

АНАЛИЗ СХЕМ ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСЛОЙНОГО НАРАЩИВАНИЯ

Вейко В.П., Губанов Д.Л., Кромин А.К., Родионов С.А., Тимофеев Б.П.,
Шакола А.Т., Чуйко В.А., Яковлев Е.Б.

Рассматриваются вопросы разработки и применения различных схем доставки лазерного излучения, в том числе сканирующей и плоттерной, для использования в лазерных технологических установках, реализующих технологии послойного наращивания. Приведены результаты оптических расчетов сканера для различных типов лазеров, применяемых в данных технологических установках. Для плоттерной схемы доставки лазерного излучения предложены различные тактики отработки траекторий, обеспечивающие допустимые ошибки при минимальном времени обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Принципиально новая технология создания трехмерных объектов методом послойного наращивания появилась в мире относительно недавно на стыке лазерных и компьютерных технологий. Многие эксперты считают, что эта технология способна революционизировать разработку, конструирование и производство новых изделий [1, 2]. Хотя на английском и немецком языках уже имеется обширный список литературы по данному вопросу, включая труды конференций [3, 4], русскоязычная библиография пока имеет лишь считанное число публикаций [5, 6].

Поэтому позволим себе кратко описать основные принципы этой новейшей технологии. Она состоит из двух основных этапов. На первом создается трехмерный компьютерный образ проектируемого изделия (или его прототипа) одним из методов автоматизированного проектирования (САПР, СА). Этап заканчивается "электронным рассечением" трехмерного образа на слои заданной толщины и созданием программ управления движением лазерного пучка в каждом сечении. На втором этапе изделие изготавливается в результате одного из трех процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом: 1) путем послойного отверждения вязких олигомеров (stereolithography), 2) путем послойного спекания порошков (3D-sintering), 3) путем вырезания слоев листового материала (бумаги, пластика) и их последовательного соединения или склеивания (laminated objects manufacturing (LOM)).

Даже в США, где эта технология впервые была разработана, в связи с новизной процесса пока нет единства в терминологии: наиболее часто встречаются термины rapid prototyping, CAD-oriented manufacturing, design-controlled automated fabrication (desCAF), direct CAD manufacturing (DCM), 3D-printing, desk-top manufacturing (DTM), instant manufacturing, layer manufacturing, solid free-form fabrication (SFF), material deposit manufacturing, material addition

manufacturing, material inress manufacturing (MIM), etc. [1]. Еще меньшая ясность наблюдается в литературе на русском языке. Помимо термина "стереолитография", нет общепринятых названий ни для обозначения всего направления, ни для его отдельных ветвей. Принимая во внимание дискуссию, развернувшуюся по этому вопросу на I Всероссийском семинаре по лазерно-компьютерным технологиям создания деталей сложной формы [6], предлагаем использовать термин "послойное наращивание" для всего рассматриваемого направления как отражающий наиболее важную особенность, отличающую эту технологию от технологий удаления (резанием, физико-химическими методами) и деформирования в жидком (литье) и твердом (обработка давлением) состояниях. Другие термины мы рассмотрим по мере их появления в тексте.

Как ясно из сказанного выше, одним из важнейших вопросов лазерного этапа технологии послойного наращивания является обеспечение необходимой точности и производительности синтеза (отверждения, спекания, вырезки) отдельных слоев изделия. Эти параметры процесса определяются выбором лазера системы доставки лазерного излучения до объекта воздействия. В настоящей работе именно последнему вопросу в связи с его наименьшей изученностью применительно к технологии послойного наращивания и уделено основное внимание.

Здесь возможны две основные альтернативы: сканер и плоттер. Сканирующие системы обеспечивают более высокие скорости обработки, но они имеют ограничения, связанные с оптическими искажениями и величиной поля обработки. Плоттерные системы обеспечивают большие точности на больших полях, но имеют ограничения по скорости обработки. Как сканирующие, так и плоттерные системы имеют фундаментальные механические ограничения на высоких скоростях обработки, что требует разработки специальных алгоритмов коррекции.

1. СКАНИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

1. Оптические ограничения

Сканирующая система обычно содержит два зеркала, закрепленных на крутильном электромеханическом приводе. Сканаторы имеют фундаментальные оптические ограничения, связанные со способом управления лазерным лучом. Поэтому для обеспечения требуемой точности обработки необходимо проанализировать оптическую схему сканатора. Детальный анализ и расчеты величин различных составляющих оптических искажений приведены в работе [7]. Здесь мы остановимся лишь на кратких выводах и окончательных формулах.

Лазерный луч (рис. 1) фокусируется линзой L и попадает последовательно на два зеркала сканатора M . Угол отклонения зеркал $\omega(t)$ задается управляющими сигналами, которые вырабатываются персональным компьютером. Таким образом, сфокусированный луч перемещается в

плоскости обработки PP по траектории, зависящей от углов поворота зеркал, закрепленных на валах сервомеханизмов сканатора.

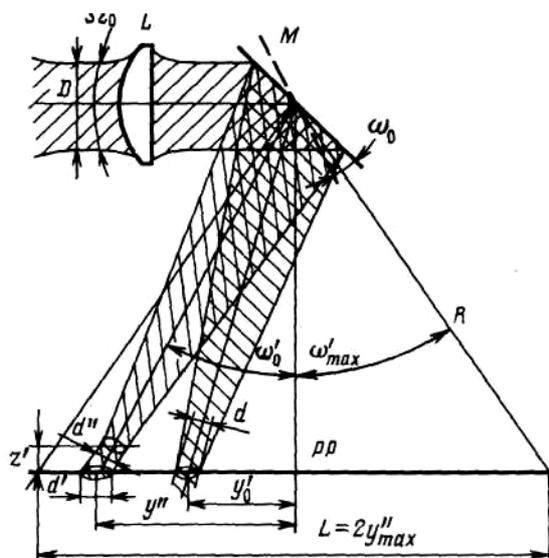


Рис. 1. Схема, поясняющая работу лазерного сканатора

Основная проблема разработки лазерного сканатора состоит в увеличении размеров поля обработки L при условиях минимизации размеров пятна лазерного излучения d и сохранения в допустимых пределах значения неоднородности Δ размеров пятна в пределах этого поля:

$$\Delta = (d' - d)/d. \quad (1)$$

Согласно законам оптики диаметр лазерного пучка в фокальной плоскости линзы равен

$$d = \Omega_0 f' = I f' / D, \quad (2)$$

где D - начальный диаметр пучка, Ω_0 - угловая расходимость лазерного излучения, f' - фокусное расстояние линзы, $I = D\Omega_0 = d\Omega'_0$ - инвариант Лагранжа-Гельмгольца (invar). Он имеет величину порядка длины волны λ для идеального дифракционно-ограниченного гауссова пучка. Увеличение инварианта от значения порядка λ означает ухудшение качества пучка, что приводит к большему размеру сфокусированного пучка в поле лазерной обработки (таблица 1). При этом возникают два основных типа искажений пучка, связанных с его фокусировкой на поверхности сферы радиусом $R \sim f$ и центром радиуса кривизны, находящимся на зеркале M^1 . Первый вид искажений – дефокусировка – связан с отстоянием плоскости обработки от сферы во всех точках, кроме центра, на расстояние z' , в результате чего фокальное пятно приобретает размер d' (рис. 1). Второй тип искажений связан с наклонным падением пучка опять-таки во всех точках, кроме центральной, в результате чего круг преобразуется в эллипс.

¹ В действительности радиусы сфер в сагиттальной и меридиональной плоскостях различны по величине, так как центры кривизны находятся на разных зеркалах сканатора.

Таблица 1. Основные типы лазеров, используемых в технологиях 3D-синтеза

Тип лазера	λ , мкм	Ω , мрад	D , мм	I , мм - мрад
CO ₂	10,6	3	7	21
YAG:Nd	1,06	2	3	6
Ar	0,48	1	1	1

Примечание. Видно, что для CO₂ и Ar лазера $I \sim 2\lambda$, т.е. пучок близок к дифракционно-ограниченному; для YAG:Nd-лазера $I \sim 6\lambda$ – пучок далек от дифракционно-ограниченного.

Уже из самых общих соображений (рис. 1, формулы (1) и (2)) становится ясно, что требования уменьшить размер пятна лазерного излучения в фокальной плоскости d и неоднородность Δ и одновременно увеличить поле обработки L противоречат друг другу. Подробный анализ приведен в работе [1], он приводит к выражению

$$\Delta = (LI/4Dd)^2 \left[1 + 0,5(LI/4Dd)^2 (D/d)^2 \right] \quad (3)$$

Легко увидеть, что выражение (3) можно также записать через значение угла поворота зеркал ω_0 :

$$\Delta = \omega_0^2 + 0,5\omega_0^4 (D/d)^2, \quad (4)$$

где $\omega_0 = LI/4Dd$. Первое слагаемое в выражении (4) показывает эффект наклонного падения пучка на краях поля, а второе – эффект кривизны поля.

Единственным способом уменьшить d и Δ , сохраняя требуемый размер L , является увеличение начального диаметра пучка D (например, с помощью телескопа), но этот диаметр ограничен максимальным размером зеркала D_{\max} . Кроме того, максимальный размер пучка D ограничен, исходя из принципа Рэлея:

$$D < I/4\delta\omega, \quad (5)$$

где $\delta\omega$ – минимальный угол поворота зеркала, ограниченный чувствительностью сервомеханизма сканатора или размером зеркала D_{\max} :

$$D < \min(D_{\max}, I/4\delta\omega). \quad (6)$$

Таковы фундаментальные физические и технические ограничения, накладываемые на параметры L , d и Δ .

Результаты расчетов по приведенным выше формулам представлены на рис. 2, где показаны зависимости угла поворота зеркал ω_0 и неоднородности Δ от размеров поля L для типов лазеров, приведенных в таблице. Принимая, что максимальный размер входного пучка D_{\max} , ограниченный размером зеркала, равен 10 мм, минимальный угол поворота сервомеханизма $\delta\omega = 3 \cdot 10^{-5}$ рад, оценим размер входного пучка рассматриваемых лазеров и возможности его расширения.

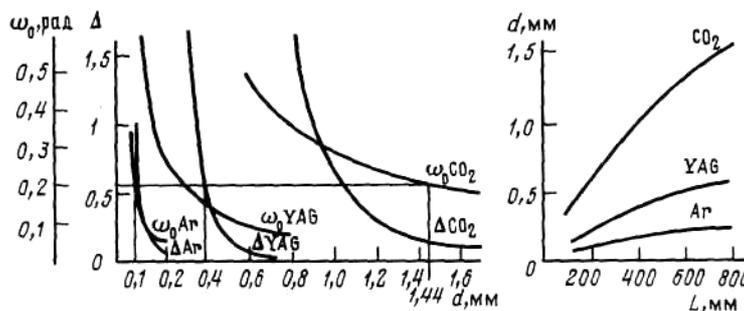


Рис. 2. Зависимость угла поворота ω_0 и величины Δ от диаметра луча d в плоскости обработки и d от размеров поля L

Для CO_2 -лазера получаем, что $D < \min(10 \text{ мм}, 700 \text{ мм})$ и принимаем $D = 7 \text{ мм}$, т.е. работа без телескопа. Для YAG:Nd-лазера $D < \min(10 \text{ мм}, 20 \text{ мм})$ и принимаем $D = 10 \text{ мм}$, т.е. применяем 5^\times -телескоп. Для аргонового лазера $D < \min(10 \text{ мм}, 30 \text{ мм})$ и принимаем $D = 10 \text{ мм}$, т.е. применяем 10^\times -телескоп. Из рис.2 можно видеть, что для CO_2 -лазера минимальный размер пятна лазерного излучения в зоне обработки ограничен величиной $\omega_0 = 0,2 \text{ рад}$ и равен 2 мм для $L = 800 \text{ мм}$ и 1 мм для $L = 400 \text{ мм}$. Для YAG:Nd-лазера соответствующие значения равны 0,2 и 0,1 мм, а минимальный размер ограничен величиной неоднородности $\Delta = 0,3$. Для аргонового лазера размер пятна также ограничен величиной допустимой полевой неоднородности Δ , а соответствующие значения d равны 0,11 и 0,055 мм.

С точки зрения применения этих типов лазеров в процессах послойного наращивания трехмерных объектов можно сделать вывод, что параметры лазера, сканера и оптической системы связаны друг с другом столь тесно, что при конструировании технологических установок следует учитывать не только требования энергетики, но и пространственно-геометрические параметры лазерного излучения (инвариант Лагранжа-Гельмгольца). Возможность удовлетворить требованиям минимальных величин d и Δ при увеличении размеров поля L ограничена инвариантом Лагранжа-Гельмгольца, который возрастает с увеличением длины волны излучения. Поэтому CO_2 -лазера со сканирующей системой нецелесообразно использовать при полях обработки более 200-300 мм, так как размер пятна сфокусированного излучения при этом выходит за допустимые границы.

Для более коротковолновых лазеров, таких, как YAG:Nd, аргоновый и гелий-кадмиевый, сканирующие системы обеспечивают достаточно высокие точности обработки, что позволяет успешно применить их в стереолитографических 3D-системах, где требуется высокое быстродействие сервомеханизмов.

2. Механические ограничения

Максимальная скорость сканирования V , которую может обеспечить сервомеханизм при соблюдении необходимой точности обработки, зависит от конструкции сервомеханизма и момента инерции зеркал (т.е. их массы и

размеров). Размеры и массы зеркал зависят в первую очередь от диаметра пучка лазерного излучения D и его мощности P . Таким образом, имеется связь между скоростью сканирования и мощностью лазера. Кроме того, скорость лазерной обработки определяется плотностью мощности лазерного излучения на объекте лазерной обработки и характером процессов, протекающих при этом.

Некоторые виды механических искажений, такие, как разомкнутость замкнутых контуров и динамические ошибки в местах мгновенной смены направления и/или величины скорости сканирования, могут быть частично или полностью скомпенсированы за счет применения специальных приемов и алгоритмов. Так, например, путем задания дополнительного перезамыкающего отрезка управляемой величины можно скомпенсировать эффект разомкнутости контуров. Величина этого отрезка составляет 2-2,5 мм для скорости сканирования V порядка 150-250 мм·с⁻¹.

Следует также отметить, что первое и второе зеркало сканатора обычно имеют разные размеры и массу, поэтому различаются и их моменты инерции. Различны соответственно и величины динамических искажений обработки траектории в продольном и поперечном направлениях.

2. ПЛОТТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Плоттерные системы доставки лазерного излучения имеют два привода (шаговых, линейных или других типов), которые осуществляют перемещение фокусирующей оптики в поле обработки. Лазерное излучение доставляется к линзе с помощью зеркал или другими способами.

В данном случае размер рабочего поля L не связан с размерами пятна лазерного излучения d и точностью обработки (d и Δ). Поэтому в отличие от сканатора здесь можно использовать линзу с гораздо меньшим фокусным расстоянием, т.е. $f_{\text{плот}} \ll f_{\text{скан}}$. Согласно выражению (2), размер пятна лазерного излучения тогда $d_{\text{плот}} \ll d_{\text{скан}}$. Соответственно можно достигнуть большей точности обработки, заменив сканирующие системы плоттерами.

Однако плоттеры имеют значительные механические ограничения, связанные в основном с существенно большей инерционной массой приводов зеркал. Даже не вникая глубоко в суть работы плоттера, можно понять, что невозможно обеспечить перемещение достаточно тяжелого привода по более или менее сложной траектории с высокой и постоянной скоростью V (например, в случае необходимости реверса мы должны сначала остановить двигатель и только потом изменить направление движения). Таким образом, скорость принципиально является переменной величиной. Соответственно необходимо обеспечить условие постоянства соотношения мощности и скорости:

$$P/V = hdQ/\chi A = B = const, \quad (7)$$

где h – толщина слоя материала, Q – удельная теплота процесса обработки, χ – коэффициент поглощения материала, A – коэффициент

пропускания оптической системы. Только в том случае энергетические условия на поверхности будут обеспечивать стабильную обработку (например, резку с постоянной шириной реза d). По этой причине, во-первых, при плоттерной схеме доставки требуется использовать импульсно-периодический лазер (так как нет возможности управлять непрерывным излучением, согласно закону (7)). Во-вторых, закон управления мощностью лазера должен быть следующим:

$$P(t) = BV(t), \quad (8)$$

т.е. необходимо отслеживать текущую скорость обработки и соответственно управлять мощностью лазерного излучения.

Рассмотрим теперь принципы управления для случая двух независимых перемещений по осям X и Y . Основная проблема состоит в том, чтобы обеспечить минимальное время обхода замкнутого контура, имеющего переменную кривизну. Для идеальной механической системы очевидно, что здесь не возникает никаких проблем, кроме участков смены направления (углов). В зависимости от величины углов, длины и радиусов допустимых дуг существует ряд ограничений и встает задача оптимизации выбора траектории.

В принципе существуют два способа решения проблемы. Первый состоит в том, что в углах траектории выполняется дополнительная петля за пределами замкнутого контура (I на рис. 3). Однако этот способ непригоден для выполнения углов, если траектория является отверстием. Поэтому обратимся к другим способам выполнения требуемой траектории с допустимым отклонением (II-IV на рис. 3).

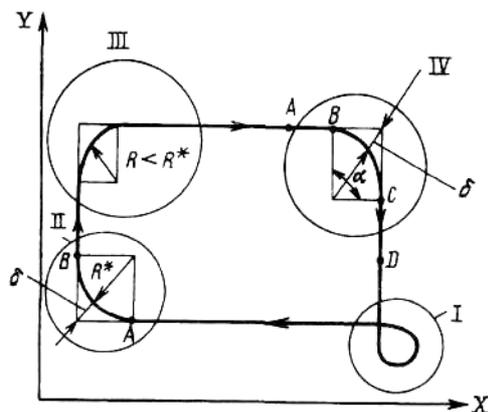


Рис. 3. Прямоугольная траектория для анализа работы плоттерной системы и различные тактики выполнения углов

Выберем один из стандартных законов для каждого из парциальных движений по координатам X и Y – синусный закон изменения ускорения. Это обеспечивает приемлемую динамику каждого парциального перемещения и удовлетворяет таким требованиям механики, как отсутствие ударов и вибраций. Можно показать, что закон перемещения при изменении направления на угол $\pi/2$ будет следующим:

$$X = \frac{a^* t^*}{\pi} \left(t + \frac{t^*}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t^*} \right) - \frac{a^* t^{*2}}{\pi},$$

$$Y = \frac{a^* t^*}{\pi} \left(t - \frac{t^*}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t^*} \right),$$
(9)

где a^* - максимальное значение ускорения, t^* - время ускоренного движения на участке траектории, которая является дугой с радиусом

$$R^* = a^* t^{*2} / \pi. \tag{10}$$

Используя выражение для времени прохода дуги $t^* = V^* \pi / 2\pi^*$, можно получить связь радиуса кривизны с параметрами V^* и a^*

$$R^* = V^{*2} \pi / 4a^*. \tag{11}$$

Тогда максимальная ошибка отработки траектории будет равна

$$\delta = R^* (\sqrt{2} - 1), \tag{12}$$

а минимальная скорость перемещения по траектории составит $\sqrt{2}V^*/2$.

Если же величина ошибки, рассчитанная, согласно выражению (12), неприемлема, то нужно применять иную тактику передачи траектории.

На рис. 4 показана зависимость времени отработки дуговых траекторий от ошибки δ , а на рис. 5 – относительной ошибки δ/R от величины угла поворота траектории.

Таким образом, при любом законе изменения ускорения время перехода от одного направления к другому увеличивается, если допустимая погрешность уменьшается. Минимальное время передачи можно получить, используя одновременное изменение скоростей частных перемещений по координатам X и Y .

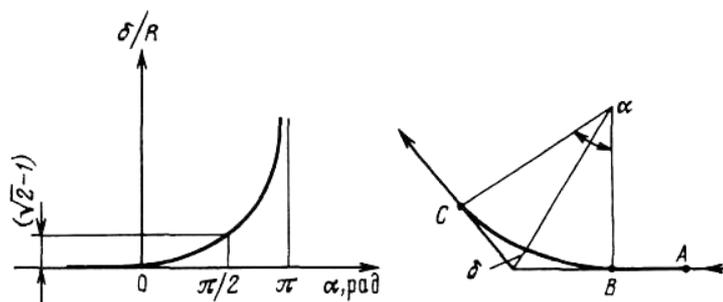


Рис. 4. Зависимости времени выполнения дуги от ошибки δ и относительной ошибки δ/R от величины угла поворота траектории

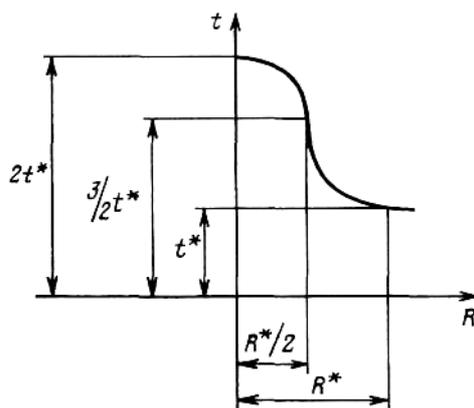


Рис. 5. Тактика прохождения угла траектории

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе приведенного анализа были разработаны две системы для реализации технологии послойной сборки (ЛОМ-технологии). Используются в них CO_2 -лазера мощностью 30-40 Вт.

Устройство доставки лазерного излучения установки КАРАТ-200 основано на оптимизированной сканирующей системе. Все геометрические искажения оптики и сервомеханизмов уменьшены до менее чем 0,3 мм за счет использования специального алгоритма обработки траектории. Линза из селенида цинка расположена после сканатора и имеет фокусное расстояние ~ 240 мм, что позволяет получить ширину реза $\sim 0,5$ мм.

Процесс наращивания в модели является автоматическим и обеспечивается блоком подачи и склейки. Блок позволяет осуществлять слежение за текущей высотой детали и по мере необходимости - корректировку процесса изготовления.

В качестве материала применена специально разработанная бумага, имеющая толщину ~ 70 мкм и слой термоактивируемого клея. Температура склейки бумаги составляет $\sim 90^\circ\text{C}$.

В системе КАРАТ-400 для управления лазерным лучом используется плоттер, управляемый согласно оптимизационным алгоритмам, приведенным выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kruth J.P. // Ann. CIRP. 1991. V. 40/2. P. 603.
2. Олмен У. // За рубежом. 1993. № 8. С. 21.
3. Proc. III Intern. Congress "Intelligente Produktionssysteme - Solid Freeform Manufacturing". Dresden (Germany), 1995. 369 с
4. Proc. II Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, USA, 1991.
5. Куликов А., Зайцев В. // Наука и жизнь. 1995. № 8. С. 16.
6. Тр. I Всероссийского семинара "Лазерно-компьютерные технологии создания деталей сложной формы". Шатура: НИЦТЛ РАН, 1996.
7. Veiko V.P., Rodionov S.A., Timofeev B.P. et al. // Proc. Europ. Conf. on Rapid Prototyping and Manufacturing. Dipoli Centre, Espoo, Finland, 1996.