

Оперативное формирование трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии

А.В.Евсеев, В.С.Камаев, Е.В.Коцюба, М.А.Марков,
М.М.Новиков, В.Я.Панченко

На основе фотоиницированной лазерным излучением полимеризации, разработана технология лазерной стереолитографии, реализующая принцип формирования трехмерных объектов по их компьютерным моделям, путем послойного наращивания материала. Создан типоряд установок для лазерной стереолитографии, освоен их выпуск опытным производством ИПЛИТ РАН. Проведена большая работа по внедрению лазерной стереолитографии в различные области человеческой деятельности: точное машиностроение, авиа- и космическую промышленность, автомобильную промышленность, радиоэлектронику, медицину и медицинскую технику, архитектуру и строительство, образование и подготовку кадров. Изготовлено более 1000 пластиковых моделей для различных областей применения и создания новых технологий на базе возможностей современной информационной технологии и лазерной стереолитографии для промышленных предприятий, КБ и исследовательских институтов.

1. Введение

Современные системы трехмерного компьютерного проектирования, позволяют значительно сократить затраты времени и средств на разработку и конструирование новых деталей, машин и оборудования. Однако изготовление первого физического образца детали сложной формы требует значительных затрат времени и средств. Поэтому, примерно, с начала 80^х интенсивно развиваются методы формирования трехмерных объектов не путем удаления материала (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка, прессовка), а путем постепенного наращивания (добавления) материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства [1-7]. На данный момент значительный прогресс достигнут в послойном формировании трехмерных объектов по их компьютерным образам [8-10].

Развитие и доступность мощной вычислительной техники, способной оперировать трехмерными образцами, а также успехи достигнутые в разработке и освоении пучковых (в том числе и лазерных)

технологий обработки материалов явились основой бурного развития технологий послойного изготовления трехмерных объектов практически любой степени сложности с габаритами до 1 м³ при точности не хуже 0,1 мм.

В настоящее время успешно развиваются лазерные технологии послойного изготовления трехмерных объектов основанные на

1) лазерном раскрое листовых материалов [3-5, 8-12];

2) спекании и наплавке порошков металлов, керамики и полимеров лазерным излучением или электронным пучком [8-10, 13-19];

3) фотоиницированной лазерным излучением или излучением люминисцентных ламп обычно ближнего УФ диапазона (320-360 нм) полимеризации.

Последняя технология наиболее широко используется в разрабатываемых и серийно выпускаемых в настоящее время установках для оперативного макетирования и получила название “лазерной стереолитографии” (Laser Stereolithography) [1, 2, 8-10, 20-25]. Это бурно развивающееся направление интегрирует в себя последние достижения квантовой электроники, лазерной оптики и прецизионной механики, вычисли-

тельной техники и информационных технологий, фотохимии органических и неорганических соединений, химии и физики высокомолекулярных соединений.

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход жидкость-твердое тело) в результате фотоиницированной в заданном объеме полимеризации [26-31]. Суть этого процесса состоит в создании с помощью иницирующего, например, лазерного излучения в жидкой реакционно-способной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые взаимодействуя с молекулами мономера инициируют рост полимерных цепей, т. е. процесс полимеризации. Следствием полимеризации является изменение фазового состояния среды — в облученной области образуется твердый полимер. Так как активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает преимущественно в этой области, т. е. достигается пространственная селективность фотоиницированной полимеризации. Активные центры образуются при взаимодействии фотополимеризующей композиции (ФПК) с излучением из определенного спектрального диапазона. Эта спектральная селективность позволяет, в частности, проводить полимеризацию в условиях естественного освещения.

Высокая квантовая эффективность фотоиницированной полимеризации (поглощение одного кванта излучения приводит к полимеризации до 10^4 молекул мономера [30]) и, как следствие этого, невысокие требования на мощность иницирующего излучения, ее экологическая чистота, возможность эффективного протекания при комнатной температуре, а также принципиальная возможность широкого варьирования механических и физико-химических свойств отвержденного материала путем изменения состава (ФПК) делают этот базовый процесс привлекательным с точки зрения создания на его основе установок для оперативного изготовления трехмерных объектов по их компьютерным образам.

В данной работе дается краткий обзор результатов, полученных в Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам Российской академии наук (НИЦТЛ РАН) в области лазерной стереолитографии начиная с 1990 года.

2. Лазерная стереолитография

Лазерная стереолитография включает в себя создание компьютерного образа детали (рис. 1а), его разбиение на тонкие слои (рис. 1б), расчет траектории движения лазерного луча, заполняющего каждое

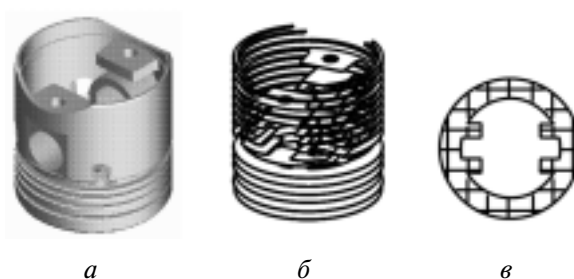


Рис.1. Последовательность подготовки данных для системы управления установки лазерной стереолитографии. а — трехмерная компьютерная модель, б — разбиение модели на тонкие (100-200 мкм) слои, в — формирование траектории лазерного луча.

сечение (рис.1в) и последовательное воспроизведение соответствующих поперечных сечений на поверхности жидкой фотополимеризующейся композиции сфокусированным пучком иницирующего полимеризацию лазерного излучения. Коэффициент поглощения излучения достаточно велик, так что оно практически полностью поглощается в тонком (0,05 – 0,5 мм) слое фотополимеризующейся композиции (ФПК). В облученной области образуется пленка твердого полимера. Для позиционирования лазерного луча в заданную точку на поверхности ФПК и его перемещения по рассчитанной траектории с заданной скоростью обычно используют управляемый компьютером двухкоординатный гальвано-электрический сканатор. Такой подход использует метод прямого лазерного рисования в отличие от других способов воспроизведения сечений на поверхности ФПК, о которых будет упомянуто ниже. Переход от одного слоя к другому осуществляется путем перемещения платформы, на которой выращивается деталь, в емкости с жидкой ФПК на глубину, равную толщине следующего слоя. Рис.2 иллюстрирует последовательность послойного изготовления трехмерного объекта сфокусированным лазерным лучом. Платформа, на которой “выращивается” деталь, устанавливается ниже поверхности ФПК на расстоянии равном толщине первого слоя. На поверхности ФПК формируется изображение соответствующее первому сечению объекта. В облучаемой области образуется пленка твердого полимера. После завершения формирования первого слоя платформа с пленкой опускается на расстояние равное толщине следующего слоя и на поверхности ФПК воспроизводится изображение соответствующее второму сечению детали. Параметры инициирования выбираются таким образом, чтобы второй слой надежно “приклеился” к первому. Далее платформа перемещается на расстояние равное

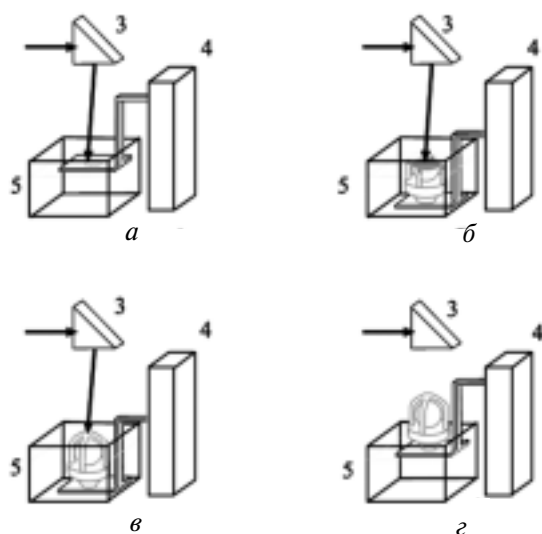


Рис.2. Последовательность послойного изготовления трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии. *а* — Формирование первого слоя объекта; *б* — *N*-ого и *в* — последнего слоя объекта; *г* — объект, послойно изготовленный сфокусированным лазерным лучом на вертикально перемещаемой платформе, извлеченный из емкости с жидкой ФПК. Цифрами обозначены элементы установки, схема которой приведена на Рис. 5.

толщине следующего слоя и процесс повторяется до тех пор пока не будут изготовлены все слои. После завершения формирования последнего слоя платформа поднимается над поверхностью ФПК, послойно выращенная деталь снимается с платформы, с поверхности детали удаляются следы жидкой ФПК и деталь шунтируется.

3. Фотоиницированная лазерным излучением полимеризация

Основой стереолитографии является фотоиницированная лазерным излучением полимеризация. Особенностью лазерной полимеризации является высокая интенсивность инициирующего излучения и, как следствие этого, большая концентрация инициирующих полимеризацию активных центров. Экспериментально показано, что для ФПК полимеризующихся по радикальному механизму (например, ФПК приготовленные на основе акриловых мономеров и/или олигомеров) затраты энергии на инициирование полимеризации зависят как от интенсивности излучения, так и от плотности энергии инициирующих импульсов [30]. В качестве примера на рис.3 приведены зависимости толщины отвержденного слоя от дозы облучения полученные при разной плотности энергии импульсов. Доза облу-

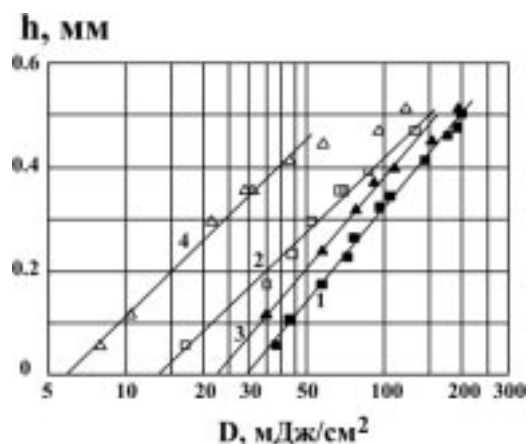


Рис.3. Зависимости толщины отвержденного слоя от дозы облучения при полимеризации ОКМ-2 излучением ХеСl лазера на воздухе (1, 3) и в атмосфере гелия (2, 4). Получены при $F=1$ (1, 2) и $0,2 \text{ мДж/см}^2$ (3, 4). Концентрация фотонинициатора бензона была равна $0,06 \text{ моль/дм}^3$, частота следования лазерных импульсов — 2 Гц.

чения необходимая для получения пленок с одинаковой толщиной увеличивается при увеличении плотности энергии импульсов. Это является следствием рекомбинации радикалов, вероятность которой зависит от их концентрации. Необходимо отметить также пороговый характер пленкообразования в том смысле, что для каждой конкретной ФПК минимальная толщина полимерной пленки не может быть меньше некоторой конкретной величины, обычно равной нескольким сотням мкм. Это ограничивает разрешающую способность стереолитографии. Поэтому вопросам связанным с получением на поверхности полубесконечной среды либо внутри реакционноспособной среды полимерных пленок с толщиной порядка нескольких мкм и меньше в настоящее время уделяется значительное внимание [32, 33].

При инициировании полимеризации импульсным излучением (например, излучением эксимерного ХеСl лазера с длительностью импульса 10 нс по полувысоте) с однородным распределением интенсивности в облучаемой области на поверхности облучаемой ФПК образуется полимерная пленка, зависимость толщины (h) которой от дозы облучения (D) удовлетворительно описывается соотношением

$$h = D_p \ln(D/E_c). \quad (1)$$

Здесь доза облучения $D = \Phi N$, где Φ — плотность энергии лазерного импульса, N — количество лазерных импульсов. E_c — критическая доза облучения, которая определяется путем экстраполяции зависимости $h(\ln D)$ к значению $h=0$ (см. рис.3). D_p — эффективная глубина проникновения излучения в

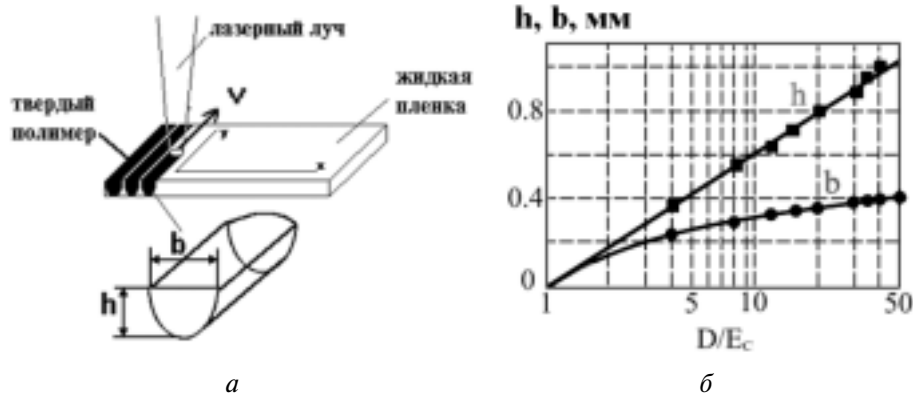


Рис.4. а — Формирование на поверхности ФПК следа из отвержденного полимера при иницировании полимеризации движущимся со скоростью v лазерным лучом. б — Зависимости толщины (h) и ширины (b) отвержденного трека от приведенной дозы облучения (D/E_c).

ФПК, которая определяется по наклону зависимости $h(\ln D)$.

В случае иницировании полимеризации сфокусированным пучком непрерывного лазерного излучения (например, излучением HeCd лазера с длиной волны $\lambda=325$ нм), пятно которого движется по поверхности ФПК со скоростью v , на поверхности ФПК остается след из отвержденного полимера (см. Рис.4а), геометрические параметра которого в поперечном сечении определяются распределением интенсивности излучения в пучке и законом изменения интенсивности от расстояния до поверхности ФПК. При движении пучка с гауссовым распределением интенсивности

$$I = I_0 \exp(-r^2/w_0^2),$$

(где I_0 — интенсивность излучения на оси пучка, $r=(x^2+y^2)^{1/2}$ — расстояние от центра пучка, w_0 — радиус пучка) вдоль оси x и зависимости интенсивности от расстояния до поверхности ФПК

$$I = I_0 \exp(-\alpha h)$$

(где α — коэффициент поглощения) интенсивность излучения на расстоянии y от оси x и глубине h определяется соотношением

$$I(t, y, h) = I_0 \exp\{-(v^2 t^2 + y^2)/w_0^2\} \exp(-\alpha h).$$

Здесь t — время. Тогда доза облучения в точке с координатами (y, h) равна

$$D(y, h) = (P/vw_0\pi^{1/2}) \exp\{-(y^2/w_0^2 + \alpha h)\},$$

где P — мощность лазерного излучения. Условием получения твердого полимера в облученной области является выполнение неравенства

$$D(y, h) \geq E_c$$

и легко показать, что толщина отвержденного трека при $y=0$ равна

$$h = \alpha^{-1} \ln(D/E_c), \quad (2)$$

ширина трека d при $h=0$ есть

$$d = 2w_0 \{\ln(D/E_c)\}^{1/2}, \quad (3)$$

а граница отвержденной области описывается параболой

$$y^2/w_0^2 + \alpha h = \text{const.}$$

Доза облучения (D) связана с мощностью излучения (P), радиусом пучка (w_0) и скоростью его движения (v) по поверхность ФПК соотношением

$$D = P/(vw_0\pi^{1/2}).$$

Для рассматриваемой модели параметр D_p , которым принято характеризовать ФПК, просто равен α^{-1} . На Рис.4б приведены экспериментальные (точки) и модельные (сплошные кривые) зависимости $h(D)$ и $b(D)$ полученные при полимеризации ФПК на основе олигокарбонатметакрилата, известного под торговой маркой ОКМ-2. Следует, однако, отметить, что как D_p , так и E_c зависят от плотности энергии иницирующих импульсов или интенсивности излучения при иницировании полимеризации непрерывным лазерным излучением [23, 25, 30, 31], и параметров полимеризующейся среды, которые изменяются в процессе полимеризации. Попытка моделирования пленкообразования была предпринята в работах [25, 34].

Для полноты картины необходимо рассмотреть также случай иницирования полимеризации сфокусированным лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности, который дискретно

(скачками) перемещается по поверхности ФПК. В этом случае скорость $v=0$ и легко показать, что $h(D)$ и $d(D)$ определяются соотношениями (2) и (3) соответственно, а граница отвержденной области представляет собой параболоид вращения. В этом случае, однако, доза облучения

$$D = Pt/\pi w_0^2$$

при инициировании полимеризации непрерывным излучением или

$$D = FN/\pi w_0^2$$

при импульсном инициировании. Такой способ инициирования полимеризации для установок лазерной стереолитографии в настоящее время интенсивно развивается в связи с использованием импульсно-периодических лазеров [35].

Таким образом, используя разные способы облучения можно получить на поверхности ФПК полимерную пленку (плоскость), трек (линию) или керн (точку). Эти элементарные объекты можно использовать для формирования вещественных копий трехмерных объектов по их компьютерным образам.

4. ФПК для лазерной стереолитографии

В результате исследований фотоиницированной импульсным и непрерывным лазерным излучением полимеризации акриловых и эпокси олигомеров было разработано несколько фототолеризирующихся композиций для лазерной стереолитографии и на основе промышленно выпускаемых в России соединений изготовлена экспериментальная партия

ФПК. В Таблице 1 приведены измеренные характеристики разработанной акриловой ФПК и для сравнения приводятся параметры ФПК поставляемые фирмой Ciba Gagy для установок SLA-250 фирмы 3D Systems. Разработанная ФПК характеризуется высокой фоточувствительностью и малой (по сравнению с другими известными акриловыми ФПК для стереолитографии) вязкостью. Малая вязкость ФПК позволяет изготавливать квазизамкнутые модели с тонкими формообразующими поверхностями и системой ребер жесткости из которых неотвержденная ФПК удаляется через небольшие отверстия. Модели с отношением объема материала к объему детали на уровне 10-20% представляют интерес, например, для изготовления керамических форм для литья путем выжигания пластиковых моделей. Кроме того, такой подход уменьшает время изготовления модели, расход ФПК и, следовательно, стоимость модели.

Для ФПК с малой вязкостью затраты энергии на инициирование полимеризации зависят от интенсивности излучения, поэтому для эффективного использования лазерного излучения был предложен и реализован способ инициирования полимеризации, который обеспечивает значительное сокращение затрат энергии и времени на инициирование полимеризации интенсивным лазерным излучением [36].

5. Схемы установок для лазерной стереолитографии

В настоящее время успешно развиваются два направления стереолитографии, которые различаются способом инициирования полимеризации.

Таблица 1

Основные характеристики разработанной ФПК

Жидкие ФПК (до отверждения)			
Параметр	НИЦТЛ-1	SL 5149	SI 5170
Основа	акрилат	акрилат	эпокси
Плотность, г/см ³	1,195	1,12	1,14
Вязкость, сП	190-260	1600-2400	165-195
D_p^* , мкм	160	147	122
E_c^* , мДж/см ²	3,7 - 4,7	5,5	13,5
Отвержденный материал			
Модуль упругости, Н/мм ²	2600-2950	1100-1200	2400-2500
Предел прочности, Н/мм ²	60-70	35	59-60
Отн. удлинение при разрыве, %	2,8-4,6	11-19	7-19
Температура стеклования, °С	70-75	83	65-90
Ударная вязкость, кДж/м ²	4,1-8,4	20-25	27-30(нач.) 80-90(3 нед.)
Твердость	162(по Бринеллю)	78(по Шору)	85(по Шору)

* $h = D_p \ln(D/E_c)$

Отличительной особенностью одного направления является использование сфокусированных пучков инициирующего полимеризацию излучения, другого — использование широкоапертурных пучков. На рис.5-7 приведены экспериментально опробованные схемы установок для лазерной стереолитографии [21, 22, 25], в которых были реализованы эти подходы.

В первом случае (рис.5) для позиционирования луча в заданную точку на поверхности ФПК и управления его перемещением необходима быстродействующая двухкоординатная система сканирования. Для этих целей используются гальваноэлектрические сканаторы, которые при фокусном расстоянии фокусирующего излучения объектива порядка 1 м позволяют обеспечить равномерную скорость движения луча по заданной траектории на поверхности ФПК порядка 1 м/с в векторном режиме. При использовании широкоапертурных пучков изображение на поверхности ФПК формируется методом проекционной или контактной печати (рис.6). Такой подход требует оперативного изготовления и смены масок, которые являются негативом по отношению к воспроизводимому изображению. Для изготовления масок из прозрачных для излучения материалов можно использовать современные лазерные принтеры или плоттеры, которые обеспечивают разрешение до 1200 точек на дюйм. Маски можно изготавливать также методом электронографии [37].

Комбинацией рассмотренных выше способов формирования изображения на поверхности ФПК является схема установки (Рис.7), в которой для инициирования полимеризации использовалась лазерная электронно-лучевая трубка (полупроводниковый лазер с накачкой электронным пучком [38]). В этом случае изображение формируется на лазерном экране электронным лучом, а лазерное излучение экрана переносится на поверхность ФПК с помощью проекционной оптической системы.

В экспериментах по послойному изготовлению трехмерных объектов методом проекционной печати была показана принципиальная возможность использования опробованных схем для лазерной стереолитографии. Однако обе опробованные схемы имеют ряд недостатков и ограничений. Для реализации метода проекционной печати необходимо иметь полный набор фотошаблонов соответствующих поперечных сечений объекта (например, для модели высотой 250 мм и толщине слоя 0,2 мм количество шаблонов составит 1250 шт.) на прозрачных для УФ излучения носителях или управляемые транспаранты. Вторая схема в настоящее время не обеспечивает нужное разрешение при необходимых размерах

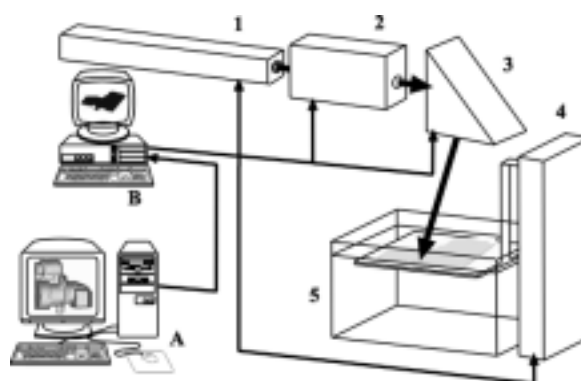


Рис.5. Схема установки лазерной стереолитографии на основе непрерывного HeCd лазера. А) Компьютерное моделирование и подготовка данных для системы управления установкой, В) управляющий компьютер, 1 — HeCd лазер, 2 — акустооптический затвор, 3 — двухкоординатный (X-Y) сканатор, 4 — элеватор (Z-координата), 5 — емкость с жидкой фотополимеризующей композицией.

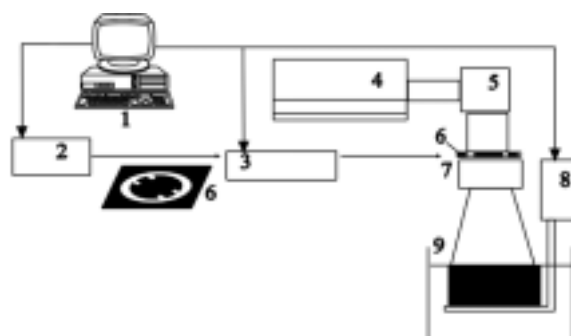


Рис.6. Схема установки для послойного изготовления деталей из жидких ФПК методом проекционной печати. 1 — управляющий компьютер, 2 — устройство для формирования масок, 3 — устройство для смены масок, 4 — эксимерный лазер, 5 — оптическая система для формирования пучка, 6 — маска, 7 — проекционное устройство, 8 — подъемное устройство, 9 — емкость с жидкой ФПК.

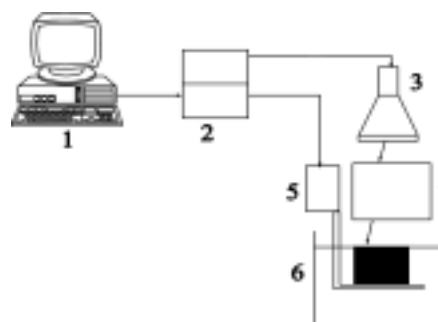


Рис.7. Схема установки для послойного изготовления деталей на базе полупроводникового лазера с возбуждением электронным пучком. 1 — управляющий компьютер, 2 — интерфейс, 3 — ЛЭВ, 4 — объектив, 5 — подъемное устройство, 6 — емкость с жидкой ФПК.

изготавливаемых деталей из-за ограниченных размеров монокристалла, являющегося основой полупроводникового лазера. Следует также отметить большие эксплуатационные расходы на обеспечение работоспособности лазерной электронно-лучевой трубки (низкая температура лазерного экрана и высокий вакуум). Поэтому предпочтение было отдано методу прямого лазерного рисования. В настоящее время на базе непрерывного HeCd лазера создан и действует пилотный образец установки для оперативного изготовления объектов с габаритными размерами до 250×250×250 мм³ из разработанных в институте жидких ФПК. Схема установки аналогична приведенной на рис.5.

6. Программное обеспечение для лазерной стереолитографии

Программное обеспечение для лазерной стереолитографии должно обеспечивать просмотр и редактирование компьютерных образов объектов в формате STL, который является общепринятым входным форматом для установок лазерной стереолитографии, формировать технологические подпорки, своего рода строительные леса, необходимые для фиксации послойно изготавливаемой детали и всех ее элементов на платформе в процессе ее изготовления. Далее программа разбивает объект с подпорками на слои с заданной толщиной, рассчитывает оптимальную траекторию заполнения сечений, и формирует управляющую программу для изготовления конкретного объекта. Вопросы связанные с разработкой системы управления и подготовкой данных для системы установки лазерной стереолитографии рассматриваются в работах [39, 40]. Значительное внимание было уделено разработке алгоритма заполнения сечений, который используется для формирования траектории лазерного луча. Этот алгоритм должен обеспечивать как устранение деформации объекта в процессе его послойного изготовления, так и компенсацию изменения геометрических размеров в результате дополимеризации [41].

Кроме базового программного обеспечения в НИЦТЛ созданы интерфейсы для преобразования информации о трехмерных объектах представленных в разных форматах или полученной разными методами зондирования в STL формат, который является исходным для разработанного программного обеспечения. В настоящее время пакет программного обеспечения позволяет изготавливать пластиковые модели трехмерных объектов если они представлены

— в виде файлов в STL, DXF, IGES-форматах,
— в виде файлов компьютерных томографов, координатно-измерительных машин и других типов зондирования трехмерных объектов

Исходные данные могут быть переданы по компьютерной сети INTERNET [42], что существенно ускорит изготовление моделей.

7. Применения лазерной стереолитографии

Созданные методом лазерной стереолитографии пластиковые модели могут использоваться в различных областях производства и научных исследований:

1. Конструкторские и дизайнерские прототипы при создании макетов изделий и сборок.
2. Формообразующая оснастка для различных видов точного литья.
3. Мастер-модели для изготовления методом гальванопластики инструментов для электроэрозионной обработки.
4. Биосовместимые имплантаты.
5. Восстановлении объектов по данным рентгеновской, акустической или ЯМР-томографии для целей медицины, криминалистики, археологии и др.

Стереолитография, томография и фотограмметрия

Современная стереолитография позволяет решить большинство проблем, связанных с изготовлением пластиковых копий компьютерных моделей, которые были созданы с помощью программного обеспечения для трехмерного проектирования, например САПР. Однако часто появляется необходимость быстрого изготовления копий реальных объектов, например, в таких областях, как медицина, археология, криминалистика и др. Следовательно, актуальной является задача быстрого и точного преобразования данных, полученных с помощью измерительных машин и механизмов, рентгеновских, ЯМР или ультразвуковых томографов, а также результатов видеограмметрических измерений в трехмерные компьютерные модели [43-46].

Томограммы, полученные на рентгеновском томографе, обычно, представляют собой набор серых изображений массивов сечений (слоев) исследуемого объекта по координате z . Каждый элемент томограммы есть функция плотности объекта в соответствующей точке $q(x, y, z)$. В большинстве случаев диапазон от q_{\min} до q_{\max} в области значений функции $q(x, y, z)$ может быть представлен одним байтом. Таким образом, томограмму можно рассматривать как трехмерное изображение функции

плотности, приведенной к однобайтовым значениям и записанной трехмерной матрицей яркости $Q(i, j, k)$.

Для перевода томограммы в STL-формат необходимо построить математическую модель объекта как твердого тела. В общем виде такая модель может быть представлена как:

$$f(x, y, z) \begin{cases} = 0, \text{ если не имеется никакого} \\ \text{объекта в данной точке,} \\ = 1, \text{ если имеется объект} \\ \text{в данной точке.} \end{cases} \quad (4)$$

В случае, если координаты x, y, z определены на дискретной сетке:

$$x_i = d_x \cdot i, i = 0, 1, \dots, N_x,$$

$$y_j = d_y \cdot j, j = 0, 1, \dots, N_y,$$

$$z_k = d_z \cdot k, k = 0, 1, \dots, N_z,$$

функция $F(x_i, y_j, z_k)$ имеет вид трехмерного с двумя градациями (0 или 1 - бит на пиксель) изображения. Таким образом, если представить пиксел изображения как куб с размерами $d_x \times d_y \times d_z$, преобразование томографических данных к STL-формату может быть выполнено преобразованием $Q(i, j, k)$ к $F(x_i, y_j, z_k)$. При этом каждая внешняя сторона куба описывается двумя треугольниками.

Для корректности преобразования необходимо правильно определить границу реального объекта в томограмме. В простейшем случае соотношение (4) принимает вид

$$F(x_i, y_j, z_k) \begin{cases} = 0, \text{ если } Q(i, j, k) < Q_{\text{пороговая}}, \\ = 1, \text{ если } Q(i, j, k) > Q_{\text{пороговая}}. \end{cases}$$

Опыт изготовления моделей по томографическим данным показал, что объект исследования — достаточно сложное образование с большим количеством внутренних полостей и разной оптической плотностью в различных местах. Имеются детали с геометрическими размерами меньшими чем разрешение томографа. Таким образом, в одном случае, при более низком пороговом значении сигнал/шум, некоторые детали могут быть объединены, в другом, при более высоком пороговом значении, одна деталь может быть представлена как несколько. Правильное определение границы объекта возможно только при знании всех нюансов механизма томографического сканирования конкретных типов объектов и представлении их изображений на томограмме.

После определения границ объекта точность изготовленной модели полностью определяется числом точек изображения и числом слоев в исходных данных. Например, если расстояние между слоями $d_z = 1$ мм, а $d_x = d_y = 0,5$ мм, пластиковая модель будет иметь структуру с такой же точностью (с характерными ступеньками). Однако стереолитография позволяет получать значительно более высокую точность. Следовательно, существует потребность в сглаживании поверхности модели объекта для определения необходимых промежуточных значений. Ошибка интерполяции должна быть минимальной, не больше шага координатной сетки. Таким образом, для создания реалистичного представления модели объекта разрешение томографа оказывается недостаточным и возникает необходимость в использовании подходящей интерполяции. Попытка применить пакеты трехмерного проектирования для автоматической интерполяции и натягивания гладкой поверхности на контура слоев оказалась неудачной из-за большого объема обрабатываемых данных. Особенно неадекватно традиционные САПР, например Euclid и AutoCAD, ведут себя в случае натягивания гладкой поверхности на контуры слоев с различной связностью (в топологическом смысле). При этом требуется большой объем интерактивной работы.

Помимо проблем со временем, в случае с интерактивной работой, слишком велика вероятность ошибки оператора. Напомним, что требования к точности копии объекта очень высоки. Проблему может решить только создание специализированного программного обеспечения [44].

Разработанное в НИЦТЛ РАН программное обеспечение выполняет следующие функции:

- читает исходные данные рентгеновского томографа;
- формирует яркостное представление и приводит изображение к трехмерной матрице яркости (байт на точку);
- при необходимости делает сглаживание трехмерного изображения с помощью окна $3 \times 3 \times 3$;
- вычисляет реальную границу объекта на изображении и приводит представление объекта к твердотельной форме;
- фильтрует твердотельное изображение (удаляет малогабаритные одиночные фрагменты и полости);
- позволяет оператору-эксперту при необходимости выполнять интерактивное редактирование полученной твердотельной модели для удаления артефактов и внутренних закрытых полостей, которые не несут полезной информации и просто не могут быть изготовлены;

— транслирует твердотельное представление в формат STL, который является общепринятым для установок лазерной стереолитографии.

В 1995 г. в НИЦТЛ по заданию правительственной комиссии РФ по захоронению останков царской семьи были проведены работы по изготовлению копии черепа человека по данным рентгеновского компьютерного томографии [43, 44]. В этот же период времени группой французских исследователей была выполнена аналогичная работа по изготовлению пластиковой копии черепа человека, найденного в одном из ледников Альп [45].

В настоящее время разработанное программное обеспечение и созданная установка лазерной стереолитографии применяются для изготовления пластиковых копий костных фрагментов черепа пациентов, которые используются хирургами Детской клиники им. Святого Владимира (г.Москва) для планирования операций и предварительной подгонки челюстно-лицевых имплантатов. Совместно с клиникой Св. Владимира была практически реализована схема (Рис.8) оперативного изготовления методом лазерной стереолитографии пластиковых копий фрагментов черепа пациентов по томографическим данным, которая включает:

— сканирование фрагмента черепа пациента на рентгеновском томографе SOMATOM CR фирмы SIEMENS;

— преобразование формата томограмм в формат совместимый с PC компьютерами;

— предварительную обработку томограмм с целью выделения областей, которые необходимы для построения трехмерной компьютерной модели;

— упаковку томограмм и их передачу по сети Интернет;

восстановление по полученным томограммам трехмерной компьютерной модели и преобразование ее в STL формат;

— изготовление пластиковой копии на установке лазерной стереолитографии.

Работоспособность и оперативность всех элементов схемы была продемонстрирована в последнем эксперименте, когда пластиковая копия нижней челюсти пациента поступила в клинику менее чем через трое суток с момента проведения томографического исследования.

В тех случаях когда внутренняя топология объектов непринципиальна, а необходима информация о формообразующей поверхности, вместо томографии можно использовать результаты фотограмметрических исследований [47]. Этот метод позволяет регистрировать форму объекта бесконтактным способом с помощью видеокамер и

специального освещения. Такой подход экспериментально реализован [48] и может использоваться для изготовления копий особо ценных, уникальных, ветхих объектов, до которых буквально нельзя дотрагиваться руками.

Прямое изготовление биосовместимых имплантатов

Основой обширного класса фотополимеризующихся композиций (ФПК) для лазерной стереолитографии являются акриловые олигомеры и мономеры. Вместе с тем акриловые пластмассы давно и широко используются в медицине в качестве костного цемента и материала для имплантатов. Однако их использование в клинике часто сопровождается различными воспалительными и дистрофическими процессами, вплоть до некрозов и отторжения имплантатов [49]. Это, в первую очередь, связано с содержащимися в этих пластмассах различными токсичными примесями (мономеры, низкомолекулярные олигомеры, инициаторы и сшивающие агенты), выделяющимися в окружающие ткани. Развитие химии и совершенствование технологии синтеза пластических масс привело к разработке и созданию практически нетоксичных материалов за счет резкого снижения в них концентрации растворимых компонентов. К таким материалам можно отнести, например, полифункциональные (мет)акриловые олигомеры, которые характеризуются высокой реакционной способностью и полимеризация которых протекает с образованием трехмерной пространственной сетки [50, 51] (в отличие от традиционных линейных полиметилметакрилатных цепей). Полифункциональность этих соединений (наличие не менее двух концевых реакционноспособных групп) обуславливает практически полное сшивание всех молекул в единый полимерный блок даже при степени конверсии двойных связей отличной от предельной. Уже при степени конверсии равной примерно 50% образуется практически нерастворимый в органических растворителях полимер. Структура олигомерного блока между концевыми реакционноспособными группами и параметры пространственной сетки определяют механические и физико-химические свойства конечного полимерного продукта. Это позволяет, в принципе, изготавливать имплантаты с заданными биохимическими и биомеханическими свойствами.

Изготовление медицинских имплантатов является ярким примером единичного производства, так как практически каждый имплантат требует инди-



Рис.8. Схема оперативного изготовления пластиковых копий фрагментов черепа пациентов по результатам томографических исследований.

видуальной подгонки. Поэтому для изготовления имплантатов естественно использовать лазерную стереолитографию, которая позволяет всего за несколько часов изготавливать пластиковые копии объектов с габаритным объемом до нескольких литров и, следовательно, изготовить копию практически любого фрагмента костного скелета человека.

С целью определения возможности использования метода лазерной стереолитографии для прямого изготовления имплантатов костных фрагментов был выполнен цикл исследований по УФ лазерной полимеризации ФПК на основе олигокарбонатдиметакрилатов и их смесей с биоактивным гидроксиапатитом, изучению реакции костной ткани на полимерные и минерал-полимерные композитные

имплантаты, изготовленные методом лазерной стереолитографии, а также характеристики остеointеграционных и остеиндукционных свойств этих новых материалов [52].

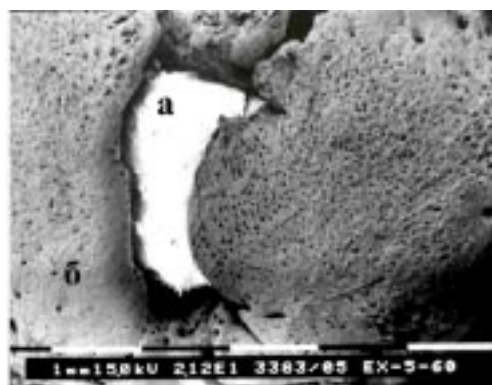
В результате данной работы методом лазерной стереолитографии были синтезированы полимерные и композитные (минерал-полимерные) имплантаты заданной формы, которые затем были имплантированы в область дистального эпифиза бедренной кости белых крыс линии "Vistar" (рис.9а) для изучения реакции костной ткани на материал имплантата и исследования процессов его остеointеграции и остеиндукции. Показано, что полимерные имплантаты не только не угнетают остеогенез, а, напротив, активизируют как перистальное, так и эндостальное костеобразование. Введение в состав композиции гидроксиапатитом существенно усиливало биоактивность изготовленных из нее, в частности остеointегративные свойства имплантатов, проявляющиеся в значительном увеличении площади непосредственного контакта поверхности имплантата с регенерируемой костной тканью (рис.9б).

Таким образом, лазерная стереолитография может с успехом применяться для изготовления как биоинертных (чисто полимерных), так и биоактивных (содержащих компоненты, стимулирующие остеогенез) минерал-полимерных имплантатов сколь угодно сложной формы, которые без дополнительной обработки могут быть использованы для восстановления практически любого участка человеческого скелета.

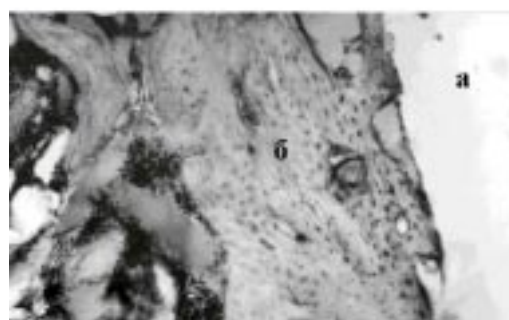
В качестве исходной информации для изготовления имплантатов могут использоваться результаты томографических исследований. Развитые системы компьютерного проектирования делают возможным редактирование компьютерных образов объектов, восстановление недостающих фрагментов и оптимальную индивидуальную подгонку имплантата, а наличие компьютерных сетей позволяет вести до минимума интервал времени между обследованием в специализированной клинике и началом процесса изготовления имплантата на установке лазерной стереолитографии, расположенной на значительном удалении.

Изготовление формообразующей оснастки

Оперативное изготовление формообразующей оснастки для разных видов литья является одним из наиболее широко используемых приложений лазерной стереолитографии. Для изготовления форм для литья методом газификации пластиковых моделей



а



б

Рис.9. *а* — Имплантат содержащий гидроксиапатит интегрированный с костной тканью; *б* — участок прямого контакта костных структур (*б*) с поверхностью имплантата (*а*).

фирмой 3D Systems было специально разработано программное обеспечение для изготовления по исходным компьютерным образам моделей с тонкими стенками и системой ребер жесткости, а фирмой Ciba Gage для реализации этого стиля разработаны соответствующие ФПК (SL5170, SL5180, SL5190 и SL5510). Способ изготовления методом лазерной стереолитографии моделей для литья получил название QuickCast [53]. Следует отметить, что структура ребер жесткости, кроме сохранения формы моделей с тонкими оболочками, должна также гарантировать минимальную разрывающую нагрузку на керамическую оболочку в процессе выжигания пластиковой модели. Эта нагрузка является следствием разных коэффициентов температурного расширения материала оболочки и модели. Однако для моделей, которые содержат элементы с характерным размером хотя бы по одному измерению порядка 1 мм и меньше эти элементы не могут быть изготовлены методом QuickCast без существенного повышения разрешающей способности стереолитографии. Примером

таких объектов является турбинка, которая содержит ребра с толщиной 0,8 мм и показан на рис.10а. Поэтому совместно с МГТУ им. Баумана была начата работа по исследованию возможностей применения пластиковых моделей созданных методом лазерной стереолитографии для изготовления металлических отливок различными способами точного литья. Пластиковые модели из разных видов ФПК вместе с восковой литниковой системой помещались в керамическую оболочку. После сушки керамики модели выжигались, а в образовавшуюся полость заливался металл. На рис.10 представлены отливки на литейном дереве после извлечения из литейных форм (б) и после окончательного удаления остатков керамики (в). Разработанная технология литья по выжигаемым моделям изготовленным методом лазерной стереолитографии обеспечивает получение отливок деталей содержащих элементы, размеры которых меньше 1 мм.

Прямое использование пластиковых моделей в качестве формообразующей оснастки

Привлекательность прямого использования деталей изготовленных методом лазерной стереолитографии в качестве элементов штампов, пресс-форм и других функциональных узлов стимулирует непрерывный поиск новых фотополимеризующихся композиций для изготовления деталей с повышенной прочностью, износо- и термостойкостью, стойкостью к воздействиям внешней среды. Характеристики отвержденных ФПК (таблица 1) позволяют в ряде случаев использовать изготовленные из них детали в качестве функциональных элементов оборудования. Совместно с Ярцевским заводом двигателей и фирмой “Полис Систем” была выполнена работы по созданию оснастки для изготовления крышек автомобильного стартера. Компьютерные модели формообразующих элементов оснастки были созданы по чертежам разработчиков. Изготовленные методом лазерной стереолитографии пластиковые детали использовались для изготовления земляных литейных форм. Чтобы сократить время изготовления и расход ФПК на установке лазерной стереолитографии были выращены оболочки моделей, которые затем заполнялись эпоксидной смолой. По отзывам специалистов завода пластиковые модели выдержали 1000 циклов формовки при температуре 100°С без видимых признаков износа. Применение лазерной стереолитографии позволило существенно сократить срок изготовления формообразующей оснастки и снизить их себестоимость в 2 раза. При этом 3/4 времени ушло на создание трехмерных

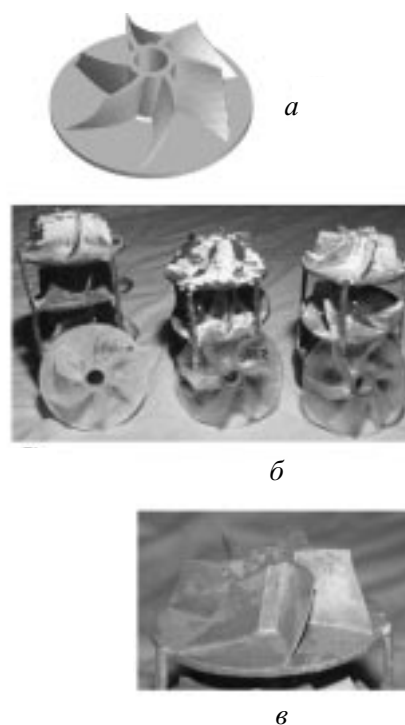


Рис.10. а — Компьютерная модель трехмерного объекта, б — пластиковые копии объекта и отливки извлеченные из формы на литниковой системе, в — отливка после окончательной очистки.



Рис.11. Элементы оснастки изготовленные методом лазерной стереолитографии.

компьютерных моделей по бумажным чертежам из-за отсутствия на заводе возможностей для трехмерного компьютерного моделирования. На рис.11 показаны элементы оснастки изготовленные методом лазерной стереолитографии.

8. Заключение

По мнению авторов основными направлениями развития лазерной стереолитографии в ближайшее время будут:

- повышение точности и воспроизводимости изготавливаемых деталей до уровня порядка 1 мкм;
- разработка набора ФПК для изготовления методом лазерной стереолитографии функциональных элементов для различных систем и механизмов;
- изготовление микрообъектов и микромеханических систем;
- разработка ФПК для изготовления био-совместимых и биоактивных имплантатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kodama, H. 1981. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Rev. Sci. Instrum.* 1770-73.
2. Herbert, A. J. 1982. Solid object generation. *J. Appl. Photo. Eng.* 8(4)(August): 185-88.
3. Kunieda, M. and T. Nakagawa. 1984. Development of laminated drawing dies by laser cutting. *Bull. of JSPE* 353-54.
4. Nakagawa, T., et al. 1979. Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Technique* 93-101.
5. Nakagawa, T., M. Kunieda, and S. Liu. 1985. Laser cut sheet laminated forming dies by diffusion bonding. In *Proc. 25th Int'l. MTDR Conf.*, 505-510.
6. Schwerzel, R. E., et al. 1984. Three-dimensional photochemical machining with lasers. In *Appl. of Lasers to Ind. Chem.*, SPIE, 90-97.
7. В.И.Горюшкин «Основы гибкого производства деталей машин и приборов» Минск: Наука и техника, 1984, 222 с.
8. «Desktop Manufacturing: The next automation revolution», Technical Insights, Inc., Englewood/Fort Lee, NJ, 1988.
9. «Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography», ed. P.F.Jacobs. 1992, Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers, 434 p.
10. «Stereolithography and other RP&M technologies», ed. P. F. Jacobs. 1995, Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 451 p.
11. В.П.Вейко, Д.Л.Губанов, А.К.Кромин, А.Т.Шакола, В.А.Чуйко, Е.Б.Яковлев. 5^{ая} международной конференции «Лазерные технологии'95», г.Шатура, 24-26 июня 1995 г., с.75.
12. В.П.Вейко, Д.Л.Губанов, А.К.Кромин, С.А.Родионов, А.Т.Шакола, Б.П.Тимофеев, В.А.Чуйко, Е.Б.Яковлев. «Оптимизация алгоритмов доставки лазерного излучения в установках послойного трехмерного синтеза». *Оптическая техника*, 1998, №1 (13), с.18-21.
13. Nakagawa, T., et al. 1985. Laser cut sheet laminated forming dies: Diffusion bonding. *Proceedings 25th Int'l. MTDR Conf.*, 505-510.
14. V.Badrinayan, J.W.Barlow (1992) "Metal Parts From Selective Laser Sintering of Metal-Polymer Powders" in *Proceedings of the Solid Free Form Fabrication Symposium*, (eds.: H.Mareus, J.J.Beaman, J.W.Barlow, D.L.Bourell, R.Crawford), 3.-5.8.92, Austin, Texas, pp.141-146.
15. Agarwala, M., et al. 1995. Post-processing of selective laser sintered metal parts. *Rapid Prototyping Journal* 1: 36-44.
16. Greulich, M., et al. 1995. Fast, functional prototypes via multiphase jet solidification. *Rapid Prototyping Journal* 1: 20-25.
17. F.Klocke, T.Celiker, Y.-A.Song (1995) "Rapid Metal Tooling" in *Proceedings of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing* (13-15 June, 1995, Belgirate, Italy): Ed. P.M.Dickens, pp. 225-245.
18. И.В.Шишковский, Н.Л.Куприянов, А.Л.Петров. 5^{ая} международной конференции «Лазерные технологии'95», г.Шатура, 24-26 июня 1995 г., с.74.
19. С.Г.Баев, В.П.Бессмельцев, В.М.Крылов, В.А.Слуев, К.К.Смирнов. «Разработка прототипа рабочей станции для изготовления трехмерных моделей методами послойного лазерного спекания и/или абляции». *Оптическая техника*, 1998, №1 (13), с.15-17.
20. С.W.Hall, Патент США - 4,575,333, 1986.
21. А.В.Евсеев, В.Я.Панченко, В.П.Якунин «Лазерный синтез трехмерных объектов из фотополимеризующихся композиций». Сборник тезисов Российской национальной конференции «Лазерные технологии'93», 14-16 апреля 1993 г., Шатура.
22. А.В.Евсеев, М.А.Марков «Послойное изготовление деталей из жидких фотополимеризующихся композиций излучением ХеСl лазера», *Квантовая электроника*, 1994, т.21, N.5, с.495-498.
23. А.В.Евсеев, М.А.Марков, М.М.Новиков, А.Н.Никитин, В.Я.Панченко, В.П.Якунин. «Фотоиницированная излучением непрерывных и импульсных лазеров полимеризация акриловых олигомеров и послойное изготовление деталей методом лазерной стереолитографии». Тезисы V конференции по химии и физико-химии олигомеров, 4-6 октября 1994 г., Черногловка, с.117.
24. Г.А.Абакумов, В.А.Вдовин, В.Р.Железцов, П.В.Казарин, В.В.Мамышев, О.П.Мамышева, А.В.Маругин, С.Н.Менсов, В.А.Мураев, В.Д.Тихонов, В.К.Чесноков, С.А.Чесноков, Ю.В.Чечет. Тезисы 5^{ой} конференции по химии и физикохимии олигомеров, Черногловка, 4-6 октября 1994 г., с.87.
25. A.V.Evseev, S.V.Kamayev, M.A.Markov, A.N.Nikitin, M.M.Novikov, V.Ya.Panchenko, V.P.Yakunin «Rapid object manufacturing from liquid photo-sensitive compounds induced by pulsed and CW laser beam», in *5th International Conference on Industrial Lasers and Laser Applications'95* (Eds.: Vladislav Ya. Panchenko, Vladimir S. Golubev), *Proc. SPIE* 2713, 1996, pp.370-380.
26. C.G.Roffey, «Photopolymerization of Surface Coatings», New York, 1982.
27. В.К.Грищенко, А.Ф.Маслюк, С.С.Гудзера. «Жидкие фотополимеризующиеся композиции», Киев, Наукова думка, 1985.
28. А.Ф.Маслюк, В.А.Храновский, «Фотохимия полимеризационноспособных олигомеров», Киев: Наук. думка, 1989, 192 с.
29. C.Carre, C.Decker, I.P.Fouassier, D.I.Lougnot, «Laser and Photopolymers», *Laser Chem.*, 10, 349-366 (1990).

30. А.В.Евсеев, М.А.Марков. "Фотоиницированная излучением ХеСl лазера полимеризация акриловых олигомеров". Квантовая электроника, 1994, т.21, N.5, с.491-494.
31. А.В.Евсеев, М.А.Марков, В.Я.Панченко, В.П.Якунин "Acrylic photocurable resins with low viscositi for laser stereolithography". Proc. of 8th European Stereolithography User Group Meeting, 7 - 8 October 1996, Darmstadt, Germany.
32. Y.Brulle, A.Bouchy, B.Valance, J.C.Aandre. "Industrial Photochemistry XXI: Chemical, transport and refractive index effects in space-resolved laser polymerization". J.Photochem. Photobiol. A, V.83, 1994.
33. K.Ikuta, K.Hirowatari. "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal moulding". Proc.IEEE, Micro Electro Mechanical Systems, V.6, 1993.
34. А.В.Евсеев, А.Н.Никити. «Моделирование процесса пленкообразования при полимеризации олигомеров импульсным лазерным излучением». Известия РАН (серия физическая), т.57, N 12, с.132-140, 1993.
35. J.P.Partanen, P.F.Jacobs, Proc. of 8th European Stereolithography User Group Meeting, 7 - 8 October 1996, Darmstadt, Germany.
36. А.В.Евсеев, М.А.Марков, В.Я.Панченко, В.П.Якунин. Заявка на патент N 97120334, приоритет 17.12.97.
37. Layer-Additive Nonlaser Fabrication. In «Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography», ed. P.F.Jacobs. 1992, Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers, p. 416.
38. В.Н.Уласюк. «Квантоскопы», М.: Радио и связь, 1988, 256 с.
39. Е.В.Аристова, А.В.Евсеев, С.В.Митин, М.М.Новиков, М.Д.Оноприйко, В.П.Шубин. «Геометрические проблемы лазерной стереолитографии и подготовка данных для установки лазерной стереолитографии». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.28-32.
40. Н.М.Семёшин, Е.В.Коцюба. «Принципы проектирования программного обеспечения для технологии оперативного изготовления трехмерных объектов». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.22-27.
41. А.В.Евсеев, М.А.Марков. «Влияние постобработки (дополимеризации) на деформацию объектов, изготовленных из акриловой ФПК методом лазерной стереолитографии». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.40-44.
42. Е.Коцюба. «Сжатие STL-файлов». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.33-34.
43. E.V.Kotsuba, A.V.Evseev, S.V.Kamayev, M.A.Markov, M.M.Novikov, V.Ya.Panchenko, N.M.Semeshin, V.P.Yakunin "Operative fabrication of plastic copies of objects using x-ray tomography data". Proc. of 8th European Stereolithography User Group Meeting, 7 - 8 October 1996, Darmstadt, Germany.
44. С.С.Абрамов, Н.И.Болдырев, А.В.Евсеев, Е.В.Коцюба, М.М.Новиков, В.Я.Панченко, Н.М.Семёшин. «Изготовление пластиковых копий трехмерных объектов по томографическим данным». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.45-49.
45. R.Lewis. «Imagine the Iceman of the Tyrol». Biophotonics, March-April 1995, Vol. 2, N 2, p. 34.
46. С.С.Абрамов, Н.И.Болдырев, А.В.Евсеев, Е.В.Коцюба, М.М.Новиков, В.Я.Панченко, Н.М.Семешин, В.П.Якунин «О возможности применения метода лазерной стереолитографии в судебной медицине». Судебно-медицинская экспертиза, 1998, т.41, №3, с.13-17.
47. Лобанов А.Н. и др. Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины. «Недра» 1975 г., 260 с.
48. А.В.Евсеев, М.М.Новиков, В.П.Якунин, Желтов С.Ю., Князь А.В. «Изготовление копий трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии по данным, полученным с помощью комплекса цифровой короткобазисной фотограмметрии». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.50-54.
49. А.И.Воложин, Т.И.Сашкина и др., Аллергия и другие формы непереносимости в стоматологии, М., 1996.
50. А.А.Берлин, Т.Я.Кефели, Г.В.Королев, Полиэфиракрилаты, М.: Наука, 1967.
51. А.А.Берлин, Г.В.Королев, Т.Я.Кефели, Ю.М.Сивергин. Акриловые олигомеры и материалы на их основе. М.: Химия, 1983.
52. Е.Н.Антонов, А.В.Евсеев, М.А.Марков, В.Я.Панченко, В.К.Попов, О.З.Топольницкий, А.И.Воложин, А.А.Докторов, С.Г.Курдюмов. «Формирование биоактивных минерал-полимерных композитов методом лазерной стереолитографии». Оптическая техника, 1998, №1 (13), с.55-60.
53. P.F.Jacobs. «The development of QuickCast». In «Stereolithography and other RP&M technologies», ed. P.F.Jacobs, 183-207. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1995.