

УДК 539.3; 531/534:57

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

Ю.М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ, чл.-кор. НАН Беларуси

Президиум Гомельского филиала НАН Беларуси

С.В. ПАНИН, Б.А. ЛЮКШИН, д-ра техн. наук

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО И МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены перспективы и результаты исследований авторов в актуальном и междисциплинарном научном направлении — компьютерном дизайне функциональных полимерных композитов с дисперсными и волокнистыми наполнителями. Показаны современные представления о механизмах деформирования, трения и разрушения полимеров, а также достижения механохимии, биомеханики и нанотехнологий.

Ключевые слова: полимерные композиты, армирование, прочность, деформативность, мезомеханика, компьютерный дизайн, детали машин, имплантаты

Введение. Актуальным междисциплинарным научным направлением является создание функциональных полимерных композитов с дисперсными и волокнистыми наполнителями на основе представлений о механизмах деформирования, трения и разрушения полимеров, компьютерного дизайна (КД) структуры и нанотехнологий модифицирования материалов. Разработки конструкционных и функциональных (антифрикционных, биосовместимых и т. п.) микро- и нанокомпозитов на полимерной основе с применением методов высокоэнергетической модификации входят в Перечень приоритетных научных направлений Республики Беларусь: «Физика, химия и механика поверхности; механика адаптивных материалов и конструкций, управление структурой и свойствами поверхности, в том числе на наноструктурном уровне» и относятся к числу критических технологий федерального уровня Российской Федерации. Эти исследования развиваются во всех передовых странах и их результаты находят быстрое и широкое применение в технических и медицинских приложениях.

Высокомолекулярные соединения (полимеры и эластомеры), как правило, не пригодны для непосредственного использования в качестве конструкционных либо функциональных материалов. Введением органических и неорганических наполнителей/модификаторов можно существенно повысить физико-механические характеристики и реализовать свойства, не присущие базовому материалу. Однако до недавнего времени такие материаловедческие решения были эмпирическими, а модельные представления механики материалов не находили применения в инженерии полимерных композитов. В последние годы методы механики (которая в зависимости от объекта исследования позиционируется как вычислительная механика, физическая мезомеханика, микро- и наномеханика,

биомеханика, геомеханика) позволили подойти к более осмысленному, быстрому и с минимальными затратами созданию материалов с заданными свойствами. Представляется, что развиваемый авторами междисциплинарный подход в виде компьютерного дизайна (КД) можно использовать для решения целого ряда проблем:

- Хотя использование наноразмерных наполнителей и высокоэнергетического воздействия на полимерную матрицу способствует значительному повышению физико-механических характеристик пластиков, традиционные узкотематические исследования пока не позволили выяснить механизм упрочнения. Нужна эффективная и научно-обоснованная методология разработки микро- и нанокомпозитов, реализующая принцип «от заданных свойств — к требуемой структуре»;

- Для обеспечения совместимости матрицы и наполнителя, в обычных условиях не взаимодействующих, как правило, применяют не всегда экологически безупречные химические технологии. Перспективным является механохимический метод, обеспечивающий усиление связи матрицы с наполнителем и одновременно улучшение технологических свойств при малых количествах реагентов;

- Плазменная обработка химически инертных наполнителей и капсулирование активных наполнителей нанопокрывтиями позволяет создавать высокопрочные и биосовместимые композиты медицинского назначения. Такая модификация выпускаемых в Российской Федерации и Республике Беларусь полимерных волокон, нитей и тканей востребована в производстве кардиоимплантатов, эндопротезов, шовных и трикотажных материалов для хирургии. Но интуитивный выбор укладки армирующих волокон, параметров нанопокрывтий и технологических режимов переработки крайне неэф-

фактивен; альтернативной является расчетная оптимизация структуры исходя из требуемых фрикционно-механических свойств с последующей всесторонней аттестацией получаемых материалов по техническим и медицинским показателям;

- Серьезной проблемой нанотехнологий является спонтанный процесс агломерации дисперсного наполнителя вследствие быстрого усиления поверхностного взаимодействия с уменьшением размера частиц. Это актуализирует проведение мезомеханического анализа конкурирующих процессов разрушения и агломерации частиц наполнителя;
- Применяемые в узлах трения полимерные композиты подвергаются высоким силовым и температурным нагрузкам, причем их триботехнические характеристики не всегда коррелируют с физико-механическими. Таким образом, антифрикционные композиты должны разрабатываться на основе комплексного анализа процессов трения, деформирования и разрушения.

Данная статья посвящена решению указанных проблем в русле общей тенденции — разработке композитов, исходя из требуемых свойств, путем «конструирования» («компьютерного дизайна») структуры при активном применении в материаловедении механико-математических моделей материалов и виртуальных механических испытаний. В статье обобщены результаты авторов, полученные за последние 2 года при выполнении проектов БРФФИ и заданий ГКПНИ «Механика», включая раздел «Биомеханика», отраженные в публикациях [1—21], которые, конечно, представляют лишь малую часть известных литературных ссылок по данной тематике.

Междисциплинарный подход в компьютерном дизайне микро- и нанокомпозитов. Адекватность методов механики на микро- и наноуровне. В настоящее время известен ряд работ западноевропейских, российских и белорусских исследователей, посвященных теоретическому и экспериментальному описанию механических свойств микро- и нанокомпозитов. Однако предложенные в них теоретические подходы имеют ряд недостатков. В частности, при использовании распространенных в механике композитов метода самосогласования и статистического подхода не удается учесть влияние размера и формы включений. Для исследуемых материалов характерны высокие градиенты свойств на границах раздела фаз, что усложняет получение расчетных оценок деформационно-прочностных характеристик статистическими методами механики композитов.

Важным отличием микро- и нанокомпозитов от сэндвич-конструкций [1] и дисперсно-наполненных материалов типа асфальтобетона [13], применяемых в машиностроении и строительстве, является более выраженная роль межфазного слоя, локализованного в приграничном объеме полимерной матрицы. В этой связи были разработаны новые подходы к описанию нанокомпозитов [2—6], в т. ч. на основе четырехфазной модели путем решения уравнений те-

ории упругости для каждой компоненты материала при объемном и сдвиговом деформировании [3]. Для определения констант этих решений составляется система уравнений с учетом неразрывности смещений и напряжений на межфазных границах; ограниченности напряжений; условий деформирования и энергетического принципа гомогенизации. Геометрические и механические параметры фазы, моделирующей промежуточный слой, определяются на основе теории фрактального усиления. В результате удалось получить детальную картину напряженно-деформированного состояния межфазного слоя и приграничного объема матрицы, найти расчетные зависимости эффективных упругих свойств и предела текучести композита от объемной доли наполнителя и среднего радиуса включений. Сопоставление результатов с экспериментом показало высокую точность прогнозирования [4].

Структурирование материала, как обратная задача механики. Дизайн материалов и инженерия композитов на основе компьютерного моделирования является новой для материаловедения технологией. Важно, что методами физической мезомеханики [2—9] на основе ячеек периодичности в масштабе отдельных армирующих включений, пор и прилегающего объема матрицы и межфазного слоя (рисунок 1) *вычисляются* механические характеристики материала (модули упругости, пределы текучести и прочности). Они являются исходными данными последующего макромеханического анализа изделия (покрытия, детали, конструкции) с учетом реальной геометрии и эксплуатационных нагрузок [10—13, 17—21].

Принципиальным является разделение задач компьютерного дизайна материалов на две группы — прямые и обратные. Обратные задачи КД сходны с традиционными задачами оптимального проектирования конструкций. В задачах оптимизации отыскивается экстремальное значение функции цели и решением являются параметры, отвечающие локальному или глобальному экстремуму. В рамках КД материалов отыскивается не экстремальное, а заранее заданное значение функции цели. Одни и те же значения функции цели достигаются при различных сочетаниях управляющих параметров с возможностью выбора наиболее приемлемого рецептурного и технологического вариантов. При этом возможно получение не одной, а двух и более эффективных характеристик с заданными значениями.

В частности, по алгоритму КД были проведены расчеты эффективных характеристик (модуля упругости и предельной деформации разрушения дисперсно-армированного композита при растяжении). Совмещением полученных зависимостей найдена область (рисунок 2), определяющая средний радиус включений и степень наполнения для получения заданных значений четырех эффективных характеристик, что позволяет дать конкретные рекомендации по составу конкретных композитов.

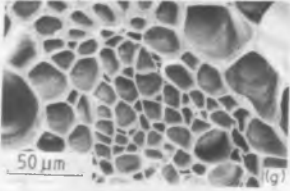
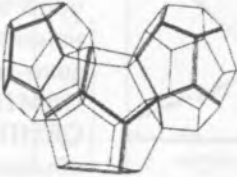
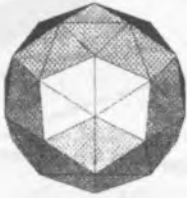
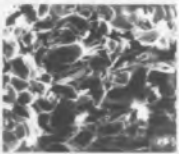
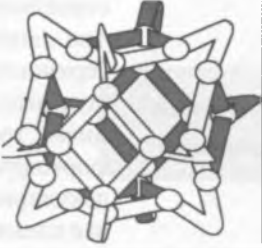
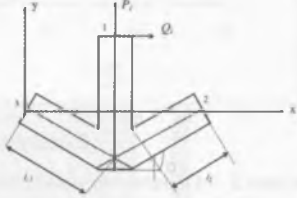


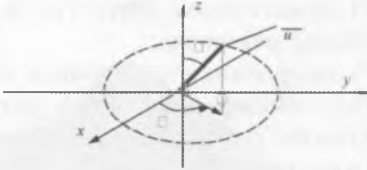
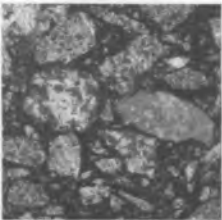
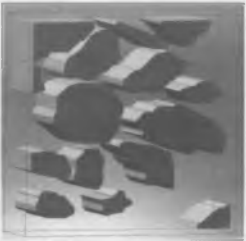
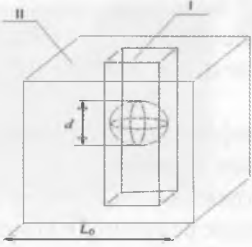
Тип материала	Схема структуры	Структурный элемент (ячейка периодичности)
<p>Закрытопористый</p> 		
<p>Открытопористый</p> 		
<p>Гранулированный</p> 		
<p>Дисперсно-наполненный</p> 		

Рисунок 1 — Мезоструктуры и ячейки периодичности в КД материалов

При изменении масштаба анализа «проявляется» присущая материалам структура, и управление эффективными характеристиками материалов естественно основывать на изменении этой структуры введением наполнителей. К управляющим параметрам относятся: степень наполнения; размеры и форма включений; уровень межфазного взаимодействия (адгезия) [5—7].

Выбор состава композитов в рассматриваемых примерах проводили по приведенной ниже единой схеме (см. также рисунок 3), понимая под *компьютерным дизайном материалов* основанную на структурно-функциональном анализе технологию, включающую два основных этапа (уровней рассмотрения структуры может быть несколько):

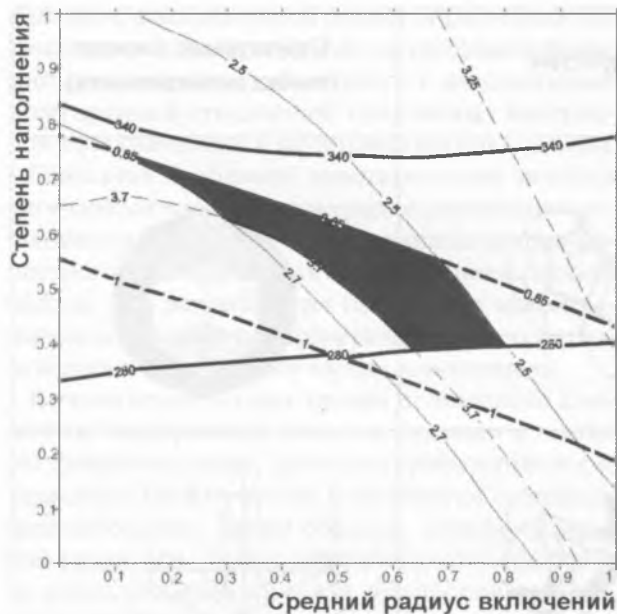


Рисунок 2 — Область значений, необходимых для получения значений четырех эффективных характеристик

I. Мезомеханический анализ:

- 1) экспериментальное исследование фрагмента материала;
- 2) схематизация структуры в представительном объеме материала;
- 3) построение структурного элемента «наполнитель — межфазный слой — матрица»;
- 4) вывод определяющих соотношений для структурного элемента и представительного объема;
- 5) анализ зависимости физико-механических характеристик от содержания и вида наполнителя.

II. Макромеханический анализ:

- 6) твердотельное моделирование и построение расчетной модели изделия;
- 7) численный анализ напряженного состояния;
- 8) численный анализ деформированного состояния;
- 9) верификация расчетной модели по экспериментальным данным;
- 10) оптимизация состава композита (материаловедческое решение) и конструкции изделия (инженерное решение) по группе критериев качества.

При решении ряда научно-технических задач, включая медицинские приложения, авторами показано, что компьютерный дизайн материалов равноэффективен в широком диапазоне дисперсности наполнителя: от нано- и микрометров (ультрадисперсные наполнители, макромолекулы полимеров, биологические клетки) до миллиметров и сантиметров (гравий, щебень) (см. рисунок 2). 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.

Значительную часть результатов составили приложения КД материалов к исследованию трибомеханических свойств микро- и нанокompозитов (на примере СВМПЭ) [14—16]. Так, было изучено влияние нановолокон Al_2O_3 и углерода, нанопорошков меди и оксида кремния SiO_2 на физико-механические и триботехнические свойства СВМПЭ. Установлено, что модифицирование СВМПЭ нановолокнами и наночастицами в малых объемах (0,1—0,5 масс. %) заметно повышает деформационно-прочностные свойства и в 3—6 раз увеличивает износостойкость в сравнении с исходным полимером; нановолокна (C и Al_2O_3) вследствие большей площади поверхности эффективнее, чем наночастицы (Cu и SiO_2), формируют на поверхности трения пленку переноса, обеспечивающую высокую износостойкость и низкий коэффициент трения; при введении нанонаполнителей формируется упорядоченная (ламеллярная) надмолекулярная структура полимера и тонкая устойчивая пленка фрикционного переноса; механическая активация связующего и наполнителя способствует равномерному распределению наполнителя и служит дополнительным способом повышения фрикционно-механических свойств СВМПЭ. Определяющую роль в абразивной износостойкости нанокompозитов на основе СВМПЭ играет размер зерна абразива и сформировавшаяся надмолекулярная структура; при абразивном изнашивании положительная роль нанонаполнителей как твердой смазки, нивелируется несоразмерностью нанонаполнителей и зернистости абразива; абразивная износостойкость микрокомпозитов на основе СВМПЭ увеличивается до 16—18 раз при наполнении полимера микрочастицами $AlO(OH)$ и Al_2O_3 ; абразивная износостойкость композитов на основе структурно модифицированной матрицы эквивалентна износостойкости микрокомпозитов на основе исходного СВМПЭ; определяющую роль в износостойкости микрокомпозитов на основе СВМПЭ играет соотношение размеров частиц микронаполнителя и зерна абразива. При близости размеров микронаполнителей и абразивных зерен износостойкость максимальна.

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 технологии компьютерного дизайна и инженерии материалов.

Разработка новых высокоэффективных полимерных композитов и народнохозяйственное значение результатов работы. Компьютерный дизайн

I Мезомеханический анализ



II Макромеханический анализ

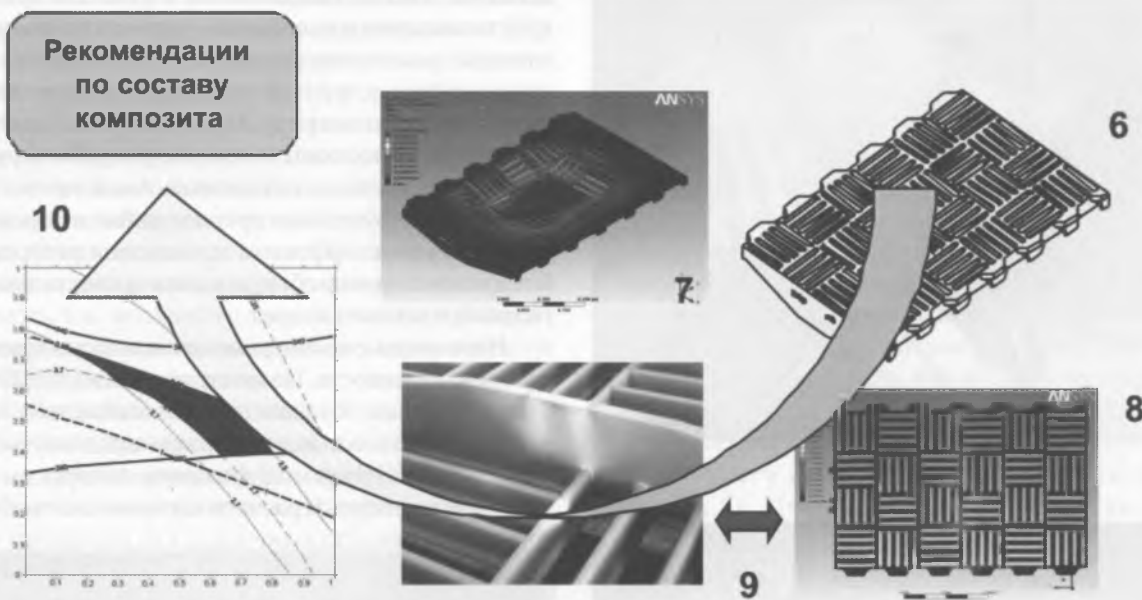


Рисунок 3 — Компьютерный дизайн материалов на примере оптимизации состава стеклонаполненного полиамида и конструкции панели пола

материалов как междисциплинарный и многоуровневый подход показал свою эффективность в различных областях материаловедения и инженерии полимерных композитов.

Технические приложения

Защитные плиты для гидроэлектростанций. Совместно с ЗАО «Полинит» (г. Москва) выполняется проект с ОАО «Федеральная гидрогенерирующая компания — РУСГИДРО» по изготовлению «Плит монолитных из высокоструктурированно-

го антиадгезионного футеровочного материала ВСАФ-РГ».

В соответствии с рецептурой, разработанной в ИФПМ СО РАН методами КД, были сформулированы технические условия 2246-012-16426899-2012 (введены впервые, срок введения: с 1.04.2012 г.). Настоящие ТУ распространяются на плиты (листы) монолитные из высокоструктурированного антиадгезионного футеровочного материала ВСАФ-РГ (плиты футеровочные) «Волга», изготавливаемые методом горячего прессования для применения в

гидромашиностроения и гидростроительстве в широком диапазоне температур при воздействии давлений, абразивов, влаги и солнечного излучения.

Имеется согласие на проведение опытных работ по использованию полимерных плит для антиледовой защиты в пазах затворов и зоне примерзания затворов на Саратовской и Жигулевской ГЭС. В настоящее время ЗАО «Полинит» изготовило опытные партии таких пластин и устанавливает их на указанных гидроэлектростанциях.

Детали машин для работы в агрессивных средах. По запросу производственных компаний Таиланда требовалось изготовить шестерни валов, обеспечивающих перемешивание агрессивных жидкостей в технологических ваннах. Из армированного частицами оксида алюминия СВМПЭ оптимального состава были изготовлены шестерни (рисунок 4 а, б), имеющие внутренние металлические вставки для крепления к валу и остальную часть, выполненную из СВМПЭ-микрокомпозиата. Проведенные испытания показали высокую химическую стойкость шестерен и необходимый уровень прочности и износостойкости.

Футеровочные плиты для рудоспусков. Серьезными проблемами эксплуатации рудоспусков яв-

ляются сильный абразивный износ металлических направляющих и примерзание породы при температуре ниже 0°C , что приводит к закрытию выходных отверстий, остановке добычи руды и необходимости очистки рудоспуска вплоть до использования взрывчатых веществ, что в условиях шахты является крайне опасным. Техническим решением является использование футеровочных плит (рисунок 5) из материала с низкой адгезией и коэффициентом трения при достаточно высокой прочности и теплопроводности.

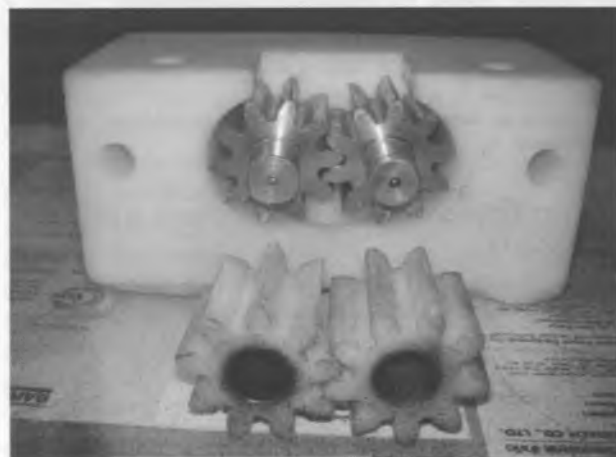
Это приводит к задаче компьютерного дизайна по определению содержания наполнителя для получения требуемых значений четырех эффективных характеристик (см. рисунок 2). Для горнообогатительного комбината (г. Мирный, АК «Алроса») были рассчитаны оптимальные составы дисперсно-наполненных полимерных композитов на основе СВМПЭ и на ЗАО «Полинит» (г. Москва) выпущена опытная партия ($\sim 200\text{ м}^2$) футеровочных плит для рудоспусков.

Оптимальное содержание наполнителя, определенное методами КД материалов, обеспечивает перераспределение температурного поля в процессе горячего прессования по толщине плиты 25 мм; создание однородной надмолекулярной структуры; действие частиц наполнителя в качестве центров кристаллизации и уменьшение размера полимерных ламелей; смазочное действие частиц наполнителя и их армирующую функцию с передачей напряжений на полимерную матрицу. При эксплуатации плиты показали кратное повышение ресурса работы рудоспусков в сравнении с исходными. Аналогично были разработаны футеровки драг для добычи породы со дна водоемов с эффектом повышения ресурса работы конвейерного оборудования за счет снижения гидроабразивного износа.

Наполненные полимерные композиты для химической промышленности. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) в исходном виде обладает низкой износостойкостью и теплопроводностью, подвержен хладотекучести и требует структурной модификации. Авторским коллективом выполнены расчеты оптимального объем-



а



б

Рисунок 4 — Детали машин из СВМПЭ-композиатов



Рисунок 5 — Футеровочные плиты рудоспусков из СВМПЭ-композиатов

ного содержания в ПТФЭ наполнителя в виде порошка меди и микроволокон базальта. Материал применен в уплотнениях быстродействующих аварийных клапанов высокого давления реактора для синтеза полиэтилена высокого давления завода полиэтилена ООО «Томскнефтехим» (дочернее предприятие ОАО «СИБУР»), что позволило применить обработку деталей на обычных металлорежущих станках без использования алмазных и твердосплавных резцов и фрез. Микрокомпозит использован и для замены материалов фирмы BOLLER Hochdrucktechnik GmbH (Австрия) уплотнений штоков компрессоров высокого давления. В штатном режиме клапан реактора находится под действием потока этилена при давлении 220 МПа и температуре 330 °С. Промышленные испытания показали, что применение разработанных импортозамещающих материалов повысило ресурс уплотнений по сравнению с прототипом в 8...10 раз.

Оптимизация асфальтобетона для дорожных покрытий. Качество и долговечность дорожных покрытий на основе битума, минерального порошка, песка и щебня определяет эффективность транспортных коммуникаций. В этой связи по-прежнему актуально определение оптимального состава асфальтобетона, исходя из требуемых эффективных характеристик. В рамках развиваемого многоуровневого моделирования [13], асфальтобетон рассматривался, как многокомпонентный композит матричная фаза которого (асфальто-вязущее) сама является микрокомпозитом (смесью битума и микронаполнителей: песка, резиновой крошки и минерального порошка), а наполнителем следующего размерного уровня являлся щебень. Хотя фракция щебня имеет значительные абсолютные размеры, метод компьютерного дизайна сохраняет свою эффективность, т. к. количество твердых частиц в рассматриваемом представительном объеме асфальтобетона достаточно велико (рисунок 6).

Для апробации расчетных составов асфальтобетона были проведены стендовые испытания образцов, изготовленных в БелдорНИИ (г. Минск), на малоцикловую усталость. Идентификация модели материала для различных стадий усталостного процесса позволила оперативно оценить деградацию материала, имитируя эксплуатационные условия. Даны рекомендации по выбору состава асфальтобетона по критерию усталостной прочности, в частности, найдено оптимальное добавление резиновой крошки, получаемой при рециклинге автомобильных шин.

Полученные данные вошли в изменения стандарта РБ СТБ 1033-2004 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» и будут учтены в отраслевых методических документах. Применение разработанных методик позволяет повысить деформационно-прочностные характеристики асфальтобетона, что способствует увеличению срока эксплуатации, и снизить при этом себестоимость работ (включая

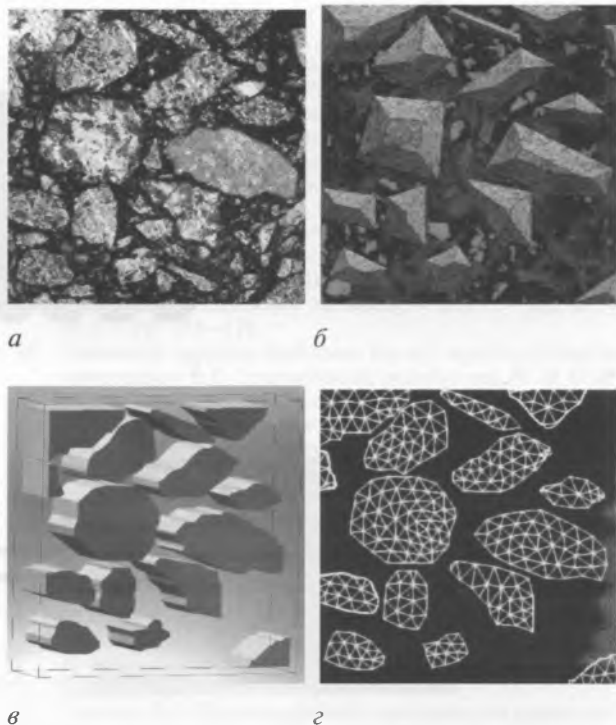


Рисунок 6 — Распределение наполнителя в объеме асфальтобетона: а — исходная структура; б — схематизированная структура; в — твердотельная модель; г — конечноэлементная модель

стоимость материалов) по устройству дорожных покрытий. Ожидаемый эффект на предприятиях дорожных хозяйств Республики Беларусь и Российской Федерации составляет не менее 225 долл. США на 1000 м² покрытия.

Технология переработки отходов в дисперсные наполнители строительных материалов. Важной проблемой является утилизация отходов производства химических заводов и вторсырья России и Беларуси. Анализ напряженного состояния гранулированного материала использован при изучении процесса его диспергирования под действием напряжений сжатия и сдвига [2] (рисунок 7). Получаемые в смесителе-диспергаторе [17] порошки в виде нейтрализованного фосфогипса используются на ООО «Бакур Групп» (г. Гомель) при изготовлении искусственного камня, теплоизоляции и вязких армирующих и вяжущих наполнителей клеевых составов, шпатлевок и колеровочных паст «VIGA», обладающих повышенной адгезией, прочностью, ударной вязкостью и экологичностью, эффектом железнения поверхности. По решению Совмина Республики Беларусь планируется расширение объема переработки в указанные материалы фосфогипса Гомельского химического завода (накопленное количество указанных отходов в отвалах превышает 20 млн т) до 1 млн т в год, а также производство установок «смеситель — диспергатор» для потребителей в Республике Беларусь и на экспорт.

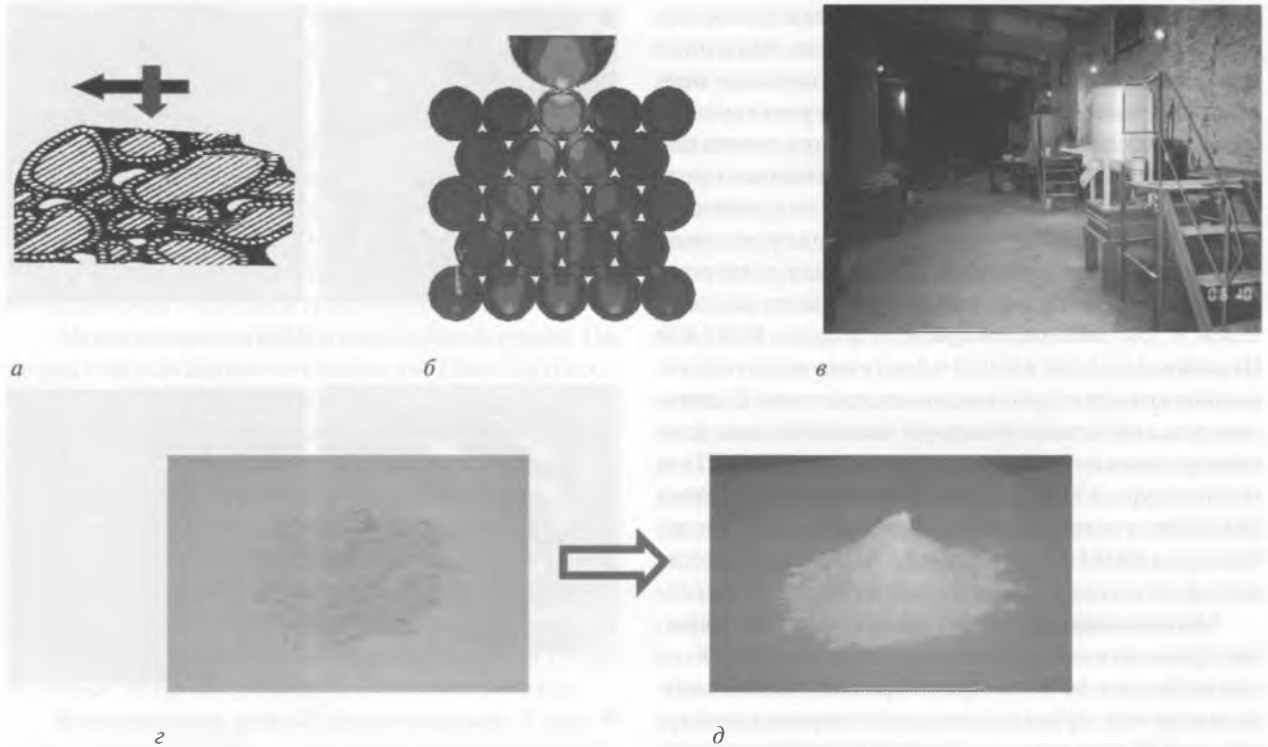


Рисунок 7 — Схема (а) и результаты анализа (б) процесса диспергирования; внешний вид (в) смесителя — диспергатора; фосфогипс до и после переработки (г, д)

Медицинские приложения

Наполненные полимерные композиты на основе биосовместимых полимеров и эластомеров, включая ПТФЭ, СВМПЭ, полиуретан и полиэфир, близкие живым тканям и по механическим свойствам [20], могут быть использованы для создания массовых и чрезвычайно дорогих кардиоимплантатов, эндопротезов и других социально значимых медицинских изделий [17—21] (рисунок 8).

К примеру, модификация протеза клапана сердца «Планикс» антифрикционным элементом на основе ПТФЭ-композита (см. рисунок 8 а) обеспечила ротабельность и самоустановку клапана в энергетически выгодном положении, улучшая послеоперационную гемодинамику [38, 40]. Эта идея использована в серийном производстве указанных кардиопротезов на ГНПО «Планар» (г. Минск).

Трикотажные полимерные имплантаты (см. рисунок 8 б) для пластики носовой перегородки, роговицы глаза и эксплантаты для лечения варикозного расширения вен, разработанные на опытно-произ-

водственной базе ВГТУ (г. Витебск) с использованием мезомеханических моделей трикотажа, рекомендованы к производству, а их применение позволило отказаться от закупок аналогичных дорогостоящих импортных изделий. В рамках инновационного проекта (заказчик НПО «Центр», г. Минск) организуется опытное производство хирургических нитей, модифицированных наноразмерным фторполимерным покрытием.

Протез стремени внутреннего уха на основе ПТФЭ с наноразмерными частицами серебра и алмазоподобным покрытием [19] (см. рисунок 8 в) в настоящее время патентуется и проходит клинические испытания (г. Гомель).

В рамках выполнения проекта Минпромторга Российской Федерации разрабатываются материалы для эндопротезов пястно-фаланговых и проксимальных межфаланговых суставов (см. рисунок 8 г). Подготовлены ТУ 9391-001-91443648-2011 на «Материал пористый керамический с кальцийфосфатным и СВМПЭ покрытиями для изготовления медицин-

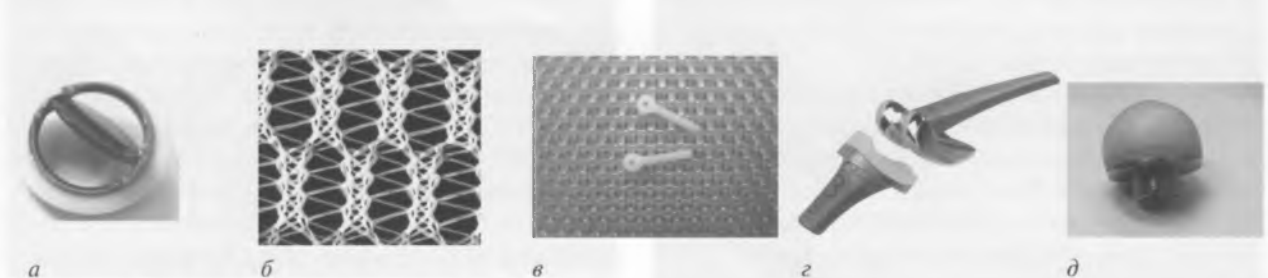


Рисунок 8 — Имплантаты из полимерных композитов: а — искусственный клапан сердца [18, 21]; б — медицинский трикотаж [21]; в — протез стремени внутреннего уха для стапедопластики [19]; г — эндопротезы тазобедренного сустава; д — межфаланговый сустав типа SR

ких имплантатов», планируемый в производство на ЗАО «Биомедицинские технологии» (г. Москва). В сотрудничестве с медицинскими специалистами проводятся исследования по изготовлению полимерных покрытий имплантатов головок шейки бедра (см. рисунок 8 д) и запланировано проведение испытательный разработанного протеза *in vivo*.

Заключение. Развиваемое авторами и изложенное в статье научное направление на стыке материаловедения, механики, трибологии и информационных технологий — компьютерный дизайн материалов, — основано на принципах физической мезомеханики и многоуровневых методах расчета.

Применение компьютерного дизайна материалов позволило создать новые полимерные микро- и нанокомпозиты, обладающие высокой прочностью, износостойкостью (превышающей износостойкость матричных материалов в 3–6 раз) и биосовместимостью; а также высокоэнергетические технологии получения полимерных композитов и дисперсных наполнителей микро- и наноразмерного уровня. Разработанные материалы, изделия и технологии (асфальтобетоны для дорожных покрытий, футеровочные плиты для ГЭС и рудоспусков, детали машин; кардио- и эндопротезы, шовный материал и трикотажные эксплантаты; крупнотоннажные технологии получения микро- и нанонаполнителей) востребованы в промышленности и здравоохранении Беларуси и России.

Список литературы

1. Плескачевский, Ю.М. Механика трехслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием / Ю.М. Плескачевский, Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 563 с.
2. 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. — InTech. — Pp. 497–526.
3. Черноус, Д.А. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокомпозита. Ч. 1: Метод расчета эффективных упругих характеристик / Д.А. Черноус, С.В. Шилько, С.В. Панин // Физич. мезомеханика. — 2010. — Т. 13, № 4. — С. 85–90.
4. Шилько, С.В. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокомпозита. Ч. 2: Оценка локальной прочности включения, межфазного слоя и приграничного объема матрицы / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, С.В. Панин // Физич. мезомеханика. — 2011. — Т. 14, № 1. — С. 67–73.
5. Оценка адгезионного взаимодействия фаз композиционного материала по кривой напряжение-деформация / Н.Ю. Анохина // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2010. — Т. 16, № 1. — С. 97–105.
6. Estimation of the adhesive interaction of composite material phases using the stress-strain curve / N.Yu. Anokhina // Int. Journal of Nanomechanics. Science and Technology. — 2010. — Vol. 1, № 4. — Pp. 301–312.

7. Computer-aided Design of Filled Polymeric Composites for Tribotechnical Applications / B.A. Lyukshin // Proc. of the 3-rd Int. Conf. on Heterogeneous Material Mechanics, May 22–26, 2011, Shanghai, China. — Pp. 831–838.
8. Шилько, С.В. Прогнозирование деформационно-прочностных характеристик дисперсно-армированных материалов / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, Е.М. Петроковец // Сб. трудов III МНПК «Инноват. технол. и экономика в машиностр.», Юрга, 24–25 мая 2012 г. — Т. 1. — С. 291–298.
9. Shilko S.V. Mesomechanical analysis of polymer composites reinforced by short fibers with taking into account an interphase layer / S.V. Shilko, D.A. Chernous, S.V. Panin // Mechanics of Composite Materials. — 2012. — Vol. 48. — № 2 — Pp. 171–178.
10. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии / В.Е. Старжинский; под общ. ред. Ю.М. Плескачевского. — Минск: Беларус. навука. — 2012. — 769 с.
11. Определение параметров контактного деформирования в условиях формирования, механических испытаний и эксплуатации полимерных композитов медицинского назначения с микро- и нанонаполнителями / С.В. Шилько [и др.] // Инженерия поверхности. Новые порошк. композиц. материалы. Сварка: в 2 ч. — Ч. 1: Матер. междуна. симп., Минск. 22–25 марта 2011 г. — С. 229–235.
12. Смеситель для диспергирования / заявка ЕА 014/12 от 14.03.2012 на выдачу Евраз. патента на изобретение «Смеситель-диспергатор» // В.П. Гарбуз, Е.А. Жернов, Н.Ф. Леванчук, Ю.М. Плескачевский, В.С. Старовойтов, С.В. Шилько.
13. Черноус, Д.А. Прогнозирование механических характеристик асфальтобетона / Д.А. Черноус, С.В. Шилько, С.Е. Кравченко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 1. — С. 72–73.
14. Разработка антифрикционных нанокомпозитов на основе химически модифицированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Ч. 1: Механические и триботехнические свойства химически модифицированного СВМПЭ / С.В. Панин [и др.] // Трение и износ. — 2011. — Т. 32, № 3. — С. 271–276.
15. Антифрикционные нанокомпозиты на основе химически модифицированного СВМПЭ. Ч. 2: Влияние нанонаполнителей на механические и триботехнические свойства химически модифицированного СВМПЭ / С.В. Панин [и др.] // Трение и износ. — 2011. — Т. 32, № 4. — С. 355–361.
16. Разработка антифрикционных нанокомпозитов на основе химически модифицированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Ч. 3: Сравнение модифицирующего действия компатилизаторов на механические и триботехнические свойства / С.В. Панин [и др.] // Трение и износ. — 2012. — Т. 33, № 1. — С. 62–68.
17. Шилько, С.В. Модель и анализ контактного взаимодействия с биотканями одномерных полимерных имплантатов / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, С.В. Панин // Рос. журнал биомеханики. — 2011. — Т. 15, № 1(51). — С. 65–73.
18. Искусственный клапан сердца: пат. 12974 Респ. Беларусь, МПК7 А 61F / С.В. Шилько, В.Ф. Хиженок, С.П. Саливончик, В.В. Аничкин. — 2010.
19. Протез для стапедопластики / С.В. Шилько, В.П. Ситников, Э. Хусам, В.П. Казаченко, А.Н. Попов. — заявка на пат. Респ. Беларусь а20111242. — заявл. 26.09.11.
20. Shilko, S.V. Nonlinear deformation of skeletal muscles in a passive state and in isotonic contraction / S.V. Shilko, D.A. Chernous, Yu.M. Pleskachevsky // Mechanics of Composite Materials. — 2012. — Vol. 48. — № 3. — Pp. 331–342.
21. Шилько, С.В. Биомеханика — кардиологии: сделано в Беларуси / С.В. Шилько // Наука и инновации. — 2012. — № 2. — С. 22–23.

Shilko S.V., Pleskachevsky Yu.M., Panin S.V., Lyukshin B.A.

Computer-aided design of polymer composites for technical and medical applications

Prospects and results of author’s studies in an actual and interdisciplinary research such as computer design of functional polymeric composites with disperse and fibrous fillers are considered. Modern views on mechanisms of deforming, friction and destruction of polymers, as well as achievements of mechanochemistry, biomechanics and nanotechnology are involved.

Поступила в редакцию 22.08.2012.