

Симуляция в сфере 3D-печати

Где мы находимся сейчас

Phillip Keane (Nanyang Technological University, Singapore)

©2018 ENGINEERING.COM

Численное моделирование (*Simulation*) для сферы 3D-печати – довольно широкое понятие, которое охватывает все аспекты этого процесса, от расплавления частиц материала до симуляции фактических перемещений рабочего органа 3D-принтера, необходимых для формирования детали.

Вообразите себе, сколько компаний предлагают решения для симуляции каждого аспекта. Целевая аудитория этих решений столь же разнообразна, как и сами программные продукты. Некоторые из них представляют собой сложное ПО, предназначенное для исследователей, другие же предлагают упрощенные функции с причудливым графическим интерфейсом для использования на производстве.

Что есть что на этом рынке? И кто есть кто?

Из всего широкого спектра компаний, разрабатывающих ПО для симуляции аддитивного производства (*Additive Manufacturing, AM*), мы выбрали 11. Давайте поговорим об их продуктах.

Классификация аддитивных технологий

Согласно стандарту *ASTM F2792.1549323-1* от *American Society for Testing and Materials* (организации, которая занимается разработкой технических стандартов для материалов, изделий, систем и услуг), все технологии аддитивного построения изделий разделены на 7 групп (русский перевод и пояснения М. А. Зленко):

1. *Material Extrusion* – выдавливание материала или послойное нанесение расплавленного строительного материала через экструдер;

2. *Material Jetting* – разбрызгивание строительного материала или его послойное струйное нанесение;

3. *Binder Jetting* – разбрызгивание связующего материала или его послойное струйное нанесение;

4. *Sheet Lamination* – соединение листовых материалов или послойное формирование изделия из листовых строительных материалов;

5. *Vat Photopolymerization* – фотополимеризация в ванне или послойное отверждение фотополимерных смол;

6. *Powder Bed Fusion* – расплавление материала в заранее сформированном слое или последовательное формирование слоёв порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц материала;

7. *Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии и материала непосредственно в место построения или послойное формирование изделия путем внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии.

Технологии 6-й и 7-й групп относятся к производству изделий из металлов и сплавов.

Журнал “Аддитивные технологии”, №4/2018
<https://additiv-tech.ru/publications/additive-technologii-dlya-aviakosmicheskoy-tehniki.html>

1. Система *Amphyon* от *Additive Works*

Первой рассмотрим систему *Amphyon* от немецкой софтверной компании *Additive Works GmbH*. Это решение ориентировано на пользователей систем аддитивного производства металлических изделий – особенно, тех, где для плавления используется лазерный луч (пользовательский интерфейс показан на рис. 1).

“Наша система предназначена для всех пользователей, применяющих технологию плавления [порошка] лазерным лучом, но основной упор делается на предварительных операциях и на автоматизации производства”, – говорит **Nils Keller**, генеральный директор *Additive Works GmbH*. – “Идея заключается в том, что каждая работа по построению [детали] может быть оптимизирована, полностью автоматизирована и подготовлена, опираясь на численное моделирование. При этом наше ПО можно использовать и для исследований, и в сфере образования, а также в качестве помощника на этапе проектирования”.

Система *Amphyon* поддерживает AM-процессы, основанные на использовании лазерного луча, включая селективное лазерное плавление (*Selective Laser Melting, SLM*), прямое лазерное спекание металлов (*DMLS*) и *LaserCUSING*. С её помощью можно моделировать различные стадии процесса производства – как собственно процесс печати, так и последующие операции (обрезка основания, удаление поддерживающих структур, термообработка деталей).

Чем *Amphyon* отличается от других представленных на рынке программных решений для моделирования аддитивного производства изделий из металлического порошка?

“Мы полагаемся на прагматические подходы и методы симуляции, чтобы сгенерировать больше

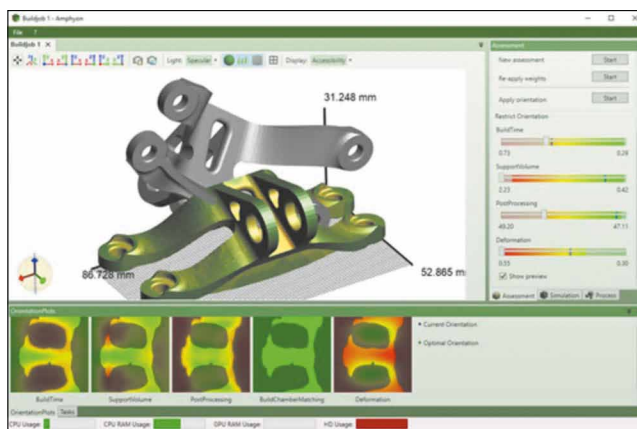


Рис. 1. Пользовательский интерфейс *Amphyon* (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Additive Works*)

информации о том, как наилучшим образом провести предварительные работы, а также предоставить на основе этих данных указания по построению”, – поясняет г-н Keller. – “По сравнению с другим подобным ПО, наша система не является всеохватывающим инструментом для выявления проблем всех процессов, которые пользователь может захотеть симулировать. Но это полное программное решение для предварительных операций. У нас есть решатели (Solvers), оптимизированные под задачи АМ, с некоторыми специальными расширениями, чтобы получать очень точные и надежные результаты, опираясь на процедуры калибровки по экспериментальным данным”.

Компания *Additive Works* входят в альянс *Altair Partner Alliance*. Клиенты *HyperWorks* могут получить доступ к *Amphyon* по подписке на *Altair/HyperWorks*.

2. Система *Simufact Additive*

Компания *Simufact*, один из ведущих разработчиков в области симуляции производства, предлагает ряд программ для моделирования процессов сварки и формования. Недавно компания выпустила пакет для аддитивного производства из металлического порошка – *Simufact Additive* (текущая версия на момент написания статьи – 3.1). Графическое представление в среде *Simufact Additive* отклонений от исходной формы показано на рис. 2. Такое развитие для компании представляется естественным, поскольку процесс АМ немного похож на сварку – не так ли?

Продукты компании *Simufact* оказались настолько инновационными, что в 2015 году её целиком купила корпорация *MSC Software* (ставшая, в свою очередь, собственностью шведского гиганта *Hexagon* в феврале 2017-го), и теперь *Simufact* де-факто является её частью. Это довольно распространенная история в сфере симуляции АМ – кто-то выходит на рынок с отличным продуктом, но затем объявляется важная птица и проглатывает компанию целиком. В результате этого меньшая компания получает доступ к громадным ресурсам родительской компании, а та, со своей стороны, получает права на какое-то замечательное ПО. И все довольны.

Система *Amphyon* в значительной степени заточена под симуляцию подготовительных процессов, тогда как *Simufact Additive* охватывает ряд этапов, включая [геометрическое] моделирование и компенсацию искажений формы.

Как осуществляется компенсация искажений? Симуляция покажет возможную температурную

Система *Amphyon* состоит из нескольких модулей, которые предназначены для пре-процессинга и расширения возможностей анализа процесса аддитивного производства.

Основные задачи, которые решает *Amphyon*:

- помочь понять проектировщикам, как правильно применять аддитивные технологии и извлекать из них максимум выгоды;
- помочь исследователям в изучении физики процессов аддитивного производства;
- помочь технологам оптимизировать настройки процесса 3D-печати за несколько простых шагов.

(С русского сайта компании *Additive Works*)

деформацию детали, после чего можно внести изменения в исходную 3D-модель, чтобы эту деформацию скомпенсировать. Такой подход тоже работает. По данным с сайта *Simufact*, при помощи симуляции можно существенно снизить процент брака в деталях из-за температурных деформаций и устранить необходимость печати тестовых деталей.

Мы поговорили с **Volker Mensing**, директором *Simufact* по маркетингу и коммуникациям, чтобы лучше разобраться с их предложением.

“*Simufact Additive* представляет собой специализированное решение для симуляции аддитивного производства деталей из металлического порошка, предназначенное как для производителей, так и для исследователей”, – сказал г-н Mensing. – “Наше программное обеспечение предлагает различные варианты симуляции. В зависимости от изучаемого аспекта, пользователь может выбрать быстрый механический или температурный подход, или же комплексный температурно-механический подход, обеспечивающий самую высокую точность”.

Как уже упоминалось, *Simufact* охватывает ряд этапов рабочего процесса АМ.

“*Simufact Additive* фокусируется на симуляции печати и последующих шагов, включая термообработку, обрезку основания, удаление подпорок

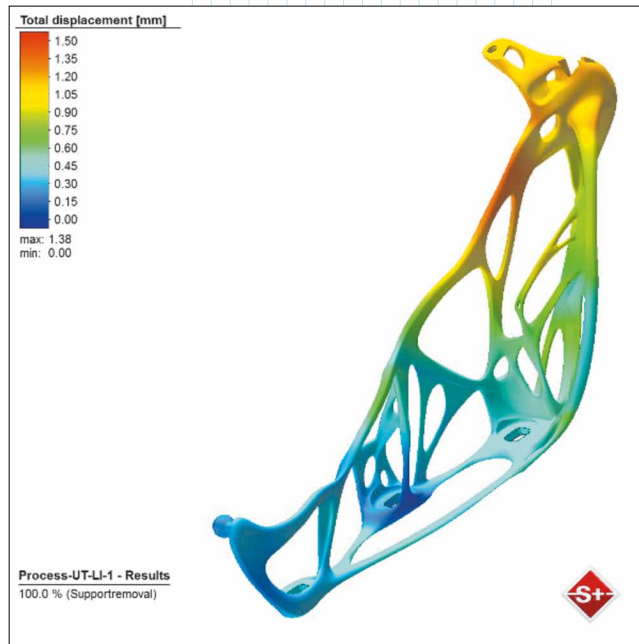


Рис. 2. Графическое представление отклонений средствами *Simufact Additive* (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Simufact*)

и *HIP (Hot Isostatic Pressing* – горячее изостатическое прессование)”, – говорит г-н *Mensing*. – “Наше программное обеспечение открыто для взаимодействия с решениями сторонних организаций для цепочки этапов *AM*-процесса – такими, как *Materialise Magics*, а также с ПО, которое *OEM*-производители используют для подготовки печати (в том числе, *QuantAM* от *Renishaw*). Система может экспортировать результаты в твердотельном *3D*-формате – например, для проведения прочностного анализа”.

Итак, чем же *Simufact Additive* отличается от других доступных решений?

“*Simufact Additive* можно назвать лучшим пакетом для всеобъемлющей симуляции, учитывая скорость работы, точность, функциональность и удобство использования”, – считает г-н *Mensing*. – “Графический пользовательский интерфейс (*GUI*) нашего ПО ориентирован на рабочий процесс, и, по мнению клиентов, является лучшим в своём классе. Система позволяет пользователям определять лучшую ориентацию детали при печати, автоматически компенсировать деформации готовой детали, автоматически оптимизировать поддерживающие структуры, выявлять такие производственные проблемы как появление трещин, усадка, контакт поверхности с кромкой распределителя порошка. Система *Simufact Additive* готова использовать кластеры на базе *Linux* для высокопроизводительных расчетов”.

Таким образом, пакет *Simufact Additive* является дружелюбным пользователю, пригоден для облака, и может сократить затраты времени на создание деталей.

3. Продукты от *Autodesk*

Один из наиболее хорошо известных комплектов программ для *AM* – линейка продуктов *Netfabb* компании *Autodesk* (рис. 3).

Предлагаются три уровня ПО *Netfabb*, обеспечивающего симуляцию процесса печати:

- *Netfabb Premium*;
- *Netfabb Ultimate*;
- *Netfabb Local Simulation*.

Мы поговорили с **Brian Frank**, старшим менеджером линейки продуктов *Autodesk* для симуляции, чтобы лучше узнать о функционале *Netfabb*.

“Семейство продуктов *Netfabb* позволяет моделировать аддитивное производство, использующее металлические порошки”, – говорит *Brian Frank*. – “Пакет *Netfabb Premium* предоставляет пользователям возможности симуляции в виде облачного сервиса. Пакет *Netfabb Ultimate* предоставляет все облачные возможности, а также позволяет выполнять симуляцию на ваших локальных вычислительных ресурсах – в зависимости от сложности и размера детали, изготовление которой вы хотите симулировать. *Netfabb Local Simulation* предоставляет возможность локально решать задачи симуляции спекания порошка для деталей любой геометрической сложности, а также симулировать прямую послойную наплавку лазером (*Direct*

Energy Deposition – подвод энергии и материала непосредственно к месту построения)”.

Платформа *Netfabb* охватывает ряд процессов: импортирование/ремонт/редактирование *CAD*-моделей (включая замечательную функцию генеративного проектирования *Netfabb Generative Design*, позволяющую оптимизировать *3D*-модель), исследование возможных деформаций, автоматическое формирование опорных структур, размещение партий деталей в зоне печати и многое другое.

“Функционал *Netfabb* позволяет в полной мере прогнозировать получаемый на выходе результат, используя симуляцию процесса на многих уровнях, что устраняет необходимость в проведении тестовой печати и измерений”, – продолжает г-н *Frank*. – “Другие подобные предложения, имеющиеся на рынке, используют подход, основанный на измерении характерных для изделия деформаций. Пользователь должен сначала напечатать первый образец желаемой геометрии, отсканировать результат, выявить отклонения [от исходной *3D*-модели], а затем настроить решатель – так, чтобы результат на его выходе соответствовал тестовой распечатке. Это дорогой и затратный по времени подход. Пользователи *Netfabb* могут получать точные результаты сразу, не тратя время и деньги на начальную распечатку и её изучение”.

Момент, относящийся к настройке решателя, достаточно примечателен. В качестве профессионального юмора: мой профессор, преподававший авионику, называл такую настройку математики для получения нужного результата введением подгоночного коэффициента.

По-видимому, компания *Autodesk* устранила необходимость в такой подгонке и фокусируется на том, чтобы сделать результаты симуляции более соответствующими реальности. Это критически важно для любого численного моделирования. Чтобы симуляция была эффективной и точной, нам, в первую очередь, необходимо понять математическую модель, которая определяет процесс..., а затем обеспечить, чтобы исходные данные были точными. Как говорится, что посеешь, то пожнешь.

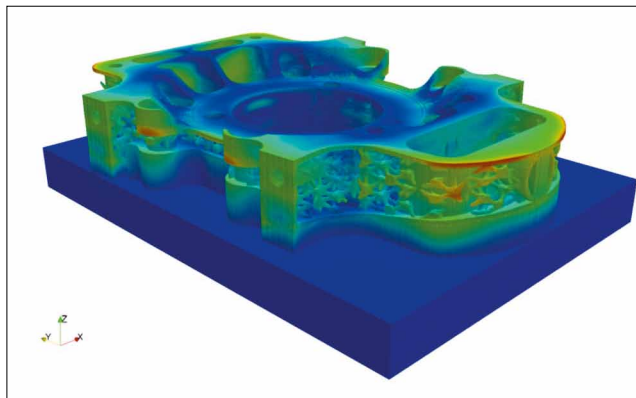


Рис. 3. Отображение деформаций средствами *Netfabb* (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Autodesk*)

Продолжая пояснять их концепцию, г-н *Frank* сказал: “По нашему опыту, отличия между прогнозируемым и реально наблюдаемым результатом обычно возникают из-за ошибок в том, что касается предоставления правильных данных для симуляции. В их числе неполное понимание свойств материала и его поведения в процессе печати, самого станка, характеристик его компонентов и пр. Если все эти элементы осмыслены полностью, то расчетные и реальные характеристики будут гарантированно коррелировать”.

Устойчивая работа ПО, точность прогнозирования, обеспечение надежного процесса печати и, что самое важное, повторяемости изготавливаемых деталей – вот чего вы ждете от пакета программ для симуляции.

Вот еще несколько вопросов, которые мы не могли не задать.

Насколько точно результаты симуляции соответствуют реальности?

“Autodesk много инвестирует в верификацию результатов симуляции”, – говорит г-н *Frank*. – “Наша история верификации начинается с наших продуктов *Moldflow*, когда мы задействовали возможности наших лабораторий по тестированию материалов и процессов для обеспечения программ симуляции достоверной информацией. Эту практику мы продолжили и при создании наших технологий симуляции аддитивного производства. Мы привлекаем как внутренние ресурсы, так и ресурсы сторонних партнеров, чтобы получить доступ к станкам и материалам с целью гарантировать точность результатов симуляции. Кроме того, мы максимально применяем эти возможности на наших собственных объектах, таких как *Advanced Manufacturing Facility* в Бирмингеме (Великобритания), а также наши другие технологические центры в Сан-Франциско, Торонто и Бостоне”.

Какую следующую инновацию в деле симуляции АМ готовит Autodesk?

Brian Frank: “Autodesk продолжит совершенствовать и усиливать возможности и надежность наших средств симуляции аддитивных технологий. Одна из областей для фокусировки усилий – тонкостенные детали и геометрия, которые на текущий момент вызывают у пользователей громадные сложности при аддитивном производстве и дают очень большой уровень брака, если не используется симуляция. Также мы вводим симуляцию в качестве помощи при создании поддерживающих структур и ориентировании деталей для сокращения последующих операций. Эти усилия согласуются с нашими еще большими усилиями для обрабатывающей промышленности. Как часть нашего видения будущего в деле изготовления вещей, мы создаем полнофункциональную поддержку сквозного процесса “*Design-to-Make*”, включающего генеративное проектирование, автоматизацию, валидацию, расчет траекторий инструмента, технологическую подготовку производства и т.д.”.

4. Пакет GENOA 3DP от AlphaStar

GENOA 3DP – пакет программ от компании с великолепным футуристическим названием *AlphaStar Corporation*, звучание которого напоминает что-то из научно-фантастических романов Филипа Киндред Дика.

В отличие от остального программного обеспечения, которое упоминалось в этом обзоре, и которое предназначено, в первую очередь, для аддитивного производства металлических изделий, *GENOA 3DP* поддерживает виртуальную симуляцию и анализ при изготовлении деталей из полимеров и металлов, а также керамики.

“*GENOA 3DP* – это инструмент, необходимый и предназначенный для исследователей, для головных (*OEM*) и контрактных производителей, чтобы они могли оптимизировать, пробовать и безошибочно изготавливать АМ-детали”, – говорит **Rashid Miraj**, технический директор *AlphaStar*. “Этот инструмент позволяет моделировать параметры материалов и процессов, связанных с АМ, для поиска оптимального решения по созданию АМ-детали”.

Функционал этого ПО предоставляет пользователям возможности импортировать *STL*-файл / *G*-код; генерировать расчетную сетку; выполнять анализ и оптимизировать деталь, чтобы уменьшить вес, снизить процент брака, повысить производительность и обеспечить соответствие спецификации.

Функциональные возможности *GENOA 3DP* позволяют прогнозировать остаточное напряжение, деформацию и расслаивание (образование/распространение); предсказывать растрескивание и тип трещин.

Кроме того, пользователи могут выявить местонахождение и размер повреждений и дефектов, а именно: диффузионные расширения, пустоты, шероховатость поверхности. Можно также менять параметры, чтобы улучшить процесс производства, – в том числе скорость печати, температуру материала, температуру окружения и тип материала (рис. 4).

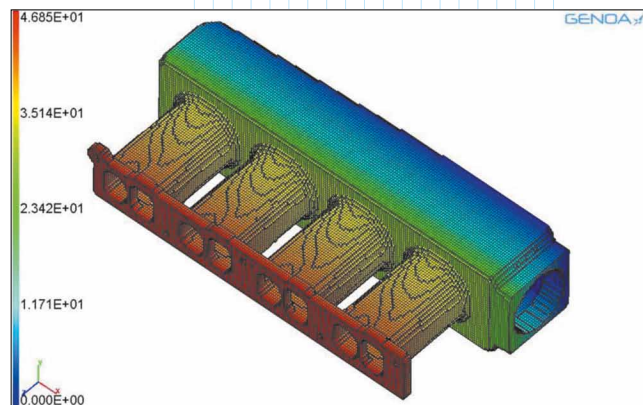


Рис. 4. Анализ дефектов средствами системы *GENOA 3DP* (Иллюстрация любезно предоставлена компанией *AlphaStar Corp.*)

“Функциональность *GENOA 3DP* объединяет дегомогенизированную температурно-прочностную модель материала с многоуровневым [включая микроруровень] последовательным анализом нарастания дефектов, чтобы точно прогнозировать появление пустот, расслоения, прогибов, остаточных напряжений, первоначальное образование повреждений и рост трещин – всего, что может возникнуть в ходе аддитивного построения детали”, – подводит черту г-н *Miraj*.

5. Пакет *FLOW-3D*

Пакет *FLOW-3D* от компании *Flow Science, Inc.* обеспечивает полную симуляцию процессов *AM*.

Головной офис *Flow Science* расположен в штате Нью-Мексико. Последние шесть лет компания занимается тем, что поставляет своим клиентам ПО для симуляции процессов лазерной сварки и аддитивного производства. В числе клиентов – производители станков, конечные пользователи *AM*-технологий из автомобилестроительной и авиационно-космической отраслей, а также исследовательские лаборатории и академические университеты.

Вот что рассказал нам *Paree Allu*, специалист по вычислительной газогидродинамике (*CFD*) из компании *Flow Science*.

FLOW-3D позволяет симулировать весь *AM*-процесс, включая укладку порошка, раскатывание порошка роликом, расплав порошка лазерным лучом, формование слоя и затверждение расплава, и последовательно повторять эти шаги для процесса многослойной наварки порошка.

Многослойная симуляция *FLOW-3D* уникальна тем, что сохраняет температурную историю ранее затвердевшего слоя. Затем выполняются симуляции для нового слоя частиц порошка, наносимых на ранее отвердевший слой. Также с помощью *FLOW-3D* можно оценить термические деформации и остаточные напряжения отвердевшего слоя, но есть и возможность экспортировать данные о давлении и температуре в другие программные средства анализа методом конечных элементов (*FEA*).

Кроме того, *FLOW-3D* позволяет моделировать процессы для технологий струйной *3D*-печати

связующим веществом (*Binder Jetting*) и прямой послойной наплавки лазером (*Direct Energy Deposition, DED*). Так, для технологии разбрызгивания связующего вещества (клея) *FLOW-3D* моделирует инфильтрацию смолы и боковое уширение в слое порошка. Для процесса наплавки моделируются такие параметры, как скорость подачи порошка, распределение частиц по размерам, мощность лазера и скорость сканирования, которые могут влиять на толщину печатного слоя, рост и ориентацию гранул при кристаллизации.

В целом, пакет *FLOW-3D* позволяет моделировать широкий спектр процессов, которые входят в разные аддитивные технологии.

Для технологии выборочного лазерного спекания порошка в заранее сформированном слое (*Powder Bed Fusion, PBF*) функционал *FLOW-3D* обеспечивает возможность симулировать укладку и распределение порошка (рис. 5), динамику расплавления, зернистость и пористость, структуру поверхности (морфологию) и эволюцию микроструктуры, а также разрабатывать параметры процесса.

Для технологии прямой наплавки (*DED*) система позволяет проанализировать динамику расплавления слоя (рис. 6), форму и размеры верхнего слоя, структуру поверхности и эволюцию микроструктуры.

Для технологий струйной печати можно симулировать работу печатающей головки, распыление и укладку порошка, инфильтрацию и распределение связующего вещества.

“Используя пакет *FLOW-3D* и его [дополнительные] модули *DEM* (*Discrete Element Method* – метод дискретного элемента) и *WELD*, можно симулировать поведение порошка при его плавлении на уровне слоя”, – говорит *Paree Allu*. – “В число охваченных физических аспектов входят взаимодействие лазера с частицами, расплавление и отверждение, давление защитного газа, поверхностное напряжение, динамика порошка/частиц. Мультифизический подход делает возможной успешную разработку технологических окон для процесса образования сплавов и

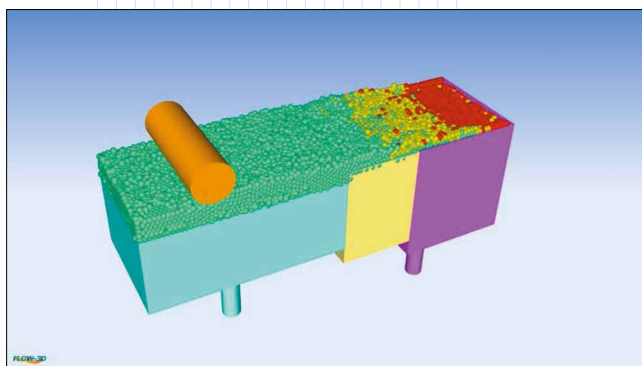


Рис. 5. *FLOW-3D*: симуляция процесса распределения порошка (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Flow Science*)

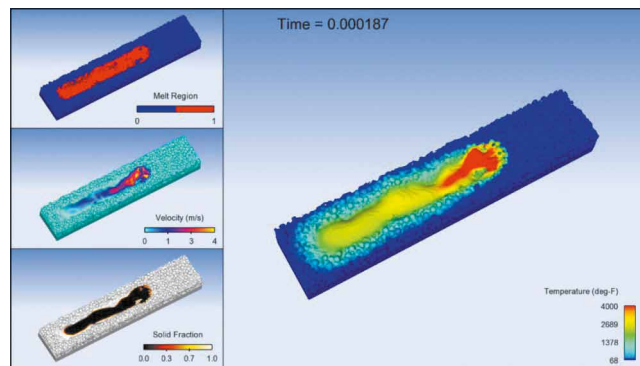


Рис. 6. *FLOW-3D*: симуляция расплавления слоя (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Flow Science*)

обеспечивает понимание эволюции микроструктуры”.

Мы спросили у представителя *Flow Science*, чем их продукт отличается от остальных.

Вот что сказал об этом, подводя черту, *Paare Allu*.

Существующее положение дел таково, что ПО для аддитивного производства фокусируется на температурно-механической симуляции, которая помогает моделировать в масштабе детали – например, выявлять термические деформации, остаточное напряжение и генерировать поддерживающие структуры.

Однако информация о динамике расплавления и связанных с этим дефектах (таких, как комки, пористость и др.), хотя она и была бы полезной, обычно оказывается вне рамок данного подхода. Поток жидкости, теплообмен и поверхностное натяжение расплава влияют на температурные градиенты и скорость охлаждения, которые, в свою очередь, влияют на эволюцию микроструктуры.

С помощью *FLOW-3D* можно точно симулировать распределение и укладку порошка, взаимодействие лазер/частица, динамику расплавления, структуру поверхности и последовательную эволюцию микроструктуры. *FLOW-3D* точно отражает состояние слоя расплава, учитывая все основные физические аспекты. Именно этот детальный анализ помогает пользователю понимать роль таких параметров процесса, как скорость сканирования, распределение мощности лазера, плотность укладки порошка и их влияние на качество получаемой на 3D-принтере детали.

Важно, что эти уникальные возможности реализованы в системе *FLOW-3D* с большой вычислительной эффективностью. Таким образом, *FLOW-3D* закрывает разрыв между разными уровнями моделирования процессов аддитивного производства, привлекая критически важные физические дисциплины, и при этом выдает результаты в сроки, соответствующие отраслевым стандартам. Кроме того, *FLOW-3D* может детально симулировать процессы струйной печати связующим материалом и прямого послойного наплавления.

6. Продукты компании ANSYS

Возможности симуляции 3D-печати, предлагаемые компанией *ANSYS*, называются “*Additive Suite*” и “*Additive Print*”. Они ориентированы на аддитивное производство металлических изделий – в частности, областью специализации компании является симуляция процессов в порошkovом слое. Рабочий процесс, который поддерживает *ANSYS*, показан на рис. 7.

Чтобы узнать о последних предложениях *ANSYS*, мы поговорили с *Masha Petrova* из службы маркетинга.

“В настоящий момент доступны два продукта *ANSYS*. Один называется *Additive Print*, а другой – *Additive Suite*”, – сказала

г-жа Петрова. – “*Additive Suite* – это не просто инструмент сам по себе, а набор программных средств, который предлагает *ANSYS* и который вобрал в себя всё, что есть под солнцем в области аддитивного производства. Итак, *Additive Suite* включает в себя:

- *Additive Print* – оптимизация топологии, оптимизация решетчатых структур;
- *Workbench Additive* – рабочее место механика;
- *Additive Science* – новый инструмент для симуляции микроструктуры и понимания свойств готовой печатной детали”.

Как и большинство компаний, упомянутых в этой статье, основное внимание *ANSYS* в настоящее время уделяет аддитивному производству изделий из металлов, особенно технологии расплавления заранее сформированного слоя порошка. В настоящее время компания изучает процессы прямой наплавки (*DED*), так как в них сейчас заинтересована авиационно-космическая отрасль.

“Хотя технологических проблем по симуляции *AM* пластиковых изделий нет, но пластик – дешевый для производства материал, так что несколько испорченных деталей не имеют большого значения”, – говорит г-жа Петрова.

И действительно, металлический порошок и станки, которые печатают из него детали, стоят очень дорого. Поэтому, здесь вступает в игру принцип “делать правильно с первого раза”.

Далее мы задали наши традиционные вопросы.

Чем инструменты *ANSYS* отличаются от предложений конкурентов?

Вот что рассказала г-жа Петрова.

Мы предлагаем два специализированных инструмента симуляции, которые поддерживают процессы печати по технологии расплавления сформированного слоя металлического порошка. Главная цель – уменьшить количество неудачных распечаток. Неудачные распечатки – абсолютная проблема для любого производителя, и её надо решать. Если симуляция действительно позволит вам смоделировать процесс и понять, где нужны поддерживающие структуры и как надо перепроектировать деталь, чтобы не было брака, и в результате у вас не будет перекосов, и пластина не треснет, и так далее – в этом случае ценность симуляции очень велика.

Проблема заключается в том, что другие *CAE*-инструменты, которые мы видим в данной области, не проектировались специально для операторов, конструкторов и людей, которые не имеют никакого отношения к симуляции, равно как и наоборот,



Рис. 7. Рабочий процесс *ANSYS AM* (иллюстрация любезно предоставлена компанией *ANSYS*)

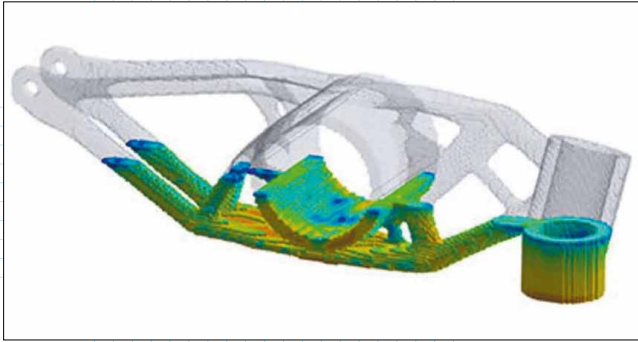


Рис. 8. Симуляция 3D-печати от ANSYS (иллюстрация любезно предоставлена компанией ANSYS)

специально для аналитиков, которые всё время занимаются симуляцией, – они пытаются сразу охватить и тех, и других. Зато ANSYS предлагает как раз два инструмента, и это – два разных решателя.

Итак, один из наших инструментов – решатель APDL, который используется в нашем решении Workbench Additive (входит в Mechanical Workbench) и разработан специально для аналитиков. ANSYS хорошо знает аналитиков и ... то, в чём аналитики нуждаются, поэтому и появился этот инструмент, который прекрасно вписывается в рабочий процесс инженерного анализа.

Помимо этого, у нас есть инструмент, который достался нам при поглощении 3DSIM. Этот инструмент использует совершенно другой процесс симуляции – применяет шаблон сканирования конкретного станка (так как у разных AM-станков разная логика). Таким образом, мы учитываем эту логику при симуляции, что дает нам совсем другой взгляд на процесс печати.

Из этих двух разных подходов мы получаем два разных приближенных представления одного физического процесса... Интерфейсы инструментов и [принимаемый во внимание] пользовательский опыт [тоже] оказались разными при проектировании ПО для двух разных групп людей (специалистов-аналитиков и инженеров), хотя это тот же самый процесс.

И это как раз то, чего в настоящий момент больше никто не делает. А во-вторых, ни у кого нет ничего близкого к тому, что предлагает решение Additive Science (входит в Additive Suite), которое, главным образом, позволяет экспериментировать с мощностью лазера и скоростью сканирования, чтобы увидеть, как эти факторы влияют на окончательные свойства детали.

У компании ANSYS есть и другие мысли о том, почему симуляция отличается от процессов реального мира, которые она старается имитировать.

“Возможно, большая часть расхождений вызвана недостатком знаний у пользователей”, – считает г-жа Петрова. – “Мы стараемся исправить это, объединив некоторые реально

хорошие учебные курсы для наших клиентов. Мы ведем онлайн-курсы, а также сотрудничаем с Луисвиллским университетом (шт. Кентукки), у которого есть великолепная AM-лаборатория, где мы можем проводить курсы с использованием оборудования. Я действительно считаю, что причиной многих различий является недостаток знаний”.

Упомянутые продукты доступны для пользователей ANSYS 19.1.

7. Система Materialise Magics

При подготовке статьи мы связались с компанией Materialise – ветераном мира 3D-печати, который уже десятки лет поставляет своим клиентам систему Magics для подготовки данных для печати.

Мы поговорили с Manuel Michiels, менеджером Materialise по программному обеспечению, чтобы узнать о том, что же его компания вносит в мир симуляции аддитивного производства.

“Materialise Magics является фактическим стандартом для подготовки данных при 3D-печати металлических изделий”, – сказал г-н Michiels. – “В текущем релизе мы выпустили в свет модуль Magics Simulation. Он полностью интегрирован в существующее программное обеспечение и позволяет нашим клиентам ввести симуляцию на производстве, встроить её в рабочий процесс бесшовно, без необходимости переключаться между пакетами программ”.

Действительно, недостаточная интероперабельность программ и разные типы файлов – проклятье всех инженеров, когда дело касается моделирования и симуляции.

“Модуль симуляции, ориентированный на металлопечать, использует метод внутренних механических напряжений, базирующийся на технологии Simufact, включая калибровку напряжений и систему управления симуляцией”, – поясняет г-н Michiels. – “В него бесшовно интегрированы инструменты визуализации (контр-)деформаций, линий усадок и коллизий с кромкой повторителя (распределителя порошка); также имеется возможность корректировать опорные структуры по результатам симуляции”.

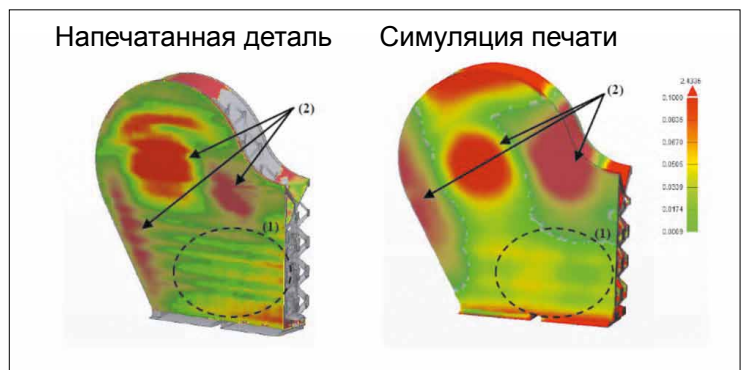


Рис. 9. Модуль Magics Simulation: сравнение реальной деформации с прогнозируемой (иллюстрация любезно предоставлена компанией Materialise)

В том, что касается инноваций, у *Materialise* есть несколько планов, как сохранить конкурентоспособность с другими компаниями, которые занимаются симуляцией 3D-печати.

“Мы планируем дальнейшее использование симуляции для форсирования рабочих процессов за счет автоматизации – например, оптимизация опорных структур, ориентация, формирование послойных траекторий... всего того, что поможет нашим клиентам использовать свои станки по максимуму”, – сказал г-н *Michiels*.

Что же отличает предложение *Materialise* от предложений их конкурентов?

“Рабочий процесс симуляции в *Materialise Magics* – полностью интегрированный”, – поясняет г-н *Michiels*. – “Это удобный путь привести симуляцию на производственный участок, вместо переключения между специализированными пакетами программ для симуляции”.

До этого мы уже спрашивали у других провайдеров ПО, насколько точной является их симуляция, и что служит главным источником расхождений между результатом симуляции и готовой деталью. Предоставить такую маркетинговую информацию им несложно; мы также хотим знать и об ограничениях каждого софта. Поэтому вполне логично, что и остальные компании мы тоже попросили ответить на те же вопросы.

Вот что рассказал по этому поводу г-н *Michiels*.

Опасность деформации, просчеты с опорными структурами – всё это улавливается уже за пару минут вычислений. Для более подробного анализа пользователю надо запускать процедуру калибровки и более детальный расчет, в результате чего легко достигается большая точность симуляции. Пользователь может самостоятельно выбрать степень детализации для симуляции, использовать быструю “грубую” симуляцию или более основательный анализ, результаты которого будут намного точнее.

Далее, пользователь может либо выбрать для своего АМ-станка учет его внутренних конструктивных напряжений и деформаций по умолчанию, либо использовать процедуру калибровки, чтобы получить более точное представление о поведении станка.

“В текущем релизе не охвачены проблемы локального нагрева. Но в будущем мы планируем избавиться от температурных перекосов при печати”, – сказал в заключение г-н *Michiels*.

8. Продукты от *Siemens*

Компания *Siemens* очень хорошо вписалась в ландшафт цифровых продуктов, охватывающих весь жизненный цикл изделий, поэтому неудивительно, что она активно вводит симуляцию аддитивного производства в рабочие процессы.

Мы поговорили с *Ashley Eckhoff*, менеджером *Siemens* по маркетингу инженерного ПО для

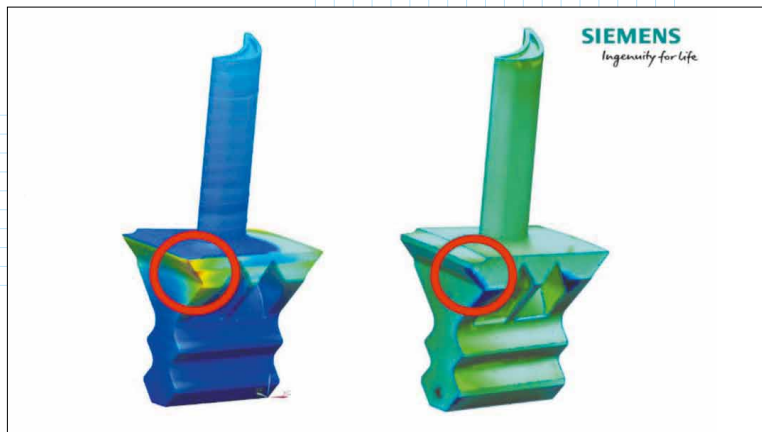


Рис. 10. Совпадение расчетного искажения формы лопатки при её печати (слева) и отклонения формы между исходной CAD-моделью и 3D-сканом реально напечатанной лопатки (справа).
(Иллюстрация любезно предоставлена компанией *Siemens*)

производства, о текущей ситуации и планах компании по симуляции АМ.

“Чем больше компаний и отраслей запускают у себя аддитивное производство как часть рабочего процесса выпуска своей продукции, тем более важной становится концепция “печатать правильно с первого раза”, – сказал г-н *Eckhoff*. – “В настоящее время для получения совершенного результата при печати изделий из металла требуется 3÷5 попыток. Чтобы выйти на промышленный уровень печати, нам нужно ориентироваться на правильную распечатку с первого раза”.

Очевидно, что концепция правильной печати с первого подхода жизненно важна для высокотехнологичных производственных компаний, которые надеются использовать аддитивные методы производства. Принтеры и сырье для печати металлических изделий стоят очень дорого – с позиции экономики, здесь мало места для ошибок или переделок.

“Для правильной печати с первого раза, важно симулировать процесс построения для всего рабочего пространства (модельного лотка), включая опорные структуры”, – поясняет г-н *Eckhoff*. – “Это позволяет смоделировать тепловое взаимодействие между деталями, опорными структурами и остаточным порошком в лотке. Более того, это важно для того, чтобы предусмотреть геометрическую корректировку конструкции детали и подпорок, что необходимо для противодействия температурным деформациям в процессе построения”.

А в чём же заключается уникальность подхода *Siemens* к внедрению симуляции аддитивного производства в массы?

“Прагматичный подход *Siemens* предусматривает, что симуляция базируется на гибридном наборе данных о микроструктуре, который объединяет расчетную и эмпирическую информацию”, – говорит г-н *Eckhoff*. – “Этот оригинальный подход позволяет калибровать процесс для обеспечения непрерывного улучшения результатов симуляции.

Кроме того, *Siemens* видит большую ценность в автоматизации взаимодействия на этапах проектирования, численного моделирования и производства, чтобы минимизировать усилия по изготовлению печатных деталей с первого подхода”.

По поводу точности симуляции и возможных расхождений нам стало ясно следующее: *Siemens* всё еще работает над этим, так как их модуль симуляции аддитивного производства пока еще относительно новый продукт.

“*Siemens* интенсивно работает с клиентами, которые стали пионерами в применении симуляции печати, чтобы проверить точность наших процессов симуляции”, – сказал г-н *Eckhoff*. – “Получаемая нами обратная связь помогает нам повышать качество и точность результатов нашей симуляции.

Точность решения очень сильно зависит от точности исходных сеток для симуляции. Мы ведем дополнительные исследования по чувствительности сетки с целью минимизации усилий, необходимых для качественной печати с первого раза”.

И наконец, какие же инновации планирует вводить *Siemens* для симуляции аддитивного производства?

“*Siemens* изучает, как использовать симуляцию, чтобы противодействовать деформациям путем выявления зон локального перегрева с последующей коррекцией процесса печати таких областей”, – говорит г-н *Eckhoff*. – “Компания *Siemens* работает над развитием симуляции для пластиков, а также симуляции прямой наплавки (*DED*) и процессов струйной печати”.

9. *Digmat* от *e-Xstream* / *MSC*

Компания *e-Xstream*, основанная в 2003 году как филиал Лувенского католического университета (Бельгия), была приобретена корпорацией *MSC Software* в 2013 году. За это время компания стала экспертом в области многоуровневого моделирования композитных материалов и структур. В последнее время она распространила этот опыт на сферу симуляции 3D-печати, и теперь список её клиентов представляет все аспекты высокотехнологичного производства.

Кроме того, *e-Xstream* – единственная компания, из тех, с которыми мы разговаривали, которая на 100% сфокусирована на процессах печати деталей из полимеров и композитов.

Мы побеседовали с **Olivier Lietaer**, инженером *e-Xstream* по развитию бизнеса для аддитивного производства, чтобы узнать, что может добавить эта компания к нашему обсуждению.

Вот что рассказал г-н *Lietaer*.

Основываясь на технологии моделирования материалов *Digmat* и технологии конечных элементов *MSC*, компания *e-Xstream* разработала интеграционное решение для аддитивного производства, которое предлагает уникальную комбинацию анализа материалов, симуляции процессов и прочностного анализа, позволяющую ответить на ключевые вызовы *AM*-отрасли.

Во-первых, в том, что касается материалов, *e-Xstream* дополняет свои инструменты инженерного анализа материалов (*Digmat-MF* и *Digmat-FE*) возможностями виртуального сочетания новых *AM*-материалов с симуляцией их поведения в ходе печати. Продвинутые модели материалов, учитывающие анизотропность, создаются, сохраняются и распространяются через базу данных *Digmat-MX*. Благодаря этим инструментам, пользователи могут существенно уменьшить количество физических тестов, лучше понять основные параметры, управляющие поведением материала, и без труда создавать из него новые структуры, такие как легкие решетки.

В том, что касается процесса печати, используется *Digmat-AM* – новое программное решение, которое было разработано для обеспечения правильной печати с первого раза путем симуляции *FDM* (*Fused Deposition Modeling* – моделирование методом послойного наплавления) и *SLS* (*Selective Laser Sintering* – выборочное лазерное спекание) для армированных материалов. *Digmat-AM* помогает просчитывать проблемы наперед, прогнозировать коробление и компенсировать деформацию. Симуляция процессов – это ключевое средство для инженеров, чтобы они могли лучше понимать и оптимизировать настройки процессов за счет возможности оценить их влияние на коробление детали.

И, наконец, в отношении свойств детали *e-Xstream* расширяет свое решение *Digmat-RP* для прочностного анализа, чтобы инженеры могли проверить свою конструкцию, прогнозируя характеристики напечатанной детали (жесткость, прочность и пр.) как функцию материала и таких настроек печати, как траектория головки или направление построения. Улучшения в отношении точности симуляции, обеспечиваемой *Digmat*, позволяет уменьшить вес, затраты и сроки выхода на рынок одновременно с уменьшением необходимости в тестировании материалов и прототипировании.

Таким образом, платформа моделирования материалов *Digmat* в значительной части была расширена с целью поддержки *AM*-материалов и производства, и теперь она предлагает инструменты симуляции, которые повторяют традиционный инженерный рабочий процесс для оптимизации материалов, [параметров] принтеров и самих деталей – как часть времени и затрат традиционного метода печати и тестирования.

Что касается характерных особенностей *Digmat AM*, компания *e-Xstream* говорит, что её программное обеспечение имитирует реальный рабочий процесс печати, учитывая настройку принтера и параметры материала, и использует собственный решатель *MSC* для нелинейного анализа методом конечных элементов (*FEA*) – *MSC MARC*. Кроме того, *e-Xstream* со всей очевидностью стремится сделать свои продукты доступными для широкого круга пользователей.

“Совершенно ясно, что наш рабочий процесс, поддерживаемый дружественным пользователю графическим интерфейсом, не предназначен исключительно для FEA-экспертов. Опираясь на методы многоуровневого моделирования материалов и методы оценки внутренних напряжений, система *Digmat-AM* обеспечивает быстрое решение для симуляции процессов. Начиная с последнего релиза (*Digmat 2018.1*), новый решатель предлагает полностью взаимосвязанную температурно-механическую симуляцию, что необходимо для более углубленного анализа и большей точности, а также модуль кинетики кристаллизации. Теперь инженеры-технологи полностью вооружены, чтобы понимать и оптимизировать настройки параметров для производства”, – утверждает *Olivier Lietaer*.

В чём уникальность *Digmat AM*? Что *e-Xstream* может делать такого, чего не может никто другой?

“*e-Xstream Engineering* – это компания, занимающаяся моделированием материалов. Система *Digmat* является результатом 15-летней исследовательской работы по многоуровневому моделированию и нелинейной микромеханике в сотрудничестве с университетами и исследовательскими центрами, она базируется на партнерстве с ключевыми игроками этой отрасли. Таким образом, работа с упрочненными материалами и продвинутыми моделями материалов для аддитивного производства – это просто логичное продолжение наших предыдущих разработок (таких, как литье под давлением). Для нас полимер с наполнителем – обычное дело”, – говорит г-н *Lietaer*. – “Система *Digmat* обладает самой большой базой моделей композитных материалов, в ней уже свыше 270 классов и 14 500 *Digmat*-моделей материалов. *Digmat-MX* используется как рыночная площадка для связи между поставщиками материалов и конечными пользователями. В настоящее время эта база заполняется данными о серийно выпускающихся высокопроизводительных моделях принтеров для AM и материалах – таких, как стеклопластики и углепластики *Solvay KetaSpire PEEK (FFF)*, термопластики *Stratasys ULTEM9085* и *1010 (FDM)*, порошки *Solvay Sinterline (SLS)*”.

С такой впечатляющей родословной в сфере материалов и симуляции можно ожидать, что у *e-Xstream* будет что сказать на тему точности симуляции.

Действительно, компании *e-Xstream* очень близка тема расхождений между симуляцией и реальной жизнью – она даже смогла выразить их в численном виде!

“Компания *e-Xstream Engineering* в партнерстве со всей экосистемой AM, включая поставщиков материалов,

производителей принтеров, исследовательские институты и конечных пользователей, занимается разработкой, верификацией, валидацией и улучшением цифровых инструментов симуляции”, – говорит г-н *Lietaer*. – “Кроме того, у нас есть давняя традиция предоставления услуг инженерного анализа, что позволяет нам быть в курсе реальных задач клиентов и постоянно оценивать свои инструменты. В отношении прогнозируемой точности на растяжение мы обычно получаем ошибку порядка 5% по сравнению с результатами реального эксперимента”.

Обладая таким точным знанием величины погрешности, компания наверняка должна знать и причину расхождений. Делайте ставки.

“С позиции процесса симуляции, главными вызовами, которые были выявлены изысканиями наших клиентов, является необходимость правильно учитывать температурную среду и историю, а также моделирование опор”, – сказал г-н *Lietaer*. – “Со стороны свойств детали к озвученным вызовам добавляется влияние механического поведения конструкции, микроструктуры, а также таких дефектов, как пористость или воздушные зазоры, шероховатость поверхности, которые играют важную роль в разбросе результатов экспериментов и последующей надежности результатов симуляции”.

Однако в *e-Xstream* не довольствуются тем, что они являются владельцами самой большой базы данных о композитных материалах – они оптимистично считают, что сохраняют свою инновационность и конкурентоспособность на рынке.

“Первые релизы стали начальными вехами на долгом и захватывающем пути по многим другим типам принтеров, материалам и методам моделирования, которые будут добавляться в нашу систему по мере выхода новых релизов”, – говорит г-н *Lietaer*. – “На этом длинном пути, наряду с другими инновациями, *e-Xstream* будет опираться на свой большой опыт моделирования в отношении печати несколькими материалами”.

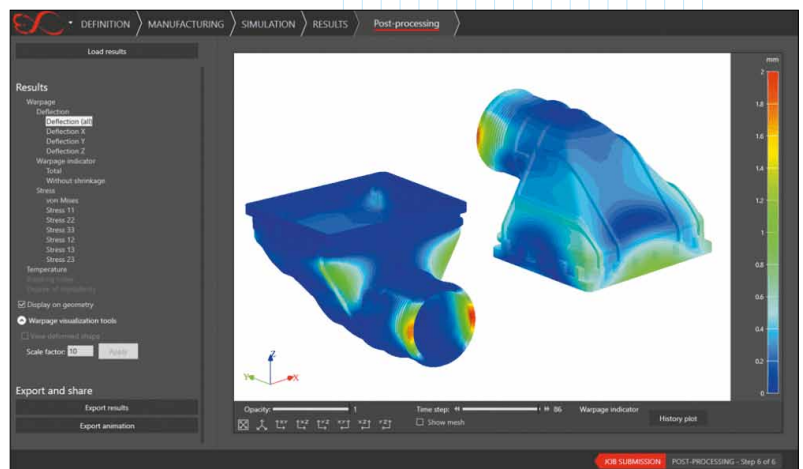


Рис. 11. Анализ коробления в среде *Digmat-AM* (иллюстрация любезно предоставлена *e-Xstream/MSC*)

10. Приложения от Dassault Systèmes

Затем мы поговорили с **Subham Sett** из *Dassault Systèmes*, директором подразделения *SIMULIA* по стратегическим инициативам. Вот что он рассказал.

Платформа *3DEXPERIENCE* от *Dassault Systèmes* предлагает следующие приложения для симуляции 3D-печати: *Functional Generative Design*, *Additive Manufacturing Programmer*, *Additive Manufacturing Researcher* и *Reverse Shape Optimizer*. Все эти приложения являются модельно-ориентированными, что позволяет пользователям бесшовно переключаться между различными функциями в ходе конструирования, подготовки производства и симуляции.

Приложение для генеративного проектирования (*Functional Generative Design*) обеспечивает оптимизацию топологии детали, настраиваемую в соответствии с конкретными АМ-ограничениями, а также плавный, осуществляемый за один щелчок, переход от результатов оптимизации обратно к геометрии.

Приложение *Additive Manufacturing Programmer* позволяет подготовить обработку на виртуальном станке: ориентировать детали и вкладывать одну в другую, формировать оптимизированную геометрию опорных структур, генерировать траекторию головки.

Additive Manufacturing Researcher осуществляет температурно-механическую симуляцию и симуляцию внутренних напряжений для прогнозирования перекосов, остаточного напряжения и микроструктуры.

Приложение *Reverse Shape Optimizer* позволяет на основе расчетов компенсировать деформацию.

Итак, чем продукты *Dassault Systèmes* отличаются от остальных?

“Компания *Dassault Systèmes* предлагает единую программную среду (как облачную, так и локальную), которая позволяет создать сквозной цифровой поток, объединяющий процессы оптимизации конструкции, изменения геометрии, планирования печати, симуляции печати и последующих операций, а также симуляцию эксплуатации”, – говорит г-н *Sett*. – “При помощи своего FEA-решателя *Abaqus* компания обеспечивает настраиваемую основу для поддержки АМ-процессов любых типов, включая спекание слоёв порошка, прямую наплавку (*DED*), струйную печать и процессы,

которые еще только предстоит изобрести. Многодисциплинарное моделирование – в диапазоне от симуляции температурно-механических процессов, внутренних напряжений и микроструктуры до симуляции операций термообработки, удаления опор и эксплуатации – доступно как для целей промышленного производства, так и для проведения комплексных исследований. Более того, компьютерное проектирование материалов и их анализ связывают область симуляции на микроуровне с металлургической фазой анализа трансформации и свойств материала при печати, а также с возможностью полного моделирования соединений, повреждений, усталостных характеристик”.

А что делает *Dassault Systèmes* в плане будущих инноваций на своей платформе?

“Предоставляя такие инновационные продукты, как [интернет-площадка] *3DEXPERIENCE Marketplace*, компания *Dassault Systèmes* ориентируется на рационализацию процессов аддитивного производства по запросу – от 3D-моделей до изготовления реальных деталей – за счет сотрудничества с ведущими цифровыми производителями, осуществляемого в рекордные сроки”, – говорит г-н *Sett*. – “*Marketplace PartSupply* соединяет среды проектирования с каталогом поставляемых поставщиками компонентов, чтобы на этапе проектирования можно было выбирать наиболее подходящие детали, а *Marketplace Make* проверяет [3D-модель] на технологичность, повторяемость, качество и выбирает подходящие Бюро производственного сервиса в экосистеме *Dassault Systèmes*, объединяющей поставщиков услуг”.

Что же касается точности симуляции и расхождений, то, похоже, *Dassault Systèmes* в этой теме разбирается лучше всех.

“По оценке института *NIST*, симуляция аддитивного производства от *Dassault Systèmes* дает самую высокую точность прогнозирования остаточного напряжения (*AM-Bench 2018 Benchmark*)



Рис. 12. 3DEXPERIENCE: один из возможных рабочих процессов для АМ (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Vias Inc.*)

Challenge Submissions and Awards). Среда *Dassault Systèmes* для моделирования микро-структуры обеспечивает подтверждаемый прогноз свойств микроструктуры, имеющий взаимно-однозначное соответствие с такими механическими характеристиками на макроуровне, как модуль Юнга, предел текучести, прочность на разрыв”, – сказал г-н *Sett*. – “Причиной отличий являются: методы симуляции и допущения, данные о материале и допущения моделирования, надежность симулирования, ошибки физических измерений и повторяемость самого процесса печати”.

11. Продукты компании COMSOL

Последней по списку, но не по значимости, идет *COMSOL*.

Компания серьезно инвестирует в сферу мультифизической симуляции и имеет хорошие возможности использовать свой опыт для симуляции аддитивного производства – ведь природа аддитивного производства такова, что охватывает множество физических дисциплин!

Мы побеседовали с ***Bjorn Sjodin***, вице-президентом *COMSOL, Inc.* по управлению продуктами, чтобы больше узнать о предложениях компании.

“Клиенты *COMSOL* применяют для 3D-печати множество [наших программных] продуктов”, – сказал г-н *Sjodin*. – “Чаще всего эти расширения используются в сочетании с платформой *COMSOL Multiphysics*, включая модули *Structural Mechanics* (Механика конструкций), *Nonlinear Structural Materials* (Нелинейные конструкционные материалы) и *Heat Transfer* (Теплообмен).

Кроме того, некоторые клиенты для симуляции 3D-печати добавляют электромагнитный и химический анализы, которые обеспечивают *AC/DC Module* и *Chemical Reaction Engineering Module* (Разработка химических реакций). Модуль *Structural Mechanics* может обрабатывать наплаивание материала в текучем состоянии с помощью техники под названием *Material Activation* (активация материала)”.

Чем отличается платформа *COMSOL Multiphysics* от продуктов конкурентов?

“Уникальность *COMSOL Multiphysics* в том, что наши продукты являются набором инструментов для исследования всех аспектов процесса печати”, – поясняет г-н *Sjodin*. – “У нас есть такие клиенты, которые разрабатывают оборудование для аддитивного производства и полагаются на наши программные инструменты для дальнейшего совершенствования своих методов печати. Они применяют наши инструменты, чтобы лучше понимать физику своего процесса аддитивного производства, а также для поиска новых идей в отношении того, как изменить физический процесс, чтобы повысить производительность.

Благодаря обширным междисциплинарным возможностям нашего набора продуктов, клиенты могут экспериментировать с разными физическими процессами, дополнять их [исследованием] электромагнитных и даже акустических полей (например, добавляя магнитные поля катушек), что может улучшить качество конечного изделия”.

Будучи специалистом по многим аспектам физики, компания *COMSOL* планирует и впредь вводить в свои продукты для симуляции новые направления.

“Мы всегда ищем способы удобным образом интегрировать различные физические явления в [процедуры] моделирования и симуляции аддитивного производства. Этот процесс может быть очень сложным, и я считаю, что в будущем мы увидим в аддитивном производстве еще больше междисциплинарного моделирования”, – говорит г-н *Sjodin*.

А насколько точно симуляция *COMSOL* соответствует реальной жизни?

“Любому программному обеспечению для симуляции, в том числе и *COMSOL*, трудно достичь того уровня точности, который обеспечивает традиционный механический анализ”, – считает г-н *Sjodin*. – “Общей проблемой является недостаточное знание свойств материалов. Тем не менее, аккуратно комбинируя эффекты прочностных и температурных нагрузок, фазовых переходов и химических процессов, мы можем улучшить результаты”.

Что касается причин различий между результатами симуляции и напечатанной деталью, то у *COMSOL* на этот счет есть свои идеи.

“Когда дело доходит до добавления материала, то процесс нуждается в какой-то дискретизации или дигитализации”, – поясняет г-н *Sjodin*. – “Процесс делится на управляемые

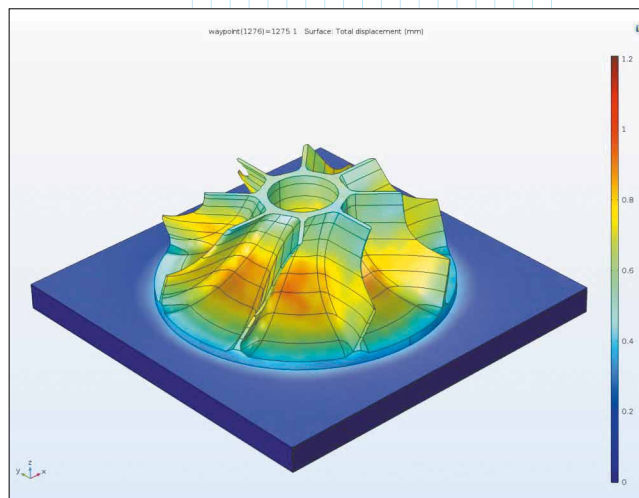


Рис. 13. Графическое отображение деформаций при печати интеллекта (иллюстрация любезно предоставлена *The Manufacturing Technology Centre*)

подзадачи. Чем больше подзадач, тем выше точность, но продолжительнее время симуляции. Компромиссы такого типа и являются основным источником отличий симуляции от реальной жизни. Другие причины ошибок могут включать недостаточные знания свойств материала, а также непонимание всех физических явлений, которые в действительности происходят в процессе аддитивного производства”.

Заключение

Подведем итоги. Как вы можете видеть, симуляция – область активности CAE-провайдеров всех направлений, и все они участвуют в гонке за общую цель: обеспечить достоверную симуляцию, которая позволит их клиентам реализовать принцип “печатать *правильно с первого раза*”.

Очевидно, что эти цели особенно важны для высокотехнологичного аддитивного производства в таких отраслях, как авиакосмическая, военная и медицинская промышленность, где сырье стоит дорого, а ключевым моментом является соблюдение всех требований.

Интересно читать ответы разных компаний про точность их средств симуляции и причины расхождений с жизнью. На одинаковые вопросы мы, по большей части, получили совсем разные ответы.

Одни разработчики считают, что причина расхождений кроется в недостаточном понимании особенностей их программного обеспечения пользователями, другие – в пробелах в знаниях о материалах или недостаточном понимании физики процесса. Различие ответов на этот вопрос показывает, как далеко нам еще надо идти, чтобы достичь унифицированного понимания этих процессов и обеспечить их симуляцию!

Каковы бы ни были причины, стремление к точности симуляции не имеет границ, и компании, которые продемонстрируют непротиворечивые и повторяемые результаты симуляции, смогут заполучить крупных клиентов.

Общим моментом, отмеченным респондентами, является то, что они хотят передать средства симуляции аддитивного производства из рук специалистов-аналитиков в руки конструкторов – то есть, на производственные площадки. Одним из способов достижения этого является повышение удобства использования за счет дружественного пользователю графического интерфейса.

Кроме прочего, большинство компаний, с которыми мы говорили, фокусируется на том, чтобы более тесно интегрировать свои платформы в PLM-системы и существующие рабочие процессы. Интеграция и доступность определенно являются темой дня. 👁

◆ Выставки ◆ Конференции ◆ Семинары ◆

rosmould

Международная выставка производственных технологий нового поколения

18–20 июня 2019
+ МВЦ «Крокус Экспо», Москва

- Дизайн и проектирование изделий
- Аддитивные технологии
- Формы, пресс-формы и штампы
- Сырье и материалы
- Оборудование и оснастка

QR code: www.rosmould.ru

messe frankfurt mesago
Messe Frankfurt Group