа обратной связи содержались в гипотезе о рефлексорных реакциях. Р. Декарт, французский философ, математик, физик и физиолог, ввел (1664 г.) понятие рефлекса. Й. Прохаска, чешский анатом и физиолог, развил их, считая, что нервная система является посредником между организмом и внешней средой (1784 г.). К выводу о рефлексорном принципе работы нервной системы пришел (1814 г.) шотландский анатом, хирург и физиолог Ч. Белл.

Таким образом, была создана база современных представлений о системах регулирования в живых организмах. Великий русский физиолог И. М. Сеченов создал основы теории рефлексов (1866 г.) и высказал смелую для своего времени идею: «мысль о машинности мозга – клад для физиолога». Лауреат Нобелевской премии (1904 г.) И. П. Павлов разработал теорию высшей нервной деятельности. Он экспериментально установил основные характеристики условного рефлекса и предложил этот термин. Павлов считал, что человек является системой, подчиняющейся единым для природы законам, но уникальной по высочайшей

степени саморегулирования, поскольку она сама себя поддерживает, восстанавливает, поправляет и совершенствует.

Теоретические основы современной биомеханики, предвосхитившие ряд положений кибернетики, создал (1941 г.) советский нейро- и психофизиолог Н. А. Бернштейн. В теории функциональных систем, предложенной русским физиологом П. К. Анохиным, изложены (1965 г.) представления об обратной связи в живых системах. Украинский биолог И. И. Шмальгаузен применил (1967 г.) теорию обратной связи в популяционной генетике. Труды И. П. Павлова и его последователей создали основу биологической кибернетики, которая была представлена как наука в 1959 г. в монографии «Введение в кибернетику» английского биолога У. Р. Эшби.

Основы теории автоматического регулирования и теории устойчивости систем регулирования были заложены (1877–1878 гг.) русским математиком и механиком И. А. Вышнеградским. Один из крупнейших математиков XIX в. А. М. Ляпунов впервые решил (1892 г.) общие задачи устойчивости движения, являющиеся фундаментом современной теории автоматического управления.

Материальной базой систем управления, реализующих методы кибернетики, стала электронная вычислительная техника. Прототипом современных цифровых ЭВМ считают «аналитическую машину» английского математика Ч. Беббиджа, который в 1835 г. предвосхитил их идею. Другой английский математик А. М. Тьюринг создал (1936 г.) теорию автоматических устройств. Его автомат, принципиально пригодный для реализации любого алгоритма, известен как «машина Тьюринга».

В СССР на кибернетику был навешен ярлык лженауки и служанки капитализма. Ее не признавали в течение 10 лет, предшествующих изданию в 1958 г. русского перевода книги Н. Винера [2]. К сожалению, «отец» науки, совершившей революцию в жизни общества, не был удостоен Нобелевской премии, ежегодно (с 1901 г.) присуждаемой за выдающиеся работы в области физики, химии, медицины, физиологии и в ряде других областей.

Н. Винер и создатель цифровой ЭВМ американский математик Дж. фон Нейман связали идеи И. П. Павлова с принципами

работы техники, реализующей искусственный интеллект. Позднее было установлено, что структура нервных волокон человека, состоящих из нервных клеток (нейронов), аналогична структуре связей в технических системах управления. В обеих системах процессы накопления и переработки информации дискретны по принципу «да–нет». На основе двоичного счисления английский математик Дж. Буль, один из основоположников математической логики, разработал в 1854 г. математико-логический аппарат – Булеву алгебру. Ее используют для оценки информации и построения умных систем.

УМ являются кибернетическими системами, которые имеют множество внутренних связей, подверженных стохастическим (случайным) изменениям. Если внешнее воздействие на УМ дает N разных результатов, из которых благоприятными являются n , вероятность благоприятного результата выражается дробью $P = n/N$. В 1948 г. один из создателей теории информации американский инженер и математик К. Э. Шеннон предложил для оценки неравновероятностных результатов уравнение энтропии информации

$$i = -(P_1 \lg_2 P_1 + P_2 \lg_2 P_2 + \dots + P_n \lg_2 P_n) = -\sum_{j=1}^n P_j \lg_2 P_j,$$

где все логарифмы берутся по основанию 2. Это уравнение аналогично формуле энтропии Больцмана (австрийский физик, один из основателей (1872 г.) статистической физики). Шеннон ввел единицу количества информации – бит (от англ. binary digit – двоичный знак), принимающую значения 0 и 1.

В ретроспекции УМ следует упомянуть А. А. Богданова, того самого, которого В. И. Ленин критиковал за философские построения. Богданов опубликовал в 1913 г. монографию «Всеобщая организационная наука (тектология)», где высказал оригинальные идеи, предвосхитившие ряд положений современной кибернетики.

При создании теории УМ существенную роль сыграл введенный (1941 г.) немецким физиком В. Коером принцип «черного ящика» – системы с неизвестным внутренним устройством и про-

текающими в ней процессами. Методология изучения «черного ящика» предполагает исследование его реакции на заданные входные сигналы. Н. Винер использовал принцип «черного ящика» для выбора рабочей гипотезы о предполагаемом строении изучаемой системы, сопоставляя поведение ее и известной модели. Такой метод «осветления» «черного ящика» стали затем применять при моделировании структуры УМ.

Развитие теории УМ связано с деятельностью многих российских ученых: адмирал-инженера А. И. Берга, бессменного в 1970-е годы руководителя Научного совета по кибернетике АН СССР; В. М. Глушкова, создателя теории цифровых автоматов; Л. В. Понтрягина, развившего принципы оптимальности кибернетических систем (принцип максимума Понтрягина); А. Н. Колмогорова, основателя научных школ по теории вероятностей и теории функций.

В XX в. стал очевиден междисциплинарный характер работ по созданию УМ. Именно подключение к работам по промышленному применению УМ почти всех лабораторий компании «Херох» позволило ей стать лидером этого направления. Разработка УМ включена в список перспективных проектов «Hewlett-Packard Co». Созданием УМ для армии и вооружения заняты «US Army Research Lab.» и специальные подразделения University of Delaware.

Миниатюризация блоков электронной техники привела к пределу, за которым стало невозможным пренебрегать протекающими в микроблоках спиновыми эффектами. Это открыло новую перспективную область применения УМ как материалов спиновой электроники или спинтроники, использующей спин квантовых частиц в качестве носителя информации [3]. Открытие первого значительного спинтронного эффекта – гигантского магнетосопротивления – было удостоено в 2007 г. Нобелевской премии (немецкие физики А. Ферт и П. Грюнберг).

Результаты изучения УМ стали актуальной темой многих научных журналов. В течение 20 лет издается «Smart Materials Bulletin», известен журнал «Intelligent materials». Постоянные рубрики, посвященные УМ, есть в журналах «Advanced Composite

Bulletin», «Advanced Ceramics Report», «Applied Surface Science», «Biomedical Materials», «Materials Science and Engineering: B, C», «Journal of Alloys and Compounds», «Materials and Wave Interaction», «Journal of Magnetism and Magnetic Materials», «Polymer Cells and Networks», «Progress in Materials Science», «Progress in Polymer Science», «Computational Materials Science», «Microelectronic Engineering», «Nanostructured Materials», «Photonics and Nanostructures: Fundamental and Applications» (Elsevier), «European Physical Journal» (Springer), «Philosophical Magazine» (Taylor & Francis), «Nano» (World Scientific), «Journal of Advanced Materials» (Nova Science Publishers Inc.). Это свидетельствует о том, что разработка умных технических систем стала ведущей тенденцией материаловедения XX в.

1.2. Основные понятия

Вещество – вид материи, совокупность дискретных образований, обладающих массой покоя. В трудовой деятельности человек использует вещества как основу средств производства (т. е. средств и предметов труда) для получения материальных благ. Вместо понятия «вещественная основа» в технике используют термин «материал». Из материалов состоят и средства, и предметы труда. С помощью средств труда (машины, оборудование, инструменты, здания, средства связи, перемещение грузов, земля как всеобщее средство труда) люди воздействуют на предметы труда – на все то, на что направлен труд человека.

В составе технического изделия материалы воспринимают и передают механическую нагрузку, проводят электрический ток и теплоту, создают барьер для проникновения жидкостей и газов и т. д. В порядке усложнения эксплуатационных функций категории материалов образуют ряд: простые–многофункциональные–адаптивные–активные–умные.

Простые материалы выполняют в техническом изделии только одну основную эксплуатационную функцию. Слово «основную» употреблено потому, что почти всегда комплекс физических, химических, механических и других природных свойств материала

неконтролируемо реализуется в изделии, придавая ему какое-то дополнительное эксплуатационное свойство.

Многофункциональные материалы выполняют в изделии основную и дополнительные функции. Например, бронза является конструкционным и триботехническим материалом машиностроения, а некоторые марки бронз отличаются еще и повышенной коррозионной стойкостью. Многие конструкционные пластмассы используют для защиты металлических деталей от коррозии и для создания в изделии электрической изоляции. Большинство керамических материалов сочетает высокие твердость, диэлектрические свойства, тепло- и химическую стойкость, что обусловило многофункциональное применение керамики в технике.

У **адаптивных** (от англ. *adaptive* – приспособливающийся) материалов под действием эксплуатационных факторов (механическая нагрузка, температура, физические поля, среды), когда их интенсивность достигает порогового значения, целесообразно изменяется структура. В принципе структура любого материала естественно изменяется в результате внешних воздействий. Слово «целесообразно» означает, что изменение структуры адаптивного материала увеличивает работоспособность изделия, в составе которого он находится. Иными словами, новые свойства материала, «приспособившегося» к изменившимся условиям эксплуатации, обуславливают повышение конкурентоспособности и качества изделия. Структура адаптивного материала может возвращаться в исходное состояние после прекращения внешнего воздействия [4], в противном случае изменение структуры необратимо.

Примером адаптивного материала служит пластичная смазка – мазеобразный смазочный материал, полученный введением в жидкое нефтяное или синтетическое масло твердого загустителя (мыла, парафина, сажи и др.). При нагрузках, меньших предела прочности образованного загустителем пространственного каркаса, смазка имеет свойства твердого тела. При больших нагрузках она превращается в аномально вязкую смазочную жидкость. После снятия нагрузки структура каркаса восстанавливается и смазочный материал вновь становится подобен твердому телу.

Активные материалы, выполняя в изделии присущие техническим материалам функции, оказывают на сопряженные части изделия и окружающую среду полезные воздействия физической, химической или биологической природы. Критерием полезности является повышение работоспособности, качества и конкурентоспособности изделия.

Химически активный фильтрующий материал состоит из углеродной ткани, пропитанной (импрегнированной) комплексономы – аминополикарбоновыми кислотами и их производными. Комплексоны замечательны тем, что вступают в реакции с катионами металлов, образуя устойчивые координационные соединения. Фильтрующий материал проявляет активность, химически связывая сольватированные в фильтруемой жидкости ионы тяжелых металлов. Последние представляют собой опасную в экологическом плане и трудноуловимую примесь.

Умный материал выполняет в технической системе соответствующие его природным свойствам эксплуатационные функции, но при достижении энергии внешнего воздействия некоторого порогового значения, во-первых, трансформирует эту энергию в изменение своей структуры, обеспечивающее более высокий уровень эксплуатационных свойств, а во-вторых, контролирует и автоматически регулирует этот уровень с помощью системы обратной связи путем сопоставления величины внешнего воздействия и степени изменения свойств.

Итак, отличительные признаки УМ следующие:

1) эксплуатационные функции УМ, как и всякого материала, соответствуют его природным свойствам – механическим, физическим, химическим и др.;

2) изменение структуры УМ происходит после того, как энергия внешнего воздействия W достигнет критического значения, превышающего энергию активации процесса перестройки структуры материала $W > W_a$;

3) на перестройку структуры УМ тратится энергия внешнего воздействия на материал, а не энергия, вырабатываемая технической системой, в которой работает материал;

4) УМ обладает способностью сопоставлять энергию внешнего воздействия и степень первичного изменения структуры материала; результат такого сопоставления реализуется в виде сигнала обратной связи, направляющего энергию внешнего воздействия на вторичное регулирование структуры материала;

5) обратная связь – главный отличительный признак самоорганизующегося УМ, не характерный ни для какой другой категории материалов.

При характеристике УМ был употреблен термин «способность», который обычно используют для оценки индивидуальных особенностей живых существ как объективный критерий их успешной деятельности. В материаловедении его синонимом является понятие «свойство». Употребление сочетания «способность УМ» оправдано тем, что УМ как кибернетическая система проявляет черты искусственного интеллекта, идентичные природному интеллекту – способности к мышлению живых существ.

После прекращения внешних воздействий УМ регенерирует, т. е. восстанавливает свои характеристики. Однако вследствие потерь энергии при перестройке структуры (выделение джоулева тепла, гистерезис, трение, неполнота фазовых переходов и т. п.) абсолютной регенерации УМ никогда не происходит. КПД перестроек структуры УМ $\eta = W_a/W < 1$, где W и W_a – энергии внешнего воздействия и активации перестройки структуры. УМ представляет собой открытую термодинамическую систему, которая обменивается с окружающей средой веществом и энергией. Поэтому, согласно первому началу термодинамики, для УМ справедливо классическое соотношение

$$dU - TdS - \delta A \leq 0,$$

где dU – изменение внутренней энергии УМ при внешнем воздействии; dS – изменение его энтропии; δA – работа по перестройке структуры УМ; T – термодинамическая температура; знак равенства соответствует абсолютно обратимому процессу перестройки структуры, имеющему место в идеальном УМ.

С позиций второго начала термодинамики и статистической физики УМ как система, состоящая из очень большого числа n

хаотически движущихся частиц, имеет тенденцию к регенерации, т. е. к самопроизвольному переходу из состояний менее вероятных в состояния более вероятные. Второе начало термодинамики выполняется с тем большей вероятностью, чем больше n , и для УМ оно практически носит характер достоверности. В то же время в элементах структуры УМ, содержащих малое число частиц, непрерывно происходят флуктуации (беспорядочные отклонения физических характеристик частиц от их средних значений), т. е. имеют место отклонения от второго начала термодинамики.

Существует естественная **прямая связь** между интенсивностью внешнего воздействия на материал и степени трансформации его структуры. **Обратная связь** – воздействие результатов какого-либо процесса на его протекание. Обратная связь в УМ – процесс взаимного влияния энергии внешнего воздействия и внутренней энергии трансформированной структуры материала. Он определяет кинетику и результат физико-химической перестройки структуры, т. е. ее конечное состояние. Иными словами, обратная связь – это форма взаимного влияния действительного состояния УМ и переменных условий его эксплуатации. Если структура УМ под действием прямой связи трансформировалась недостаточно, а под влиянием обратной связи этот процесс ускоряется, обратную связь называют положительной. Когда процесс перестройки структуры УМ меняет направление, имеет место отрицательная обратная связь, которая стабилизирует структуру материала. Термодинамически целесообразное реагирование на переменную первичную реакцию УМ предполагает гибкость обратной связи [5]. По природе естественных процессов, с помощью которых в УМ реализуется обратная связь, различают механические, оптические, электрические и другие обратные связи. Цепь обратной связи УМ может содержать одно или несколько звеньев (структурных единиц материала), осуществляющих преобразование выходного сигнала по заданному алгоритму. Наличие обратной связи является критерием «разумности» материала.

Умная техническая система, как и УМ, содержит обратную связь. Однако она не встроена в структуру одного материала, а ее

функции выполняет один или несколько элементов технической системы, пространственно отделенных от элемента, проявляющего признаки искусственного интеллекта. Примерами умной технической системы являются усилитель с громкоговорителем, звуковой сигнал которого воздействует на микрофон, подключенный ко входу усилителя; узел трения, реализующий эффект безызносности; система электрохимической защиты трубопровода от коррозии.

Модель умной технической системы, разработанная в конце 1940-х годов XX в. создателями радиоэлектронной техники и позже принятая в качестве основного принципа построения структуры УМ [5], предполагает взаимодействие трех элементов: сенсора, актюатора и процессора (от англ. sense – ощущение, actuate – приводить в действие, process – обрабатывать). В диссертации [6] предложена форма их взаимодействия в структуре УМ, представленная на рис. 1.1. Сенсор – чувствительный элемент, оценивающий природу и интенсивность внешних воздействий на материал. Актюатор – исполнительный элемент, преобразующий внешнее воздействие в изменения структуры материала. Процессор – элемент, управляющий актюатором с помощью сигнала от сенсора.

В работе [7] нами дана следующая интерпретация взаимодействия этих элементов в структуре материалов. Материал 1, содержащий сенсор и актюатор, представляет собой обычный



Рис. 1.1. Модель структуры УМ

технический материал. Материал 2 имеет структурные элементы, служащие актюатором и процессором, а материал 3 – сенсором и процессором. И тот, и другой материалы могут быть активными, т. е. запрограммированными на изменение воздействия окружающей среды, или адаптивными, приспособляющимися к изменяющимся условиям эксплуатации. Умный материал 4 содержит элементы, выполняющие

функции сенсора, актюатора и процессора. Его структура целесообразно изменяется соответственно условиям эксплуатации, он оказывает воздействие физической, химической и биологической природы на окружающую среду и, кроме того, регулирует свою активность, т. е. изменяет уровень ответных реакций в зависимости от изменения условий эксплуатации.

Эта абстрактная модель нуждается в наполнении характеристиками материалов и физико-химическими процессами, протекающими в них при внешних воздействиях.

Алгоритм (от *algorithmi* – лат. транслитерации арабского имени математика IX в. аль-Хорезми) – точное описание способа решения задачи, обеспечивающего результат, однозначно определяемый исходными данными. Математическое моделирование УМ состоит в получении алгоритма управления структурой материала с помощью системы обратной связи. Она оптимизирует величину энергии внешнего воздействия, которая затрачивается на вторичную перестройку структуры, по критерию соответствия эксплуатационных свойств УМ интенсивности внешнего воздействия. В теории алгоритмов как части математики стремятся уменьшить число элементарных операций и сделать их достаточно мелкими. Алгоритмическими языками, возникающими в результате такого подхода практически невозможно пользоваться для описания УМ. Поэтому в теории алгоритмов разработаны языки, специально ориентированные на те или иные классы УМ [8].

Системный подход – направление методологии научного познания, состоящее в рассмотрении объектов исследования как систем. УМ представляет собой материальную, а его модель – абстрактную кибернетические системы. Любой материал – это система взаимосвязанных элементов структуры, состояние которых меняется под действием эксплуатационных факторов. На естественное изменение структурных элементов УМ дополнительно влияют сигналы обратной связи. Закономерности функционирования УМ описывают тремя семействами функций [1]:
1) определяющих изменения состояния структурных элементов;
2) описывающих свойства материала в зависимости от состояния

структуры; 3) задающих внешние воздействия на материал. Если эти функции однозначны, УМ называют детерминированным, если часть из них случайные функции, УМ представляет собой вероятностную или стохастическую систему. Полное описание УМ включает дополнительно семейство функций исходного состояния материала.

Вид математического аппарата, наиболее удобного для анализа УМ, выбирают в зависимости от дискретности или непрерывности функций, описывающих УМ как систему. Для непрерывных функций это теория дифференциальных уравнений, для дискретных – теория алгоритмов и теория автоматов. Базовой математической теорией, которую применяют и в том, и в другом случаях, является теория информации.

Типы управления структурой материалов могут быть следующими.

Простейшим является *программное управление*: на материал выдается заданная условиями эксплуатации последовательность управляющих воздействий (температура, давление, поле, среда), обратная связь отсутствует. Структура материала изменяется естественным образом под действием прямых связей. По такой программе «работают» все материалы, только в «умных» она дополнена действием обратных связей.

Простым видом управления является классическое *авторегулирование*, цель которого состоит в поддержании постоянным одного или нескольких параметров структуры материала с помощью обратной связи. Примером может служить система автоматического регулирования концентрации ингибитора коррозии в объеме пленочной упаковки для металлического инструмента. Чтобы инструмент не корродировал, в упаковке надо поддерживать постоянным некоторое парциальное давление паров ингибитора. Последний испаряется внутрь упаковки из образующей ее активной полимерной пленки, которая содержит ингибитор коррозии. Когда скорость испарения становится равной скорости конденсации паров ингибитора на поверхности инструмента, испарение прекращается. При утечке паров из негерметичной упаковки испарение возобновляется, когда давление уменьшится

до критического значения [9]. Функцию сигнала обратной связи в такой системе выполняет парциальное давление паров ингибитора внутри упаковки.

Целью *оптимального управления* является поддержание заданного значения некоторой функции от двух групп параметров. Параметры первой группы (внешние условия) меняются произвольно, параметры второй группы регулируются под действием сигналов системы управления. Пример систем оптимального управления – защита от коррозии металлоизделий, находящихся в полугерметичной упаковке, с помощью таблеток, состоящих из умного композиционного материала на основе полимера и летучего ингибитора коррозии. Полимерная матрица ограничивает скорость испарения ингибитора из таблетки. Величина парциального давления паров ингибитора, обеспечивающая торможение коррозии металла, зависит от влажности воздуха в упаковке. Влажность меняется в зависимости от атмосферных условий. Необходимо, чтобы скорость испарения ингибитора из УМ изменялась соответственно колебаниям влажности. Задачу оптимального управления структурой полимерной матрицы, ограничивающей испарение ингибитора в зависимости от влажности, должен решить УМ. В простейшем случае задача оптимального управления сводится к поддержанию наибольшего при пороговом значении влажности давления паров ингибитора внутри упаковки.

Задачу *экстремального регулирования* решает система оповещения о перегрузке моста. Количество возмущающих действий на его конструкцию (люди, транспорт) очень велико, а их распределение по длине моста непредсказуемо. Умным элементом такой системы может служить магнитострикционный материал. Изготовленные из магнитострикционных сплавов элементы опор и несущих конструкций моста служат одновременно датчиками давления. При механическом нагружении в них генерируются магнитные поля, которые информируют о превышении в элементах конструкции допустимого уровня напряжений. Строго говоря, эта система является не системой регулирования, а информационной системой. Кроме того, магнитострикционные датчики

выполнены из материала, который следует отнести к категории многофункциональных, а не УМ. Тем не менее такая система проявляет признаки искусственного разума. Функцию обратной связи, отсутствующей в магнитострикционном сплаве, выполняют другие элементы системы слежения за перегрузкой моста.

Если нерегулируемые условия эксплуатации УМ существенно изменяются, система управления должна поддерживать такие состояния материала, которые обеспечивают устойчивость управления. Когда влияние возмущающих факторов делает это невозможным, необходимы самонастройка и самоорганизация УМ. В случаях выведения технической системы из равновесия система управления должна изменить параметры связей между структурными элементами УМ, чтобы добиться устойчивости управления. Такие системы управления называют *ультраустойчивыми*. Можно предположить, что большинство УМ XXI в. будет ультраустойчивым.

Некоторые УМ обладают способностью накапливать информацию о состоянии своей структуры и в зависимости от этого инициировать процессы ее перестройки. По аналогии с человеческим мозгом такое свойство УМ называют *памятью*. «Запоминание» информации в УМ происходит вследствие изменения состояний элементов структуры. Это классический случай авторегулирования в УМ. На нем основан эффект «памяти формы» – восстановление в результате нагрева после пластической деформации первоначальной формы изделия.

Приведенные примеры свидетельствуют, что техническая система может проявлять признаки искусственного разума не только благодаря УМ, но также в случаях, когда в ее составе находятся многофункциональные, адаптивные или активные материалы. Функцию отсутствующей у них обратной связи выполняют элементы управления технической системой.

Важным фактором эффективности УМ (как и всех технических материалов) является его *надежность* – свойство материала выполнять заданные функции в составе технической системы, обеспечивая саморегулирование рабочих параметров в зависи-

мости от режимов эксплуатации (при заданных условиях использования и обслуживания). Надежность обуславливает техническую возможность применения УМ, а значит, и содержащего его изделия по назначению в нужное время и с требуемой эффективностью. Теория надежности кибернетических систем позволяет оценить эксплуатационные свойства УМ при повреждении их структурных элементов, разрыве цепей обратной связи и др. [10].

Методология изучения УМ как кибернетических систем включает три принципиально разных метода. Два из них – экспериментальный и аналитический – широко применяются в материаловедении. Экспериментальный метод предполагает проведение экспериментов с УМ или с его физической моделью. Сущность аналитического метода состоит в описании УМ с помощью математического аппарата и последующего извлечения следствий из этого описания, например, путем решения соответствующей системы уравнений. Третий метод, получивший названия математического моделирования, машинного или виртуального эксперимента, является одним из важнейших результатов кибернетического подхода к изучению материалов. Его смысл состоит в том, что эксперименты проводят не с материалом, а с его математическим описанием. Последнее вместе с соответствующими программами, реализующими изменения характеристик материала, помещают в память ЭВМ. Это дает возможность прогнозировать изменение свойств материала в определенных условиях, менять компьютерные алгоритмы реализации свойств, визуализировать объемную структуру, рассчитывать параметры физических свойств материала и т. д. [11]. Быстродействие современных компьютеров позволяет изучать трансформацию структуры УМ в более быстром темпе, чем она происходит в действительности. Метод виртуального эксперимента оказался наиболее плодотворным, когда из нескольких вариантов УМ выбирают для реализации тот, который в наибольшей мере отвечает условиям эксплуатации.

Иногда больший интерес, чем строение УМ, представляет его ответ на внешние воздействия. В таких случаях метод реше-

ния задач моделирования состоит в использовании упомянутого в параграфе 1.1 принципа «черного ящика». «Черному ящику» уподобляют УМ, структура которого неизвестна или слишком сложна для того, чтобы можно было по свойствам структурных элементов и связей между ними делать выводы о свойствах материала.

1.3. Энергетические аспекты внешних воздействий на материалы

При эксплуатации в составе технической системы материалы подвергаются внешним воздействиям со стороны сопряженных элементов системы и окружающей среды. Любые внешние воздействия совершают работу над материалом, изменяя его структуру и внутреннюю энергию. Внутренняя энергия является суммой кинетической энергии молекул и атомных частиц, из которых состоит материал, а также энергии взаимодействия всех элементов структуры материала. Внутренняя энергия – функция термодинамических параметров материала (объема, температуры и др.), изменение которой определяется работой, совершаемой над ним внешними воздействиями. Последние могут иметь физическую, химическую или биологическую природу. Ниже приведены обобщенные характеристики эксплуатационных воздействий, которые обуславливают ответную реакцию материалов, служат источником энергии и определяют механизмы обратных связей.

Воздействия физической природы оказывают на материалы механические напряжения, температура и физические поля, т. е. поля ядерных сил, тяготения и электромагнитные поля.

Механические напряжения инициируют соударения и реакции взаимодействия газовых частиц, гомогенизацию или разрывы сплошности жидкостей, упругую или пластическую деформации твердых тел. Деформирование вызывает перестройку структуры твердого материала, возникновение в нем изотропии или анизотропии, предельным случаем которой является нарушение сплошности твердого тела. Оно начинается с образования и развития

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Концепция умных материалов	7
1.1. Ретроспекция	7
1.2. Основные понятия	13
1.3. Энергетические аспекты внешних воздействий на материалы..	24
Глава 2. Ответ материалов на внешние воздействия	32
2.1. Деформация	32
2.1.1. Деформация твердых материалов	32
2.1.2. Деформация жидкостей.....	39
2.1.3. Деформирование газов	41
2.2. Явления переноса	43
2.2.1. Диффузия	44
2.2.2. Перенос зарядов	49
2.2.3. Перенос излучения	49
2.2.4. Теплообмен	56
2.3. Фазовые переходы	57
2.3.1. Термодинамическая система.....	58
2.3.2. Плавление и кристаллизация	60
2.3.3. Испарение, сублимация и конденсация	63
2.3.4. Фазовые переходы в твердом теле	65
2.3.5. Переходы в жидкости	67
2.3.6. Переходы в газе	70
2.4. Электрические явления.....	72
2.4.1. Поляризация.....	72
2.4.2. Пьезо-, пиро- и сегнетозлектричество.....	79
2.4.3. Электрокинетические явления.....	80
2.4.4. Гальваномагнитные явления.....	82
2.4.5. Сверхпроводимость	83
2.4.6. Электрохимические процессы	85
2.5. Магнитные переходы	86
2.5.1. Намагничивание.....	86

2.5.2. Магнитные фазовые переходы.....	89
2.5.3. Магнитная релаксация.....	89
2.5.4. Магнитострикция.....	91
2.5.5. Магнитная вязкость.....	92
2.5.6. Тепловые и оптические эффекты.....	94
2.6. Поверхностные явления.....	96
2.6.1. Поверхностная энергия.....	96
2.6.2. Смачивание и растекание.....	97
2.6.3. Адсорбция.....	98
2.6.4. Капиллярные явления.....	101
2.6.5. Адгезия.....	102
2.6.6. Наноструктуры.....	104
2.7. Биотрансформация материалов.....	106
2.7.1. Биокоррозия металлов.....	108
2.7.2. Биодеструкция полимеров.....	110
2.7.3. Биозагрязнение жидкостей.....	114
Глава 3. Систематизация и методы описания умных материалов	117
3.1. Методы таксономии материалов.....	118
3.2. Модель умного материала.....	120
3.3. Механика умных материалов.....	124
3.3.1 Структурно-функциональный анализ композитов.....	126
3.3.2. Макромеханические методы моделирования УМ.....	131
3.3.3. Методы физической мезомеханики материалов.....	133
3.3.4. Принципы моделирования УМ: самоорганизация структуры, система обратной связи, подвижные границы.....	139
3.3.5. УМ с подвижными межфазными границами.....	144
3.4. Формулировки и решения некоторых задач механики УМ.....	146
3.4.1 Самозалечивание повреждений.....	146
3.4.2. Самоармирование материалов.....	149
3.4.3. Материалы с отрицательным и нулевым коэффициентами термического расширения.....	154
3.4.4. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (ауксетики).....	155
3.4.4.1. Композиционные ауксетичные материалы.....	157
3.4.4.2. Пористые и гранулированные материалы.....	160
3.4.4.3. Природные материалы.....	166
3.4.5. Использование anomalно упругих материалов в УМ.....	166
3.4.5.1. Самоупрочнение УМ с ауксетичными компонентами.....	167
3.4.5.2. Термостабильные УМ с ауксетичными компонентами.....	169
3.5. Классификация умных материалов и технологических систем.....	171
Глава 4. Основные классы умных материалов и технических систем ...	180
4.1. Конструкционные материалы.....	180
4.1.1. Самозалечивающиеся материалы.....	180

4.1.2. Жаропрочные материалы.....	182
4.1.3. Хладостойкие материалы.....	186
4.1.4. Радиационно стойкие материалы.....	189
4.1.5. Коррозионно-стойкие материалы.....	193
4.2. Триботехнические системы.....	198
4.2.1. Материалы, работающие при аномальных температурах....	199
4.2.2. Материалы работающие при воздействии полей и излучений...	203
4.2.3. Материалы для работы в коррозионных средах.....	209
4.2.4. Смазочные материалы.....	213
4.2.5. Фрикционные материалы.....	215
4.3. Защитные системы.....	219
4.3.1. Герметизирующие материалы.....	219
4.3.2. Фильтрующие материалы.....	232
4.3.3. Теплоизоляционные и звукопоглощающие материалы.....	238
4.3.4. Радиопоглощающие материалы.....	244
4.3.5. Антикоррозионные покрытия.....	247
4.4. Изделия электротехники и электронной техники.....	252
4.4.1. Проводники.....	255
4.4.2. Полупроводники.....	264
4.4.3. Диэлектрики.....	272
4.4.4. Магнитные материалы.....	278
4.4.5. Оптически активные материалы.....	287
4.5. Материалы и изделия медицинской техники.....	302
4.5.1. Методы и устройства физиотерапии.....	303
4.5.2. Материалы для имплантов.....	310
4.5.3. Целевая доставка лекарств.....	321
4.5.4. Выращивание тканей.....	325
4.6. Средства упаковки.....	331
4.6.1. Активные средства упаковки.....	333
4.6.2. Газоселективные пленки.....	338
4.6.3. Биоразлагаемые упаковки.....	341
4.6.4. Информационные упаковки.....	345
4.7. Биологически активные материалы и системы.....	347
4.7.1. Антимикробные материалы.....	348
4.7.2. Регуляторы брожения.....	350
4.7.3. Регуляторы роста растений.....	352
4.7.4. Системы очистки вод.....	356
Глава 5. Умные материалы и энергетическая проблема.....	360
5.1. Глобальная энергетическая проблема.....	360
5.2. Энергозатраты на производство материалов.....	365
5.3. Техничко-экономическая эффективность умных материалов и технических систем.....	367
Заключение.....	371
Литература.....	373

Научное издание

Пинчук Леонид Семенович
Гольдаде Виктор Антонович
Шилько Сергей Викторович
Неверов Александр Сергеевич

**ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМАТИКУ
УМНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор *Г. В. Малахова*
Художественный редактор *И. Т. Мохнач*
Технический редактор *О. А. Толстая*
Компьютерная верстка *Ю. А. Агейчик*

Подписано в печать 25.03.2013. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 23,25. Уч.-изд. л. 20,5.

Тираж 160 экз. Заказ 74.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом
«Беларуская навука». ЛИ 02330/0494405 от 27.03.2009.
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.