

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПО СЕЛЕКТИВНОМУ ЛАЗЕРНОМУ СПЕКАНИЮ

© 2003 В.В. Багров, Н.А. Климов, С.В. Нефедов, А.Л. Петров,  
В.И. Щербаков, И.В. Шишковский

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Представлено описание программно - аппаратного комплекса по селективному лазерному спеканию (СЛС) объемных изделий деталей машин, действующего в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. Обсуждаются новые технические решения, преимущества и недостатки разрабатываемых нами подходов по синтезу объемных изделий методом СЛС.

### **Быстрое прототипирование как важное направление НТП**

В настоящее время скорость и стоимость внедрения в производство новой техники напрямую зависят от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире высокотехнологичные методы трехмерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

Актуальным является также задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс (установку), позволяющий в сжатые сроки (несколько часов вместо нескольких месяцев или лет) изготовить прототипы инструментов и изделий с любой степенью сложности внутренней или внешней поверхности и точности, без предварительных затрат на подготовку оснастки.

Наряду с этим, умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности как медицинское протезирование, криминалистика, реставрационные работы является не менее актуальным.

Таким образом, в рыночных условиях давление международного соревнования требует, чтобы новые изделия (продукты) были бы как можно более быстро и дешево разра-

ботаны, произведены и представлены на рынок. Стандартные многоступенчатые процедуры конструирования и проектирования не способны отвечать этим требованиям сегодняшней динамики производства. Сокращение временных циклов изготовления продукции и увеличение номенклатуры изделий, наряду с возрастающими требованиями по качеству, неизбежно должны были бы привести к развитию этих новых тенденций на рынке конструирования, проектирования и создания новой техники и продукции. Так как большинство издержек современного производства имеется именно в этой фазе, то очевиден высокий потенциал ускорения темпов развития для тех компаний и производств, которые осознали эти проблемы и внедряют эти новшества у себя на производстве.

Речь идет об объединении развитых уже в достаточной мере систем автоматического проектирования - САПР (англ. термин Computer Aid Design – CAD) реализованных в широко известных профессиональных пакетах программ - AUTOCAD, 3D Компас, CATIA, Pro - Engineer, 3D Studio и т.д.) с новой высокой технологией синтеза объемных изделий деталей машин (англ. термины Rapid Prototyping & Manufacturing - RP&M, Solid Free Form Fabrication – SFFF и т.п.). Наиболее известными и коммерчески реализованными являются следующие SFFF методики послойного синтеза:

- лазерная стереолитография (Laser Stereolithography).

- селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering).
- послойное уплотнение (Solid Ground Curing).
- послойная заливка экструдированным расплавом (Fuse Deposition Modeling).
- послойное формирование объемных моделей из листового материала (Laser Object Manufacturing).
- непосредственное создание литевой формы (3D printing).
- объемная наплавка (LENS, DMD и т.п.).

Общим для всех методик быстрого прототипирования является возможность их применения для:

- проверки на выполнимость новых понятий (концепций) вещественного проекта;
- оценки пригодности/работоспособности разрабатываемых новых сложных механизмов;
- параллельной разработки нового изделия (программы) в нескольких направлениях (вариантах);
- обеспечения высокой точности, скорости и воспроизводимости копий деталей и машин;
- прямого использования этих копий в тестовых испытаниях;
- изготовления эталон - моделей и мастер - форм в технологии литья.

Последнее десятилетие XX века было отмечено бурным развитием различных способов (техник) реализации технологии быстрого прототипирования, которых к настоящему времени известно более десятка. Заметим, что некоторые из них даже не используют лазерное излучение и поэтому не лежат в сфере научных интересов нашей организации.

Совмещение CAD и RP&M технологий предлагает такие инструментальные средства и процедуры, которые являются идеальными для быстрого и эффективного в стоимостном плане преобразования виртуальных (компьютерных образов) изделий в рыночные продукты. В таблице приведены сведения из ИНТЕРНЕТ (см., например, [1]) источников, показывающие среднюю стоимость установок различных производителей, указаны не-

которые технологические особенности процессов (методик) послойного синтеза, а также приведена примерная стоимость используемых материалов. Оценки показывают, что стоимость изготовления одного усредненного объемного изделия (детали) размером 4×4×8 см разными методами колеблется в пределах от 50 до 300 \$US, в зависимости от сложности контура внутренней и внешней поверхности изделия, количества требуемых изделий, используемого материала и типа установки.

Из таблицы также видно, что стоимость некоторых установок может быть достаточно высока, что, однако, за короткое время окупается большей функциональностью изготавливаемых прототипов. Следует отметить, что все методики, программное обеспечение и используемые материалы являются торговыми марками соответствующих фирм, поэтому внедрение на рынок данной технологии “с нуля” представляется довольно сложным предприятием. Использование научно-технического опыта Самарского филиала ФИАН и его патентных разработок по материалам позволяет существенно сократить затраты будущим российским потребителям данного высокотехнологического направления. В том, что они появятся по мере становления российской экономики и развития промышленности, в том числе и в Самарском регионе, у нас не сомнений.

Оставляя в стороне широко представленное в литературе изложение сути самих методик RP&M, обсуждение их преимуществ и недостатков в сравнении друг с другом, в настоящей работе основное внимание сосредоточено на описании программно-аппаратного комплекса по СЛС объемных изделий деталей машин, действующего в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. По названным выше причинам патентного характера и ограниченности рамками скудного бюджетного финансирования РАН нам пришлось пройти все стадии НИОКР данной методики самостоятельно. Другими словами, цель работы - обсудить оригинальные технические решения, преимущества и недостатки разрабатываемых нами

**Таблица.** Сведения из ИНТЕРНЕТ-источников, показывающие среднюю стоимость установок различных производителей

Технология	Stereo-lithography	Wide Area Inkjet	Selective Laser Sintering	Fused Deposition Modeling	Single Jet Inkjet	Three Dimensional Printing	Laminated Object Manufacturing
Производитель	3D Systems			Stratasys	Solidshape	Z Corp.	Cubic Technologies
Основные свойства объемных изделий							
рабочий объем (в дюймах)	20 x 20 x 24	10 x 8 x 8	15 x 13 x 18	24 x 20 x 24	12 x 6 x 9	20 x 24 x 16	32 x 22 x 20
Скорость	средняя	хорошая	средняя	плохая	плохая	отличная	хорошая
Точность	очень хорошая	хорошая	хорошая	плохая	отличная	плохая	плохая
Чистота поверхности	очень хорошая	плохая	плохая	плохая	отличная	плохая	плохая (зависит от приложения)
Преимущества	лидер рынка, большие размеры деталей, точность, широкий ряд продуктов	лидер рынка	лидер рынка, точность, широкий ряд материалов	Хорошая цена, широкий ряд материалов,	точность, качество поверхности	высокая скорость, цвет, цена	Большие размеры деталей, литьевые формы, низкая стоимость материала
Недостатки	требует пост-обработки, хим. безопасность	маленькие размеры и вес, хрупкость, чистота поверхности	маленькие размеры, стоимость системы, чистота поверхности	скорость, низкая точность	скорость, ограничения материалов и размеров	ограничения материалов, хрупкость, чистота поверхности	низкая точность, устойчивость, чистота поверхности
Стоимость установки	\$75-800К	\$50К	\$300К	\$30-300К	\$70К-80К	\$30К-70К	\$120-240К
Стоимость материала \$/фунт							
полимеры	\$75-110	\$100	\$30-60	\$115-185	\$100		\$9
металл			\$25-30				
другие			\$5 (печной песок)			крахмал: \$0.35 / пластизол: \$0.60 / + инфльтрация	\$5-8 (бумага)

подходов по синтезу объемных изделий методом СЛС. Перспективность же самой методики СЛС, как одного из наиболее многообещающих направлений 3-х мерного послойного синтеза, неоднократно обсуждалась в наших работах ранее.

### Компьютерный дизайн и программное обеспечение станда по СЛС

Изготовление любого трехмерного изделия начинается с прорисовки конструктором его внешней и внутренней формы с точным указанием всех типоразмеров в натуральную величину в среде упомянутых выше графических САПР. Не следует забывать и о более простом но и дорогом с практической точки зрения способе – трехмерном сканировании поверхности. В обоих случаях результатом работы оказывается файл, содержащий всю информацию об объекте в цифровом формате. Поскольку каждому графическому пакету присущ свой формат представления данных (например, \*.3DS, \*.IGS, \*.DXF, \*.WRL), приходится использовать условно-бесплатное программное обеспечение (freeware, shareware), позволяющее преобразовать информацию из

одного графического формата в другой.

Для того чтобы облегчить работу конструкторов-проектировщиков, в технологии быстрого прототипирования был создан и свой специальный стандарт содержания данных об объекте. Формат STL (от слова STereo Lithography) файла первоначально был разработан для процесса лазерной стереолитографии, но в последующем взят за основу для других процессов послойного синтеза. В настоящее время он является общепринятым графическим стандартом представления данных о модели для всех систем быстрого прототипирования. Широкие возможности по его сжатию (архивации) и передаче по ИНТЕРНЕТУ позволяют организовать процесс создания изделия наиболее оптимально и мобильно.

В основе компьютерного описания STL формата, как впрочем и некоторых других, лежит метод 3-х мерной триангуляции поверхности модели. Простейшая трехмерная триангуляция поверхности изделия осуществляется треугольниками и может быть сглажена геометрическими фигурами более высокого порядка (рис.1), за счет чего достигается высокая точность и воспроизводимость синте-

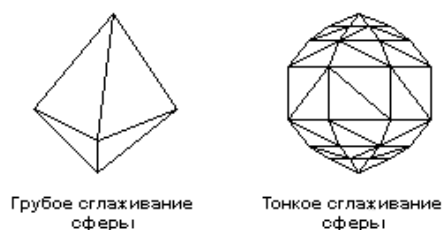


Рис.1. Триангуляция сферы

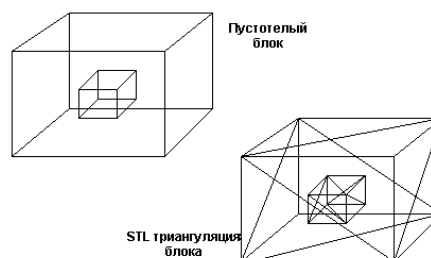


Рис.3. Метод поиска пустоты в объекте

зируемой поверхности.

“Поверхностные” треугольники определяются (нумеруются) с учетом направления узлов (вершины треугольников) по часовой стрелке (рис.2), а также с учетом подобных узлов в вершинах треугольников. При отсутствии перекрытия, очевидно, модель будет иметь промежутки, а неточное совпадение узлов означает ошибку триангуляции.

Следующим важным шагом является разбиение виртуального (компьютерного) изображения объекта на сечения, по которым в последующем и будет осуществляться процесс послойного синтеза вещественной копии. Правильный выбор ориентации расположения сечений в пространстве относительно самой детали является предметом отдельного исследования.

Общий метод определения промежутка (т.е. пустоты) в модели при ее сечении плоскостями здесь следующий. При испускании геометрического луча из одного угла (т.е. вершины поверхностного треугольника) через объемную фигуру он должен попасть в другой угол (т.е. другую вершину поверхностного треугольника) что означает - объект целый (рис.3). Если это не так - в объекте существует пустота.

Кратко описанный выше метод графического представления и соответствующий

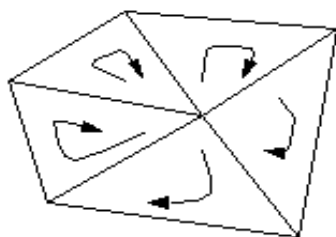


Рис.2. Правила обхода вершин треугольников на поверхности 3D объектов

ему стандарт был использован нами при создании управляющих процессом спекания программ.

Имея файл с координатами сечений 3-х мерного объекта нужно было разработать также и программу «развертки» то есть описать путь, по которому будет осуществляться сканирование лазерного луча в каждом слое сечения. В течение лазерного прохода (рис.4) излучение от лазера может достигать поверхности порошкового материала (и тогда он в данном месте будет происходить спекание /сплавление/) при открытой лазерной заслонке - «ДА» или, наоборот, когда заслонка закрыта, и обработка поверхности не проводится «НЕТ» (т.е. спекания не осуществляется в данном месте поверхности).

Таким образом (рис.5), STL файлы содержат сведения о:

- всех сечениях данной модели,
- всех составных частях модели (здесь несколько файлов может быть использовано),
- величинах допустимых отклонений по уровню на один слой порошковой композиции при опускании платформы.

В более продвинутых версиях управляющих программ учитываются допуски, сводящие к минимуму деформацию (усадку) отдельных слоев, ступенчатость боковых граней изделия и т.д.

Одним из существенных преимуществ метода СЛС порошковых композиций по сравнению со стереолитографией является

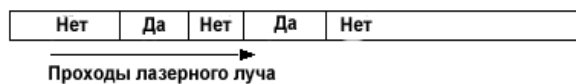


Рис.4. Развертка лазерного луча при одиночном проходе

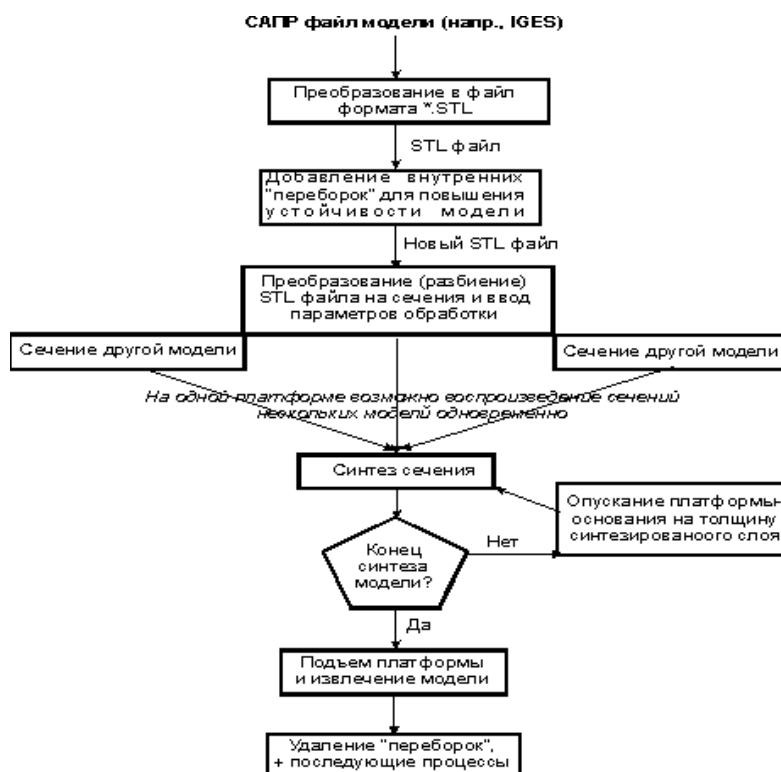


Рис.5. Блок-схема управляющей программы обработки с STL файлом

отсутствие поддержек (т.е. внутренних или внешних «переборок»), которые создаются на стадии компьютерной обработки 3-х мерного вида модели при помощи различных программ (напр. Solid Concepts, Los Angeles, California), но значительно усложняют структуру STL файла.

В настоящее время программно-аппаратный комплекс на базе технологической маркировочной установки КВАНТ-60 (рис.6 - лазер на YAG:Nd<sup>3+</sup>, работающий, в отличие от задач лазерной маркировки в непрерывном режиме) подключается с помощью кабеля к одному из стандартных параллельных портов IBM PC -XT/AT. Для этого в «Блоке Управления» лазерной установки используется плата сопряжения нашей разработки. По умолчанию устанавливается интерфейс между компьютером и лазером по шине данных через параллельный порт с номером 1 (адрес 378-37F h); в противном случае при запуске исполняемых программ в качестве параметра указывается номер параллельного порта: 2 - адрес 278-27F h или 3 - адрес 3B0-3B7 h. Так как шина данных работает с тактовой частотой около 12 МГц, увеличение производи-

тельности компьютера (за счет более мощного процессора) не имеет смысла. В установке КВАНТ-60 используются два сменных объектива с фокусными расстояниями  $f$  149 и 336 мм (диаметр пятна ЛИ  $d_n = 50$  и 100 мкм, соответственно). Максимально достижимая мощность ЛИ не более  $P = 24$  Вт контролируется на поверхности порошка с помощью приборов ИМО-2Н или ТИ-3. Управление лазерным пучком (ЛП) с помощью ком-



Рис.6. Технологическая маркировочная установка КВАНТ-60

пьютера в рамках поля 50×50 и 100×100 мм (1024×1024 точек) позволяет осуществлять сканирование по любому наперед заданному контуру, воспроизводя тем самым послойно изделие произвольной конфигурации. Процесс сканирования осуществляется с помощью дефлекторов (рис.7), максимальный угол отклонения зеркал в которых около 9,5°.

Нами разработаны следующие программы:

**1. Перекодировщики.** Каждая их программ перекодирования производит обработку исходных данных по определенному алгоритму и работает с графическими форматами типа стандартного бинарного упакованного TIF формата размером не более 1024×1024 пикселей (точек), а также BMP или PCX. То есть каждый слой (сечение) объемного изделия должен быть заранее “приготовлен” в одном из этих форматов.

Программа *CONTUR.EXE* осуществляет обход (например, квадратного) сечения по контуру (рис.8б). Она дает хорошие результаты для сечений, состоящих в основном из тонких линий (контурные рисунки). При обработке сложных заполненных сечений (например – типа фотографии) дает оптимальный обход рисунка, но при этом создает очень большой выходной управляющий файл (под оптимальностью обхода следует понимать соотношение количества пустых проходов лазерного луча установки “КВАНТ-60” к числу обрабатываемых точек). В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем что и исходный и с расширением \*.KWC .

Программа *RASTCONT.EXE* осуществ-

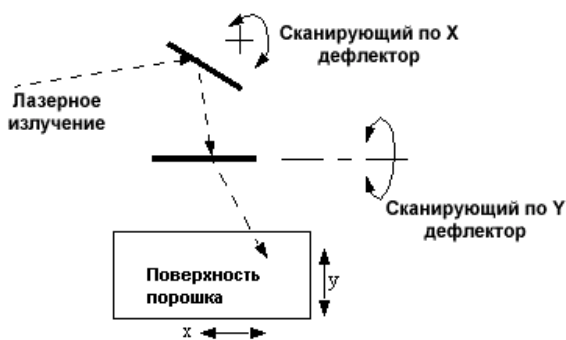


Рис.7. Устройство сканирования лазерного излучения

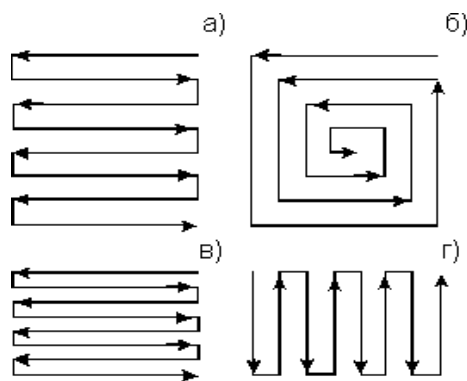


Рис.8. Возможные пути обхода сечения лазерным излучением

ляет растрово-контурный алгоритм перекодировки. Дает хорошие результаты при обработке любых сечений объектов. Единственным недостатком этого перекодировщика является то, что при спекании слоя самая последняя обрабатываемая линия, из ряда соседних линий, будет отличаться от них своей яркостью. Такие линии будут разбросаны по всему сечению, что несколько портит общий вид обработанной поверхности. Следует отметить, что все сказанное относится также и к *CONTUR.EXE*, но в большинстве случаев эти последние линии для контурного обхода будут находиться по центру спекаемых слоев, что создает иллюзию “выпуклости” изображения. В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем что и исходный и с расширением \*.KWO.

Наконец, программа *RASTR.EXE* осуществляет растровый проход по меандру (рис.8а). Данный метод свободен от неравномерности по яркости (см. выше), но обход не оптимален, так как время спекания существенно возрастает и имеет достаточно большой размер выходного управляющего файла. В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем что и исходный и с расширением \*.KWR.

На пульте управления установки предусмотрен тумблер, позволяющий менять направление обхода (рис.8а) с “Кругового” (см. рис.8в) на “Матричный” (см. рис.8г).

**2. Спекание отдельных слоев** осуществляется нами с помощью программы *SINTER.EXE*. После запуска программы

*SINTER.EXE* лазерный луч сразу смещается в правый дальний угол от оператора (точка 0,0). Далее *SINTER.EXE* предлагает оператору ввести следующие параметры:

- величину смещения  $N$  в пикселях от точки 0,0 до того места, откуда необходимо начать процесс спекания;
- запрашивается шаг  $N_y$  по координате  $Y$  (от 1 до 20);
- количество линий (проходов)  $N_{1y}$  по  $Y$ , где будет проведено спекание, которое должно удовлетворять условию  $N_{1y} \leq (1024 - N) / N_y$ ;
- запрашивается шаг по  $X$  (от 1 до 10);
- предлагается ввести время успокоения лазерного луча в точке (в тактах IBM PC) при смещении от точки к точке.

После получения этих данных программа готова к работе и достаточно нажать <Enter>, чтобы требуемый квадрат (прямоугольник) был “заштрихован” лазерным лучом. Многократное повторение <Enter>, чередуемое с подсыпанием порошка, позволяет формировать простейшие объемные фигуры (куб, параллелепипед). Если необходимо скорректировать параметры задачи, можно нажать клавишу “P” (или “p”) и повторить ввод параметров. При нажатии “Esc” - программа выходит в ДОС. По окончании спекания каждого слоя программа возвращает лазерный луч в точку 0,0 и выводит время, затраченное на процесс сканирования. Зная расстояние между точками (например, для объектива с  $f = 149$  мм оно равно  $\sim 50$  (мм)/1024), геометрические параметры отсканированного сечения ( $N$ ,  $N_y$ ,  $N_{1y}$ ) и выданное время, можно найти скорость сканирования лазерного излучения по поверхности.

Таким образом, данная программа является мощным инструментом при поиске оптимальных режимов СЛС. Следует напомнить, что при необходимости изменить путь обхода (рис. 10 в, г) достаточно просто переключить тумблер “Маркировка: Матричная  $\leftrightarrow$  Круговая” в противоположное положение на “Блоке Управления” КВАНТ-60.

**3. Сервис.** Программно-аппаратный комплекс имеет несколько сервисных программ.

Так программа *KWTEST.EXE* позволяет протестировать оборудование, то есть наличие интерфейса между IBM PC и дефлекторами, а также выполнить ряд простейших операций. При нажатии клавиш:

“Esc” - программа выходит в ДОС;

<F1> - осуществляется ручной тест, то есть можно задать любые координаты в поле 1024x1024 и лазерный луч должен переместиться в это место;

<F2> - лазерный луч “описет” квадрат размером 50x50 мм (при объективе 149 мм) и 100x100 мм при объективе 336 мм;

<F3> - в рамках всего квадрата будет лазерным лучом “начерчена” сетка;

<F4> - лазерный луч “пройдет” по диагоналям квадрата;

<F5> - лазерный луч “впишет” квадрат, повернутый относительно основного центра поля на  $45^\circ$ ;

<F6> - осуществляется проверка “не ворота” в точку;

<F7> - оценивается размер поля сканирования:

Программа *VISUAL.EXE*, позволяет визуализировать явно результат работы перекодировщиков, то есть показать на экране компьютера контур сечения (рисунка), который предстоит использовать управляющей программе. Изображение можно “гонять” по экрану с помощью управляющих клавиш “стрелка вверх”, “стрелка вниз”, “стрелка влево”, “стрелка вправо”. Если изображение не сдвигается, то в этом направлении нет ничего интересного. Выход из программы осуществляется нажатием клавиши “Esc”.

**4. Синтез объемных изделий.** Программа *NORM.EXE* позволяет производить послойный синтез объемных изделий. Предварительно подготовленный файл в STL формате должен быть сохранен в ASCII кодах (расширение \*.ASC), то есть фактически файл должен содержать только координаты вертексов узлов поверхностных треугольников. Также желательно удалить из файла всю информацию о цветах 3D объектов, материалах и способах “редеринга”, используемых графическим пакетом, но не существенных

для послойного СЛС.

После запуска программа *NORM.EXE* предлагает выбрать название файла из текущей директории с расширением \*.ASC, содержащий информацию об синтезируемом изделии. Если файла в текущей директории нет, можно указать полный путь к искомому файлу или провести его поиск подгружаемыми средствами ДОС. После ввода файла программа загружает его в оперативную память машины. К сожалению, оперативная память исполняемых в ДОС программ не может быть больше 640 Кб, поэтому если файл ASC формата очень большой (реальные размеры STL файлов могут достигать 20-40 Мб!), очевидно необходимо разбить 3D объект средствами профессиональных графических пакетов на “мелкие” части и спекать их отдельно. Другой путь решения данной проблемы, это переход к другой операционной системе (Windows, Unix – последняя как раз и используется на технологических установках SinterStation по СЛС фирмы 3D Systems, Co.). Однако решаемые нами научно-технические задачи пока не требуют от нас таких шагов.

После загрузки графического файла *NORM.EXE* предлагает в интерактивном меню ввести следующую информацию:

- с какого слоя требуется начать синтез изделия;

- какое приращение (смещение) в вертикальном направлении следует задать при спекании (то есть требуется спекать каждый последующий слой, каждый второй, десятый, сотый и т.д.);

- предлагается ввести коэффициент (от 1 до нуля), позволяющий пропорционально уменьшить все геометрические размеры синтезируемого 3D объекта;

- предлагается ввести время успокоения лазерного луча в точке при спекании (в тактах IBM PC);

- предлагается ввести время, требуемое на переход от точки к точке, когда нет спекания (в тактах IBM PC);

На любой стадии процесса ввода параметров при нажатии клавиши “Esc” можно выйти в ДОС, либо повторить ввод с новыми параметрами. Информацию можно также из-

менять при переходе на следующий слой, что позволяет изменять условия спекания от слоя к слою, то есть формировать градиентное изделие.

Если сечение 3D объекта имеет сложный внутренний контур, в программе предусмотрена возможность перехода на “ручной” режим выбора тех сечений, которые будут “заштриховываться” лазером. Для этого достаточно “щелкнуть” левой кнопкой “мыши” по месту штриховки.

### **Особенности экспериментальной установки для СЛС**

В Самарском филиале ФИАН с 1993 г. ведутся работы по быстрому прототипированию, включая экспериментальные исследования физико-химических и механических особенностей процесса СЛС порошковых композиций на базе лазерных технологических установок КВАНТ-60 ( $\lambda = 1,06$  мкм) и ИЛГН-701 ( $\lambda = 10,6$  мкм). За этот период наш экспериментальный стенд подвергался многократной модификации рис.9а (сравни например [2], где подробно изложен сам процесс послойного СЛС и первоначальная схема нашей установки). Основной особенностью нашей реализации метода СЛС является отсутствие усилий при разравнивании порошковой композиции по спекаемой поверхности и использование длины волны ЛИ ( $\lambda = 1,06$  мкм).

В настоящее время завершено создание стенда для послойного СЛС порошковых композиций в защитной среде рис.9. Стенд состоит из двух основных систем: системы пошагового опускания рабочего основания и системы дозировки порошков в рабочую зону для лазерной обработки.

Плита и наружная поверхность рабочего основания в начале работы совмещены до полной плоскостности. Это достигается подстройкой опорных штанг 9 (4 опоры) с помощью регулировочных винтов. Шток гидроцилиндра 7 перемещения рабочего основания в это время находится в крайнем выдвинутом положении. Перемещение осуществляется за счет дозированной подачи рабочей гидрожидкости в вер-



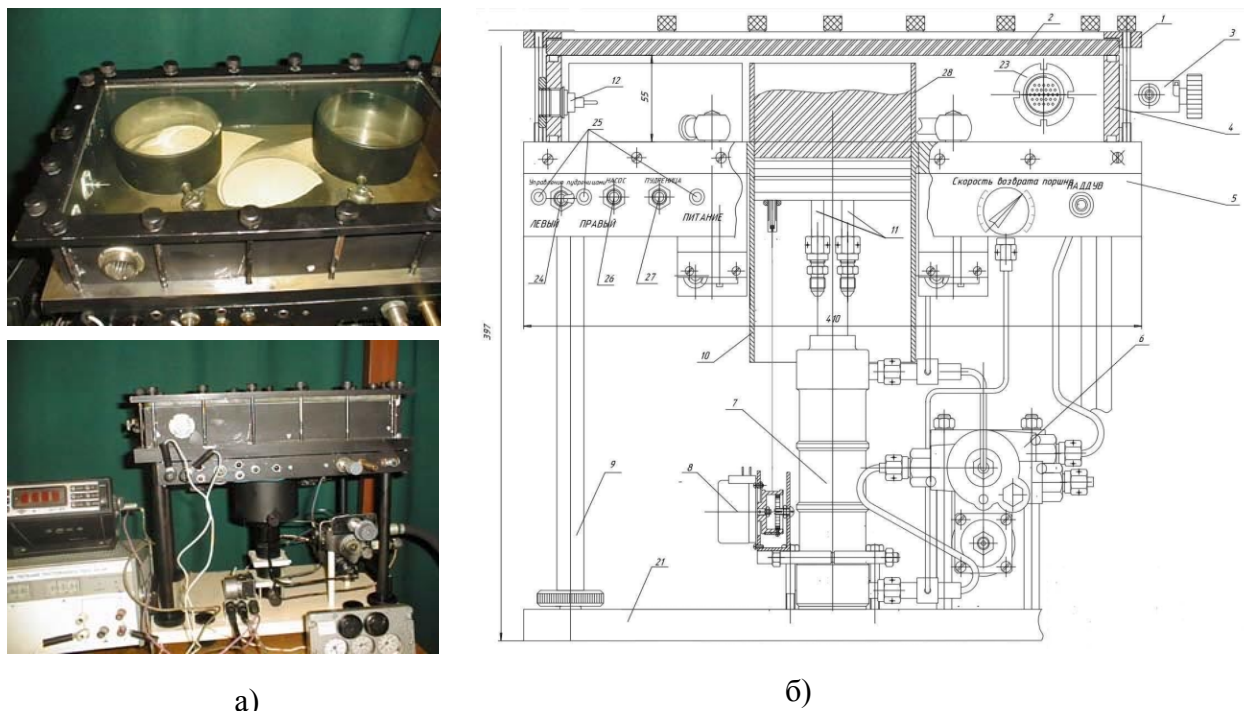


Рис.9. Стенд для послойного СПС порошковых композиций в защитной среде:  
а - внешний вид сверху и сбоку; б - сборочный чертёж (вид сбоку)

хнюю полость гидроцилиндра от импульсного гидронасоса (на рабочем чертеже поз.б), который приводится в действие от электромагнита. Шаг подачи поршня может регулироваться от 10 до 200 мкм настройкой хода плунжера насоса с помощью винта, расположенного в подвижном ястре электромагнита. Заполнение полости плунжера жидкостью происходит через боковое отверстие по окончании рабочего хода и после возврата плунжера в исходное положение под действием усилия пружины.

Для обеспечения быстрого и полного заполнения рабочего объёма плунжера, а также для возврата поршня в исходное положение по окончании работы, гидросистему следует наддувать внешним газом до давления 2,5-3 Кг/см<sup>2</sup>. Возврат поршня гидроцилиндра в исходное положение осуществляется за счёт не сбалансированного усилия от давления наддува на шток гидроцилиндра после открытия дросселирующего крана, когда происходит перетекание жидкости из верхнего в нижний объём гидроцилиндра. Это усилие составляет порядка 5-6 Кг и для плавного возврата поршня в исходное положение используется регу-

лирующий поток жидкости игольчатый дроссель-кран. Наддув гидросистемы осуществляется от внешнего газового баллона через редуктор. Рабочее основание представляет собой поршень, двигающийся в цилиндре большого диаметра 10. Он жёстко посажен на шток гидроцилиндра, уплотнён по образующей поверхности цилиндра 10 с помощью комбинированного радиального уплотнения на базе резинового и фторопластового колец. Для уменьшения трения о стенки цилиндра 10 уплотнение натёрто специальным ультрадисперсным фторопластовым порошком "Суперфайн". Для того чтобы в уплотнение не попадал рабочий порошок, в верхней части поршня в канавке установлено пылесборочное кольцо из плотного фетра. Поскольку предполагаются работы с подогревом или охлаждением рабочих порошков, внутри поршня сделаны канавки для пропускания через них охлаждённого или нагретого газа (жидкости) для чего в нижнюю стенку поршня заделаны герметично два штуцера 11. Для контроля положения поршня в процессе спекания изделия в системе установлен датчик положения поршня 8. Он представляет

собой точный переменный проволочный резистор типа ПЛ-11 с номиналом 20 Ком, на оси которого установлен подпружиненный шкив с намотанным на него тросиком, который связан с нижней частью поршня. Двигаясь, поршень сматывает тросик с барабана и вращает ось резистора. Контроль осуществляется с помощью цифрового омметра при предварительной калибровке датчика по часовому индикатору.

Вторая система предназначена для внесения порошка в рабочую зону для лазерной обработки. После опускания поверхности поршня на величину шага, порошок (или разные порошки), находящиеся в бункерах 28, вносятся в рабочую зону поворотом бункеров до совпадения осей большого цилиндра и основания бункера. Бункера 28 представляют собой отрезки цилиндра того же диаметра, что и большой цилиндр 10, их торцы притёрты к шлифованной поверхности плиты. Это позволяет работать с очень мелкими порошками без их утечки из бункера. Поворот бункера осуществляется приводом, состоящим из коллекторного электродвигателя постоянного тока, червячного и цилиндрического редукторов и кривошипно-шатунного механизма. Один из кривошипов, установленный на редукторе, совершает в процессе нанесения порошка поворот на  $360^{\circ}$ , второй кривошип при этом совершает возвратно- качательное движение на угол около  $100^{\circ}$ . Это перемещение начинается с замыкания оператором кнопки S2, которая шунтирует разомкнутый в крайнем положении микровыключатель Кн.1 или Кн.2 – в зависимости от положения тумблера S3 “Левый” или “Правый” - и подаёт ток на электродвигатель М1 или М2. Наличие этого переключателя делает невозможным одновременное движение левого и правого бункеров. Полно оборотный кривошип начинает вращение и замыкает микровыключатель. Движение происходит до тех пор, пока толкатель микровыключателя опять не попадёт в выемку на поверхности полнооборотного кривошипа и не выключит электродвигатель. Для контроля (какой из приводов – левый или правый - в

настоящее время активирован) на панели управления установлены сигнальные лампы 25 Лн.1 и Лн.2 . Наличие питающего напряжения подтверждается горячей лампочкой Лн.3 “Питание”. Кнопка S1 подаёт питание на электромагнит ЭМ-1 импульсного насоса.

Лазерное излучение фокусируется на поверхности порошка, проходя через защитное стекло 2. Стекло прижимается к корпусу и плите невыпадающими винтами через рамку 1. Съёмный корпус имеет в торце канавки, куда уложено резиновое уплотнение. Рабочее пространство между стеклом и плитой, ограниченное по бокам корпусом, может вакуумироваться и заполняться различными газами под давлением через запорные краны. В стенках корпуса также установлены высоковольтные вводы 12 и герметичный разъём 29 для подключения всевозможных внутренних датчиков. Стенки корпуса скреплены винтами и посажены на силиконовый герметик. Для плоскостности всего устройства в нижней плите 21 установлены регулируемые по высоте опоры.

### Заключение

Таким образом, конструктивные особенности настоящего стенда, в сравнении с ранними модификациями, значительно расширяют возможности по СЛС и изучению сопровождаемых спеканию физико-химических процессов:

- размер спекаемого объема увеличен до  $10 \times 10 \times 10$  см;
- имеется возможность спекания в защитной среде инертных газов, вакууме, либо в среде химически активных газов;
- автоматизирован процесс опускания платформы в вертикальной плоскости, минимальный шаг платформы 30-20 мкм;
- предусмотрено два бункера для спекания разнородных порошков;
- процесс разравнивания порошков автоматизирован;
- предусмотрена возможность подогрева платформы при спекании;
- ввод термпары позволяет контролиро-

вать температуру в зоне спекания;

- предусмотрены технологические отверстия для фото- видеосъемки и диагностики процесса спекания;

- автоматизация ряда перечисленных выше операций открывает путь для создания компьютерной программы по управлению всем процессом СЛС в замкнутом цикле.

Подводя итоги, следует отметить: описанный выше программно – аппаратный комплект позволяет решать практически любые задачи по оптимизации режимов СЛС и поиску перспективных порошковых композиций для самого процесса синтеза. Комплекс открыт для последующей доработки и автоматизации. В настоящее время ведутся работы по полной автоматизации всех перечисленных выше операций, что открывает путь для создания компьютерной программы по управлению всем процессом СЛС в замкнутом цикле.

Представленные работы проводились, в

том числе, при поддержке Комиссии по работе с молодыми учеными РАН (научный проект 6-го конкурса-экспертизы по фундаментальным и прикладным исследованиям 1999 года “Синтез имплантантов на основе никелида титана методом селективного лазерного спекания”, постановление РАН от 24 апреля 2001 года № 123).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ed Grenda*. Worldwide Guide to Rapid Prototyping. Version 33 from 17.09.2002. Copyright, <http://home.att.net/~castleisland/home.htm>.
2. *Багров В.В., Голованов И.В., Курприянов Н.Л., Неведов С.В. Петров А.Л., Саченко А.И., Шишковский И.В.* Основы метода селективного лазерного спекания метал-полимерных порошковых композиций // Препринт ФИАН. Москва. 1996. №14.

#### FIRMWARE COMPLEX FOR SELECTIVE LASER SINTERING

© 2003 V.V. Bagrov, N.A. Klimov, S.V. Nefedov, A.L. Petrov,  
V.I. Scherbakov, I.V. Shishkovsky

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev  
of Russian Academy of Sciences

The description of software and hardware complex by Selective Laser Sintering (SLS) was presented at this paper. Described complex by three dimensional synthesis of tools was realized at P.N. Lebedev Physical Institute of RAS. The new technical decisions, advantages and limitations our approaches by the SLS method were discussed.