Программный комплекс *Digimat* как основа интегрального решения для аддитивных технологий

Алексей Гонтюк (OOO MSC Software RUS)

В настоящее время изготовление деталей из пластиков (в том числе армированных пластиков) аддитивными методами достигло новой стадии зрелости и активно переходит от задач быстрого прототипирования к промышленному производству ответственных нагруженных деталей. Однако, несмотря на большой интерес в мире к технологиям 3D-печати, широкому их применению в промышленном производстве препятствует ряд существенных проблем:

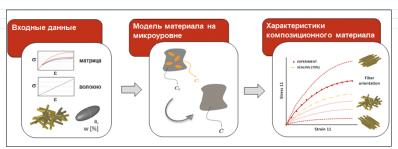
- ограниченный ассортимент современных материалов;
- недостаточная точность из-за коробления детали в процессе изготовления;
- трудно предсказуемые механические свойства (прочность и жесткость) будущего изделия.

Поэтому для получения детали, соответствующей теоретической геометрии и заданным механическим характеристикам, приходится использовать метод проб и ошибок. Как результат, стоимость деталей, получаемых методом 3D-печати, сейчас достаточно высока.

Чтобы обеспечить быстрый и эффективный переход к промышленному производству, компания *MSC Software* предлагает уникальное решение для аддитивных технологий – *Digimat Additive Manufacturing*. Это решение позволяет провести комплексную разработку деталей из пластиков (включая армированные пластики) – от композиционного материала и процесса изготовления методом *3D*-печати до характеристик конструкции.

Основой платформы Digimat Additive Manufacturing служит программный комплекс Digimat, который разработан и поддерживается бельгийской компанией e-Xstream engineering (с 2012 года — подразделение корпорации MSC Software).

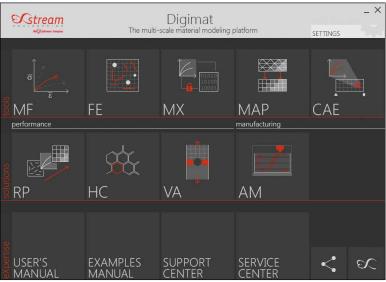
Для определения свойств многофазных материалов в *Digimat* используется микроуровневый подход. В качестве исходных данных выступают свойства каждой фазы композиционного материала (КМ), их объемное или массовое содержание и микроструктура (форма фаз и их ориентация). *Digimat* строит математическую модель материала на микроуровне, чувствительную к свойствам каждой фазы и его микроструктуре, после чего определяет требуемые механические, тепловые или электрические характеристики многофазного материала.



Микроуровневый подход для определения свойств многофазных материалов

Возможности программного комплекса обеспечивают моделирование широкого спектра многофазных материалов и использование комплексного подхода в разработке композитных конструкций — от технологии изготовления до конечных характеристик конструкции. Реализованный в Digimat микроуровневый подход делает его востребованным всеми специалистами, связанными с КМ или композитными конструкциями. Это могут быть разработчики композиционных материалов, специалисты по статической или динамической прочности композитных конструкций, материаловеды, занимающиеся испытаниями слоистых КМ, или технологи, связанные с изготовлением композитных деталей методами литья под давлением и 3D-печати.

Digimat имеет модульную структуру и в настоящее время состоит из девяти модулей (*Digimat-MF*, -*FE*, -*MX*, -*MAP*, -*CAE*, -*RP*, -*HC*, -*VA*, -*AM*),



Программный комплекс Digimat

которые взаимосвязаны и логически дополняют друг друга.

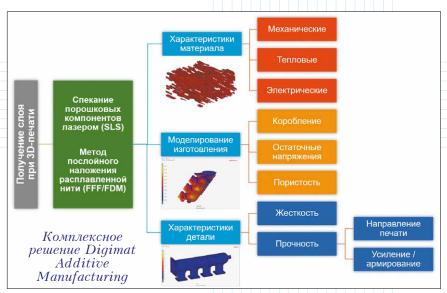
Платформа *Digimat Additive Manufacturing* основывается на получивших заслуженное признание решениях программного комплекса *Digimat* в области нелинейного многоуровневого моделирования композиционных материалов и представляет собой уникальное сочетание инструментов, которые охватывают все направления, связанные с аддитивными технологиями:

2 моделирование процесса изготовления детали методом 3D-печати для определения коробления, остаточных напряжений и пористости;

В расчет детали на прочность и жесткость (с учетом микроструктуры и возможных дефектов в ней после изготовления) с целью оценки соответствия полученных характеристик конструкции заданным требованиям. Это позволяет при необходимости оперативно внести требуемые изменения в конструкцию — например, с помощью дополнительного армирования или путем выбора оптимальных параметров печати (другого направления и т.д.).

На сегодня из всего множества существующих в мире технологий 3D-печати платформа Digimat Additive Manufacturing поддерживает две:

• **SLS** (Selective Laser Sintering) – спекание порошковых компонентов лазером;

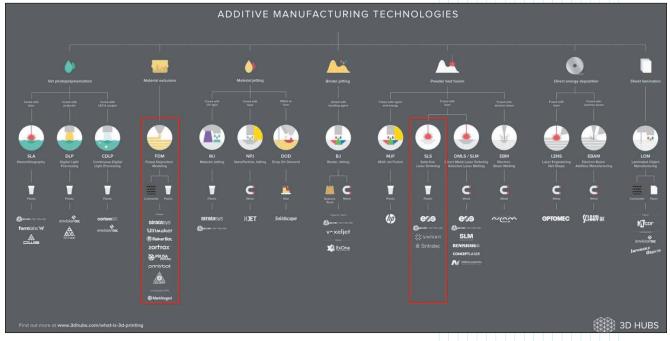


• FFF/FDM (Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Method) — метод наплавления нити / метод послойного наплавления. (Оба термина характеризуют один и тот же процесс; дело только в юридических ограничениях на использование товарной марки компании Stratasys. — Прим. ред.)

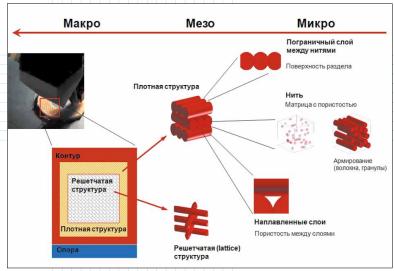
Эти технологии являются наиболее перспективными для промышленного производства "силовых" деталей из полимерных композиционных материалов, которые должны "нести" нагрузку и отвечать соответствующим требованиям по прочности и жесткости.

Точное определение свойств материала

Для качественной виртуальной разработки детали, которую планируется изготовить методом



Технологии 3D-печати, поддерживаемые платформой Digimat Additive Manufacturing



Digimat обеспечивает точное моделирование материала на макро-, мезо- и микроуровне

3D-печати, требуется точное определение характеристик материала на каждом из уровней моделирования процесса изготовления. Например, при использовании *FFF/FDM*-технологии изготовления мы можем выделить макро-, мезо- и микроуровень. На макроуровне у нас есть опора, плотная структура и решетчатая (lattice) структура. Спускаясь на уровень ниже, можно видеть, что свойства решетчатой структуры во многом определяются её геометрией и выбранным материалом. Свойства основной плотной структуры связаны не только со стратегией расположения слоёв при 3D-печати (однонаправленная укладка слоев, укладка 0/45 градусов или квазиизотропная укладка 0/90 градусов), но и со множеством параметров уже на микроуровне. К таким параметрам можно отнести пористость между слоями, которая зависит от технологии наложения нитей, пористость на уровне одного слоя, которая определяется технологическими параметрами укладки слоя и формы нити после спекания. Наконец, свойства самой нити будут зависеть от характеристик матрицы, армирующих волокон, возможной в ней микропористости, микроструктуры композиционного материала нити (ориентации армирующих волокон).

Можно констатировать, что для точного определения свойств при моделировании аддитивных технологий необходимо многоуровневое моделирование материала: от свойств одной

нити на микроуровне к свойствам плотной и решетчатой структуры на мезоуровне, а затем к характеристикам детали на макроуровне.

За точное определение характеристик композиционного материала на каждом из уровней моделирования 3D-печати отвечают модули Digimat-MF, -FE и -MX. Это первый блок платформы Digimat Additive Manufacturing.

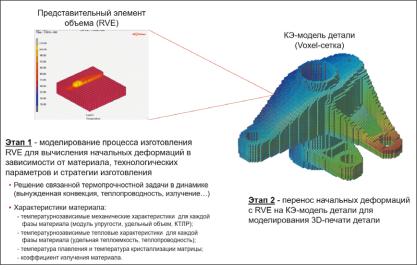
Моделирование процесса 3*D*-печати

Следующий блок отвечает за моделирование процесса изготовления детали из КМ методом 3D-печати. Эту задачу решает модуль Digimat-AM, который появился в релизе Digimat 2017.1.

Функционал модуля Digimat-AM позволяет определить коробление и остаточные напряжения, возникающие при 3D-печати



Рабочий процесс моделирования 3D-печати в модуле Digimat-AM



Двухэтапный подход при моделировании процесса 3D-печати

детали В зависимости от технологических процесса, параметров стратегии печати и выбранного материала. Поддерживается моделирование полного цикла изготовления деталей из однородных и армированных пластиков с помощью SLS- и FFF/FDM-технологий: 3D-печать, удаление опоры и охлаждение детали. Моделирование процесса *3D*-печати выполняется в дружественном польинтерфейсе

Пример минимизации коробления детали при 3D-печати

Digimat-AM и включает в себя несколько этапов:

- подготовка рабочего процесса изготовления;
- виртуальное моделирование методом конечных элементов (**КЭ**) послойного изготовления детали;
 - анализ полученных результатов.

При подготовке рабочего процесса пользователь вводит исходные данные (загружает начальную геометрию детали, выбирает стандартный материал из базы данных или задает свойства собственного композиционного материала, задает технологию изготовления — SLS или FFF/FDM), а также определяет технологические параметры изготовления: путь инструмента, параметры процесса, ориентацию детали и т.д. Далее на импортированной модели автоматически строится

воксельная (3D Voxel) сетка выбранного размера. После подготовки рабочего процесса изготовления запускается виртуальное моделирование процесса печати.

Моделирование печати производится с помощью встроенного в *Digimat-AM* нелинейного КЭ-решателя *Marc*, в котором с использованием воксельной конечно-элементной сетки просчитывается послойное выращивание детали. Для расчета коробления детали, деформаций и напряжений применяется метод собственных деформаций (*Inherent Strains*). Идея метода заключается в том, что при создании каждого слоя конечных элементов, моделирующих *3D*-печать, добавляются элементы с уже заложенными в них собственными

Три направления Digimat Additive Manufacturing

Платформа Digimat Additive Manufacturing работает как единая экосистема для тесного и эффективного взаимодействия поставщиков материалов, разработчиков 3D-принтеров, специалистов отделов НИОКР и конечных пользователей. Каждое из направлений охватывает свою группу задач при работе с аддитивными технологиями.

1. Направление "Материалы":

- Разработка новых композиционных материалов для аддитивных технологий, с требуемыми нелинейными анизотропными характеристиками (механическими, тепловыми и электрическими).
- Использование общих данных по материалам и обмен между производителями КМ, разработчиками 3D-принтеров и конечными пользователями.
- Точное определение свойств КМ (от микродо макроуровня) для моделирования процесса 3D-печати и связанного КЭ-расчета с учетом микроструктуры после изготовления.

Реализовано с помощью модулей Diginat-MF, -FE, -MX.

2. Направление "Технологические процессы":

- Моделирование процесса изготовления детали аддитивными методами.
- Определение возможных проблем в конструкции (коробление и остаточные напряжения) до начала физического изготовления детали.
- Оптимизация технологии *3D*-печати: подбор скомпенсированной геометрии для печати, оптимального материала и технологических параметров изготовления.
- Обмен данными между разработчиком 3D-принтера и конечным пользователем.

Реализовано с помощью модуля Digimat-AM.

3. Направление "Характеристики детали":

- Определение характеристик (прочность и жесткость) детали, получаемой методом *3D*-печати, с учетом микроструктуры после изготовления.
- Подбор оптимального материала и технологических параметров изготовления.
- Оптимизация конструкции (усиление армированием или использование решетчатой структуры в ненагруженных местах).

Реализовано с помощью модулей Diginat-RP, -CAE, -MAP.

деформациями. Значение этих собственных деформаций в создаваемых элементах зависит от выбранного материала, технологии 3D-печати и технологических параметров изготовления.

Модуль Digimat-AM предоставляет пользователю возможность задать значения Inherent Strains вручную или же позволить системе определить их самостоятельно. В случае автоматического определения задача моделирования решается в два этапа. На первом этапе Digimat-AM на микроуровне моделирует для небольшого объема материала технологический процесс послойного изготовления — с учетом свойств материала, технологических па-

раметров и стратегии изготовления; после этого из результатов моделирования программа сама определяет *Inherent Strains*. При этом происходит решение связанной термопрочностной задачи в динамике с учетом вынужденной конвекции, теплопроводности и излучения с учетом температурно-зависимых механических и тепловых характеристик каждой фазы композиционного материала. На втором этапе *Digimat-AM* использует высчитанные значения *Inherent Strains* на макроуровне — для моделирования печати уже всей детали.

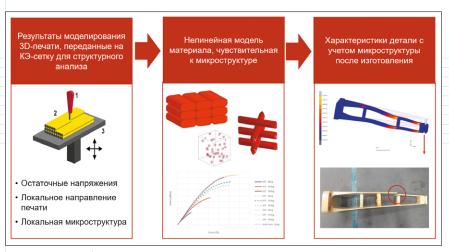
Таким образом, пользователь выбирает стратегию задания *Inherent Strains* (автоматическое определение или вручную) и запускает процесс КЭ-моделирования послойного изготовления детали.

Результатами моделирования являются искаженная форма детали после 3D-печати, остаточные напряжения и деформации, которые могут быть переданы в КЭ-модель для расчета конструкции на прочность или жесткость. Полученная при моделировании искаженная геометрия детали впоследствии может быть использована для нахождения начальной оптимально деформированной формы с целью компенсации искажения (коробления) после физического изготовления.

Расчет характеристик изготовленной детали

И, наконец, третье направление, поддерживаемое платформой *Digimat Additive Manufacturing*, – расчет конструкции, полученной методом *3D*-печати, на прочность и/или жесткость с учетом микроструктуры после изготовления.

В общем случае пользователям недостаточно лишь напечатать деталь – их интересует, чтобы она также соответствовала заявленным требованиям по прочности и жесткости. Эта задача решается с помощью связанного КЭ-анализа с моделью материала на микроуровне.



Рабочий процесс расчета конструкции с учетом микроструктуры в ней после 3D-печати

Полученные после моделирования процесса 3D-пеачати остаточные напряжения и микроструктура передаются на КЭ-сетку для структурного анализа. Параллельно с этим строится нелинейная анизотропная модель материала (чувствительная к микроструктуре после изготовления), которая и используется для связанного КЭ-анализа конструкции. За возможность проведения связанного КЭ-анализа с учетом микроструктуры после 3D-печати отвечают модули Digimat-CAE и -MAP.

Beрсия Digimat 2018

В конце ноября 2017 года вышла версия *Digimat 2018.0*, обеспечивающая новые возможности для работы с аддитивными технологиями:

- определение характеристик различных видов решетчатых структур в модуле *Digimat-FE*;
- более точное моделирование 3D-печати в Digimat-AM (разрушение опор, проектирование анкерных креплений, решение тепловой задачи на макроуровне при моделировании печати всей детали);
- \bullet выполнение в модуле Diginat-RP расчета на прочность детали после 3D-печати.

Сейчас заказчикам доступен релиз *Digimat* 2018.1, о котором мы планируем рассказать в ближайшем будущем.

Дополнительную информацию о программном комплексе *Digimat* и его возможностях можно получить в OOO *MSC Software RUS* или на сайтах корпорации:

- <u>www.e-xstream.com</u> (сайт разработчика Digimat компании e-Xstream engineering);
- <u>www.mscsoftware.com</u> (корпоративный сайт MSC Software);
- <u>www.mscsoftware.ru</u> (российский сайт MSC Software).

Оригинальный материал опубликован в электронном журнале *CADMaster* (www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm 87 18.html).