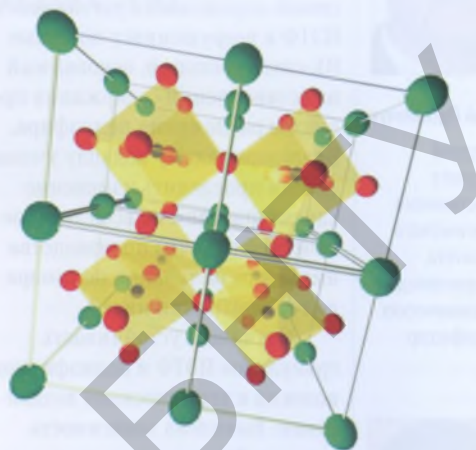


# «Умные материалы»: время убирать кавычки



Непременный атрибут цивилизации – материалы, активно используемые человеком в разнообразных сферах. Не случайно их создание и совершенствование стало приоритетным научно-техническим направлением во всех развитых странах.



**Сергей Шилько,**  
завлабораторией  
механики композитов и биополимеров  
Института механики металлополимерных  
систем им. В.А. Белого НАН Беларуси



**Юрий Плескачевский,**  
председатель  
Гомельского филиала НАН Беларуси,  
член-корреспондент

При всем многообразии, крупнотоннажности и значимости стали, алюминиевых сплавов, бетона, древесины, пластиков, продолжают поиски новых составов материалов и режимов их переработки в изделия, чтобы удовлетворить растущие потребности современного общества. Данная проблема особенно актуальна в части производства конструкционных материалов для нужд машиностроения, строительства и других важнейших отраслей. К сожалению, до сих пор некоторые разработчики приспособливают новую конструкцию к узкому перечню известных или доступных им материалов. Так появляются морально и физически устаревшие уже при рождении образцы техники. Более прогрессивен комплексный подход (рис. 1), при котором одновременно и всесторонне, за несколько уточняющих шагов, взаимовызываются требования к конструкции, материалу и технологии для достижения ключевых показателей.

Однако в то время как конструкции и технологии (даже чрезвычайно сложные) улучшаются с использованием компьютерных средств автоматизированного проектирования,

материаловедение во многом остается эмпирической наукой и, если угодно, искусством. Это обусловлено тем, что прямое моделирование и расчетная оптимизация тонкой структуры реального материала со всеми его микрокомпонентами и несовершенствами пока невозможны даже при наличии суперкомпьютера. Вторая и главная причина ограниченности традиционных подходов в том, что удельные механические характеристики конструкционных материалов уже не могут быть радикально улучшены дисперсионным упрочнением (когда в металлическую или полимерную матрицу вводятся бездефектные жесткие частицы или волокна). Определенный оптимизм в этой области обусловлен появлением наноматериалов и нанотехнологий, но даже они не решают проблему в принципе.

Дело в том, что совершенство и устойчивость структуры материала, достигнутые на стадии его получения, далеко не всегда определяют надежность, ресурс, биосовместимость и другие потребительские свойства изделий. Невозможно точно предсказать весь спектр нагрузок и состояний окружающей среды, ожидающих машину или конструкцию в период эксплуатации, а завышение запасов прочности неминуемо приводит к таким затратам сырья и энергии, которые сделают любую продукцию неконкурентноспособной. К тому же изначально высококачественные (формостабильные, прочные, твердые, жаростойкие) материалы плохо поддаются рециклингу, создавая значительную экологическую нагрузку (банальные примеры – автомобильные шины и ПЭТ-тара).

В этой связи полезно обратиться к опыту окружающей нас природы, которая в ходе эволюции отыскала и успешно использует принципиально иные способы как повышения живучести, так и утилизации организмов. Даже простейшие биологические виды демонстрируют замечательную способность гибко перестраивать свою структуру в

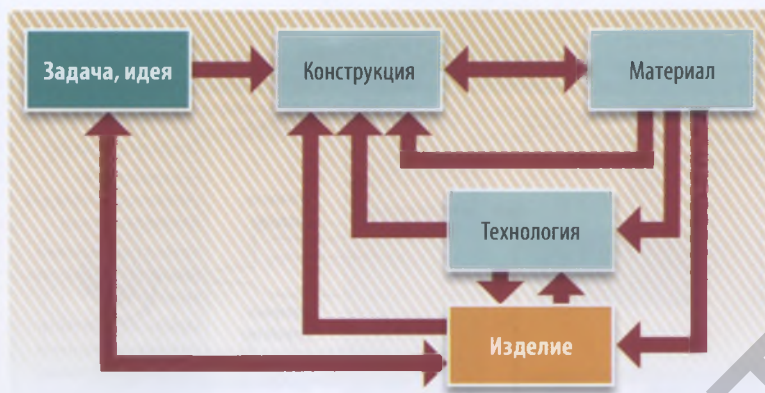


Рис. 1. Схема создания технических решений с использованием новых материалов

ответ на внешние воздействия. Парадоксально, что все искусственные материалы в конечном счете уступают относительно непрочным и податливым биологическим прототипам, которые оказываются более рациональными и надежными. В терминологии Д. Медоу это выражается в следующих особенностях и возможностях последних:

- композиционному строению;
- иерархии уровней структурной организации;
- мягких, гибких компонентах;
- самосборке, самоорганизации, самоумножении (репликация) на основе слабых связей;
- использовании шаблона-матрицы для построения нового объекта;
- способности к делению [1].

Дальнейший анализ позволил расширить перечень признаков, необходимых для целенаправленного синтеза квазибиологических материалов и конструкций [2, 3]: подвижные межфазные границы, переменные по объему характеристики, самозалечивание, реверсивность, регенерация, резервирование функциональных блоков, самодиагностика, принцип обратной связи.

Из рис. 2 видно, что перечисленные принципы лишь частично реализуются при получении искусственных материалов даже на основе олигомеров и полимеров, наиболее близких биотканям в силу общего высокомолекулярного строения [4].

Авторами предложена классификация материалов [3] с точки



Рис. 2. Принципы создания технических решений и объектов живой природы



Таблица 1. Классификация материалов [3]

Функциональное развитие	Активность	Степень интеллекта	Качество функционирования	Линия поведения
моно-функциональный	пассивный	тривиальный	материал	«предсказуемый» материал (пассивное разрушение)
		интеллектуальный	материал-изделие	«неопределенный» (непредсказуемое бифуркационное разрушение)
поли-функциональный	активный	адаптивный	материал-устройство	«эгоист» (заторможенное разрушение при самосохранении функции)
		умный	материал-система	«приспособленец» (заторможенное разрушение за счет адаптивной реакции)
		мудрый (экофильный)	материал-среда	«камикадзе» (программируемое саморазрушение) «регенерат» (восстановление за счет самоорганизации) «кибер» (заторможенное разрушение за счет обратной связи)

зрения активности и степени интеллекта, а линия поведения материалов характеризуется терминами, которые, как правило, применяются в психологии для описания человека (табл. 1). Здесь сделан акцент на признаках активного (интеллектуального, умного, мудрого) поведения. Можно заметить, как в наши дни ячейки приведенной таблицы начинают заполняться реальными примерами, создаваемыми в передовых лабораториях.

Поскольку разработка умных материалов предполагает использование механизма самоорганизации структуры, обуславливающего уменьшение полной энергии среды, особую актуальность приобретает оценка ее термодинамического состояния. Она предполагает анализ явлений хаоса, стабилизации, кооперативного движения частиц, определение точек бифуркации, кооперативных эффектов. Соответствующие задачи образуют предмет исследований в важном мультидисциплинарном научном направлении – создании умных материалов.

Вообще говоря, с позиций термодинамики все материалы в той или иной степени обладают интеллектом в силу универсальности известного принципа Ле Шателье – Брауна: если система, находящаяся в состоянии равновесия, подвергается воздействию какого-либо фактора, то равновесие в ней смещается так, чтобы его действие ослаблялось. Вопрос именно в соответствии этого закономерного отклика той целевой функции материала (рис. 3), которая закладывается разработчиком. Так, строительный кирпич сопротивляется силовому воздействию до критического предела, но его несущая способность обеспечивается исходной прочностью, которая

может оказаться избыточной, либо со временем необратимо исчерпаться вследствие деградации связующего (медленно), либо при возникновении трещины (быстро). В любом случае поведение рассматриваемого объекта не сопровождается рациональной перестройкой структуры, и поэтому степень его интеллекта ничтожна. Конструкционный материал с высокой степенью адаптации и подвижностью структуры способен самостоятельно снизить опасную концентрацию внутренних напряжений путем перераспределения по объему, выйти из области резонанса колебаний, остановить развитие трещины и по меньшей мере сигнализировать о достижении критического состояния.

Преимущества динамической авторегуляции несомненны. Она широко используется в машинах (к примеру, в антиблокировочной системе тормозов автомобилей) и автоматизированном технологическом оборудовании. Там регулирование осуществляется известной триадой: сенсор (чувствительные датчики) – процессор (средство обработки информации датчиков и принятия решения) – актуатор (исполнительное устройства типа двигателя, клапана или

Рис. 3. Общая схема взаимодействия на различных структурных уровнях материала при наличии обратной связи

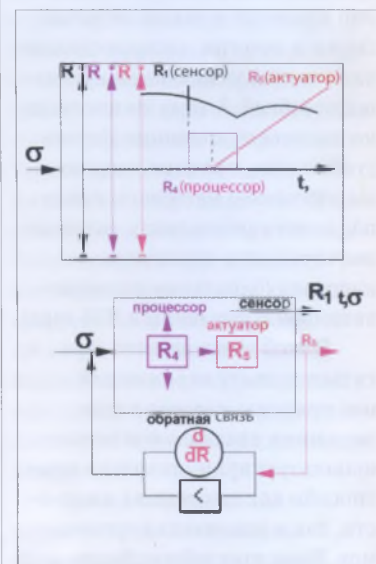
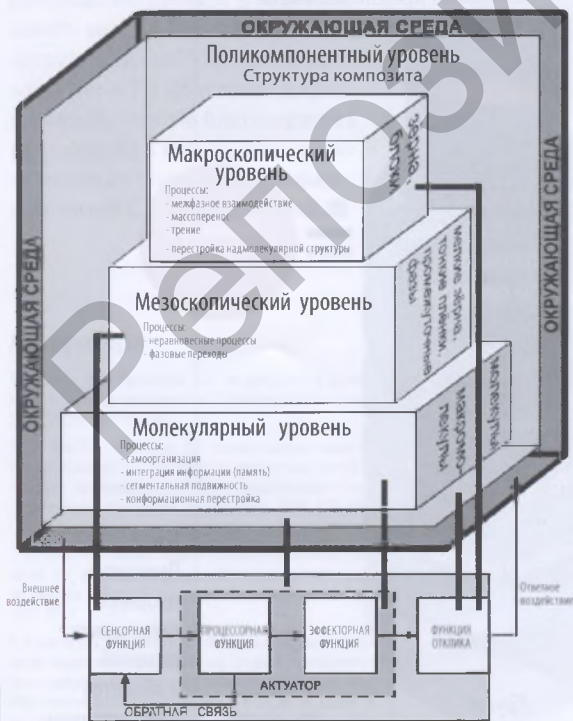


Рис. 4. Схема функционирования обратной связи



другого привода). Достигнутая в наши дни миниатюризация деталей, узлов и электронных элементов подобных устройств приближается к нанометрам. Но ведь данному размерному уровню соответствуют фрагменты надмолекулярной структуры полимеров, способные к конформационной перестройке. В результате наблюдается феномен сближения понятий «материал», «конструкция» и «машина». По аналогии с робототехникой, выбор подходящего физического механизма структурирования позволит реализовать требуемое умное поведение материала.

Фундаментальный атрибут умных материалов, демонстрирующих целесообразное поведение, – обратная связь. На рис. 3 схематично показаны иерархия уровней адаптивного полимерного композита, а также общая схема действия обратной связи, обеспечивающей запуск механизма структурной перестройки в ответ на внешнее воздействие.

Один из возможных вариантов функционирования обратной связи во времени при действии на умный материал механических напряжений, отражающий его инерционность и реологические свойства, показан на рис. 4.

Рис. 5 иллюстрирует один из способов формирования целесообразного отклика неоднородного (многофазного) материала на внешнее воздействие, названный нами принципом автолокализации подвижных межфазных границ [4, 5], при котором достигается экстремум (минимум или максимум) задаваемого критерия качества. Под точкой бифуркации понимается состояние резкого изменения параметров, например, вследствие потери устойчивости структурных элементов или фазовых переходов. Энергетические затраты на перестройку структуры могут возмещаться за счет энергии источника внешнего воздействия [6].

К материалам с подвижными межфазными границами, уже появившимся на рынке, можно отнести пластики с наполнителем



в виде микрокапсул, содержащих полимерное связующее и отвердитель, которые при разрушении контактируют и химически взаимодействуют, обеспечивая локальную полимеризацию и самозалечивание трещины (рис. 6). Аналогичную роль играет слой полимера, содержащего хлорид титана  $TiCl_4$ , размещенный под защитным покрытием из оксида алюминия. В зоне трещины полимер деградирует, хлорид мигрирует к месту дефекта, где превращается в оксид титана, который разбухает и заполняет трещину.

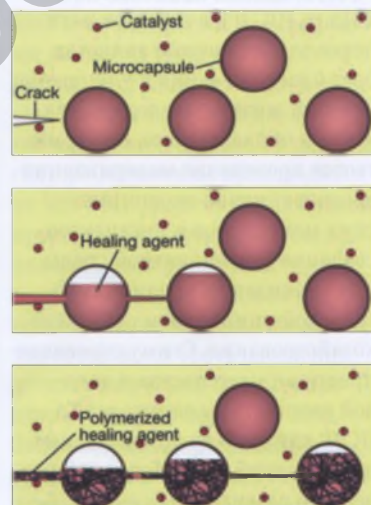


Рис. 6. Самозалечивание трещины в умном материале

Появление умных материалов – безусловно, серьезнейшее событие, которое, по нашему мнению, наряду с информационными и биотехнологиями станет одним из символов настоящего века, как это было в далеком прошлом при главенствовании камня, железа и бронзы. Заметим, что в научной литературе (специализированных журналах, трудах множества конференций, десятках монографий, в том числе отечественном издании [6] и даже справочнике [7]) с названия обсуждаемых материалов (smart и intelligent materials) давно снят флер условности. Не пора ли и в русском языке при употреблении этого термина снимать кавычки? ■

### Литература

1. Gandhi M., Thomson B.S. Smart materials and structures. – Berlin, 1992.
2. Плещачевский Ю.М., Шилько С.В., Стельмах С.В. Этапы развития и уровни организации структуры материалов: адаптивные композиты // Доклады Нац. Акад. наук Беларуси. 1999. Т. 43, №5. С. 119–123.
3. Плещачевский Ю.М., Чигарев А.В., Шилько С.В. Биологические и технические системы – конкуренция и синтез // Механика машин, механизмов и материалов. 2007. Т. 1, №1. С. 78–89.
4. Галаев И.Ю. «Умные» полимеры в биотехнологии и медицине // Успехи химии. 1995. Т. 64, №5. С. 505–524.
5. Shilko S. Adaptive Composite Materials: Bionics Principles, Abnormal Elasticity, Moving Interfaces / In Book: Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials / Ed. P. Tesinova, 2011. Chapter 23. P. 497–526.
6. Пинчук Л.С., Гольдаде В.А., Шилько С.В., Неверов А.С. Введение в систематику «умных» материалов. – Мн., 2013.
7. Varadan V.K. Handbook of smart systems and materials. – London, 2009.

Рис. 5. Принцип автолокализации