

## СТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ — НОВАЯ ЛАЗЕРНО-КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЫСТРОГО МАКЕТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**В. М. Метальников**

Государственный комитет по оборонным отраслям промышленности РФ, Москва, Россия

**В. И. Баринов, Ю. И. Рогозин**

Всероссийский научно-исследовательский институт  
межотраслевой информации, Москва, Россия

Дано описание принципов и приведены технические характеристики оборудования для стереолитографии, которая является совершенно новой лазерно-компьютерной технологией быстрого создания макетов, а в перспективе — и самих деталей машин и агрегатов сколь угодно сложной формы. Первоначальный облик деталей есть результат компьютерного трехмерного проектирования-САПР.

В настоящее время поддержание высокого научно-технического уровня и конкурентоспособности продукции промышленности требует максимального ускорения процесса конструирования и изготовления экспериментальных и опытных образцов. Важнейшую роль в этом плане играют современные компьютерные системы автоматизированного проектирования (САПР). Однако проблема создания первого физического макета, шаблона или экспериментального образца по-прежнему до последнего времени оставалась узким местом, особенно в случае деталей и конструкций сложной формы. В результате до 50 % времени разработки образца для серийного производства расходуется на изготовление макетов и моделей, что остается трудоемким и дорогим процессом, требующим, как правило, высококвалифицированного ручного труда. Поэтому недавнее появление лазерно-компьютерной технологии быстрого физического макетирования — стереолитографии (СЛ) можно рассматривать как прорыв в конструировании, производстве и маркетинге промышленных изделий [1—8].

СЛ — принципиально новый способ быстрого и точного создания физических макетов деталей любой степени сложности, заключающийся в формировании детали из тонких и плоских слоев путем последовательного аддитивного их наращивания. При этом нужная двумерная форма каждого слоя, соответствующая площади текущего поперечного сечения детали, реализуется оптическим путем и определяется данными предварительного трехмерного САПР, т. е. результаты компьютерного моделирования получают свое непосредственное быстрое воплощение в физическом макете детали из специального материала.

СЛ как идея новой технологии была сформулирована практически одновременно в 1984 г. в ряде патентов США и Франции [7, 8] и к настоящему времени прошла путь интенсивных материаловедческих исследований и технических разработок, к сожалению, в основном за рубежом. Сейчас наиболее распространенным является т. н. базовый вариант СЛ, когда в качестве материала используется жидкий фоточувствительный полимер, например, типа эпоксидной смолы, а каждый слой детали образуется под действием УФ-лазерного излучения, сканирующего под компьютерным управлением по исходной поверхности жидкости в целях генерации локальных фотохимических преобразований типа полимеризации и отверждения. Готовый слой затем утапливается перемещением специальной поддерживающей платформы, обеспечивая формирование следующего слоя толщиной 0,05—0,1 мм. Принципиальная схема этого процесса изображена на рис. 1, а на рис. 2 приведена функциональная схема соответствующей СЛ установки. Время изготовления макета детали по “компьютерному шаблону” с точностью до 0,1 мм

на существующих промышленных установках составляет от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от размеров детали. Следует заметить, что добавление к СЛ некоторых стандартных технологических операций позволяет быстро создавать необходимые формы для литья под давлением или вакуумного литья, что уже открывает путь к серийному производству изделий из различных металлов и пластмасс. И, наконец, методы СЛ позволяют создавать детали любой сложной формы, в том числе недоступные для любых других технологий.

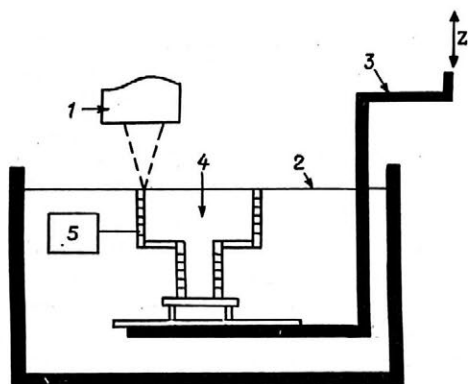


Рис. 1. Схематическое изображение стереолитографического принципа изготовления моделей деталей из жидких фоточувствительных полимеров:

1 — управляемый по осям X и Y УФ-лазерный луч; 2 — поверхность жидкого полимера; 3 — платформа, поддерживающая модель детали; 4 — УФ-отверждаемый фотополимер; 5 — модель детали

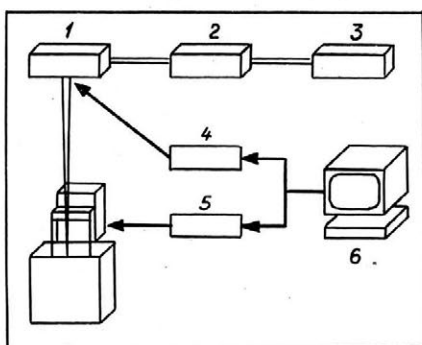


Рис. 2. Функциональная схема стереолитографической системы:

1 — двухкоординатное зеркало; 2 — оптическая система; 3 — УФ-лазер; 4 — канал управления двухкоординатным зеркалом; 5 — канал управления перемещением по вертикальной оси Z; 6 — управляющая ЭВМ

В зарубежной технической литературе термин СЛ часто относят только к вышеописанному способу реализации послойного изготовления деталей, т. е. через отверждение жидких фотополимеров. Однако существует и ряд других (схожих по принципу послойного наращивания) методов быстрого макетирования. Среди них можно выделить, например, технологию селективного лазерного спекания (СЛС), разработанную и запатентованную университетом штата Техас. Технология СЛС отличается использованием порошковых материалов. Спексаемый порошок может быть изготовлен из нейлона, поликарбоната или воска, традиционно применяемого в технологии литья под давлением. Последовательность действий при СЛС почти аналогична таковой в базовом варианте СЛ. В рабочий объем камеры послойно насыпается порошок, предварительно нагретый до температуры чуть ниже точки плавления. Происходит последовательное облучение пучком маломощного  $CO_2$ -лазера осаждаемых слоев порошка до тех пор, пока не закончится создание трехмерного объекта. Луч  $CO_2$ -лазера отклоняется устройством с ЧПУ, использующим данные САПР. Свободный неспеченный порошок служит в качестве опоры для последующих слоев порошка, что рассматривается как преимущество данного метода перед методом СЛ на жидких реагентах.

Другой разновидностью быстрого макетирования, вызывающего сейчас огромный интерес благодаря высокому быстродействию, является способ послойного изготовления объектов из листовых материалов. Здесь также используется  $CO_2$ -лазер, сфокусированный луч которого выкраивает двумерное сечение САПР-модели из рулона листового материала, покрываемого с одной стороны клеящим со-

ставом. Каждый свежвырезанный слой накладывается поверх ранее вырезанного рисунка, и нагретый ролик сцепляет их вместе друг с другом. Эти циклы завершаются изготовлением трехмерной детали. Поскольку в данном случае луч прочерчивает только контуры поперечного сечения детали, а не сканирует по всей его площади (как в вышеуказанных вариантах СЛ), то появляется возможность физической реализации САПР-модели с наибольшим быстродействием и максимальными для СЛ габаритами. Одновременно это является самой дешевой технологией быстрого послойного макетирования.

Для полноты обзора следует отметить также существование нелазерных методов быстрого послойного макетирования [1, 5, 6]. Отверждение полимеров возможно некогерентными источниками УФ-излучения. Это подразумевает использование серии масок, каждая из которых соответствует текущему слою и является для него негативом в УФ-свете. Маски должны печататься принтером под управлением компьютера на прозрачной для УФ-излучения пленке и поочередно вводиться в поток излучения параллельно поверхности фотополимера (технология фирмы Cubital). Фирма Soligen использует ударно-капельную технологию управляемого введения биндера в последовательные слои керамического порошка.

Однако все-таки наибольшая точность физического воспроизведения компьютерного образа детали обеспечивается в СЛ применением лазеров.

По проблеме быстрого макетирования (Rapid Prototyping) проведены уже три международных конференции, последняя — в Дайтоне (США) [3]. Выказано мнение, что в обозримом будущем все производственные процессы перейдут на метод СЛ. Пока же наибольшую заинтересованность в ней проявляют за рубежом отрасли с быстрой сменой номенклатуры производства, например, аэрокосмическая, автомобильная, электротехническая, бытовой техники и т. д.

На рис. 3 приведено сравнение по зарубежным данным [4] финансовых затрат на изготовление деталей обычным способом и с помощью СЛ, а на рис. 4 — соответствующее сравнение временных затрат применительно к различным отраслям производства. Везде виден существенный выигрыш, часто не менее чем в 5—10 раз, причем наиболее впечатляюще абсолютные и относительные данные для авиационной и автомобильной техники.

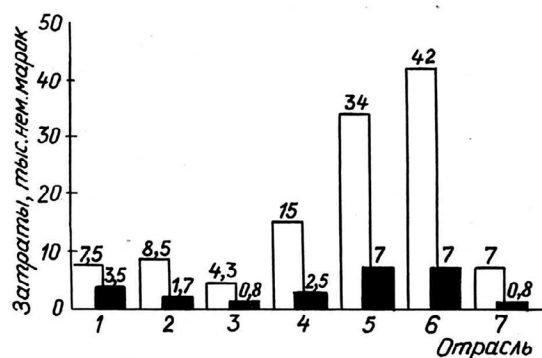
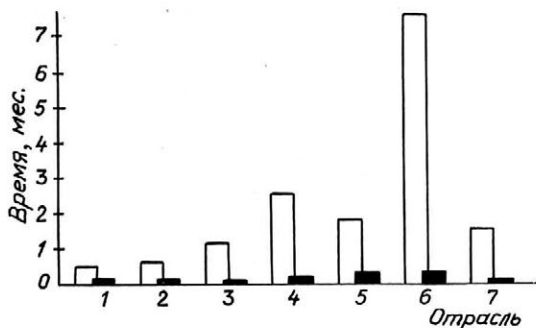


Рис. 3. Сравнение финансовых затрат на изготовление деталей: □ — обычным способом; ■ — с помощью стереолитографии:

1 — медицина (изготовление протезов органов); 2 — электротехническая промышленность; 3 — производство тары и упаковки; 4 — производство компьютеров; 5 — автомобильная промышленность; 6 — авиационная техника; 7 — двигателестроение

В настоящее время коммерчески доступные установки СЛ производят двенадцать фирм США, две в Японии и по одной в Германии, Франции и Израиле. С 1987 г. продано уже около тысячи установок. Поскольку цены довольно высокие (от 100 до 500 тыс. дол.), покупателями являются в основном крупные компании с регулярно большим объемом разработок. Однако имеется значительное количество сервисных фирм, владеющих одной-двумя установками и оказывающих разовые услуги многочисленным мелким клиентам. Окупаемость затрат на приобретение оборудования составляет три-четыре месяца.

Рис. 4. Сравнение временных затрат на изготовление деталей: □ — обычным способом; ■ — с помощью стереолитографии. Цифровые обозначения отрасли аналогичны обозначениям на рис. 3.



Пока мировым лидером в разработке и производстве техники СЛ является американская фирма 3D Systems, выпускающая на основе базового варианта СЛ установки моделей SLA 250 (с гелий-кадмиевым лазером) и SLA 500 (с аргон-ионным лазером). Последняя модель позволяет создавать детали максимальными размерами 50х50х60 см<sup>3</sup>.

На рис. 5 представлен общий вид типового промышленного оборудования для СЛ, а на рис. 6 — набор макетов деталей, иллюстрирующий возможности СЛ.



Рис. 5. Промышленная установка для стереолитографии

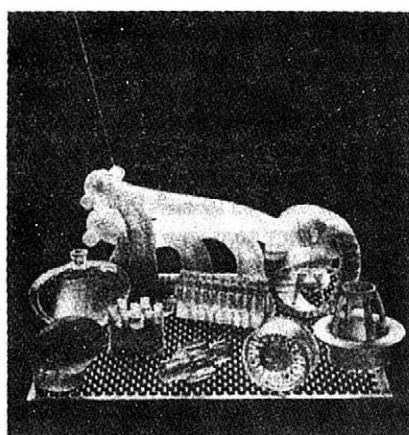


Рис. 6. Набор макетов деталей, изготовленных методом стереолитографии

Ожидается, что к 2000 г. емкость рынка для оборудования СЛ составит 1 млрд. дол. [5].

В качестве перспективного образца аппаратуры базового варианта СЛ на текущее десятилетие, видимо, можно назвать установку второго поколения SPL 1000/LSA французской фирмы LASER 3D S. A. [2, 3]. Данной фирме, обобщившей опыт исследований и разработок в области СЛ, удалось в 1992 г. выйти на рынок с установкой второго поколения, обладающей существенно лучшими характеристиками по сравнению с моделями, выпускавшимися с 1988 г. фирмами США и Германии. Основные технические параметры SPL 1000/LSA следующие:

Длина волны аргон-ионного лазера, мкм . . . . . 0,35—0,36  
 Мощность луча, Вт . . . . . 1—2

|   |          |
|---|----------|
| Размер фокального пятна луча, мкм .....                       | 200      |
| Максимальная ошибка позиционирования<br>пятна, мкм .....      | ±50      |
| Скорость сканирования луча, м/с .....                         | 10—50    |
| Максимальная ошибка вертикального позиционирования, мкм ..... | 10       |
| Типовая толщина слоя, мкм .....                               | 100      |
| Типовое время создания слоя, с .....                          | 3        |
| Максимальные размеры детали, см <sup>3</sup> .....            | 50x55x70 |
| Максимальная масса детали, кг .....                           | 200      |
| Компьютер РС/АТ 486/33:                                       |          |
| напряжение трехфазное, В .....                                | 380      |
| ток в каждой фазе, А .....                                    | 60       |
| потребление воды, м <sup>3</sup> /ч .....                     | 0,8      |

Основное преимущество данной установки — почти десятикратное увеличение производительности по сравнению с производительностью существующих промышленных прототипов, что достигается резким увеличением мощности лазера и применением специальных фоточувствительных жидких полимеров, созданных в результате интенсивных материаловедческих исследований (и представляющих, видимо, секрет фирмы).

В СССР, и теперь в России, не было уделено должного внимания СЛ. До последнего времени фактически не было ни одной отечественной публикации по данному вопросу. Первое устное сообщение прошло на конференции “Оптика лазеров-93” (С.-Петербург, июнь 1993 г.), где представители Научно-исследовательского центра по технологическим лазерам РАН (НИЦТЛ РАН) доложили о создании в результате четырехлетних работ лабораторного образца установки СЛ с рабочим объемом 10x10x10 см<sup>3</sup> [9]. Первая отечественная публикация тех же авторов [10] вышла в свет только в середине 1994 г.

В отличие от зарубежной практики СЛ в НИЦТЛ используется импульсно-периодический эксимерный ХеСl-лазер. Его КПД — примерно 2 %, что в 20—100 раз больше, чем у непрерывных ионных (газовых и на парах металлов) УФ-лазеров. Однако ввиду неизбежно большой скважности режима работы ХеСl-лазера ( $\tau_i \approx 100$  нс,  $f = 100$  Гц) его лучом нельзя непрерывно сканировать по поверхности жидкого фотополимера. Приходится применять серию последовательных масок, т. е. технику, характерную для вышеописанного варианта СЛ с некогерентным УФ-источником.

Пока трудно сказать, может ли принятый вариант СЛ стать основой для разработки промышленного образца отечественной установки: слишком еще далеки технические характеристики созданного лабораторного образца от возможностей зарубежной техники СЛ. Отчасти это связано с тем, что работа слишком слабо финансируется со стороны Миннауки РФ в рамках программы “Технологии, машины и производства будущего”.

Из сказанного очевидно, что технология СЛ сегодня приобретает статус “критической”, но в России ее пока практически нет. Более того, как показал выборочный опрос, проведенный ВИМИ, большинство отечественных машиностроительных заводов и КБ просто не осведомлены о возможностях СЛ. Подобное состояние дел грозит в перспективе технологическим отставанием отечественной промышленности и потерей конкурентоспособности даже для наиболее развитых ее отраслей, например, авиационной и ракетно-космической. Однако в сегодняшних условиях нереален импорт в заметных количествах дорогостоящей техники СЛ или получение

технологического ноу-хау хотя бы в интересах высокотехнологичных предприятий оборонных отраслей. Поэтому, несмотря на известные бюджетные трудности, чрезвычайно важно сохранить в числе выполняемых заданную Госкомоборонпром РФ комплексную НИР по стереолитографии (1993—1995 гг.), главным исполнителем которой определен НИИ технологии и организации производства двигателей (НИИД).

Интенсивное выполнение намеченных неотложных работ, выпуск отечественной серийной техники СЛ и внедрение ее в различные отрасли промышленности обеспечит законченный цикл наиболее современной технологии конструирования и производства (что особенно важно для конверсируемых предприятий) и откроет практически неограниченный рынок для оборудования СЛ, по крайней мере, в странах СНГ и ближнего зарубежья.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Belforte D.* // *Laser Focus*. 1993. № 6. P. 126.
2. Материалы фирмы *Laser 3D S. A.*, 1993.
3. *Proceedings of the Third International Conference on Rapid Prototyping*, 1992, Dayton, USA.
4. *Laubacher O.* // *Technische Rundschau*. 1991. № 5. P. 42.
5. *Maddox R., Knesek J.* // *Aerospace America*. 1993. V. 31, № 6. P. 28.
6. *Wohlens T.* // *Computer Graphics World*. 1991. № 12. P. 53.
7. Пат. США № 4575330, авр., 1984.
8. Пат. Франции № 8411241, июль, 1984.
9. *Есеев А. В., Якунин В. П. и др.* // *Laser Optics'93*, 1993. P. 47.
10. *Есеев Ф. В., Марков М. А.* // *Квантовая электроника*. 1994. Т. 21, № 5. С. 495.

## STEREOLITHOGRAPHY — THE NEW LASER-COMPUTER TECHNOLOGY OF RAPID PROTOTYPING IN INDUSTRIES

V. M. Metalnikov

State Committee of Defence Branches, Moscow, Russia

V. I. Barinov, Yu. I. Rogozin

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

In this article are described the principles and specifications of the equipment for a stereolithography, which is a quite new laser-computer technology of rapid prototyping and in perspective — making of selves parts of machines and assemblies. The original image of parts is a result of 3D-computer design-CAD.