

Розроблена методика розрахунку оптимальної геометрії кутів утворюючих коаксіального сопла, яка дозволяє керувати формою та поперечною концентрацією порошку в зоні лазерної обробки. Сутність даної методики полягає у визначенні трьох оптимальних кутів утворюючих сопла, які дозволяють регулювати дисперсний склад порошкової суміші у зоні сфокусованого лазерного випромінювання. Розрахунок проводився з використанням методу Ейлера

Ключові слова: порошкова композиція, газопорошковий струмінь, лазерна обробка, дисперсність

Разработана методика расчета оптимальной геометрии углов образующих коаксиального сопла, которая позволяет управлять формой и поперечной концентрацией порошка в зоне лазерной обработки. Сущность данной методики заключается в определении трех оптимальных углов образующих сопла, которые позволяют регулировать дисперсный состав порошковой смеси в зоне сфокусированного лазерного излучения. Расчет проводился с использованием метода Эйлера

Ключевые слова: порошковая композиция, газопорошковая струя, лазерная обработка, дисперсность

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ПОРОШКОВОЙ СТРУИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ «RAPID PROTOTYPING»

П. В. Кондрашев

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра лазерной техники и
физико-технических технологий

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: kondrashev@ukr.net

1. Введение

Технология «Rapid Prototyping» (быстрое изготовление деталей, в том числе и уникальных, таких как мастер-образец, человеческий сустав, которые имеют сложную трехмерную геометрическую конфигурацию можно изготовить с помощью данной технологии). Реализация технологии «Rapid Prototyping» осуществляется путем лазерного сплавления порошкового материала, который подается в зону лазерной обработки с использованием двух схем доставки порошковой композиции. Первая схема послонная реализация процесса, когда каждый новый слой порошка сплавляется лазерным излучением, вторая, когда порошок подается коаксиально лазерному излучению. Влияние системы, формирующей газопорошковую струю в зоне воздействия сфокусированного лазерного излучения (при реализации коаксиальной схемы подачи порошковой композиции в зону лазерной обработки) на качество и производительность лазерного сплавления порошкового материала при реализации технологии «Rapid Prototyping», отмечена многими специалистами в данной области научных исследований. Очевидно, что при реализации технологического процесса «Rapid Prototyping», по схеме вдувания порошка в зону лазерной обработки, наиболее целесообразным является применение схемы, когда газопорошковая струя подается коаксиально оси сфокусированного лазерного из-

лучения. Для расчета коаксиальных сопел в основном используют простые инженерные зависимости, которые не могут определить распределение концентрации порошковой композиции в зоне лазерной обработке. Именно поэтому, использование численного моделирования процесса поведения газопорошковой струи в зоне воздействия сфокусированного лазерного излучения в качестве инструмента для проектирования оптимальных конструкций сопел, является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

На основании анализа априорной информации, [1 – 6] можно отметить следующее, схемы подачи порошковой композиции в зону воздействия сфокусированного лазерного излучения оказывают существенное влияние на производительность и качество лазерного сплавления, а также условно разделяются на две группы: 1-ая – подача порошкового материала под определенным углом; 2-ая – коаксиально лазерному излучению. Первая схема [7] преимущественно применяется для реализации технологии лазерной наплавки (реставрация, ремонт, повышение прочности, износостойкости и пр. механических характеристик готовых изделий). Характерной особенностью реализации данной

схемы является то, что газопорошковая струя формируется в зоне воздействия лазерного излучения достаточно большие по площади поперечного сечения участки порошковой композиции, при чем величина этих участков прямо пропорциональна величине угла подачи порошкового материала. Реализация данной схемы оправдывает себя, когда присутствуют большие площади обработки. Недостатком данной схемы является отсутствие возможности работы в фокусе газопорошковой струи. Вторая схема [8] подачи порошкового материала в зону обработки компенсирует недостаток предыдущей схемы. Причем как показывают исследования ученых в этом направлении, доминирующую позицию начинают занимать конструктивные особенности приспособлений коаксиальной подачи порошкового материала. Однако существующие средства доставки порошкового материала, лишены возможности управления формой газопорошковой струи, как правило, имеют сложную технологическую конструкцию, сложность юстирования, а также дорогую себестоимость изготовления и обслуживания [9].

3. Оценка физического процесса формирования газопорошковой струи при реализации технологии «Rapid Prototyping»

При реализации технологического процесса лазерного сплавления порошковой композиции по схеме вдувания порошка в зону воздействия сфокусированного лазерного излучения, как было сказано выше, одну из первостепенных ролей играет средство доставки порошкового материала, а именно конструктивные особенности коаксиальных сопел. Поэтому для проектирования сопел, целесообразно использовать численное моделирование [10] процесса поведения газопорошковой струи, которая подается в зону воздействия сфокусированного лазерного излучения. Для решения этих задач, хорошо зарекомендовал себя специализированный программный комплекс Ansys CFX, который имеет в себе весь необходимый инструмент для численного анализа в гидрогазодинамике, например возможность определения максимальной концентрации порошка в зоне обработки.

При моделировании движения твердых частиц в потоке газа программный комплекс Ansys CFX, как и большинство других аналогичных программных продуктов использует два базовых метода Лагранжа и Эйлера [11, 12]. Метод Лагранжа может достоверно описать движение одиночных частиц, при условии их упругого соударения со стенкой сопла, что справедливо только для порошкового материала крупнодисперсной фракции (свыше 100 мкм). В случае тонкодисперсной (до 10 мкм) и мелкодисперсной (до 100 мкм, наш случай 60 мкм) фракции порошковой композиции, упругое соударение частиц не играет существенной роли. Вследствие чего, среду с такими частицами в рамках данного метода можно считать как сплошную. Опираясь на эти факты, для расчета дисперсной фазы был использован метод Эйлера, достоинством которого является то, что разницу концентраций дисперсной фазы между 2-мя точками определяет диффузионный поток, образованный турбулентными пульсациями сплошной среды, движение которой описывается тоже

в рамках методологии Эйлера. Для расчета турбулентности двух фаз использовалась стандартная ($k-\epsilon$) модель Лаундера-Соплдинга, хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании течений с малыми градиентами турбулентных пульсаций, обладающая хорошей работоспособностью, экономичностью и высокой точностью.

4. Основные теоретические положения, которые используют для численного моделирования программный комплекс Ansys CFX

Движение дисперсной фазы в Ansys CFX рассчитывается по методу Эйлера с помощью интегрирования скорости за шаг δt (шаг интегрирования) зависимость (1).

$$x_i^n = x_i^0 + v_{pi}^0 \delta t, \quad (1)$$

где o -показатель степени старых значений перемещения частицы;

n -показатель степени новых значений перемещения частицы;

v_{pi} - скорость перемещения частицы.

При последующем интегрировании скорость частицы рассчитывается в начале шага. В конце шага новая скорость частицы рассчитывается аналитическим методом с помощью уравнения (2). Свойства сплошной фазы берутся в начале интервала времени. Момент движения отдельных частиц дисперсной фазы будет зависеть от скорости частиц в начале интервала времени. При расчете всех действующих сил, такие переменные сплошной фазы, как плотность, вязкость и скорость также должны быть учтены при перемещении дисперсной фазы. Согласно уравнению (2) скорость движения сплошной фазы влияет на скорость передвижения частиц дисперсной фазы и наоборот наблюдается обратное влияние скорости передвижения частиц дисперсной фазы на скорость движения сплошной фазы, т.е. происходит связь между двумя фазами. Принимаем, что отдельная частица дисперсной фазы движется внутри потока сплошной фазы. Силы действующие на частицу дисперсной фазы, влияющие на ее ускорение зависят от разницы скоростей частицы и сплошной фазы, так как имеет место смещение потока сплошной фазы относительно дисперсной фазы (2).

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_P + F_{BA}, \quad (2)$$

где F_D - сила трения, действующая на частицу;

F_B - выталкивающая сила;

F_R - вращательная сила;

F_{VM} - виртуальная добавочная сила тяжести, необходимая для ускорения виртуальной массы среды относительно объема, который занимает частица дисперсной фазы;

F_P - сила градиента давления среды на частицу. Эта сила имеет значение, когда плотность сплошной среды сопоставима или превышает плотность частиц дисперсной фазы;

F_{VA} -сила отклонения потока от стабильного состояния модуль CFХ не учитывает. Левая часть уравнения (2) трансформируется согласно виртуальной добавленной силы тяжести, что приводит к изменению скорости частицы зависимость (3).

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{m_p + \frac{C_{VM}}{2}m_F} (F_D + F_B + F'_{VM} + F_P) + \frac{1}{m_p} F_R, \quad (3)$$

где m_p -масса дисперсной фазы;
 m_F -масса сплошной фазы.

В правой части уравнения остается параметр F'_{VM} (виртуальная сила инерции) далее определяются значения масс сплошной и дисперсной фаз с помощью уравнения (4).

$$m_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \quad \text{и} \quad m_F = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_F, \quad (4)$$

где d_p -диаметр частицы дисперсной фазы;
 ρ_F -плотность сплошной фазы;
 ρ_p -плотность дисперсной фазы.

Далее соотношение общей массы частицы дисперсной фазы к ее эффективной массе выражается в виде уравнения (5).

$$R_{VM} = \frac{m_p}{m_p + \frac{C_{VM}}{2}m_F} = \frac{\rho_p}{\rho_p + \frac{C_{VM}}{2}\rho_F}, \quad (5)$$

$$1 - R_{VM} = \frac{\frac{C_{VM}}{2}\rho_F}{\rho_p + \frac{C_{VM}}{2}\rho_F}$$

где C_{vm} -коэффициент, который равен 1, если учитывается виртуальная сила тяжести. Значение параметра эффективной массы R_{VM} дисперсной фазы подставляем в уравнение (3) и получаем следующее выражение (6).

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{R_{VM}}{m_p} (F_D + F_B + F'_{VM} + F_P) + \frac{1}{m_p} F_R. \quad (6)$$

Правая часть уравнения (6) потенциально может быть выражена линейно с учетом изменения скорости передвижения частиц дисперсной фазы U_p выражение (7).

$$T = R + C_{lin} U_p. \quad (7)$$

Сила аэродинамического трения, действующая на частицы дисперсной фазы пропорциональна скорости скольжения между частицей и скоростью передвижения сплошной фазы зависимость (8).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_s| U_s = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_F - U_p| (U_F - U_p), \quad (8)$$

где C_D -коэффициент трения;

A_F -площадь поперечного сечения частицы дисперсной фазы.

С использованием значения коэффициента

$D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_s|$, уравнение (3) преобразуется в сле-

дующий вид (9).

$$R = \frac{D}{m_p + \frac{C_{VM}}{2}m_F} U_F = \frac{R_{VM}}{m_p} D U_F. \quad (9)$$

Выталкивающая сила-это сила, действующая на погруженную частицу дисперсной фазы. Выталкивающая сила равна объему вытесненной сплошной фазы и выражается следующим уравнением (10).

$$F_B = (m_p - m_F)g = m_p \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_p}\right) g = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_F) g, \quad (10)$$

где g -сила тяжести.

Уравнение (10) приводит к следующим преобразованиям в правой части уравнения (3).

$$R = \frac{\rho_p - \rho_F}{\rho_p + \frac{C_{VM}}{2}\rho_F} g = R_{VM} \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_p}\right) g. \quad (11)$$

Вращательная результирующая сила, действующая на частицу дисперсной фазы состоит из суммы двух составляющих, в виде силы Кориолиса и центробежной силы (12).

$$F_R = m_p (-2\Omega \times U_p - \Omega \times \Omega \times r_p), \quad (12)$$

где Ω , r_p -угловая скорость и радиус-вектор частицы соответственно.

Следует отметить, что использованная в расчетах сила вращения зависит от градиента давления сплошной среды, что в свою очередь приводит к следующим преобразованиям уравнения (3).

$$R = -2\Omega \times U_p - \Omega \times \Omega \times r_p -$$

$$-(1 - R_{VM})(-2\Omega \times U_F - \Omega \times \Omega \times r_p) -$$

$$-R_{VM} \frac{\rho_F}{\rho_p} (-2\Omega \times U_F - \Omega \times \Omega \times r_p). \quad (13)$$

Используя замену:

$$R_{Cor,P} = -2\Omega \times U_p$$

$$R_{Cor,F} = -2\Omega \times U_F$$

$$R_{Cent} = -\Omega \times \Omega \times r_p$$

Уравнение (13) принимает вид:

$$R = R_{Cor,P} + (C - 1)R_{Cor,F} + CR_{Cent}, \quad (14)$$

где $C = 1$ -если не учитывается градиент давления и виртуальная дополнительная сила тяжести;

$C = R_{VM}$ -учитывается только виртуальная дополнительная сила тяжести;

$C = 1 - \rho_F / \rho_p$ -учитывается только градиент давления;

$C = R_{VM} (1 - \rho_F / \rho_p)$ -учитываются оба параметра.

При передвижении в среде сплошной фазы (в данном случае сжатый воздух) каждая отдельная частица дисперсной фазы разгоняет вокруг себя сплошную фазу, это приводит к дополнительному торможению частицы, природа данного торможения каждой отдельно взятой частицы описывается следующим уравнением (15).

$$F_{VM} = \frac{C_{VM}}{2} m_F \left(\frac{dU_F}{dt} - \frac{dU_P}{dt} \right). \quad (15)$$

Если дополнительная виртуальная сила тяжести учитывается, тогда коэффициент C_{VM} в большинстве случаев равен 1, в обратном случае, коэффициент C_{VM} равен 0, соответственно коэффициент R_{VM} равен 1. Вторая часть правой половины уравнения описывает отклонение скорости передвижения частицы дисперсной фазы, эту часть уравнения можно перенести в левую часть уравнения (3), эти математические преобразования приводят к изменению эффективной массы газопорошковой струи. Если рассматривать только стабильное состояние газопорошковой струи, то уравнение (3) принимает следующий вид зависимость (16).

$$F'_{VM} = \frac{C_{VM}}{2} m_F (U_F \nabla U_F - R_F), \quad (16)$$

где ∇ -оператор Гамильтона.

Выражение (16) приводит к преобразованию правой части уравнения (5).

$$R = (1 - R_{VM})(U_F \nabla U_F - R_F), \quad (17)$$

далее

$$R_F = -2\Omega \times U_F - \Omega \times \Omega \times r_p. \quad (18)$$

Необходимо принять во внимание тот факт, что когда частицы дисперсной фазы рассматриваются во вращательной системе, уравнение (18) преобразуется в сферическую систему координат (уравнение 13), в результате чего выражение дополнительной виртуальной силы тяжести принимает следующий вид (19).

$$R = (1 - R_{VM})(U_F \nabla U_F). \quad (19)$$

Сила градиента давления образуется за счет локального давления сплошной фазы на частицу дисперсной фазы и имеет следующий вид выражение (20).

$$F_P = \frac{m_F}{\rho_F} \nabla P, \quad (20)$$

где P -градиент давления.

Эту силу необходимо учитывать, когда имеют место большие градиенты давления сплошной фазы, в таких случаях плотность дисперсной фазы гораздо меньше плотности сплошной фазы. Пренебрегая межфазной диффузией и исходным видом уравнения постоянного момента, градиент давления может быть заменен на градиент скорости. Принимаем, что плотность (количественные показатели частиц дисперсной фазы в потоке сплошной среды, задаются пользователем непосредственно при расчетах в программном

комплексе Ansys CFX, количество частиц влияет непосредственно на машинное время обработки результатов расчетов увеличивает или уменьшает количество итераций) газопорошковой струи носит постоянный характер, то есть $const$, силу градиента давления можно выразить следующим образом (21).

$$F_P = m_F (U_F \nabla U_F - R_F) = m_P \frac{\rho_F}{\rho_P} (U_F \nabla U_F - R_F), \quad (21)$$

Учитывая ранее сделанные математические преобразования правая часть уравнения (3) приобретает следующий вид (22).

$$R = R_{VM} \frac{\rho_F}{\rho_P} (U_F \nabla U_F - R_F), \quad (22)$$

далее

$$R_F = -2\Omega \times U_F - \Omega \times \Omega \times r_p, \quad (23)$$

где r_p -радиус-вектор частицы дисперсной фазы.

И поскольку, как было отмечено выше, когда частицы дисперсной фазы рассматриваются во вращательной системе (с учетом оператора Гамильтона), тогда выражение преобразуется во вращающуюся систему уравнении (13), в результате чего, выражение дополнительной виртуальной силы тяжести принимает следующий вид (24).

$$R = R_{VM} \frac{\rho_F}{\rho_P} U_F \nabla U_F. \quad (24)$$

Расчет мгновенной скорости V_f уравнения (2) зависит от режима потока, то есть может быть средняя или сильная турбулентность газопорошковой струи. Для потока имеющего мелкодисперсную фракцию частиц порошковой композиции V_f равна средней скорости потока сплошной фазы \bar{V}_f . Путь каждой частицы дисперсной фазы попадающей в дискретный домен носит уникальный характер, поэтому, для отслеживания движения частицы в турбулентном потоке мгновенная скорость раскладывается на две составляющие, а именно, стабильная \bar{V}_f и нестабильная V_f . Поэтому следует отметить тот факт, что две одинаковые частицы дисперсной фазы, которые были внедрены в одной точке дискретного домена, но в разное время могут двигаться разными траекториями, поскольку их мгновенные скорости могут быть разными. Это и есть главный критерий распределения частиц дисперсной фазы в турбулентном потоке.

Модель распределения частиц дисперсной фазы в турбулентном потоке предполагает, что частица всегда движется только в одном вихре. Каждый вихрь имеет нестабильную составляющую скорости V_f , период существования τ_e , и длину L_e . Когда частица попадает в вихрь нестабильная составляющая скорости для этого вихря добавляется к стабильной составляющей скорости сплошной фазы, таким образом получается мгновенное значение скорости сплошной фазы, используемое в уравнении (13). Итак турбулентная скорость, длина и период существования каждого вихря считаются на основании заданных граничных условий турбулентного потока и определяются следующими уравнениями (25).

$$V_i' = \Gamma \sqrt{\frac{2k}{3}}, L_e = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, \tau_e = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{2k}{3}}}, \quad (25)$$

где k - скалярный коэффициент энергии турбулентного потока;

ε - скалярный коэффициент рассеивания потока;

C_μ - постоянная турбулентности;

$C_\mu^{\frac{3}{4}}$ - фактор выбранный для образования связи между шкалой длины и длиной вихря;

Γ - случайная величина, которая выбирается для того чтобы определить случайность турбулентного потока.

Согласно предыдущим расчетам, следует отметить, что каждая составляющая нестабильной скорости передвижения частицы дисперсной фазы в потоке газа может иметь разные значения для каждого вихря.

4. Алгоритм расчета траектории движения газопорошковой струи в программном комплексе Ansys CFX

Численное моделирование процесса поведения газопорошковой струи, подаваемой в зону воздействия сфокусированного лазерного излучения через коаксиальные сопла (имеющие различные конструкции) было проведено с помощью следующего алгоритма:

- создание трехмерной (параметрической) модели коаксиального сопла;

- создание трехмерной модели внутренней полости коаксиальных сопел и обозначения регионов, описывающие граничные условия расчета;

- создание расчетной сетки конечных элементов внутренней полости коаксиальных сопел с обозначением граничных условий на заданных регионах;

- непосредственный расчет траектории движения потока порошка и анализ полученных результатов.

Для создания трехмерной параметрической модели коаксиального сопла (рис. 1) использовалась CAD система автоматического проектирования.

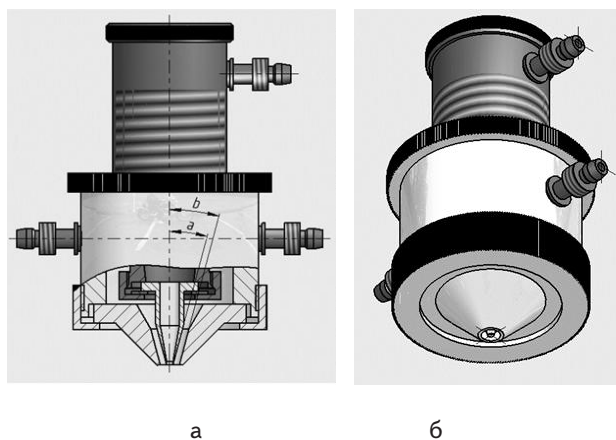


Рис. 1. Трехмерная модель коаксиального сопла: а - внутренняя часть полости (a - параметр угла образующих внутреннего сопла; b - параметр угла образующих внешнего сопла); б - общий вид

Изменение параметров a, b (рис. 1, а) проводилось при условии $a=b$ в диапазоне $20^\circ-80^\circ$. Создание сетки конечных элементов с обозначениями регионов трехмерных объектов полостей коаксиального сопла проводилось с помощью модуля Meshing программного комплекса Ansys Workbench (рис. 2).

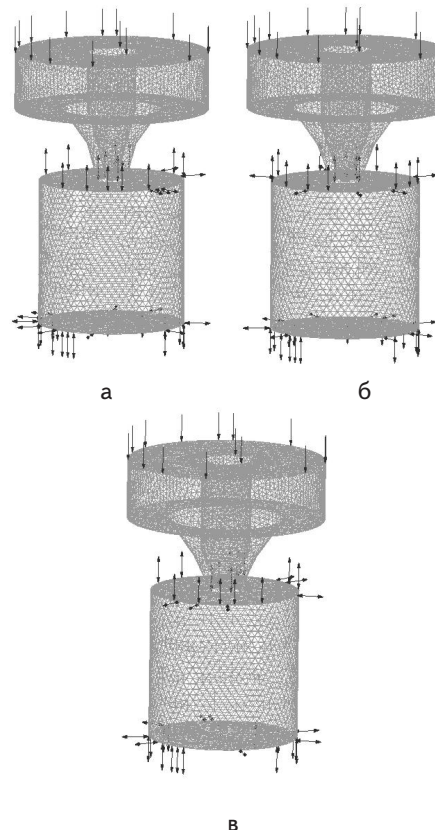


Рис. 2. Сетки конечных элементов внутренней полости коаксиального сопла: а - геометрия углов образующих внешнего и внутреннего сопел 30° ; б - геометрия углов образующих внешнего и внутреннего сопел 40° ; в - геометрия образующих внешнего и внутреннего сопел 50°

Построенные сетки конечных элементов были экспортированы в программный комплекс Ansys CFX, возможности этого модуля позволяют решать множество различных задач гидрогазодинамики в современной инженерии. Для расчета движения сплошной и дисперсной фаз были заданы следующие граничные условия регионов и свойства среды.

Свойства среды:

- 1) тип сплошной фазы - воздух;
- 2) тип дисперсной фазы - мелкодисперсная фракция порошка никеля (Ni);
- 3) тип переноса тепла - изотермический;
- 4) температура сплошной фазы - $25^\circ C$ (значение этого параметра обеспечивает температура в помещении лаборатории);
- 5) функция расчета турбулентности - ($k-\varepsilon$) (поскольку природа турбулентности соответствует потокам с малыми градиентами пульсаций, образованных давлением транспортирующего газа порядка 100 кПа);
- 6) морфологические свойства сплошной фазы - непрерывная среда;

7) морфологические свойства дисперсной фазы - твердая фракция;

8) диаметр фракции - 60 мкм.

Граничные условия на входе в среду:

- 1) режим потока порошка - дозвуковой;
- 2) управления движением потока порошка - давление 100 кПа (определено экспериментальным путем);
- 3) направление потока порошка - нормально к границе входа;
- 4) интенсивность турбулентности - средняя 5% (так как неизвестна природа турбулентности по Рейнольдсу);
- 5) скорость скольжения - не учитывается;
- 6) движение частиц дисперсной фазы - постоянная подача;
- 7) количество частиц дисперсной фазы - 200 (количественный показатель частиц дисперсной фазы влияет на число итераций расчета);

8) массовый расход порошка (обеспечивает система дозирования) - 0,6 г/с.

Граничные условия внутри среды:

- 1) тип границы - Wall (стена);
- 2) поскольку дальнейшее поведение потока порошка неизвестно параметры задаются автоматически самой программой;

Граничные условия на выходе из среды:

- 1) тип границы - Opening (открытая область);
- 2) режим потока порошка - дозвуковой;
- 3) управления движением потока порошка - давление 0 кПа (давление среды исследовательской лаборатории не учитывается);
- 4) направление потока порошка - нормально к границе выхода;
- 5) интенсивность турбулентности - средняя 5%;
- 6) все остальные параметры задает Ansys CFX.

Точность расчета:

- 1) схема адвекции - High Resolution (высшего порядка);
- 2) максимальное количество итераций-10000;
- 3) контроль по шкале времени-автоматический;
- 4) фактор масштаба времени - 1;
- 5) критерий сходимости тип - RMS, т.е. по средним значениям расчетных параметров;
- 6) точность критерия сходимости - 10^{-4} .

5. Результаты расчета пространственного распределения газопорошковой струи в программном комплексе Ansys CFX

На основании численного моделирования процесса поведения газопорошковой струи в пространстве проведенного с помощью программного комплекса Ansys CFX, следует отметить, что распределение концентрации потока порошка в плоскости, перпендикулярной оси траектории движения газопорошковой струи, зависят от углов образующих внешнего и внутреннего сопел, а именно:

- при увеличении угла геометрии образующих сопел наблюдается увеличение поперечной концентрации порошкового материала в общем случае;

- при увеличении угла геометрии образующих наблюдается рост площади поперечной концентрации порошковой композиции в зоне воздействия сфо-

кусированного лазерного излучения (рис. 3, в), это объясняется очень малым расстоянием «фокуса» газопорошковой струи от среза коаксиального сопла, благодаря большому значению углов образующих внешнего и внутреннего сопел 50° .

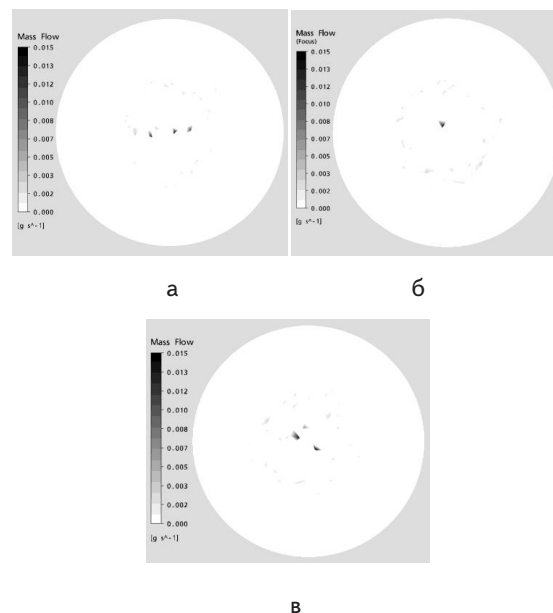


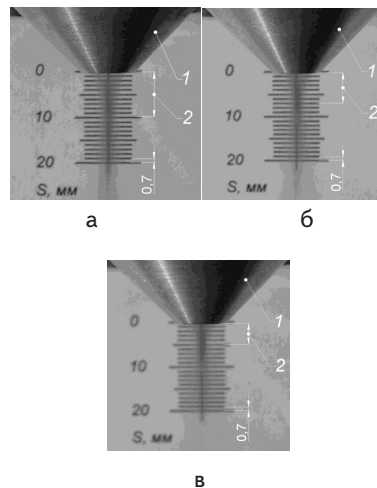
Рис. 3. Концентрация дисперсной фазы газопорошковой струи в плоскости перпендикулярной оси лазерного излучения: а - геометрия углов образующих сопел 30° ; б - геометрия углов образующих сопел 40° ; в - геометрия углов образующих сопел 50°

Причем, во всех рассчитанных случаях (углы внешних и внутренних сопел 20° - 80°) при изменении геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел, распределение концентрации газопорошковой струи меняется от кольцеобразного до полностью заполненной порошком окружности (рис. 3). Кроме того, следует отметить тот факт, что, уменьшение угла образующих сопел ведет к отдалению минимального сечения порошковой струи (концентрации порошка) к срезу сопла и наоборот увеличение угла образующих сопел ведет к уменьшению расстояния поперечной концентрации порошка от среза сопла (табл. 1). На основании результатов приведенных в табл. 1, дальнейшее расширение диапазона углов (20° - 80°) образующих внешнего и внутреннего сопел и численные расчеты для них не имеют смысла, поскольку при угле образующих внешнего и внутреннего сопел менее 20° наблюдается вырождение конической формы газопорошковой струи в цилиндрическую с одинаковой поперечной концентрацией по всему объему газопорошковой струи, расширение верхней границы тоже теряет смысл, поскольку при геометрии образующих сопла 80° максимальная поперечная концентрация порошковой композиции наблюдается на расстоянии от среза сопла 0,8 мм (табл. 1), слишком близкое расположение поперечной концентрации порошка приведет к заплыванию коаксиального сопла порошковым материалом и исключает таким образом подачу порошковой смеси в зону обработки.

Таблица 1

Распределение концентрации газопорошковой струи в плоскости перпендикулярной оси действия лазерного излучения для различных углов образующих внешнего и внутреннего сопел

Углы образующих внешнего и внутреннего сопел, град.	Расстояние от среза сопла до плоскости поперечного распределения концентрации газопорошковой струи, мм
20	6,3
30	5,1
40	4,5
50	4
60	2,1
70	1,7
80	0,8



6. Проверка адекватности теоретических расчетов, сделанных в программном комплексе Ansys CFX

Для проверки адекватности расчетов численного моделирования пространственного движения сплошной и дисперсной фаз, и возможности управления формой газопорошковой струи, благодаря изменению углов геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел на выходе из устройства коаксиального сопла с помощью программного комплекса Ansys CFX, было проведено экспериментальное измерение положения «фокуса» (максимальная концентрация порошковой смеси в плоскости перпендикулярной оси движения газопорошковой струи) потока порошка для внешних и внутренних сопел различной геометрии углов образующих. Для фиксации расстояния максимальной концентрации «фокуса» газопорошковой струи на задний план устройства коаксиального сопла был установлен белый экран с нанесенной в САД-системе в натуральном масштабе шкалы. С помощью руки антропоморфного робота, каждый раз при смене комплекта сопел (геометрия углов образующих изменялась в диапазоне 30°-50° с шагом 10°) происходило позиционирование устройства коаксиального сопла в исходную точку (срез сопла позиционировался в начале шкалы). Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

На основании результатов эксперимента (рис. 4) полностью доказана адекватность численного моделирования пространственного распределения сплошной и дисперсной фаз, и возможность управления формой газопорошковой струи, а также максимальной концентрацией порошковой композиции в зоне обработки, благодаря изменению углов геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел средства доставки порошковой смеси в зону воздействия сфокусированного лазерного излучения. Также следует отметить, что при увеличении угла образующих геометрии внешнего и внутреннего сопел положение «фокуса» газопорошковой струи уменьшалось и наоборот при уменьшении геометрии положение «фокуса» потока порошка увеличивалось. Так для сопел с геометрией образующих 30° положение «фокуса» газопорошковой струи с учетом масштабного коэффициента (рис. 4) находится на расстоянии 7 мм от среза сопла (рис. 4, а), для сопел с геометрией углов образующих 40° соответственно 4,9 мм (рис. 4, б), для сопел с геометрией углов образующих 50° расстояние равно 3,5 мм (рис. 4, в).

Рис. 4. Общий вид газопорошковой струи на выходе из устройства коаксиального сопла с обозначением масштабного коэффициента 0,7 мм: а - углы геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел 30°; б - углы геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел 40°; в - углы геометрии образующих внешнего и внутреннего сопел 50°, 1 - сопло, 2 - расстояние «фокуса» газопорошковой струи

7. Выводы

На основании численного моделирования в программном комплексе Ansys CFX было установлено следующее:

1. Установлено, что численное моделирование процесса транспортировки частиц порошка в потоке газа позволяет проектировать коаксиальные сопла и заранее определять схемы обработки, при любом закона перемещения сфокусированного луча.
2. Изменение геометрии углов образующих сопел является эффективным фактором влияния на пространственное распределение потока порошка, а именно, изменения фокальной плоскости концентрации порошка а также формы газопорошковой струи.
3. Изменение геометрии углов образующих сопел ведет к смещению минимального сечения порошковой струи относительно среза сопла, и изменению градиентов огибающих поверхностей газопорошковой струи.

Литература

1. Kruth, J. P. Curtain Coating for Depositing Layers in Stereolithography. [Текст] / J. P. Kruth // Proc. 7 Int. Conf. on Rapid Prototyping, 1997. – P. 218-228.
2. Kruth, J. P. Progress in selective laser sintering [Текст] / J. P. Kruth // Proceeding of the 13 th International Symposium for Electromachining, (ISEM-XIII), Bilbao, 2001. – P. 21-38.
3. Mazumder, J. Role of Recoil Pressure, Multiple Reflections and Free Surface Evolution during Laser Keyhole Welding [Текст] / Mazumder J.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002.-[Электронный ресурс]: LIA; 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. требования: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Загл. с контейнера.

4. Syvanen, T. New Innovations in Direct Metal Laser Sintering-A Step Forward in Rapid Prototyping and Manufacturing [Текст] / T. Syvanen // Proceedings of International Congress "ICALEO'1999". – 1999. – P. 68-76.
5. Syvanen, T. Direct Metal Laser Sintering of Very Fine Metal Powders [Текст] / T. Syvanen // Proceedings of International Congress "ICALEO'2000", 2000. - P. 21-29.
6. Kotila, J. Steel Powders for Direct Metal Laser Sintering Process-Novel Properties and Applications [Текст] / J. Kotila // Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress, 2000. - 801-804.
7. Powell, J. Laser Casting and Laser Clad-Casting: New processes for rapid prototyping and production [Електронний ресурс] / J. Powell, H. Gedda, A. Kaplan // Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. - Систем. требования: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Загл. с контейнера.
8. Найдек, В. Л. Распределение дисперсных частиц в двухфазном газолазерном потоке [Текст] / В. Л. Найдек, В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Ф. И. Кирчу и др.-Металл и литье Украины, 2009.-№11-12. - С.4-7.
9. Pinkerton, A. J. A Comparative Study of Multiple Layer Laser Deposition using Water and Gas Atomised 316L Stainless Steel Powders [Електронний ресурс] / A.J. Pinkerton, Lin Li.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. требования: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Загл. с контейнера.
10. Лихошва, В. П. Моделирование газолазерных потоков при создании оборудования для нагревания дисперсных материалов [Текст] / В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Ф. И. Кирчу и др.-Металл и литье Украины, 2009.-№11-12. - С.77-81.
11. Поляков, С. Н. Анализ эффективности пылеулавливания вихревого аппарата ВЗП-М200 с помощью программного комплекса ANSYS CFX [Електронний ресурс] / ANSYS Solutions Русская редакция, журнал №7.-Режим доступа:\www\URL: http://ansysolutions.ru/-14.04.2008 г. Загл. с экрана.
12. Эйлер, Л. Интегральное исчисление [Текст]. / Л. Эйлер. - ГИТТЛ М., 1956. - 415 с.

У статті розглянуто особливості використання систем автоматизованого проектування у сучасних підходах виробництва автомобільної галузі. Розглянуті особливості використання новітніх інформаційних технологій та систем під час проектування двигунів внутрішнього згоряння. Вказано на недоліки та переваги найпоширеніших CAD, CAM систем та окремих програмних продуктів. Запропоновано підходи у використанні продукції Delcam pls для забезпечення оптимального конструкторського рішення

Ключові слова: CAD/CAM системи, автомобільні двигуни, геометричні розрахунки, показники надійності, системи САПР Delcam pls

В статье рассмотрены особенности использования систем автоматизированного проектирования в современных подходах производства автомобильной отрасли. Рассмотрены особенности использования новейших информационных технологий и систем при проектировании двигателей внутреннего сгорания. Указаны недостатки и преимущества распространенных CAD, CAM систем и отдельных программных продуктов. Предложены подходы в использовании продукции Delcam pls для обеспечения оптимального конструкторского решения

Ключевые слова: CAD/CAM системы, автомобильные двигатели, геометрические расчеты, показатели надежности, системы САПР Delcam pls

УДК 004.92

3D ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТОТИПУ ДВИГУ- НА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗАСО- БАМИ DELCAM POWERSHAPE

П. С. Носов

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра природничо-наукової підготовки
Одеський національний
політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: nopas@bk.ru

1. Вступ

У наш час для проектування двигунів внутрішнього згоряння широко застосовують системи автоматизованого проектування (САПР), які розгалужено на модулі CAD (комп'ютерне конструювання й оформ-

лення конструкторської документації) і CAM (автоматизована підготовка виробництва) [1 – 3].

Серед багатьох сучасних систем автоматизованого проектування можна виділити найбільш розповсюджені у автомобілебудуванні, такі як: Autodesk AutoCAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, Ansys Workbench Cad і