

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

Е.А. Летов, М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов

В работе проведен анализ программных решений, применимых при моделировании быстропротекающих физических процессов аддитивных технологий наплавки. Задача моделирования таких процессов для прогнозирования свойств создаваемых покрытий является одной из самых трудоемких с точки зрения применяемых информационных средств. Большие объемы данных, высокая скорость изменения значения показателей и высокие требования к достоверности результатов накладывают жесткие требования к применяемым программным средствам.

Рассматриваются не только средства моделирования, но и программы, облегчающие построение моделей (включая ввод больших массивов данных), а также средства визуализации как самого процесса, так и полученных результатов. Проанализированы отличительные особенности, математическая основа, плюсы и минусы различных программных продуктов (Dytran, FlowVision, SYSWELD, ANSYS, Marc). Выявлено, что на сегодняшний момент не существует готового специализированного программного продукта, способного моделировать данный процесс в совокупности. Применение универсальных решений требует большого количества времени на формирование модели и может не принести достоверных результатов.

Сделаны выводы о потенциале и практической применимости рассмотренных программных средств для построения математической модели аддитивной технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

Ключевые слова: быстропротекающий физический процесс, аддитивные технологии, сверхзвуковая газопорошковая наплавка, газовый поток, порошковые материалы, концентрированные потоки энергии, система автоматизированного проектирования (САПР), математическое моделирование, прогнозирование свойств, программные продукты, математический аппарат, средства визуализации

В последнее время для решения технологических задач по созданию защитных покрытий на деталях машин и инструменте стали применяться аддитивные технологии с использованием концентрированных потоков энергии и, в частности, сверхзвуковая газопорошковая наплавка (СГП-наплавка) [1-9].

СГП-наплавка является быстропротекающим физическим процессом. Задача моделирования такого процесса для прогнозирования свойств создаваемых покрытий является одним из самых трудоемких с точки зрения применяемых информационных средств. Большие объемы данных, высокая скорость изменения значения показателей и высокие требования к достоверности результатов накладывают жесткие требования к применяемым программным средствам.

Для решения прикладной задачи реализации математической модели процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки изу-

чен ряд программных средств решения прикладных задач в других областях науки, оценен их потенциал и практическая применимость для решения поставленной задачи. В данной статье рассматриваются не только средства моделирования, но и программы, облегчающие построение моделей (включая ввод больших массивов данных), а также средства визуализации как самого процесса, так и полученных результатов.

Dytran – система моделирования быстропротекающих существенно нелинейных процессов взаимодействия конструкции и жидкости (газа) или конструкции и конструкции, в том числе их разрушения. Основой Dytran являются совместная работа решателей Лагранжа (моделирование твёрдых тел) и Эйлера (моделирование жидкости/газа), а также широкий спектр моделей материалов (включая гидродинамическую) и различные типы уравнений состояния жидкой среды (га-

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

за). Одной из отличительных возможностей Dytran является моделирование работы материала со сдвиговой жёсткостью в эйлеровой постановке. Это позволяет моделировать физические явления с присутствием неограниченных деформаций, различные гидродинамические процессы, в том числе гидроудары, а также решать задачи по моделированию и анализу специальных динамических воздействий на конструкцию (взрыв, пробитие и т.п.).

При решении поставленной прикладной задачи важным плюсом применения данной системы является возможность динамического взаимодействия жидкости/газа и конструкции. В том числе, и взаимодействие нескольких жидкостей/газов (с различными свойствами) в одной модели. Это позволит реализовать в математической модели не только процессы, протекающие в пределах газовой струи, но и реализовать взаимодействие газовой струи с соплом горелки (оценить влияние формы сопла на формирование формы струи). Кроме того, перспективным является включение в модель описания частиц наплавленного сплава в качестве твердых тел. Это позволит смоделировать процесс формирования наплавленного слоя (глубину проникновения частиц наплавленного металла, процент частиц, не вступивших в реакцию с поверхностью и т.д.).

В Dytran применяется явная схема интегрирования, не требующая декомпозиции матриц и, вследствие этого, особенно эффективная для решения нелинейных задач. Специально для задач большой и сверхбольшой размерности Dytran поддерживает распараллеливание задачи по узлам кластера для моделирования взаимодействия жидкости и конструкции – Fluid Structure Interaction (FSI) в режиме Distributed Memory Parallel (DMP). В основе Dytran лежит явный метод интегрирования дифференциальных уравнений по времени. Программа векторизована и может эффективно применяться на ЭВМ, поддерживающих параллельную обработку данных. Dytran предоставляет возможность выполнения структурного конечно-элементного анализа, анализа динамики жидкости и взаимодействия конструкция – жидкость/газ. Для Dytran в качестве препроцессора и постпроцессора служит Patran.

Patran обеспечивает интеграцию систем геометрического и конечно-элементного моделирования, анализа и обработки результатов расчета и предназначен для углубленных исследований работоспособности и оптимизаций изделий на стадиях проектирования,

производства и эксплуатации. Patran с помощью настраиваемого графического интерфейса и интерактивной справочной системы предоставляет эффективные возможности по импорту геометрических моделей из CAD систем, созданию и редактированию геометрии, генерации конечно-элементных сеток, подготовке и настройке расчетных моделей, обработке результатов [10].

К минусам данной программы нужно отнести большое время первичного освоения (особенно без опыта работы с подобными системами), высокую стоимость приобретения лицензии на продукт и самое главное – ограниченные возможности системы по применению математической модели.

FlowVision - CAE-система вычислительной аэро-, гидро- и газовой динамики. Позволяет моделировать течение жидкости и газа в любых промышленных и природных объектах с учетом физических эффектов: турбулентность, теплопередача, фазовые переходы, горение и прочее. Основан на численном решении уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости и газа.

Из отличительных особенностей нужно отметить наличие расчетной сетки. Реализована технология полностью автоматического построения расчетной сетки вне зависимости от сложности обводов геометрии. Имеется возможность моделирования поведения подвижных недеформируемых и деформируемых тел под воздействием набегающего потока. Программный комплекс реализован в рамках архитектуры "клиент-сервер", где разные функциональные приложения выделены в отдельный исполняемый файл. В частности, благодаря тому, что блок решателя является отдельным исполняемым файлом, упростилось его портирование на различные программно-аппаратные платформы, а также интеграция в прочие системы. Параллелизм положен в основу написания алгоритмов для всех этапов расчета. Поддерживаются параллельные вычисления для кластеров с распределенной памятью (на базе библиотеки межпроцессорных коммуникаций MPICH 2.0), а также многонитевая технология для систем с общей памятью [11].

Из отличительных особенностей также стоит отметить наличие компонента KompasFlow для Компас 3D 17.1. Система достаточно проста в освоении по сравнению с другими аналогами. Из минусов нужно отметить невозможность моделирования тепловых процессов, а также невозможность построения модели взаимодействия нескольких твердых тел (например, частицы напла-

ляемого порошкового сплава и наплавляемая поверхность) между собой.

SYSWELD – мощный комплекс программ для инженерных расчетов процессов сварки и термической обработки. SYSWELD моделирует термическую обработку металлов и сварочные процессы; внутренние напряжения, деформацию, твердость и прочность материалов, подвергнутых данным технологическим обработкам. SYSWELD содержит следующие модули:

Welding Wizard - моделирует происходящие во время сварки физические процессы;

Heat treatment - моделирует физические процессы, происходящие во время термообработки;

Sysweld Assembly – модуль моделирования сборки и сварки больших конструкций. Оперирует величинами, переданными из предыдущих модулей (поля напряжений и деформаций) с целью создания единого напряженно-деформированного состояния (НДС) всей конструкции.

Изначально программный комплекс не предназначен для анализа процессов сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Однако имеет очень большой программный потенциал по анализу сварочных процессов и наиболее полно охватывает все протекающие при сварке и наплавке процессы. Для построения физической модели конструкции применяется программный модуль Welding Wizard, содержащий удобные для моделирования процесса сварки пользовательские оболочки препроцессора и постпроцессора.

В Welding Wizard доступны следующие варианты моделирования:

- построенная на основе двумерных конечных элементов расчетная модель объекта;

- модель объекта, построенная на основе трехмерных конечных элементов;

- модель на основе двумерных и трехмерных элементов.

Возможно, решение тепло-металлургической задачи определения теплофизических характеристик стали, а также задания термокинетической диаграммы зависимости металлургических фаз от скорости охлаждения образца исследуемого сплава.

С использованием программного кода связываются точки выпадения фаз с температурой нагрева и скоростью охлаждения. Далее по этим данным тепло-металлургической задачи решается задача

механики с использованием аналитической модели объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака.

Одновременно с тепловой задачей решается металлургическая задача на основе модели Леблонда, описывающей процесс металлургического превращения одной фазы в другую в зависимости от времени фазового превращения и скорости нагрева или охлаждения материала при диффузионном металлургическом процессе.

Кроме тепловой и металлургической задач возможно решение задачи механики - определения термических деформаций с применением модуля упругости первого рода, коэффициента Пуассона, коэффициента теплового расширения, и кривых упрочнения для металлургических фаз. Программа, решая задачу механики использует данные рассчитанных температурных полей и данные решения металлургической задачи [12].

Таким образом, программный комплекс охватывает весь спектр процессов, протекающих при сварке. При построении модели процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки возможно описание наплавляемой поверхности любых геометрических форм. При этом учитываются все термические и механические процессы, протекающие на наплавляемой детали. Минусом данного программного средства является отсутствие возможности моделирования процессов, протекающих в газопорошковой струе при СГП-наплавке.

ANSYS - CAE-инструменты (Computer-aided engineering), предназначенные для оптимизации разработок на начальных этапах проектирования, снижения стоимости выпускаемой продукции, а также для сокращения цикла разработки нового изделия и минимизации количества натурных испытаний. Набор программных продуктов ANSYS является передовым комплексом средств компьютерного инженерного моделирования, использующим метод конечных элементов. Инструменты ANSYS позволяют решать всевозможные задачи из различных областей физики: конструкционные, тепловые, гидрогазодинамические, электромагнитные, а также междисциплинарные (с сопряжением различных областей физики).

ANSYS содержит в себе следующие компоненты: расчетная платформа, динамика и прочность, теплообмен, долговечность, динамика жидкостей и газов, междисциплинарный анализ, оптимизация, сеточные генераторы, электромеханика, вы-

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

сокочастотные устройства, явная динамика, высокопроизводительные вычисления, управление расчетами, подготовка геометрии, специализированные приложения, академические решения [13].

Таблица 1. Сводные результаты анализа

Название программы	Основа математического аппарата	Отличительные особенности	Плюсы	Минусы
Dytran	- решатели Лагранжа (моделирование твёрдых тел) и Эйлера (моделирование жидкости/газа)	- применение явной схемы интегрирования, не требующей декомпозиции матриц	- возможность динамического взаимодействия жидкости/газа и твердых тел	- большое время первичного освоения программного средства - высокая стоимость
FlowVision	- численное решение уравнений Навье-Стокса	- наличие компонента KompasFlow для Kompas 3D 17.1 - реализация программного комплекса в рамках архитектуры "клиент-сервер"	- технология полностью автоматического построения расчетной сетки вне зависимости от сложности обводов геометрии - возможность моделировать поведение подвижных тел - возможность льготного использования студентами и аспирантами	- невозможность моделирования тепловых процессов - невозможность построения модели взаимодействия нескольких твердых тел
SYSWELD	- аналитическая модель объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака - модель Леблонда - коэффициент Пуассона	- одновременное решение металлургической и тепловой задачи, а также задач механики	- программный комплекс охватывает весь спектр процессов, протекающих при сварке	- отсутствие возможности моделирования процессов, протекающих в газовой и газопорошковой струях - высокая стоимость
ANSYS	- метод конечных элементов	- большой спектр решаемых задач	- возможность моделирования всех анализируемых процессов, протекающих при сверхзвуковой газопорошковой наплавке	- требуется создание отдельной математической модели для каждого моделируемого процесса - большое время первичного освоения программного средства - высокая стоимость
Marc	- численные методы		- возможность моделирования всех анализируемых процессов, протекающих при сверхзвуковой газопорошковой наплавке	- большое время первичного освоения программного средства - высокая стоимость - большая универсальность программного средства

Данное программное средство по совокупности возможных выполняемых задач способно перекрыть все анализируемые процессы при построении модели процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Однако при этом потребуются создание отдельной математической модели для каждого моделируемого процесса. Кроме того, при применении метода конечных величин часто требуются гораздо большие операционные мощности для проведения вычислений.

Интегрированное решение Magc позволяет проводить комплексный нелинейный анализ конструкций, решение сложных задач термостатичности, электро- и магнитостатики, моделирование технологических процессов. Magc также является универсальным комплексом, способным решать следующие задачи: расчет нелинейных процессов функционирования сложных изделий, расчет технологических процессов, расчет сварки, структурный анализ, потеря устойчивости и критическое поведение, прямой и модальный методы расчета динамики, частотный отклик, расчет на ударное воздействие – ударный спектр, связанные виды анализа: теплопрочностной, электростатической, пьезоэлектрической, тепло-электро-прочностной, акустической, магнитостатической, электромагнитной, взаимодействие конструкции с жидкостью/газом, тепловой анализ, междисциплинарные расчеты [10].

Таким образом, в рамках одной модели возможно реализовать не только основные протекающие процессы, но и учесть практически любые внешние и внутренние воздействия и параметры (плотность среды, давление струи горячей газовой смеси на наплавляемую поверхность, сопротивление поверхности и пр.). Однако стоит учитывать, что в основе данного программного комплекса лежат численные методы. Это крайне увеличивает объем обрабатываемых данных при решении поставленной задачи. В рамках модели необходимо отдельно рассматривать каждую частицу наплавляемого сплава, ее взаимодействие с газовой струей, наплавляемой поверхностью, средой, в которой происходит процесс, частиц между собой и прочие взаимодействия. При этом для каждой частицы необходимо учитывать сразу несколько процессов: термические, механические, динамические и другие процессы. Это значительно увеличит время обработки, и задача может быть вообще не реализуема без использования суперкомпьютеров [14].

При моделировании процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки необходимо учесть большое количество одновременно протекающих процессов. Так, в модели задействованы вещества (твердые тела, газ, расплав металлов и пр.) различных физических свойств. При разработке математической модели необходима оценка возможностей имеющихся программных средств. На сегодняшний момент не существует готового специализированного программного продукта, способного моделировать данный процесс в совокупности. Применение универсальных решений требует большого количества времени на формирование модели и может не принести достоверных результатов.

Использование специализированных решений, моделирующих сварочные процессы, не позволит реализовать модель в полном объеме.

Необходимо рассмотреть возможность создания на базе уже имеющихся универсальных программных средств специализированной среды, учитывающей особенности протекания процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки. В основу модели изначально необходимо заложить 8-10 основных протекающих процессов. Впоследствии нужно провести анализ их влияния на конечный результат, проверить сходимость результатов компьютерного моделирования и данных, полученных экспериментальным путем. Далее необходимо установить степень влияния и необходимость отображения каждого из протекающих процессов в рамках общего процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко, М.В. Комплексная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, С.Г. Уварова, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко // Сварка и диагностика. - 2011.-№1.- С. 54-58.
 2. Радченко, М.В. Методика прогнозирования качества защитных износостойких покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки на объектах Ростехнадзора / М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // Сварка и диагностика, 2014. - № 4.- С. 14-18.
 3. Радченко, М.В. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим
- ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2017**

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

слоем» газопорошковой наплавкой [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко, С. Г. Уварова // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 200–206.

4. Шевцов, Ю.О. Прогнозирование свойств наплавляемых защитных покрытий с использованием регрессионного анализа [Текст] / Ю. О. Шевцов, М. В. Радченко, С. А. Маньковский, С. Г. Уварова, Т. Б. Радченко // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 207–210.

5. Радченко, М.В. Экспериментальные исследования технологического процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки для объектов теплоэнергетики [Текст]/ М.В. Радченко, С.А.Маньковский С.А., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Радченко Т.Б. // Сварочное производство, 2009.- №7.- С. 28-31.

6. Радченко М.В. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим слоем» газопорошковой наплавкой [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко, С. Г. Уварова, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-2. – С. 244–250.

7. Киселев, В.С. Технологические аспекты контроля и диагностики процесса СГП-наплавки самофлюсующихся сплавов [Текст]/ В.С. Киселев, М.В. Радченко, Г.В. Матюхин, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов // Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 123-126.

8. Радченко, М.В., Уварова С.Г., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Марков В.А. Практика использования концентрированных потоков энергии для сварки и создания защитных покрытий [Текст]// Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 248-254.

9. Радченко, М.В. Разработка и изготовление устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки и анализ его

технологических характеристик [Текст]/ М.В. Радченко, Д.А. Нагорный, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко// Ползуновский вестник. - Барнаул: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та им. И.И. Ползунова, 2013. - № 4-2.- С. 55-59.

10. <http://www.mscsoftware.ru/>.

11. <https://flowvision.ru/>.

12. <http://sapr.ru/>.

13. <http://cae-expert.ru/>.

14. Полищук В. А. Математическое моделирование процессов сварки [Электронный ресурс] // Концепт, 2014. – Т. 20. – С. 356–360.

Летов Егор Александрович – аспирант кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 84997847285, e-mail: Egor_Letov@mail.ru.

Радченко Михаил Васильевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89039112852, e-mail: mirad_x@mail.ru.

Радченко Татьяна Борисовна – д.т.н., профессор кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89059851621, e-mail: mirad_x@mail.ru.

Киселев Вадим Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89293970327, e-mail: vadserkis@yandex.ru,

Шевцов Юрий Олегович – к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89132213520, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.