Если стержневая система имеет n узлов, то условия равновесия, указанные выше, образуют систему $6n$ линейных уравнений относительно $6n$ неизвестных. Решением этой системы определяются внутренние усилия, перемещения и углы поворота всех узлов конструкции в единой системе координат. Далее легко перейти к местной системе координат.

Таким образом, получен обобщенный алгоритм, позволяющий проводить анализ напряженно-деформированного состояния и частот собственных колебаний плоских и пространственных стержневых систем. Данный алгоритм апробирован при решении задач прочности различных конструкций приборов и систем машиностроительного профиля. Однако он может быть эффективно использован при исследовании биомеханических систем и в частности при анализе биомеханики остеосинтеза переломов стержневыми аппаратами внешней фиксации и пластинами ТХР.

1. Кормилицын О.П., Санкин Ю.Н., Малышев Ю.Н. Алгоритмы и программы анализа плоских и пространственных стержневых систем. М: ЦНТИ «Поиск», 1981

Негодяев В.О., Роганов Д.Л., Балякин А.В.
Конструкция коаксиальных сопловых головок

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева
(Россия, Самара)*

doi: 10.18411/lj-01-2021-61

idsp: ljjournal-01-2021-61

Аннотация

Проведен обзор существующих методов и систем формирования газопорошковых потоков, используемых в лазерных технологических установках прямого лазерного сплавления. Проанализированы тенденции развития и требования к инновационным технологиям в современном авиационном двигателестроении. Также рассмотрены технологии селективного лазерного плавления/спекания. Объектом изучения была выбрана перспективная инновационная технология прямого лазерного выращивания. Детально рассмотрена конструкция коаксиальных головок для прямого лазерного сплавления. Также были изучены и проанализированы другие виды сопловых головок, взвешены все плюсы и минусы каждого из видов. Проведен обзор существующих методов и систем формирования газопорошковых потоков, используемых в лазерных технологических установках.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, сопловые головки, коаксиальное сопло, конструкция.

Abstract

A review of existing methods and systems for forming gas-powder flows used in laser processing plants for direct laser fusion is carried out. The article analyzes the development trends and requirements for innovative technologies in modern aircraft engine building. Selective laser melting/sintering technologies are also considered. The object of study was a promising innovative technology of direct laser growth. The design of coaxial heads for direct laser fusion is considered in detail. Other types of nozzle heads were also studied and analyzed, and all the pros and cons of each type were weighed. The review of existing methods and systems for forming gas-powder flows used in laser technological installations is carried out.

Keywords: additive technologies, direct laser growing, nozzle heads, coaxial nozzle, design.

В настоящее время данная проблема изучена слабо. Так, в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Шпилева А. И. [6] на тему «Исследование и оптимизация газопорошковых потоков в головках для лазерной порошковой наплавки» были кратко рассмотрены все виды головок и движение газовых потоков внутри их каналов, но конструкция самих головок была изучена менее подробно.

Развитие отечественного двигателестроения требует разработки принципиально новых подходов к созданию, эксплуатации, обслуживанию и ремонту элементов современных и перспективных двигателей. В настоящее время изготовление большинства рабочих узлов двигателей осуществляется с использованием традиционных технологий, основанных на механической обработке заготовок получаемых методами литья и штамповки. При этом возможно удаление до 90% материала, что увеличивает технологические затраты на производство. Также значительна длительность цикла изготовления, трудоемкость и себестоимость детали. Вопрос снижения себестоимости особенно актуален в наукоемких отраслях, таких как авиация, космонавтика, медицина и др. Необходимыми условиями создания нового поколения авиационной и ракетно-космической техники являются увеличение удельной прочности конструкции, снижение их веса, увеличение полезной нагрузки транспортных, авиационных и космических систем за счет разработки новых подходов к конструированию, учитывающих современные возможности аддитивных технологий. Потенциальные преимущества использования аддитивных технологий в двигателестроении огромны [1].

Переход к новым технологиям позволяет получить более точную заготовку и увеличить коэффициент использования материала. Уменьшить число технологических операций постобработки и продолжительность технологического цикла изготовления деталей, что способствует, в свою очередь, повышению производительности технологического процесса при меньших материальных, энергетических и трудовых затратах. Таким образом, внедрение аддитивных технологий в промышленное производство является перспективным путем повышения технико-экономических показателей технологического процесса изготовления сложных конструктивных элементов современных двигателей из труднообрабатываемых дорогостоящих материалов.

Существует несколько типов труднообрабатываемых материалов, например, жаропрочные стали и сплавы на хромоникелевой основе, а также титановые сплавы. Жаропрочные стали используются при производстве изделий, при условиях «ползучести» и при повышенных температурах. В свою очередь, важным свойством хромоникелевых сталей является – жаростойкость, которая характеризует, при насколько высоких температурах металл может сопротивляться процессу окисления. Это свойство стали обеспечивает хром, поскольку у него большее родство с кислородом, чем у железа. Благодаря этому при нагревании на поверхности сплава образуется плёнка из выделяемых оксидов, которая защищает его от коррозии. Также важнейшими преимуществами титановых сплавов перед другими конструктивными материалами являются их высокие удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, титан и его сплавы хорошо свариваются, парамагнитны и обладают некоторыми другими свойствами, имеющими важное значение в ряде отраслей техники. Перечисленные качества титановых сплавов открывают большие перспективы их применения в тех областях машиностроения, где требуются высокая удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Это относится, в первую очередь, к таким отраслям техники как авиастроение, ракетостроение, судостроение, химическое, пищевое и транспортное машиностроение [2]. Но несмотря на все вышеперечисленные положительные свойства

представленных сплавов, трудности, связанные с обработкой традиционными методами, увеличивают себестоимость изготовления детали [3].

В настоящее время уже доведены до практического применения технологии получения заготовок из металлических порошков, основанные на селективном лазерном спекании (SLS/SLM-технологии). Однако, потенциал технологий выращивания реализован далеко не полностью. Основными тенденциями развития аддитивных технологий являются увеличение их производительности при сохранении требуемого качества выращиваемого изделия и изготовление изделий с градиентными эксплуатационными характеристиками. Наиболее перспективной технологией высокоскоростного изготовления изделий является прямое лазерное выращивание, когда изделие формируется из порошка, подаваемого сжатой газопорошковой струей непосредственно в зону выращивания, причем газопорошковая струя может быть, как коаксиальной, так и не коаксиальной сфокусированному лазерному лучу, обеспечивающему нагрев и частичное плавление порошка и подогрев подложки. При этом возможно вводить в подающую струю смеси порошков, и изменять состав подаваемых порошков непосредственно в ходе процесса выращивания, обеспечивая высокоскоростное формирование изделий с градиентными свойствами [4].

Увеличение производительности также позволит увеличить и габариты изготавливаемых изделий [5]. Достижения в лазерной технике позволили создать новый класс технологических комплексов для лазерного выращивания, конкурирующих с традиционными технологиями механической обработки. На мировом рынке появляются новые мощные лазеры (волоконные, дисковые, диодные), использование которых может значительно расширить технологические возможности аддитивных технологий, использующих лазерное излучение. В частности, исследования родственной технологии лазерной порошковой наплавки показали, что использование мощных лазеров (до 15 кВт) позволяет значительно увеличить производительность процесса наплавки. Однако, для увеличения производительности процесса выращивания при сохранении требуемой точности изготовления изделий необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих при реализации технологии лазерного сплавления металлических порошковых материалов. Результаты этих исследований позволят сформулировать требования к разрабатываемому оборудованию: оптическим системам фокусировки лазерного излучения, системам подачи порошка, соплам, манипуляторам и др. Также для увеличения производительности процесса изготовления крупногабаритных изделий сложной формы необходимо рассмотреть возможность получения деталей комбинированным методом, при котором основа, выполняющая роль несущей конструкции, будет изготавливаться традиционными методами литья и штамповки, а сложные конструктивные элементы, обеспечивающие требуемые гидро- и газодинамические характеристики, будут изготавливаться методом прямого лазерного выращивания. Это позволит снять ограничения литейной технологии по конфигурации деталей при одновременной реализации преимуществ традиционных способов получения заготовок для ответственных узлов и методов прямого лазерного выращивания для максимального внедрения новых подходов к конструированию при удовлетворительной производительности процесса.

В отличие от распространенных в настоящее время технологий селективного лазерного плавления/спекания (SLM/SLS), которые реализуются в 3D принтерах, технология DED (Direct Energy Deposition), разработанная фирмой POM, более простая, менее ограничена размерами изделия, обеспечивает высокую скорость изготовления, хотя проигрывает SLM/SLS по точности [6]. Тем не менее, потенциал возможностей технологии DED не исчерпан и путем оптимизации существующих и разработки новых прецизионных наплавочных головок можно обеспечить требуемые значения точности,

производительности и экономичности при аддитивном изготовлении изделий из порошковых материалов. В системах лазерной порошковой наплавки применяется ряд сопловых головок, отличающихся по конструкции, способам формирования и качества газопорошкового потока. Это внеосевая (а), трех- или четырехструйная (б) и коаксиальная (в) сопловые головки, схематичные изображения которых представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 – Сопловые головки [6]

Внеосевое сопло наиболее простое по конструкции, индифферентно к ориентации в пространстве и нетребовательно к качеству порошкового материала. Оно состоит из двух коаксиальных трубок, по центральной (1) потоком транспортного газа подается наплавляемый порошок (2), а по внешней трубке (3) подается защитный газ (4), окружающий поток порошка (2) и предотвращающий его контакт с атмосферным воздухом в полете и в зоне ванны расплава (5) (см. рисунок 1 а). Внеосевое сопло, как явствует из его названия, устанавливается сбоку от лазерного пучка (б) и ориентируется под острым углом к поверхности обрабатываемого изделия (7) [7].

Трех- или четырехструйная сопловая головка (см. рисунок 1 б)), сохраняя все положительные стороны внеосевого сопла, способна формировать сфокусированный газопорошковый поток и, следовательно, может быть использована для прецизионных АТ. Сопло состоит из медной водоохлаждаемой сопловой головки 1, формирующей поток защитного газа и служащей направляющей для трех или четырех трубок 2, в которые подается газопорошковая смесь 5 и расположенных симметрично относительно оси системы под одинаковым углом. Возможно исполнение головки, при которой трубки 2 формируются непосредственно в корпусе 1 в виде отверстий. Такой вариант исполнения имеет свои недостатки, поскольку невозможно изменять диаметр порошковых трубок и менять изношенные трубки без смены всей наплавочной

головки. В головке 1 выполнено продольное осевое отверстие 3, через которое распространяется лазерное излучение и поток защитного газа 4. В зависимости от решаемых задач диаметр трубок 2 может меняться от 1 до 3 мм [6].

Подробнее рассмотрим коаксиальную сопловую головку:

Рисунок 2 – Сфокусированный газопорошковый поток [8]

Коаксиальная сопловая головка формирует сфокусированный осесимметричный газопорошковый поток (см. рисунок 2), в котором его частицы хорошо экранированы защитным газом от атмосферного воздуха [8].

Рисунок 3 – Пример получаемого изделия [10]

Помимо осесимметричности пучка, данная сопловая головка реализует наиболее тонкий газопорошковый поток, позволяющий наносить валики шириной от (200 – 300) мкм (на рисунке 3 представлен пример тонкостенного изделия, выполненного по рассматриваемой технологии) [9]. Диаметр лазерного луча (на рисунке 4 изображены основные составляющие в зоне наплавки) может составлять не более 0,3 мм, а эффективность использования порошка может достигать 70%, чего не обеспечивают методы с внеосевой или многоструйной подачей [10].

Рисунок 4 – Главные составляющие наплавочной зоны [9]

На рисунке 5 изображен один из вариантов компоновки и размеров сопел. Крупной штриховкой выделено внешнее сопло, мелкой – внутреннее.

Рисунок 5 – Пример размеров сопловой головки

Существенным недостатком коаксиальных сопловых головок являются требовательность к однородности фракционного состава порошкового материала и возможность работы преимущественно в вертикальном положении. По своей структуре коаксиальное сопло представляет комбинацию конических головок: внутренней и внешней (см. рисунок 6) [11].

Рисунок 6 – 3Д-модель сборки наплавочной головки

Внутренняя головка защищает поток от лазерного луча, внешняя головка формирует газопорошковый конус на выходе из сопла и значительно влияет на конечные параметры потока. Существуют модификации коаксиальных головок с одним и двумя защитными потоками. В последнем случае сопло состоит из трех конических головок: внешней, промежуточной и внутренней головки и поток порошка конической формы находится между двумя конусами, образованными двумя потоками защитного газа.

Еще один существенный недостаток такого типа головок заключается в том, что под действием силы тяжести порошок, имеющие собственный вес, изменяют

распределение в поперечном сечении каналов. Это говорит об ограничении углов поворота головки относительно оси вовремя наплавки.

Заключение

Проведен обзор существующих методов и систем формирования газопорошковых потоков, используемых в лазерных технологических установках. Рассмотрены внеосевое, трех-, четырех-струйное и коаксиальное сопло. Из представленных вариантов для дальнейшего изучения была выбрана коаксиальная сопловая головка, как более технологически совершенная и с большим потенциалом развития.

Коаксиальная сопловая головка по сравнению с другими типами обеспечивает при лазерном выращивании максимальную точность.

Для снижения рисков получения отрицательных результатов при разработке новых технологий и оборудования, а также для снижения материально-временных затрат требуется проводить исследования комплексно.

Первоначально должны проводиться теоретические исследования, например, подбор типа сопловой головки, ее типоразмеров.

В последствии нужно произвести математическое моделирование.

Также значительную пользу в разработку может внести CFD-расчёт, позволяющий произвести вычислительный, компьютерный эксперимент.

В завершение разработки необходимо произвести эксперимент с помощью тестовой детали, узла, сборочной единицы и т.д.

2. Елисеев, Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.С. Елисеев [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 512 с.
3. Новиченко Д. Ю. Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011 г.
4. Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г., Обработка труднообрабатываемых материалов резанием: учебное пособие. М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 208с.
5. Туричин Г., Климова О., Земляков Е., Бабкин К., Сомонов В., Шамрай Ф., Травянов А., Петровский П., Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии, Фотоника. 2015. №4 (52). С. 68-83.
6. Г.А. Туричин, К. Д. Бабкин, Е. В. Земляков, Е. А. Валдайцева, О. Г. КлимоваКорсмик, Д. Ю. Колодяжный Развитие теории и технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий для различных применений // В сборнике: Beam technologies & laser application, Proceedings of the seven international scientific and technical conference. Edited by Prof. G. Turichin. SaintPetersburg 2015, с. 269-283
7. Шпилев А. И. Исследование и оптимизация газопорошковых потоков в головках для лазерной порошковой наплавки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, КАИ им. А.Н. Туполева, 2018 г.
8. Способ лазерной наплавки и устройство для его осуществления. [Патент] : SU 1347295 A1 : Авторское свидетельство на изобретение / изобр. Н.Н. Одинцов. - Россия, 10.11.1985 г.
9. Прямое лазерное выращивание: гетерофазная лазерная порошковая металлургия [В Интернете] // Институт лазерных и сварочных технологий. - 2018 г. - http://www.ilwt-stu.ru/upload/publications/DMD_ru.pdf.
10. Асютин Р.Д., Экспериментальное исследование газопорошкового потока при лазерной наплавке с использованием различных технологических насадок [В Интернете] // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, Студенческая научная весна - 2014: Машиностроительные технологии - <http://www.studvesna.qform3d.ru>
11. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок [Книга] / авт. Под ред. В.Я. Панченко. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.
12. Третьяков Р.С. Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014 г.