

МЕЗОМЕХАНИКА БИОТКАНЕЙ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО И МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Шилько С.В.

ГНУ Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАНБ, Гомель

Введение. Разработка конструкционных, антифрикционных, биосовместимых и др. функциональных композитов – одно из приоритетных научных направлений. При всей важности и распространенности традиционного, к сожалению, во многом эмпирического, подхода к поиску оптимальных рецептур и схем армирования материалов, новой тенденцией является активное применение в материаловедении методов механики деформируемого твердого тела для прогнозирования структурных параметров, обеспечивающих желаемые деформационно-прочностные характеристики.

Моделирование, «компьютерный дизайн» и виртуальные испытания материалов представляются наиболее эффективными при создании ответственных изделий для медицины, атомного машиностроения, космической и авиационной техники. В названных приложениях критическим является достижение максимальных показателей надежности и ресурса, поскольку отказ одного конструктивного элемента может привести к значительным экономическим и социальным потерям. В последние годы для повышения работоспособности указанных изделий разработчики пытаются реализовать в них эффекты адаптации (приспособления) и ремоделирования (рациональной перестройки) структуры, свойственные живым организмам. Действительно, биотрибосопряжения (суставы), костные и мышечные ткани опорно-двигательной, сердечно-сосудистой, зубочелюстной и других систем демонстрируют уникальные характеристики равнопрочности, безысносности, сверхнизкого трения, самозалечивания и т.д.).

В связи с этим, целесообразно создавать материалы и конструкции технического и медицинского назначения, исходя из биомеханических принципов в макроскопическом (на уровне изделия) и мезоскопическом (на уровне структурных единиц материала) масштабе.

Поскольку процессы регулирования и адаптации любой физической природы являются переходными, принципиальное значение имеет описание поверхностного и объемного деформирования, трения и разрушения при изменяющихся граничных условиях. Так, в условиях изнашивания или нестационарной нагрузки в трибосопряжениях существенно изменяются размеры области контакта, а при инициации скольжения в ней формируются зоны проскальзывания и сцепления, оказывая определяющее влияние на износ, силу трения, жесткость и диссипацию энергии в контакте качения и в условно-неподвижных соединениях. Аналогично, диссипация энергии при внутреннем трении зависит от локализации зон пластического течения. Анализ подобных ситуаций приводит к формулировке и решению активно изучаемых в настоящее время задач механики о подвижной (свободной) границе.

С одной стороны, это позволяет управлять триботехническими характеристиками в широком диапазоне внешних воздействий, используя физически нелинейные, например, аномально-упругие материалы.

С другой стороны, процессы межфазного взаимодействия и внешнего трения, локализованные, соответственно, на поверхностях раздела структурных элементов композитов и контактной поверхности трибосопряжений, оказывают существенное влияние на макроскопические характеристики указанных материалов (пределы прочности и пластичности, упругие модули) и изделий (контактную жесткость, силу трения, формостабильность и т.д.).

В итоге, актуально развитие методов мезомеханики [1], позволяющих описать реальную структуру композитов на уровне отдельных армирующих включений и межфазных слоев, устанавливая связь эксплуатационных характеристик материалов и изделий с рецептурами и технологическими режимами переработки.

Целью настоящего сообщения является обоснование эффективности мезомеханического исследования структурно неоднородных и физически нелинейных биологических тканей и полимерных композитов технического и медицинского назначения.

Методы исследования. Существующие методы прочностного анализа композитных конструкций, как правило, базируются на компактных математических зависимостях, полученных на основе

модельных представлений механики неоднородной среды [2]; например, расчет контактных трибосопряжений [3] выполняется на основе решения контактных задач с учетом специфики фрикционного взаимодействия твердых тел [4,5]. Во многих случаях эти подходы дают приемлемую точность оценки практически важных параметров жесткости, прочности, а также трибомеханических характеристик.

Однако для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций сложной формы из структурно неоднородных и физически нелинейных материалов (например, полимерных композитов) приходится использовать пространственную дискретизацию тел сопряжения конечными и граничными элементами, чтобы снять геометрические ограничения аналитических методов, а также учесть нелинейные и краевые эффекты. Весьма актуальной также является обратная задача оптимизации состава материала (главным образом, содержания армирующего наполнителя) трибосопряжений по заданному критерию, исходя из заданной геометрии и условий нагружения.

По нашему мнению, реализация адекватного расчетного подхода дополнила бы обычно практикуемый экспериментальный поиск оптимальных составов композиционных материалов по общим критериям.

Вместе с тем, при использовании указанных весьма эффективных численных методов существует проблема получения исходных данных в виде модулей упругости, вязкости, пределов прочности, параметров скоростной чувствительности композитов для различных соотношений матричного и армирующего компонентов. Их экспериментальное получение является дорогостоящей и длительной процедурой.

В этой связи необходимы методы расчетного определения искомых параметров неоднородных материалов, в частности, пористых, гранулированных, дисперсно-армированных (частицами и короткими волокнами) полимеров. Применение данного класса материалов в технике мотивируется тем, что армирование полимерной матрицы высокопрочными частицами или короткими волокнами, в т.ч. наноразмерного уровня, весьма технологично и обеспечивает существенное повышение прочностных и антифрикционных характеристик [6].

Однако в настоящее время отсутствует общепризнанная расчетная методика, позволяющая прогнозировать триботехнические характеристики тел сопряжения из неоднородных материалов, включая микро- и нанокомпозиты. Прямое моделирование композитов конечными элементами практически невозможно из-за разнообразия внутренней структуры, сложности физико-химических процессов межфазного взаимодействия и нелинейности деформирования полимерной матрицы.

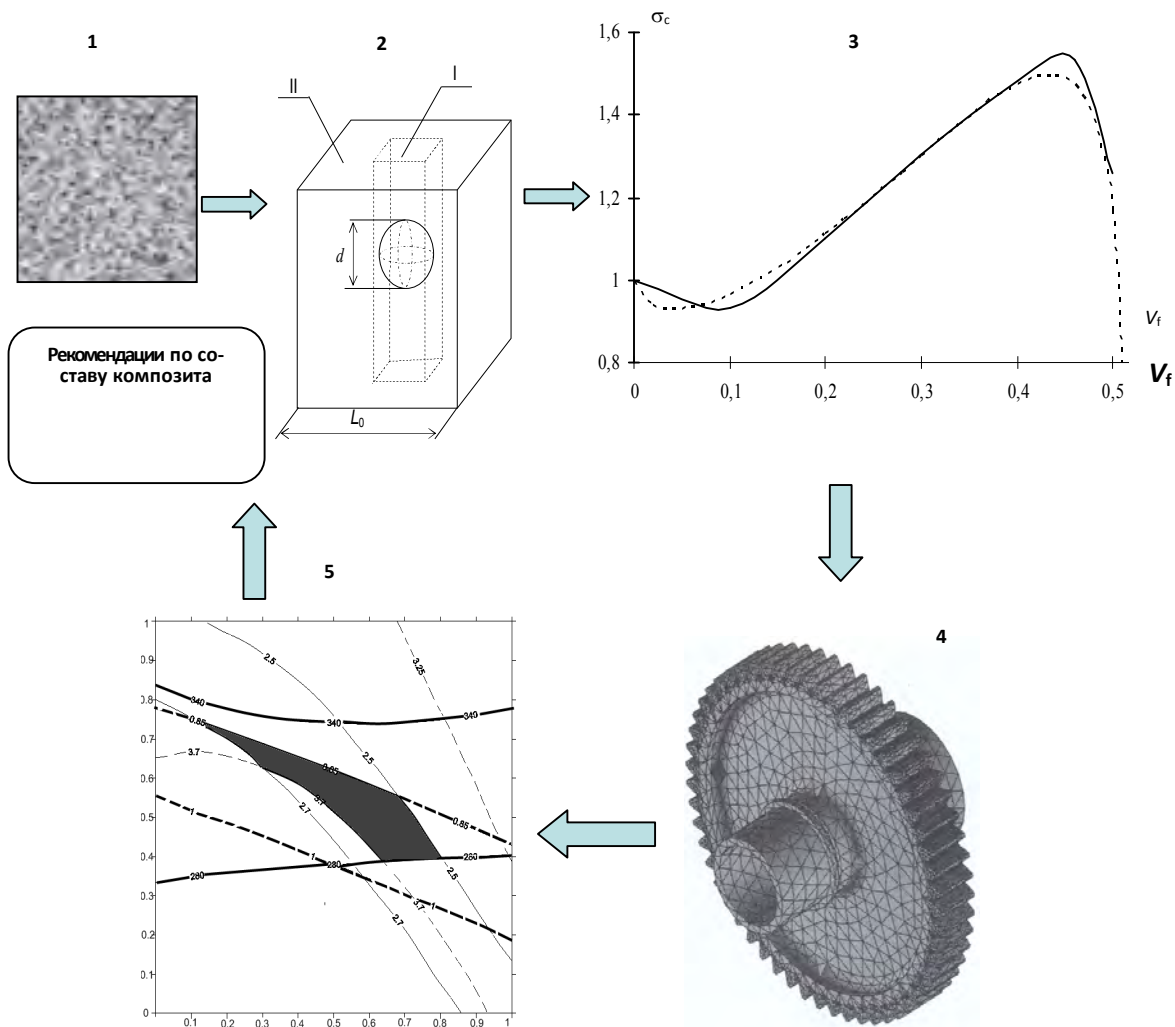
Аналогичная проблема возникает при описании биологических тканей при разработке диагностических процедур и адекватных средств протезирования, а также, как отмечено выше, адаптивных материалов и конструкций.

Рассмотрим применение двухуровневого расчетного метода (рис. 1) для анализа влияния наполнителя на напряженное состояние подповерхностных слоев материала и в зоне контакта зубчатых колес из дисперсно-армированных композитов при оценке износостойкости, контактной и изгибной прочности.

На 1-м (мезомеханическом) уровне постулируется повторяющийся и минимальный по размеру структурный элемент (ячейка периодичности) материала, в основном характеризующий свойства исследуемого материала (рис. 2). Для структурного элемента записываются определяющие соотношения, учитывающие свойства отдельных компонент и структуру композита (размеры и форму армирующих включений, толщину межфазного слоя, плотность микродефектов и т.д.). Выбор мезомеханической модели определяется следующими критериями:

- 1) Расчетные оценки, полученные на основе математической модели, должны наилучшим образом соответствовать экспериментальным данным для рассматриваемого композита.
- 2) Модель должна учитывать характерные особенности структуры и деформационного поведения данного композита.
- 3) При прочих равных условиях предпочтение следует отдать модели, основанной на более простом математическом описании.

Ввиду ограниченного объема статьи приходится отсылать читателя к обобщающим публикациям и цитируемым в них источникам [7-11], в которых дано подробное описание мезомеханических моделей различных материалов.



1) расчет механических характеристик композитного материала: структура дисперсно-армированного композита (1), структурный элемент (2), расчетная зависимость характеристики от содержания наполнителя (3); 2) расчет изделия: результаты конечноэлементного моделирования зубчатого колеса (4) в виде области значений параметров матрицы и наполнителя (5) для получения заданных характеристик композита позволяют корректировать модель 1-го уровня

Рисунок 1 – Схема двухуровневого анализа

Определенные на 1-м уровне эффективные механические характеристики используют в дальнейшем в качестве исходных данных для расчета на 2-м масштабном уровне.

При решении ряда научно-технических задач, включая медицинские приложения, показано, что развиваемая методология равноэффективна в широком диапазоне дисперсности наполнителя, от нано- и микрометров (ультрадисперсные наполнители, макромолекулы полимеров, биологические клетки) до миллиметров и сантиметров (гравий, щебень). Учет реальной геометрии, деформационных свойств и взаимодействия компонентов методами физической мезомеханики позволяют адекватно моделировать деформирование и разрушение микро- и наномпозитов, а затем прогнозировать прочностные и триботехнические характеристики изделия на его основе.

Таким образом, использование современных аналитических и экспериментальных методов оценки свойств и выбора состава композитов для конкретного применения, в отличие от традиционного длительного и приблизительного подбора материала по справочникам, а также непосредственный выход на оптимальные рецептуры материала и управление свойствами является решающим преимуществом мезомеханического подхода.

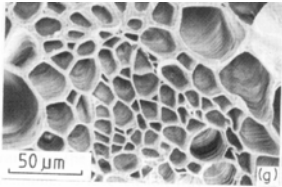
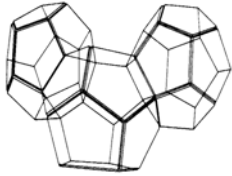
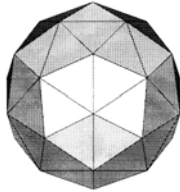

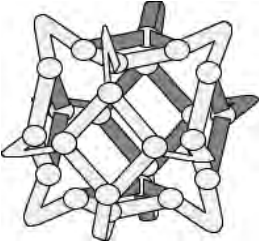
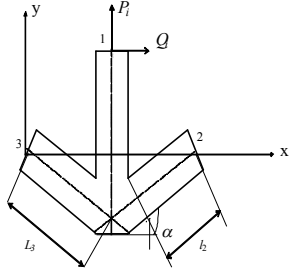
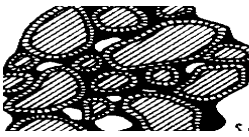
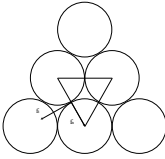
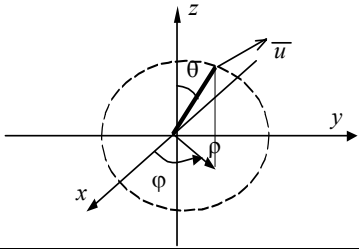
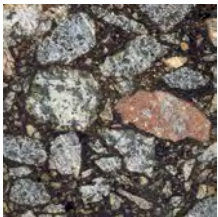
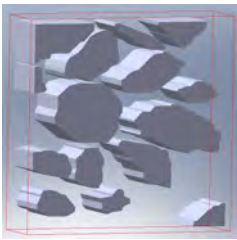
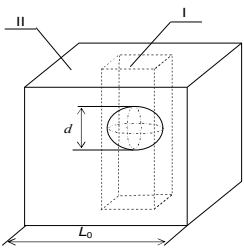
Тип материала	Схема структуры	Структурный элемент (ячейка периодичности)
<p>Закрытопористый</p> 		
<p>Открытопористый</p> 		
<p>Гранулированный</p> 		
<p>Дисперсно-наполненный</p> 		

Рисунок 2 – Мезоструктуры и ячейки периодичности структурно-неоднородных материалов

Заключение. В результате проведенных исследований получило развитие актуальное научное направление на стыке механики деформируемого твердого тела и биомеханики, а именно, мезомеханика биотканей и полимерных композитов технического и медицинского назначения, включающая:

1. создание мезомеханических моделей различных классов структурно-неоднородных материалов;
2. разработку и модификацию методов моделирования и экспериментального исследования композитов и контактных сопряжений;
3. установление новых закономерностей процессов деформирования, разрушения и трения, включая прогнозирование эффектов адаптации к силовому воздействию;
4. разработку новых технических решений в области экспериментальной механики, протезирования и биомеханической диагностики.

Резюме

С использованием мезомеханического описания и оригинальных экспериментальных методов проведены исследования композитов, как физически нелинейных и структурно-неоднородных деформируемых тел. На основе моделей пористых, гранулированных и дисперсно-армированных материалов разработан двухуровневый метод анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и контактных сопряжений, предложены оптимальные составы полимерных композитов технического и медицинского назначения, диагностические технологии для медицины и спорта. Исходя из биомеханических аналогий и анализа явлений деформирования, разрушения и контактного трения, рассматривается возможность создания адаптивных материалов и конструкций. Прогнозируются процессы ремоделирования и актуации биологических тканей, эффекты самосборки наноразмерных ауксетиков и упрочнения фрикционных соединений на их основе.

Литература

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск, Наука. – 1995, Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
2. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. – 334 с.
3. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т.– М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989.– 509 с.
5. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
6. Старжинский В.Е., Шалобаев Е.В., Шилько С.В. и др. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии / Под общ. ред. Ю.М. Плескачевского. – Минск: Бел. наука. – 2012. – 769 с.
7. Шилько С.В., Плескачевский Ю.М. Механика адаптивных композитов и биоматериалов // Материалы, технологии, инструмент. – 2003. – № 4. – С. 5–16.
8. Плескачевский 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.
9. Шилько С.В. Аномально упругие материалы как компоненты адаптивных систем / В кн. Перспективные материалы. – Витебск: УО ВГТУ, 2009.– С. 419–448.
10. Shilko S. Adaptive Composite Materials: Bionics Principles, Abnormal Elasticity, Moving Interfaces, Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials / Ed. P. Teresi Inova, InTech, 2011.– P. 497-526.
11. Плескачевский Ю.М., Шилько С.В., Панин С.В. Микро- и наноструктурные полимерные композиты технического и медицинского назначения: компьютерный дизайн, эксперимент, внедрение // Двадцать конкурсных лет (БРФФИ: 1991-2011 гг.) / БРФФИ; под ред. В.А. Орловича. – Минск: Бел. наука, 2012. – С. 334–356.

Summary

Using mesomechanical description and original experimental techniques the studies of composites as physically non-linear and non-homogeneous deforming media have been performed. Based on the models of porous, granular and disperse-reinforced materials, a two-level calculating method for stress-strain analysis of structural elements and contact joints has been developed, the optimal structures of polymer composites for technical and medical applications, as well as diagnostic procedures for medicine and sport have been proposed. In accordance to biomechanical analogies and analysis of deforming, failure and contact friction phenomena, the possibility of adaptive materials and structures creation has been assumed. The remodeling and actuation processes in biotissues, the effects of self-structuring of nanosized auxetics and strengthening of frictional joints on their base are predicted.

Поступила в редакцию 28.10.2012