



Нелинейное многоуровневое моделирование композиционных материалов



Максим Коледов,
технический консультант ООО «Эм-Эс-Си Софтвар Рус»

Стремление к уменьшению веса конструкции приводит к тому, что композиционные материалы (КМ) на основе пластиков находят все большее применение в сферах, в которых раньше использовались исключительно металлы. Для авиационной и автомобильной промышленности это особенно важно, так как в этих отраслях необходимо большое количество всевозможных характеристик для различных деталей с очень сложными свойствами материала. Применение элементов из КМ требует корректного задания их жесткостных свойств и критериев разрушения компонентов при статическом и динамическом нагружении. Новым направлением является прогнозирование усталостных характеристик, поскольку при потребности рынка в увеличении срока службы изделий насущной задачей является вычисление долговечности композитных деталей.

Все это является сложной задачей из-за необходимости учета влияния волокон, которые усиливают композит и являются причиной анизотропии свойств и их зависимости от условий технологического процесса их изготовления. Кроме того, поведение материала является нелинейным, зависимым от температуры и скорости деформации. Это относится к материалам на основе коротких, длинных и непрерывных армирующих волокон. Каждый из этих типов композитов имеет свои особенности и требует индивидуального подхода при описании поведения материала. Таким образом, возникает потребность в эффективном способе моделирования КМ, который может быть применен в промышленности. Продуктом, недавно появившимся на рынке и предназначенным для этой цели, является программный комплекс Digimat. Его разработчик — бельгийская компания e-Xstream engineering, которая была основана в 2003 г. Своей целью специалисты e-Xstream engineering видели создание передовых методов моделирования современных КМ и конструкций, которые помогут поставщикам материалов и конечным пользователям в разработке и производстве оптимальных композитных изделий. Результатом работы в этой области и стал программный комплекс Digimat. В 2012 г. e-Xstream engineering вошла в состав корпорации MSC Software, что вывело продукт на новый международный уровень.

Сегодня Digimat — это виртуальная лаборатория для моделирования КМ и изделий из них. Технология моделирования опирается на микромеханические подходы для точного прогнозирования поведения сложных многокомпонентных материалов и преодолевает разрыв между производственным процессом, разработкой материала и конечно-элементным (КЭ) расчетом. Digimat дает возможность получить актуальные, достоверные характеристики композита. КЭ-решение для композита становится предсказуемым и точным, что позволяет с уверенностью оптимизировать композитную конструкцию.

Digimat обеспечивает получение тепловых, электрических, прочностных и теплопрочностных характеристик многофазных материалов. Кроме этого, возможно получение необходимых характеристик для проведения расчетов на разрушение, ползучесть и усталость. Комплекс позволяет моделировать термопластики, терморезиновые пластмассы и композиты с различной матрицей (полимерной, металлической, резиновой). Полученные характеристики материалов в дальнейшем могут передаваться для выполнения расчетов в КЭ-системах. Возможен учет неоднородности характе-

ристик материалов, связанный с технологическими процессами изготовления композитов: литья под давлением, выкладки, прессовки.

Уникальный программный комплекс Digimat — это набор инновационных, оптимальных и эффективных инструментов для нелинейного многоуровневого моделирования материалов и конструкций. В его структуре эти инструменты представлены в виде специализированных модулей, состав которых может быть определен заказчиком исходя из потребностей предприятия.

В состав Digimat входят следующие модули: Digimat-MF, Digimat-FE, Digimat-MX, Digimat-CAE, Digimat-MAP, Micross.

Digimat-MF предназначен для прогнозирования нелинейного поведения многофазных материалов. В основе его работы лежит микромеханический подход к моделированию материала — пользователь вводит характеристики материала каждой фазы, задает микроструктуру и нагрузки, приложенные к полученному многофазному материалу. Все это делается в последовательности, указанной в дереве модели (рис. 1). Свойства композита вычисляются с помощью так называемого метода гомогенизации Мори-Танака, который основан на подходе Эшелби. Он описывает поведение одной частицы, включенной в материал матрицы. Частица представляется в виде эллипсоида, форма которого определяется отношением диаметра к длине. Метод гомогенизации позволяет получить макроскопические свойства композитных материалов исходя из свойств каждой фазы (т. е. свойств материала на микроуровне). Для создания каждой фазы армированных пластиков доступен широкий набор моделей материала. Для полимерной матрицы особый интерес представляют следующие модели: термоупругая, упругопластическая, поврежденная упругопластическая, вязкоупругая и упруговязкопластическая. Первые три модели не зависят от скорости деформации и, следовательно, предназначены для моделирования квазистатических процессов в армированном материале. Термоупругий материал можно задать как анизотропный даже прежде, чем внести анизотропию путем добавления армирующих включений. Этот подход может использоваться для моделирования анизотропной модели матриц, таких как жидкокристаллический полимер. Температурная зависимость полимерной матрицы также может быть при-

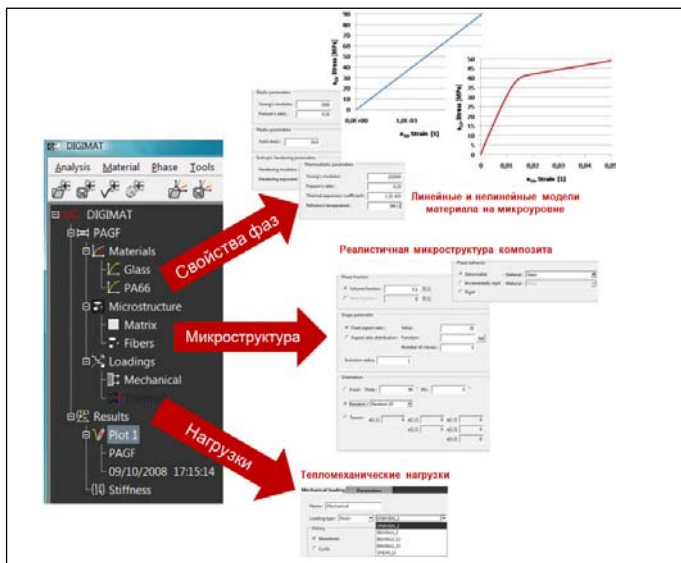


Рис. 1. Структура дерева данных модели: материалы, микроструктура и нагрузки

нята во внимание. Вязкоупругая и упруговязкопластическая модели материала используются для моделирования ползучести, релаксации и отклика материала при высокой скорости деформации.

Армирующие волокно обычно моделируется как упругий материал с изотропными (например, стекловолокно), либо с поперечно-изотропными свойствами (например, углеродные волокна). При этом предполагается, что волокна имеют форму эллипсоида, определяемого соотношением его размеров (длины к диаметру). Этим же способом могут быть легко смоделированы диски, сферы и непрерывные волокна.

Различные длины волокон могут быть заданы путем изменения соотношения длины к диаметру, от коротких волокон (с отношением 1-20) до длинных (20-1000) и непрерывных (более 1000). Ориентация волокон может быть фиксированной, случайной или описываться тензором, полученным из программного комплекса расчета литья под давлением или измеренным экспериментально. Digimat включает запатентованную технологию для задания тензоров ориентации. Материалы можно задавать также многослойными укладками, а волокна — как однонаправленные (монослой) или как тканые материалы (имеющие основу и уток), и кроме того, в матрице могут быть заданы пустоты.

Взаимодействие между включениями и матрицей может быть промоделировано с учетом фазы покрытия, которая задается относительной или абсолютной толщиной по отношению к размерам армирующей фазы. Наконец, может быть задан ряд критериев разрушения на уровне композита (т. е. макро) и на уровне фазы (т. е. в матрице и/или армирующей фазе).

Digimat-FE основан на КЭ-подходе при моделировании структуры композита и предназначен для создания представительного элемента объема (ПЭО) армированного пластика. ПЭО — это минимальный объем материала, в котором содержится достаточное для статистического описания состояния тела число «носителей» рассматриваемых механизмов процесса. Полученная КЭ-модель образца материала может быть рассчитана с помощью практически любого КЭ-решателя. Digimat-FE хорошо дополняет Digimat-MF и полностью с ним совместим.

Основными преимуществами Digimat-FE по сравнению с Digimat-MF являются:

- возможность генерировать сложные ПЭО (рис. 2) как с эллипсоидальными, так и с включениями других форм (включая геометрию пользователя);
- возможность учитывать геометрические эффекты, такие как кластеризация включений и перколяция;
- вычисление фактического распределения локальных физических полей на микроуровне (т. е. в каждой фазе армированного полимера) в дополнение к характеристикам многофазного материала на макроуровне.

Время, необходимое для расчета модели в Digimat-FE, намного больше, чем время расчета модели материала в Digimat-MF с сопоставимой микроструктурой, поэтому последний следует использовать, когда нет необходимости моделировать поведение материала в каждой точке интегрирования КЭ-модели.

Digimat-FE работает с деревом структуры данных, аналогичным дереву Digimat-MF, с некоторыми дополнительными данными,

необходимыми для создания геометрии ПЭО. Он может быть использован для создания реалистичных ПЭО с микроструктурой полимеров, армированных стекловолокном, где ориентация волокон задается тензором, а также матрицы со сферическими включениями различных размеров с моделью границы раздела фаз или без нее. Такой подход позволяет смоделировать поведение гетерогенных и анизотропных материалов, таких как композиты с полимерной, резиновой или металлической матрицей, или даже нанокомпозиты.

Digimat-MX предназначен для проведения обратного инжиниринга (калибровки моделей материала по результатам испытаний), хранения, поиска и безопасного обмена моделями материалов между поставщиками и потребителями. Так как модели армированного пластика Digimat основаны на свойствах фаз, то для их моделирования необходимы механические свойства каждой фазы композита. Хотя механические свойства армированного пластика часто известны на уровне композита (макроуровне), у пользователя могут отсутствовать данные о механических свойствах матрицы. Для компенсации этого недостатка в данных Digimat можно использовать в режиме обратного инжиниринга с целью получения механических свойств матрицы, основанных на экспериментальных характеристиках армированных пластиков. Как база данных по материалам, Digimat-MX предлагает пользователям хранить информацию по тематическим моделям каждого материала при разных условиях (например, влажности или температуры), по моделям входящих в них фаз, а также результаты испытаний материалов, которые можно использовать для процесса обратного инжиниринга. В сетевом варианте модуль устанавливается в качестве сервера, с которого остальные пользователи получают необходимые данные по сети. При этом пользователи могут получать информацию о материалах от других фирм (тем самым не касаясь процесса разработки композита) или же поставлять ее другим компаниям. Версия Digimat-MX+ обеспечивает передачу данных о материалах по сети в зашифрованном виде, что в современных условиях может быть важно для разработчиков, поскольку для определения различных характеристик многофазных материалов требуется большее количество испытаний на сложном оборудовании. Стоимость разработки одного такого материала может достигать нескольких млн. долл.

Digimat-CAE объединяет в единую цепочку КЭ программные комплексы для моделирования литья под давлением и прочностного анализа. Модель для расчета на прочность задается обычным образом: на основе геометрической модели строится КЭ-сетка, выбираются типы КЭ, нагрузки, граничные условия и т.п. А для задания свойств материала используется Digimat. В нем армированный материал задается путем определения характеристик составляющих фаз (т. е. фаз полимерной матрицы и армирующих фаз) и микроструктуры композита. Микроструктура характеризуется локальной ориентацией волокон. Эта ориентация определяется с помощью программных пакетов расчета литья под давлением, с использованием собственной сетки. Такая сетка моделирует особенности технологического процесса и поэтому включает в себя не только модель детали или ее заготовки, но и прилегающие к ней протоки.

Digimat имеет интерфейсы с основными программными пакетами расчета литья под давлением (это Moldflow, Moldex3, 3D-Sigma и др.). Эти интерфейсы позволяют пользователям ком-

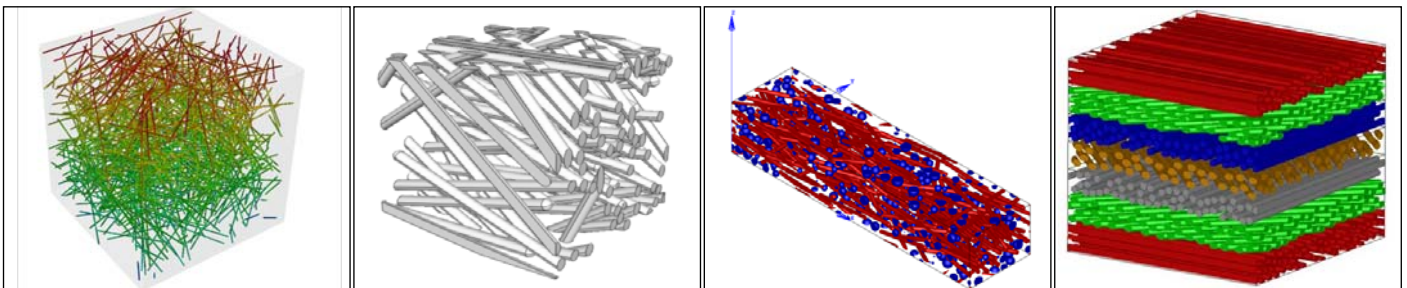


Рис. 2. Примеры генерации представительного элемента объема (ПЭО)



Рис. 3. Процесс многоуровневого моделирования с использованием интерфейса Digimat-CAE в производстве изделий из армированных пластмасс

плекса передавать в программные пакеты для расчетов на прочность такие технологические особенности, как эффект местной ориентации волокон, остаточные напряжения, а также температуры и линии спая (места встречи литейных потоков), которые возникают в процессе литья под давлением в готовом изделии (рис. 3).

Digimat связан с линейными и нелинейными решателями через подпрограммы соответствующих КЭ-пакетов. Для задания микро-механических свойств материала используется Digimat-MF, при этом учитываются свойства компонентов материала и морфология микроструктуры в каждом элементе и точке интегрирования.

Такой связанный анализ (программные пакеты расчета литья > Digimat > КЭ-решатель) дает возможность пользователю определить влияние параметров технологии на прочностные характеристики армированных пластиков. Эти параметры воздействуют на микроструктуру детали и, как следствие, влияют на его поведение под механической нагрузкой.

На рис. 4 показаны возможности многоуровневого подхода для отслеживания изменений микроструктуры без переопределения свойств материала (серые и красные кривые). Кроме учета особенностей процесса литья под давлением, Digimat может взаимодействовать с комплексами для моделирования традиционных многослойных укладок.

Digimat-MAP работает в паре с Digimat-CAE и предназначен для передачи данных об ориентации волокон, остаточных напряжениях и температурах с сетки для литья под давлением на КЭ-сетку расчета на прочность, где они могут быть использованы для осу-

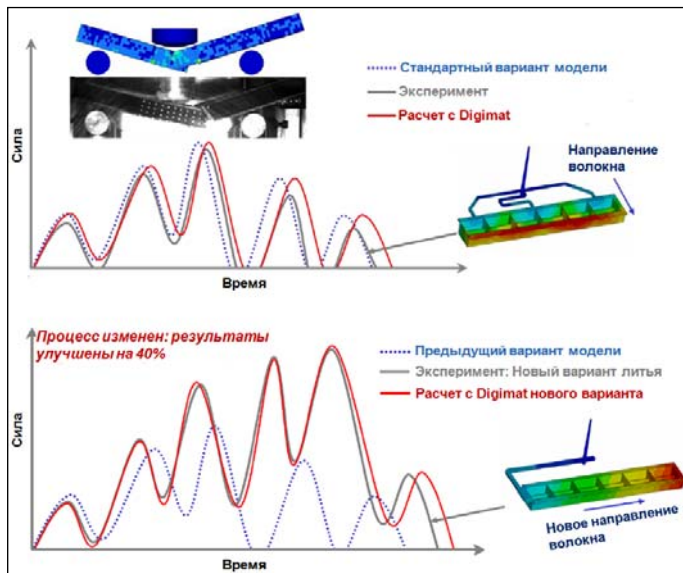


Рис. 4. Иллюстрация учета с помощью Digimat зависимости характеристик изделия от параметров технологического процесса

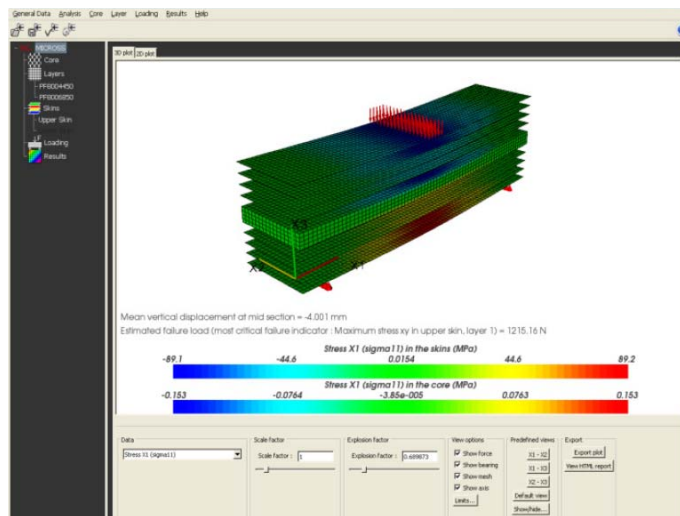


Рис. 5. Результаты расчета в модуле Microsc

ществления нелинейного многоуровневого анализа. Digimat-MAP позволяет скорректировать взаимное положение КЭ-сеток техпроцесса и расчета на прочность, а также имеет функцию расчета и отображения ошибки вычислений, благодаря которой пользователь видит ошибки в переносе данных с одной сетки на другую.

Microsc предназначен для простого и эффективного проектирования сотовых сэндвич-панелей, используя передовые технологии моделирования микро-механических свойств материала. Свойства сотового наполнителя вычисляются на основе геометрии ячейки. Обшивка задается как композитная укладка с заданной ориентацией и толщиной каждого слоя. Свойства каждого слоя могут быть определены как на макро-, так и на микроуровне. Если свойства укладки задаются на уровне микроструктуры, то для вычисления свойств на макроуровне используется Digimat-MF. Для расчетов Microsc использует собственный КЭ-решатель. Интерфейс ориентирован на максимальную простоту использования: КЭ-сетка создается автоматически с тремя степенями качества (грубая, средняя, мелкая), а варианты нагружения пакета выбираются из трех возможных – трехточечное нагружение, четырехточечное и сдвиг в плоскости модели (что воспроизводит самые распространенные испытания образцов в лаборатории). Результаты можно вывести как в трехмерной постановке, так и в виде графиков распределения интересующих величин по длине и толщине образца (рис. 5). Для материала обшивки поддерживаются различные критерии разрушения, например по максимальным напряжениям, критерии Цая-Ву и Цая-Хилла. Для наполнителя возможен вывод результатов расчета на сжатие и сдвиг. При этом Microsc имеет возможность автоматического создания отчета в формате html, в который входят исходные данные и основные результаты расчета (прогиб срединной поверхности, оценка разрушающей нагрузки на основе наихудшего критерия разрушения и т. п.).

Таким образом, Digimat является мощным инструментом, который позволяет по-новому взглянуть на процесс разработки композитов. Применение этого программного пакета в комплексе с другими продуктами корпорации MSC Software даст пользователю большую уверенность в получении надежных результатов расчетов, позволит создавать наиболее оптимальные конструкции и в результате приведет к существенной экономии сил и средств при разработке новых композитных материалов и изделий из них. □

ООО «Эм-Эс-Си Софтвэр РУС»

Россия, 123056, г. Москва,
ул. Зоологическая, д. 26, стр. 2
Тел.: (495) 363-0683, факс.: (495) 787-7606
www.mscsoftware.ru www.e-xstream.com