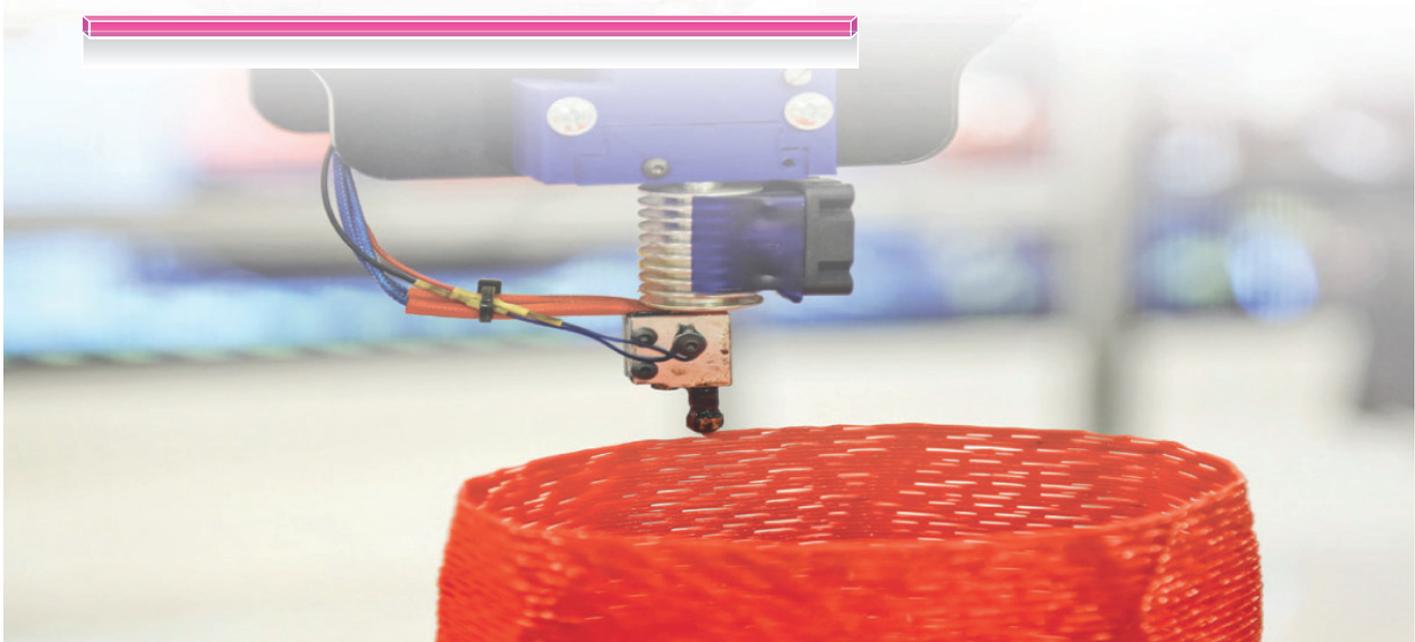


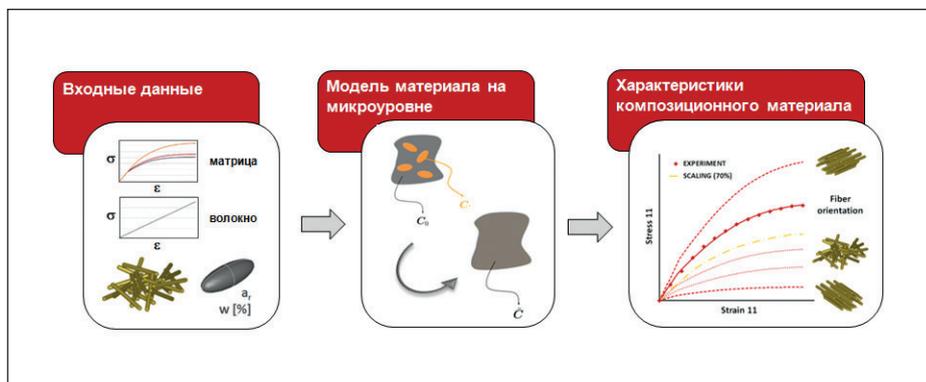
КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ DIGIMAT ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИИ



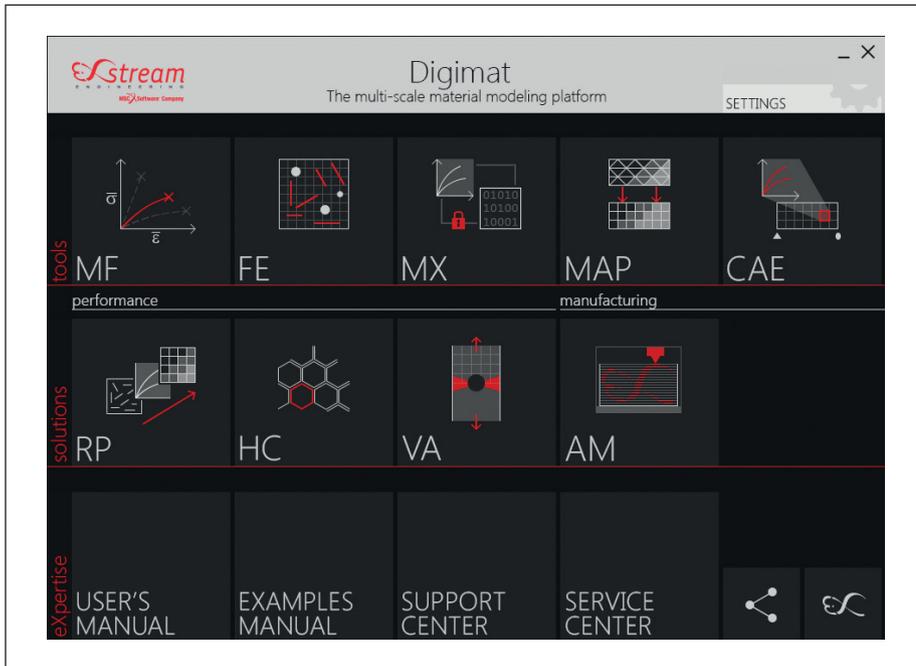
В настоящее время производство деталей из пластиков (в том числе армированных пластиков) с использованием аддитивных технологий активно переходит от стадии быстрого прототипирования к стадии промышленного производства ответственных нагруженных деталей. Несмотря на большой интерес в мире к технологиям 3D-печати, широкому применению этих технологий в промышленном производстве препятствует ряд существенных проблем: ограниченный ассортимент современных материалов, недостаточная точность детали из-за ее коробления в процессе изготовления, труднопредсказуемые 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 – **Digmat Additive Manufacturing**, позволяющее провести комплексную разработку деталей из пластика (включая армированные пластики): от композиционного материала и процесса изготовления методом 3D-печати до характеристик конструкции.

Основой платформы Digmat Additive Manufacturing является программный комплекс Digmat, который разработан и поддерживается бельгийской компанией e-Xstream engineering (с 2012 года – подразделение корпорации MSC Software). Для определения свойств многофазных материалов Digmat использует микроуровневый подход. В качестве исходных данных выступают свойства каждой фазы композиционного материала (КМ), их



Микроуровневый подход для определения свойств многофазных материалов



Программный комплекс Digimat

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. Возможности программного комплекса обеспечивают моделирование широкого спектра многофазных материалов и ис-

пользование 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, материалоло-

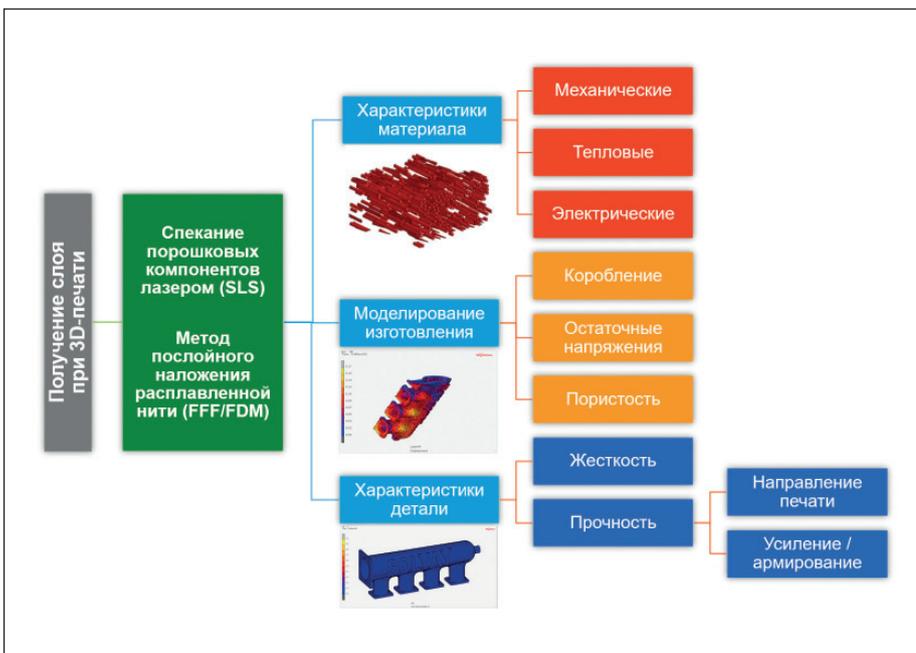
веды, занимающиеся испытаниями слоистых КМ, или технологи, связанные с изготовлением композитных деталей методами литья под давлением и 3D-печати. Digimat имеет модульную структуру и в настоящее время состоит из девяти модулей (Digimat-MF, -FE, -MX, -MAP, -CAE, -RP, -HC, -VA, -AM), которые взаимосвязаны и логически дополняют друг друга.

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:

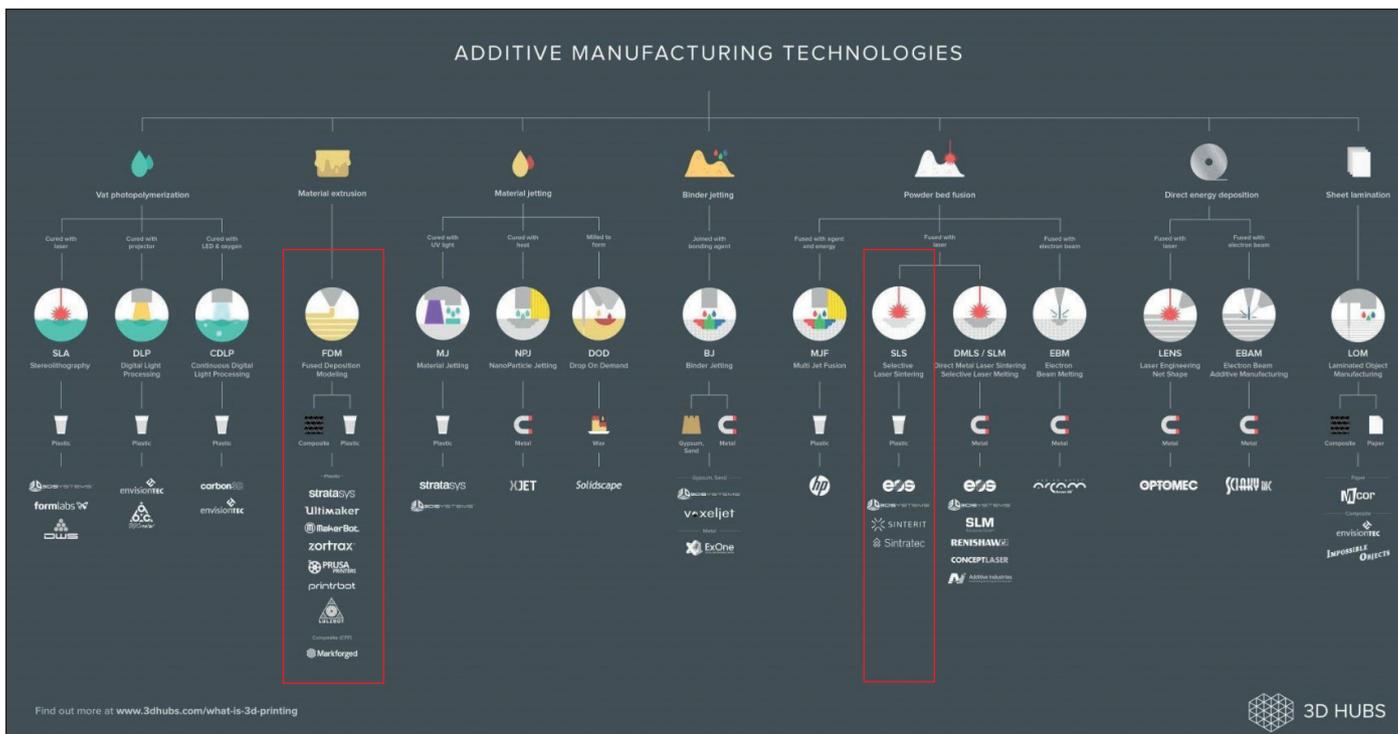
- точное определение механических, тепловых и электрических свойств материала на основе характеристик фаз и его микроструктуры;
- моделирование изготовления детали методом 3D-печати для определения коробления, остаточных напряжений и пористости;
- расчет детали на прочность и жесткость с учетом микроструктуры и возможных дефектов в ней после изготовления с целью оценки 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 Digimat Additive Manufacturing поддерживает две: SLS-технологию (спекание порошковых компонентов лазером) и FFF/FDM-технологии (метод наплавления нити / метод послойного наплавления). Эти технологии являются наиболее перспективными для промышленного производства "силовых" деталей из полимерных композиционных материалов, которые должны "нести" нагрузку и отвечать заложенным характеристикам по прочности и жесткости.

Для виртуальной разработки детали, которую планируется изготовить методом 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-



Комплексное решение Digimat Additive Manufacturing



Поддерживаемые Digimat Additive Manufacturing технологии 3D-печати

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 ее геометрией и выбранным материалом. Свойства основной плотной структуры связаны не только со стратегией расположения слоев при 3D-печати (однаправленная укладка

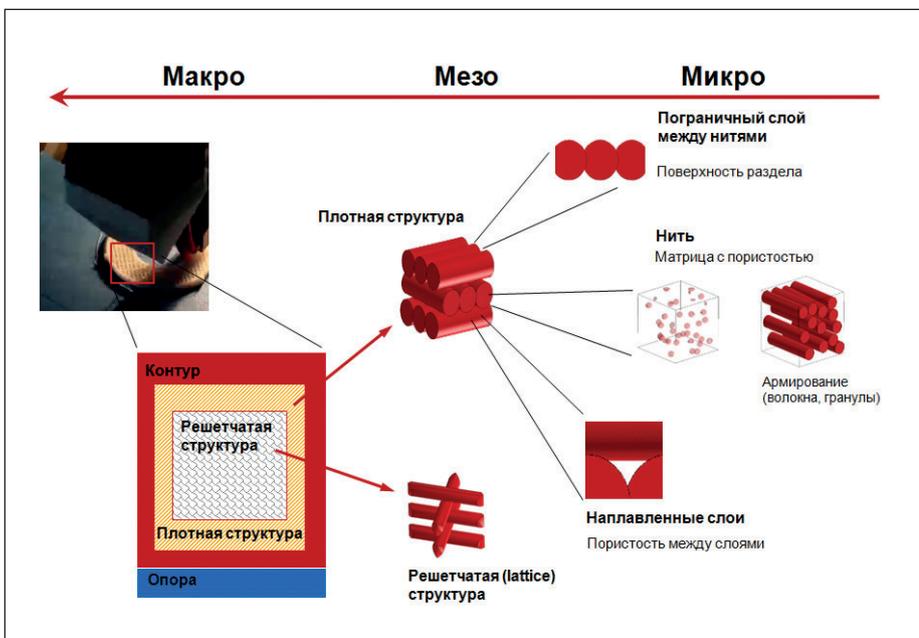
слоев, укладка 0/45 градусов или квази-зотропная укладка 0/90 градусов), но и со множеством параметров уже на микроуровне. К таким параметрам можно отнести пористость между слоями, которая зависит от технологии наложения нитей, пористость на уровне одного слоя, которая определяется технологическими параметрами 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 при моделировании аддитивных технологий для точного определения свойств необходимо многоуровневое моделирование материала: от моделирования 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.

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

Digimat-AM позволяет определить коробление и остаточные напряжения, возникающие при 3D-печати детали в зависимости от технологических параметров процесса, стратегии печати и выбранного материала. Модуль поддерживает моделирование полного цикла изготовления деталей из однородных и ар-



Точное моделирование в Digimat материала на макро-, мезо- и микроуровне



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

мированных пластиков с помощью SLS- и FFF/FDM-технологий: 3D-печать, удаление опоры и охлаждение детали.

Моделирование процесса 3D-печати выполняется в дружественном интерфейсе модуля Digimat-AM и включает в себя несколько этапов: подготовку рабочего процесса изготовления, виртуальное конечно-элементное (КЭ) моделирование послойного изготовления детали и 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 3D Voxel (воксельная) сетка выбранного размера. После подготовки рабочего процесса изготовления запускается виртуальное моделирование процесса печати.

Процесс печати производится с помощью встроенного в Digimat-AM нелинейного КЭ-решателя Marc, в котором моделируется послойное выращивание детали с использованием воксельной

конечно-элементной сетки. Для расчета коробления детали, деформаций и напряжений используется 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 деформациями. Значение этих собственных деформаций в создаваемых элементах зависит от выбранного материала, технологии 3D-печати и технологических параметров изготовления.

Digmat-AM предоставляет пользователю возможность задать значения Inherent strains вручную или же позволить модулю определить их самостоятельно. В случае автоматического определения Inherent strains задача моделирования решается в два этапа. На первом этапе Digimat-AM на микроуровне для небольшого объема материала моделирует технологический процесс послойного изготовления с учетом свойств материала, технологических параметров и стратегии изготовления, после чего из результатов моделирования определяет Inherent strains. При этом происходит решение связанной термпрочностной задачи в динамике с учетом вынужденной конвекции, теплопроводности и излучения с учетом температурнозависимых

механических и тепловых характеристик каждой фазы композиционного материала. На втором этапе Digimat-AM использует высчитанные Inherent strains на макроуровне для моделирования печати уже всей детали.

Пользователь выбирает стратегию задания Inherent strains (автоматическое определение в модуле или задание вручную) и запускает процесс КЭ-моделирования послойного изготовления детали.

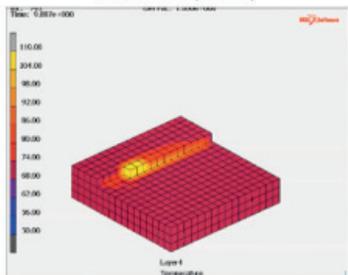
Результатом моделирования являются искаженная форма детали после 3D-печати, остаточные напряжения и деформации, которые могут быть переданы в КЭ-модель для расчета конструкции на прочность или жесткость.

Полученная при моделировании искаженная геометрия детали может быть впоследствии использована для нахождения начальной оптимально деформированной формы с целью компенсации искажения формы (коробления) после физического изготовления.

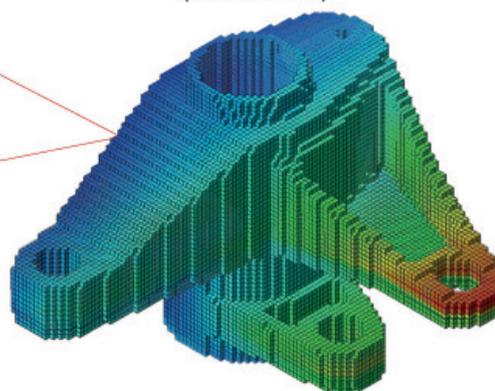
И, наконец, третье направление платформы Digimat Additive Manufacturing – это расчет конструкции, полученной методом 3D-печати, на прочность и/или жесткость с учетом микроструктуры в ней после изготовления.

В общем случае пользователям недостаточно лишь напечатать деталь – их больше интересует, чтобы она также соответ-

Представительный элемент объема (RVE)



КЭ-модель детали (Voxel-сетка)



Этап 1 - моделирование процесса изготовления RVE для вычисления начальных деформаций в зависимости от материала, технологических параметров и стратегии изготовления

- Решение связанной термомеханической задачи в динамике (вынужденная конвекция, теплопроводность, излучение...)
- Характеристики материала:
 - температурнозависимые механические характеристики для каждой фазы материала (модуль упругости, удельный объем, КТЛР);
 - температурнозависимые тепловые характеристики для каждой фазы материала (удельная теплоемкость, теплопроводность);
 - температура плавления и температура кристаллизации матрицы;
 - коэффициент излучения материала.

Этап 2 - перенос начальных деформаций с RVE на КЭ-модель детали для моделирования 3D-печати детали

Двухэтапный подход при моделировании процесса 3D-печати

ствовала заявленным требованиям по прочности и жесткости. Эта задача решается с помощью связанного КЭ-анализа с моделью материала Digimat на микроуровне. Полученные после моделирования 3D-печати остаточные напряжения и микроструктура передаются на КЭ-сетку для структурного анализа. Парал-

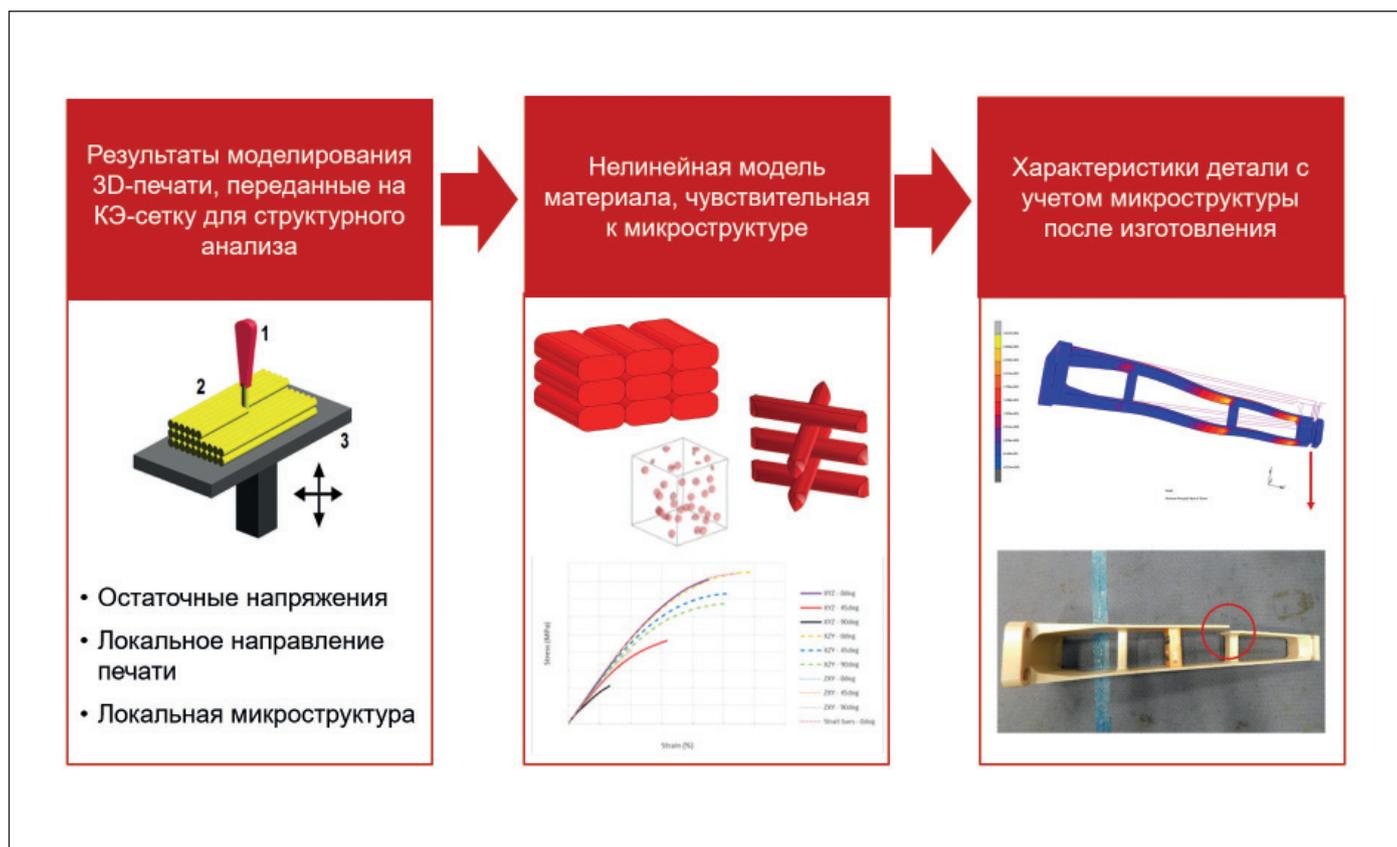
ельно с этим строится нелинейная анизотропная модель материала, чувствительная к микроструктуре после изготовления, которая и используется для связанного КЭ-анализа конструкции. За возможность проведения связанного КЭ-анализа конструкции с учетом микроструктуры после 3D-печати отвечают модули Digimat-CAE и -MAP.

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



Источник: STRATASYS

Пример минимизации коробления детали при 3D-печати



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

Направление "Материалы"

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

Реализовано с помощью модулей **Digmat-MF, -FE, -MX.**

Направление "Технологические процессы"

- Моделирование изготовления детали с помощью аддитивных технологий.
- 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 **Digmat-AM.**

Направление "Характеристики детали"

- Определение характеристик (прочность и жесткость) детали, получаемой методом 3D-печати, с учетом микроструктуры в детали после изготовления.
 - Подбор оптимального материала и технологических параметров изготовления.
 - Оптимизация конструкции (усиление армированием или использование "решетчатой" структуры в "нагруженных" местах).
- Реализовано с помощью модулей **Digmat-RP, -CAE и -MAP.**

В конце ноября 2017 года вышла новая версия – **Digmat 2018.0**, которая обладает новыми возможностями для работы с аддитивными технологиями:

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

Дополнительную информацию о программном комплексе **Digmat** и его возможностях для аддитивных технологий можно получить в ООО "Эм-Эс-Си Софтвэр РУС" или на сайтах корпорации:

- www.e-xstream.com (сайт разработчика **Digmat** – компании e-Xstream engineering);
- www.mscsoftware.com (корпоративный сайт MSC Software);
- www.mscsoftware.ru (русский сайт MSC Software).

*Алексей Гонтюк
ООО "Эм-Эс-Си Софтвэр РУС"
(Москва)*