

На правах рукописи

САПРЫКИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОТОТИПОВ**

Специальности

05.03.01 – Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки.

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск-2006

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Юргинском технологическом институте (филиале) Томского политехнического университета.

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Петрушин С.И.
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Янюшкин А.С. кандидат технических наук, доцент Брюхов В.В.
Ведущая организация	ГУ Кузбасский государственный технический университет

Защита состоится «29» ноября 2006 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.269.01 в Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук, доцент

Костюченко Т.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современной экономике конкурентоспособность продукции определяется качеством и своевременностью появления пилотной партии изделий на рынке. Особенно остро проблема конкурентоспособности продукции стоит перед машиностроением России, так как на отечественных предприятиях используются, как правило, низкопроизводительные методы моделирования и изготовления технологической оснастки (штампов, моделей для литья, электрод-инструментов, конструкторских прототипов, мастер-макетов и т.п.), что не позволяет в сжатые сроки провести техническую подготовку производства новых изделий. Одним из путей решения этой проблемы заключается в применении быстрого изготовления прототипов путем послойного выращивания физической копии различных объектов на основе 3D CAD-модели. Основное преимущество быстрого прототипирования по сравнению с обработкой на станках с ЧПУ состоит в том, что прототип создается за один прием, а исходными данными для него служит, непосредственно, компьютерная модель детали. При этом отпадает необходимость в проектировании технологических процессов и специальной технологической оснастки, а также исключается ручной труд модельщика или трудоемкий процесс объемного фрезерования рабочего профиля штамповой оснастки на станках с ЧПУ. Обладая одновременно высокой гибкостью, этот способ позволяет рассматривать многовариантные технологические и конструкторские решения.

На сегодняшний день существует большое разнообразие технологий быстрого прототипирования. Они основаны на различных физических процессах и материалах для создания прототипов: стереолитография – послойное отверждение жидкого мономера лучом УФ-лазера; LOM-технология использует листовые материалы, вырезанные лучом лазера; FDM-технология – послойная укладка расплавленной полимерной нити; селективное (избирательное) лазерное спекание (СЛС) – процесс послойного спекания порошкового материала лазерным лучом. Последняя технология является практически безотходной и наиболее универсальной, так как имеет самый широкий спектр выбора исходных материалов. Одним из основных препятствий для широкого распространения этой технологии является ее сравнительно низкая производительность, так как время создания модели может варьироваться от нескольких часов до нескольких дней, и отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору параметров режима спекания порошков. При этом, чем выше требования к точности изделия, тем продолжительней процесс его получения. Поэтому повышение производительности СЛС-технологии является актуальной задачей.

Цель работы.

Повышение производительности метода селективного лазерного спекания порошков при изготовлении прототипов технологической оснастки за счет интенсификации процесса.

Задачи исследования.

1. Проанализировать процессы быстрого прототипирования, выявить общие закономерности построения прототипов и их влияние на производительность.
2. Разработать методику определения производительности процесса селективного лазерного спекания и способов ее повышения.

3. Получить зависимости размеров спекаемого слоя порошка от параметров лазерного излучения и теплофизических свойств спекаемого материала.

4. Разработать специальное аппаратное и программное обеспечение и на этой базе усовершенствовать технологию селективного лазерного спекания прототипов.

Методы исследования.

Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях физико-технических методов обработки с использованием лазерного излучения, математического моделирования, материаловедения, линейной алгебры и моделирования с использованием современных средств вычислительной техники. Достоверность результатов диссертационной работы проверялась в лабораторных и производственных условиях.

Научная новизна.

1. Выявлены основные факторы, влияющие на производительность процессов быстрого прототипирования.

2. Созданы оригинальные способы разбиения моделей на слои, защищенные патентами.

3. Впервые выявлены закономерности изменения размеров спекаемого слоя порошкового материала от скорости перемещения источника излучения, частоты следования импульсов, мощности излучения и свойств самого материала.

Практическая значимость работы.

1. Предложено производить оценку технологичности формы изделия для условий послойного синтеза прототипов по специально разработанной методике.

2. Установленные пути повышения производительности процесса селективного лазерного спекания применимы для других методов быстрого прототипирования.

3. Разработана технология послойного синтеза прототипов литейной и штамповой оснастки с использованием древесного шпона (Патент на полезную модель 39102 РФ).

4. Способы разбиения модели на слои (Патенты на изобретение 2262741 РФ, 2268493 РФ) можно применить практически во всех технологиях послойного синтеза.

5. Даны рекомендации по выбору рациональных режимов импульсного лазерного воздействия, обеспечивающих эффективное протекание процесса спекания порошкового материала.

6. Создано программное обеспечение, позволяющее произвести расчет толщин слоев в зависимости от конфигурации поверхности компьютерной модели.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены на ООО «Юргинский машиностроительный завод». По результатам проведения работы получены два патента на изобретение и два патента на полезную модель.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на трех международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» - г. Томск (2003, 2004, 2005 г.г.); на международной научной конференции «Современные проблемы в машиностроении» - г. Томск (2002 г.); на научной конференции «Технологии 2003»

Турция, г. Анталия (2003 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» - г. Томск (2003 г.); на международной научно-практической конференции «Наука і освіта '2005» - Украина, г. Днепропетровск; на международной научно-практической конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» - г. Тюмень (2005 г.); на Всероссийской конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» г. Новосибирск (2006 г.); на восьми научных конференциях Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета (1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 г.г.); на научных семинарах кафедр «Технология машиностроения» Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, «Технология автоматизированного машиностроительного производства» ТПУ, на двух конференциях молодых специалистов ООО «Юргинский машиностроительный завод» - г. Юрга (2001, 2002 г.г.)

Публикации.

По результатам работы и основным результатам исследований опубликовано 19 печатных работ.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 161 страницах и содержит 93 рисунка, 29 таблиц и список литературы из 99 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы и представлена общая характеристика диссертации. Сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен аналитический обзор методов быстрого прототипирования, всесторонне рассмотрены вопросы, связанные с формой, размерами слоя, опорными элементами, дополнительными операциями обработки полученных прототипов. Установлена общая последовательность изготовления прототипов. Рассмотрены перспективные направления по применению технологий быстрого прототипирования. Проведен анализ точности и шероховатости получаемых поверхностей. Определена схема расчета себестоимости изготовления прототипа и трудоемкости его создания.

Как показал обзор источников (в основном иностранных интернет-сайтов), в России сравнительно мало самостоятельных разработок в области послойного синтеза. В основном используется оборудование зарубежного производства с использованием импортных же модельных материалов. Технологические режимы, свойства материалов и настройки оборудования не афишируются. Установки отечественного производства серийно изготавливает только ИПЛИТ РАН (г. Шатура), остальные разработки ведутся в университетских лабораториях на собственной инициативе и публикуемая информация по ним очень скудна, что значительно осложняет проведение разработок в данном направлении. Наибольшее развитие технологи послойного синтеза получили в США и ФРГ, и по количеству установок их догоняет Китай. В России эти технологии представлены скудно.

Установлено, что точность прототипов практически во всех технологиях послойного синтеза определяется исходя из толщины слоя - чем он тоньше, тем выше точность. Опыт проведения работ по послойному синтезу с постоянной толщиной слоя (технология с использованием шпона) показал, что с повышением точности прототипа число слоев увеличивается лавинообразно, при этом достаточно сложно точно воспроизвести профиль фасонной поверхности. Иными словами при повышении точности изготовления прототипа производительность процесса послойного синтеза значительно снижается. В тоже время отсутствуют оценки производительности процессов быстрого прототипирования. Установлено также, что одним из перспективных способов является селективное лазерное спекание (СЛС). Отсутствие данных о режимах лазерного спекания порошковых материалов, а также о самих материалах, обуславливает необходимость проведения исследований в этой области.

Все вышеизложенное свидетельствует об актуальности решения проблемы производительности процесса селективного лазерного спекания, а также ее повышения без потери качества прототипа.

Вторая глава посвящена оценке производительности процессов быстрого прототипирования и способам ее повышения.

Для оценки производительности процесса послойного синтеза прототипов весь процесс был разбит на три основных этапа (рис. 1):

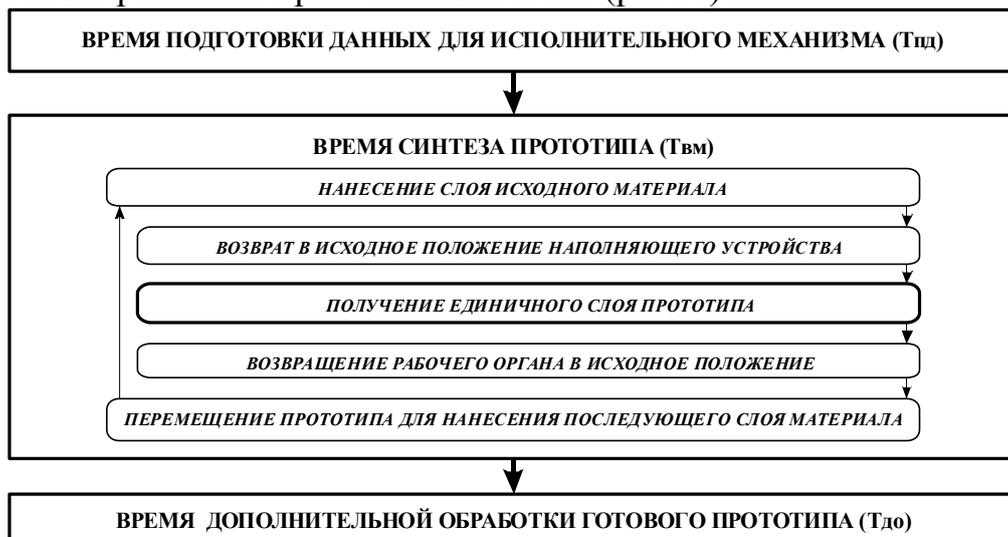


Рис. 1 Этапы изготовления прототипа

Наиболее длительный этап - это синтез прототипа, поэтому именно он может внести наибольшее влияние на производительность:

$$T_{BM} = \sum_{i=1}^n (t_{pi} + t_{xi}), \quad (1)$$

где t_{pi} и t_{xi} – время рабочих и холостых ходов, соответственно, при изготовлении единичного слоя, n – число слоев.

Время синтеза прототипа состоит из циклически повторяющихся процессов: нанесение слоя исходного материала – непосредственного получения очередного слоя модели – возвращение рабочего органа в исходное положение – перемещение модели (на необходимую величину) для нанесения последующего слоя. Его можно сократить тремя способами:

1. Увеличением толщины слоя;
2. Увеличением скорости сканирования;
3. Увеличением скорости холостых ходов.

На сегодняшний день скорости перемещения рабочих органов установок достигли физически рационального предела. Их увеличение повлечет за собой потерю стабильности работы установки, поэтому повысить производительность за счет увеличения скорости сканирования затруднительно.

Исходя из этого, дано определение циклической производительности процесса послойного синтеза, как количество получаемых слоев в единицу времени.

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{T_{ПД} + \sum_{i=1}^n (t_{pi} + t_{xi}) + T_{ДО}} \quad (2)$$

Из графика (рис. 2), полученного по (2), видно, что для повышения производительности необходимо стремиться к сокращению числа слоев, в том числе за счет увеличения толщины единичного слоя.

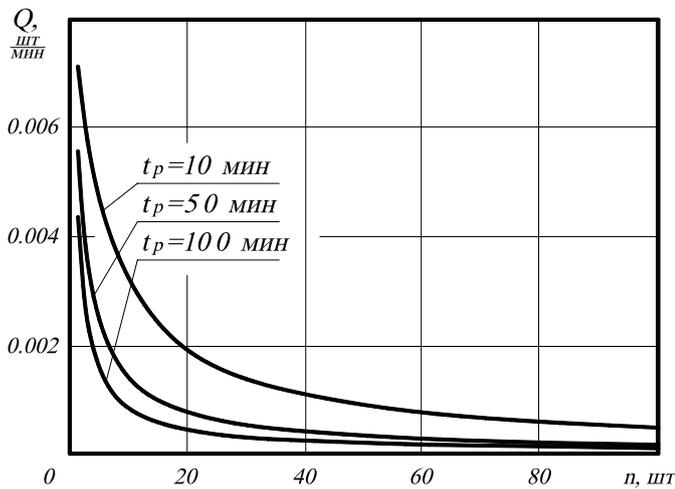


Рис. 2 Зависимость производительности процесса быстрого прототипирования от числа слоев в прототипе
($T_{ПД}=20$ мин, $T_{ДО}=100$ мин, $n=1 \div 100$ шт., $t_x=10$ мин)

При традиционном подходе (рис.3,а) увеличение толщины слоя влечет за собой уменьшение времени построения, и одновременно уменьшение точности воспроизведения модели. Для обеспечения заданной точности размеров необходимо, чтобы толщина слоя была равна или меньше половины величины допуска на форму заданного профиля. Этот метод прост и не требует сложных расчетов. Но из-за большого количества сечений построение прототипа на исполнительном механизме занимает очень много времени. Предложены новые методы разбиения модели на слои (рис. 3, б, в), лишенные отмеченного недостатка.

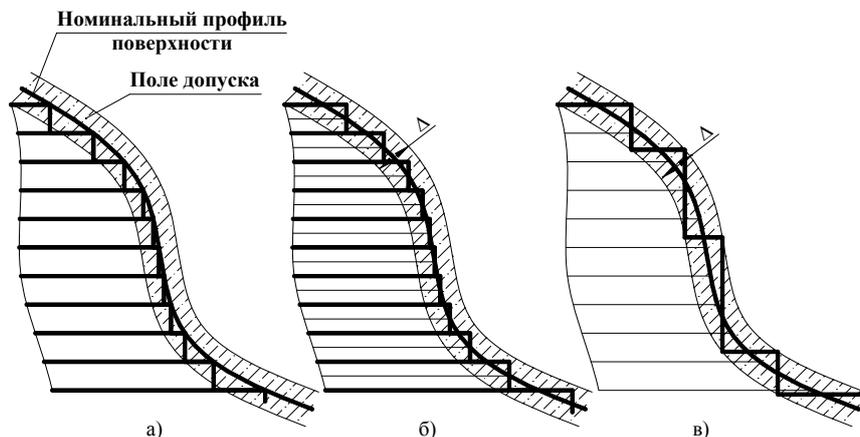


Рис. 3 Методы разбиения модели на слои

Метод «средней точности» позволяет сократить время на построение модели (Патент на изобретение 2262741 РФ) (рис. 3, б). Это достигается за счет того, что модель сечется с постоянной толщиной слоя, но особым образом. В данном случае толщина слоя равна или меньше величины допуска. Образующая профиля проходит через среднюю линию сечений. Этот метод позволяет получать модели с заданными размерами в пределах допуска значительно быстрее, чем при традиционном методе. К недостатку можно отнести то, что появляются отклонения от номинального профиля.

Метод «высокой точности» (рис. 3, в) лишен недостатков описанных выше методов (Патент на изобретение 2268493 РФ), что достигается за счет разбиения модели на слои с переменной толщиной. Толщина слоя Z зависит от угла подъема номинального профиля φ и высоты неровностей h (Рис. 4):

$$Z = \frac{h}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

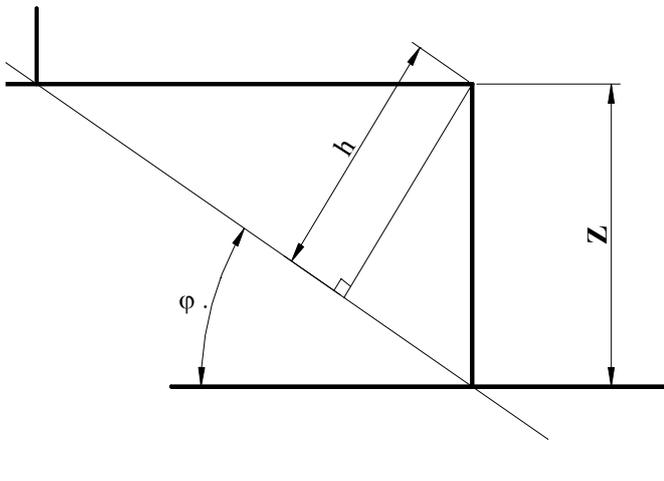


Рис. 4

На данный способ накладываются ограничения, зависящие от технологического оборудования (лазера, точности перемещения в направлении построения), используемого модельного материала. Если известны максимальная и минимальная мощности лазера, то можно получить максимальную и минимальную толщину слоя модельного материала. Отсюда имеем следующее ограничение:

$$Z_{min} < Z < Z_{max}, \quad (4)$$

где Z_{min} и Z_{max} – минимальная и максимальная толщина слоя, которую можно получить на технологическом оборудовании.

Для обеспечения требуемой точности размеров необходимо наложить еще одно условие:

$$Z \leq \Delta \varphi, \quad (5)$$

где $\Delta \varphi$ – допуск формы профиля продольного сечения заданной поверхности.

Применительно к СЛС, с учетом технологических режимов обработки, формула (2) для расчета производительности процесса примет вид:

$$Q = \frac{1}{T_{ид} + \left(\frac{4\Phi\sqrt{1-P^2}}{\pi dhV} \right) + \sum_{i=1}^n t_{xi} + T_{до}}, \quad (6)$$

где Φ – объем модели, d – диаметр лазерного пятна, V – скорость сканирования, P – коэффициент технологичности формы модели.

Третья глава посвящена анализу теплового воздействия лазерного излучения на порошковые материалы для технологического обеспечения процесса послойного спекания порошков и плавной регулировки толщины спекаемого слоя. Также установлена зависимость этой толщины от режимов лазерного воздействия.

Для разработки теории спекания порошковых материалов лазерным излучением применимы теории лазерной поверхностной закалки и лазерной сварки тонких листов. Вопросами воздействия лазерного излучения на различные материалы занимались Н. Н. Рыкалин, А. Г. Григорьянц, И. Г. Шиганов, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора, А. А. Соколов, А. Н. Сафонов, И. В. Шишковский и др. Хотя сам процесс спекания порошковых материалов исследовался в работах Костикова В. И., Кипарисова С. С., Либенсона Г. А., Васильева В. А. и др.

Лазерное спекание порошковых металлических и неметаллических материалов заключается в нагреве локальных участков поверхности до температур выше критических, приводящем к схватыванию между собой частиц порошкового материала и последующем охлаждении с высокой скоростью. Как известно, тепловое воздействие на материал определяется не параметрами лазерного излучения, а параметрами поглощенного излучения. Поэтому в расчетах используется плотность мощности теплового источника q_n .

Лазерное спекание порошков сопровождается кратковременным воздействием импульса излучения на поверхность материала. При этом в материале возникает температурное поле, имеющее осевую симметрию. При коротких импульсах основной поток теплоты в материале распространяется по нормали к поверхности. Следовательно, задачу теплопроводности можно рассматривать как одномерную по глубине.

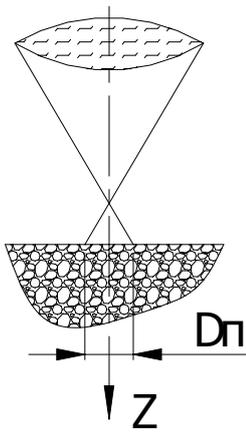


Рис. 5

Температурное поле по оси Oz (Рис.5), создаваемое в полубесконечном теле однородным лучом круглого сечения радиусом r_n , при $t > \tau_u$ имеет вид:

$$T(z, t) = \frac{2q_n \sqrt{a}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} i\Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{t - \tau_u} i\Phi \left(\frac{\sqrt{z^2 + r_n^2}}{2\sqrt{a(t - \tau_u)}} \right) \right], \quad (7)$$

где τ_u – длительность лазерного импульса; t – время, отсчитываемое после окончания действия импульса лазерного излучения; z – расстояние, отсчитываемое по оси Oz ; $i\Phi$ – функция интеграла вероятности; λ_T – коэффициент теплопроводности; $a = \lambda_T / (c\gamma)$ – коэффициент температуропроводности материала; $c\gamma$ – коэффициент объемной теплоемкости.

Предположено, что глубина пропеченного слоя порошка будет равна размерам зоны, в которой при нагреве в результате лазерного воздействия была достигнута критическая температура спекания T_{cn} . В этом случае удобнее пользоваться выражением для вычисления температур в неявном виде, полученном при допущении $r_n \gg \sqrt{at}$:

$$T(z, t) \approx \frac{q_n}{\lambda_T} \left(2\sqrt{\frac{at}{\pi}} - z \right), \quad (8)$$

где z – глубина прогрева до $T(z, t)$.

Из выражения (8) выведена формула для Z_{cn} при импульсном лазерном воздействии:

$$Z_{cn} \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \tau_u}{\pi}} - \frac{T_{cn} \cdot \lambda_{эkv} \cdot \pi \cdot r_n^2 \cdot \tau_u \cdot E}{W_i \cdot q_n} \quad (9)$$

где E – плотность мощности лазерного излучения, W_u – энергия импульса излучения.

Выражение (9) позволяет численно оценить величину воздействия излучения и значительно расширить возможности технологии СЛС прототипов, т.е. появляется возможность изготовления послойных прототипов с переменной толщиной слоя, что влечет за собой повышение их точности и скорости изготовления.

Используя одномерную модель нагрева тела тепловым источником с постоянной во времени плотностью мощности излучения, было получено энергетическое условие, обеспечивающее лазерное спекание с минимальным испарением, это тепловой поток с плотностью E_{cn} :

$$E_1 < E_{cn} < E_2, \quad (10)$$

где E_1 – плотность мощности излучения, при которой достигается температура плавления; E_2 – плотность мощности излучения, при которой происходит испарение материала.

Изменяя E_{cn} в указанных пределах (10), можно управлять толщиной спекаемого слоя порошка, а, следовательно, обеспечить технологическую реализацию предложенных методов повышения производительности процесса СЛС.



Рис. 6 Экспериментальная установка

В четвертой главе изложена методика экспериментальных исследований, которые включали в себя определение глубины и ширины спекания порошковых материалов в зависимости от режимов лазерного воздействия. Также приведено описание применявшихся экспериментальных оборудования и установок.

Экспериментальная установка (рис. 6) представляет собой технологический лазерный комплекс формирования поверхностей

деталей сложной пространственной формы. Она состоит из модернизированной лазерной установки «КВАНТ-15», специально изготовленного трехкоординатного стола, персонального компьютера и оригинального программного обеспечения для СЛС, разработанного по результатам теоретических и экспериментальных исследований. Оно позволяет производить чтение файлов в формате STL, который в настоящее время является стандартным компьютерным форматом для установок послойного синтеза, производить расчет толщины слоя различными способами, получать сечения по результатам расчетов, назначать режимы обработки и управлять установкой послойного лазерного спекания. Алгоритм функционирования компьютерной программы представлен на рисунке 7. На рисунках 8-10 представлены экранные формы.

Данное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс подготовки данных для СЛС с переменной толщиной слоя.

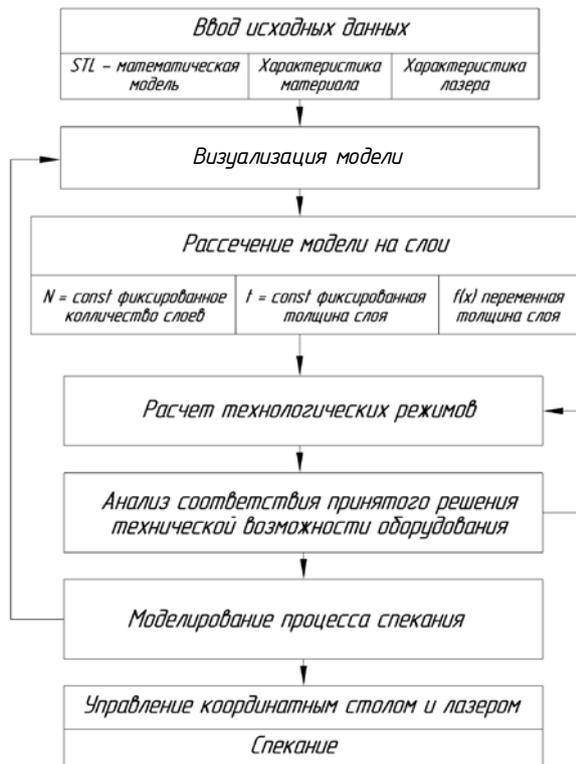


Рис. 7 Алгоритм функционирования программного обеспечения

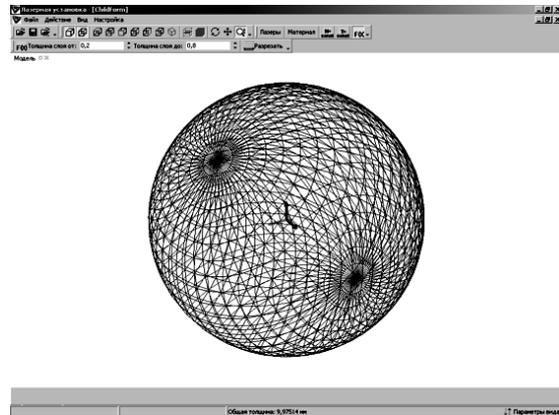


Рис. 8 Модель в формате STL

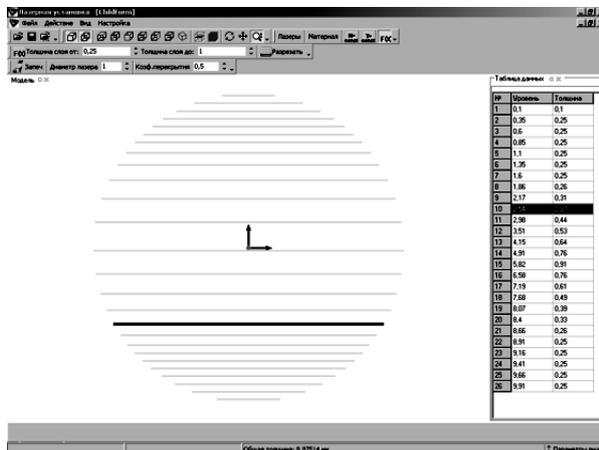


Рис. 9 Расчленение модели на слои с переменной толщиной

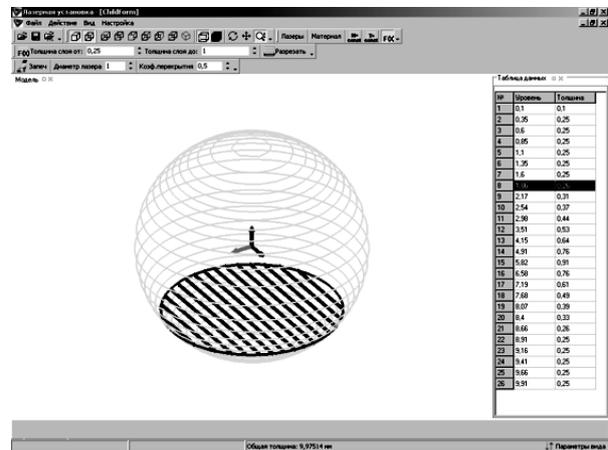


Рис. 10 Эмуляция процесса спекания

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований.

В процессе исследования ставилась задача определения влияния импульсного лазерного излучения на различные порошковые материалы и их смеси, а также экспериментально определить зависимости толщины и ширины спекаемого слоя порошка от технологических параметров лазерного излучения и свойств конструкционного материала. В результате были получены спеканные опытные образцы и проведено их изучение.

Для проведения исследований по СЛС в качестве спекаемых материалов были выбраны следующие порошки:

- медный порошок ПМС-1 (ГОСТ 4960-75),
- порошок конструкционной стали ПЖ6 (ГОСТ 9849-74),
- тонер от лазерного принтера HP LaserJet 1200 (Состав: стиролакриловый полимер, оксид железа, неорганические добавки).
- смесь медного порошка и тонера в соотношении 1/1.
- смесь порошка конструкционной стали и тонера в соотношении 1/1.

Для проведения экспериментов были установлены следующие технологические режимы работы лазерной установки:

Длительность импульса, мс _____ 4
 Частота повторения импульса, Гц _____ 1...10
 Диаметр светового пятна, мм _____ 0,1...1,6

Мощность излучения регулировалась изменением напряжения на накопительных конденсаторах лазерной установки. Энергия излучения фиксировалась индикатором энергии. При проведении экспериментов изменялась частота следования импульсов и мощность лазерного излучения, а также фиксировалась энергия излучения. Диаметр лазерного пятна и скорость его перемещения оставались постоянными. Эксперименты проводились до момента появления явных дефектов спеченного слоя, таких как усадка и появление раковин. В ходе проведенной работы было получено 56 образцов, у которых измерялась глубина и ширина спеченного слоя на инструментальном цифровом микроскопе ИМЦ 100×50,А с точностью 0,001 мм.

Так как порошковый материал не является однородным телом, то при расчетах необходимо использовать теплофизические характеристики, определяемые экспериментально. Для этого был применен импульсный метод определения теплофизических характеристик материала, при котором выделившаяся за время действия источника конечная энергия не успевает заметно рассеяться за пределы зоны его локализации. При этом время действия источника выбрано пренебрежимо малым в сравнении с длительностью рабочей стадии опыта, на которой регистрируется вызванное этим источником тепловое возмущение. Он обладает широкими техническими возможностями и позволяет определять все три теплофизических характеристики образца (табл. 1).

Таблица 1

Теплофизические характеристики порошковых материалов

Порошок или смесь	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(м ³ ·°С)	Коэффициент температуропроводности, м ² /с
ПМС-1 + тонер (1/1)	$7,35 \times 10^{-3}$	1,46	$3,2 \times 10^{-3}$
ПЖ6 + тонер (1/1)	$3,63 \times 10^{-3}$	0,5	$2,85 \times 10^{-3}$
ПМС-1	$3,6 \times 10^{-3}$	1,16	2×10^{-3}
ПЖ-6	$5,5 \times 10^{-3}$	0,9	$2,4 \times 10^{-3}$

На рисунках 11-13 представлены зависимости ширины и глубины спеченного слоя порошка от плотности мощности лазерного излучения в двойных логарифмических координатах, полученные при частоте следования 1 Гц для разных материалов.

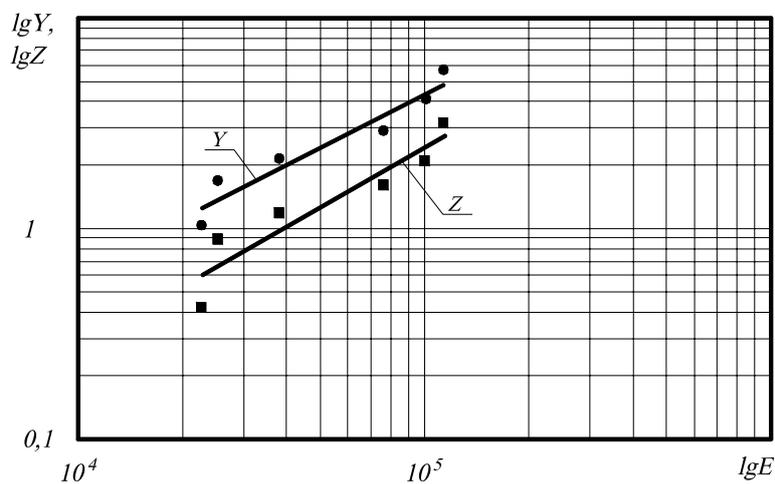


Рис. 11 График зависимости ширины и глубины спеченного слоя порошка ПМС-1

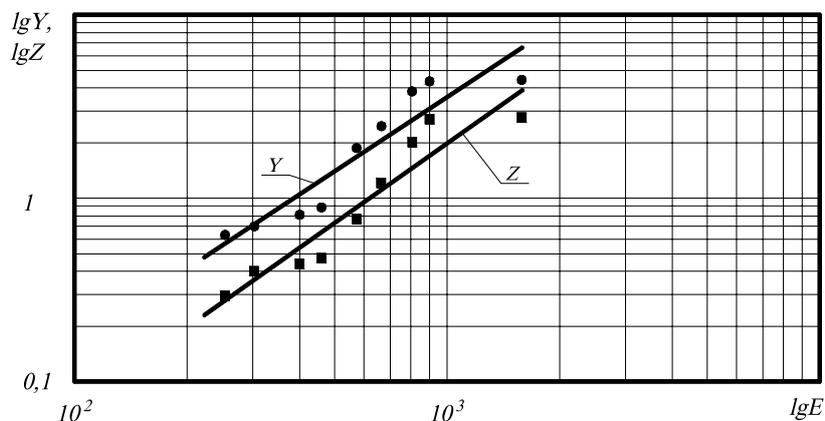


Рис. 12 График зависимости ширины и глубины спеченного слоя порошка ПМС-1/тонер

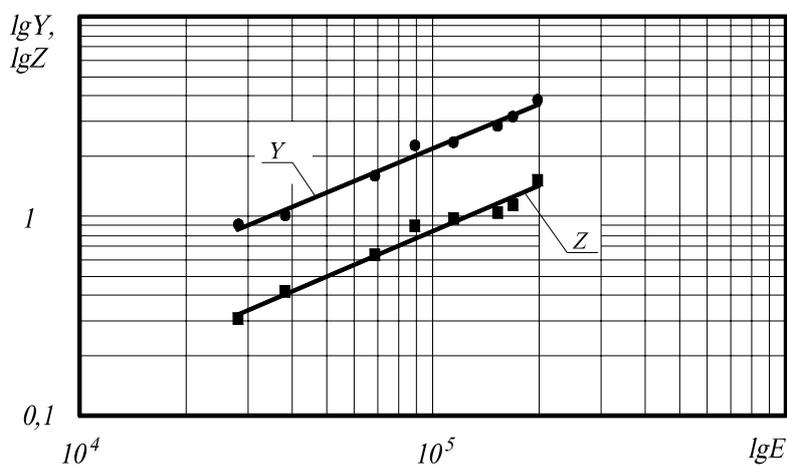


Рис. 13 График зависимости ширины и глубины спеченного слоя порошка ПЖ-6/тонер

Графоаналитическая обработка экспериментальных результатов дала следующие зависимости глубины и ширины спекаемого слоя от плотности мощности лазерного излучения:

- для глубины спеченного слоя
$$Z = C_z \cdot E^{X_z}; \quad (11)$$

- для ширины спеченного слоя
$$Y = C_y \cdot E^{X_y}; \quad (12)$$

где C_y , C_z , X_y и X_z – коэффициенты, значения которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты	Частота следования импульсов		
	1 Гц	2 Гц	5 Гц
Порошок медный ПМС-1			
C_y	2×10^{-4}	3×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-3}$
C_z	2×10^{-6}	5×10^{-5}	$0,2 \times 10^{-3}$
X_y	0,7785	0,8371	0,7552
X_z	1,1002	0,9328	0,8709
Смесь ПМС-1-тонер (1/1)			
C_y	4×10^{-4}	3×10^{-6}	9×10^{-5}
C_z	10^{-4}	2×10^{-8}	8×10^{-5}
X_y	1,3324	1,1526	0,9605
X_z	1,4342	1,4923	0,9063
Смесь ПЖ-6-тонер (1/1)			
C_y	5×10^{-4}	10^{-5}	9×10^{-28}
C_z	2×10^{-4}	8×10^{-7}	10^{-32}
X_y	0,7349	1,1027	6,2761
X_z	0,75	1,2768	7,3162

Были получены зависимости изменения толщины и ширины спекаемого слоя от изменения диаметра лазерного пятна.

В результате проведенных экспериментов показано, что имеется возможность изменения толщины спекаемого слоя в значительных пределах за счет изменения технологических режимов лазерной обработки. Сделан вывод о том, что применение металлических порошков в «чистом» виде без защитной среды ограничено, т.к. происходит их интенсивное окисление.

Получены формулы, позволяющие рассчитывать производительность процесса селективного лазерного спекания в зависимости от режимов лазерного воздействия и сложности формы прототипа.

Основные результаты и выводы по работе

В диссертационной работе решена актуальная задача повышения производительности процессов быстрого прототипирования в целом и селективного лазерного спекания в частности.

1. Проведен анализ особенностей существующих технологий быстрого прототипирования, в результате которого выявлено, что практически отсутствует актуальная информация по оценке производительности процессов быстрого прототипирования, режимах обработки и используемых материалах.

2. Разработана методика оценки производительности и выявлены способы ее повышения на основе общих закономерностей построения прототипов.

3. По результатам экспериментальных исследований установлено влияние режимов лазерного воздействия на порошковые материалы при селективном лазерном спекании. Получены эмпирические зависимости глубины спекаемого слоя порошка от параметров лазерного излучения и теплофизических свойств спекаемого материала.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые способы лазерно-компьютерного макетирования (Патенты на полезную модель 39102 РФ, 52348 РФ, Патенты на изобретение 2262741 РФ, 2268493 РФ).

5. Создано программное обеспечение СЛС, позволяющее производить расчет толщин слоев в зависимости от конфигурации поверхности модели, проводить рассечение модели на слои, выдавать рекомендации по режимам обработки, и осуществлять эмуляцию процесса спекания.

6. Разработанная технология послойного синтеза прототипов литейной и штамповой оснастки с использованием древесного шпона позволила снизить трудоемкость проектирования и изготовления литейной и штамповой оснастки в среднем в 9,5 раз по сравнению с ручным проектированием и изготовлением, о чем

свидетельствует акт внедрения разработки в производство ОАО «Юргинский машиностроительный завод».

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Внедрение и перспективы развития новых технологий изготовления литейной и штамповой оснастки с использованием САД/САМ систем. // I Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ» г. Томск, 24-28 сентября 2002 г. Сборник трудов. – Томск: СТТ, 2003 –101-102с.

2. Сапрыкин А. А. Внедрение и перспективы развития новых технологий быстрого изготовления прототипов в заготовительном производстве. // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 2-ой межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд. Алт. гос. техн. ун-та, 2002 – с.219-221.

3. Петрушин С. И., Сапрыкин А. А. Сокращение сроков технологической подготовки производства путем быстрого изготовления прототипов изделий // Технология машиностроения. - 2003. - № 3(21). – С.73-76.

4. Петрушин С. И., Сапрыкин А. А. Разработка и применение современных высоких технологий в машиностроительном производстве // «Успехи современного естествознания», №7 2003 г. (Материалы научной конференции «Технологии 2003» 18-25 Мая 2003 года, Турция, г. Анталия), с. 72-73.

5. Сапрыкин А. А. Методы получения сечений в технологии лазерно-компьютерного макетирования // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Труды Всероссийской научно-практической конференции. –Томск: Изд-во ТПУ, 2003 г. - 129-131с.

6. Сапрыкин А. А. Технологии быстрого прототипирования в машиностроительном производстве // «Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ-2003)». Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. – г. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та им. Ползунова, 2003 г. –124-125 с.

7. Сапрыкин А. А. Технология послойного синтеза прототипа сложной штамповой оснастки // IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 7-11 апреля 2003 г. Труды в 2-х т. –Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. –Т.1.-322с. С. 189-191.

8. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Методы повышения точности прототипов в технологиях быстрого прототипирования // X Юбилейная Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 29 марта-2 апреля 2004 г. Труды в 2-х т. –Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004. –Т.1.-3008с. С. 189-190.

9. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Изготовление пластиковых моделей с помощью аддитивных технологий // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 4-ой Всероссийской юбилейной научно-практической конференции 23-24 сентября 2004 года. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд. Алт. гос. техн. ун-та, 2004 – с.39-41.

10. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Методика расчета толщины спеченного слоя порошка при импульсном лазерном излучении // Современные проблемы машиностроения. Труды II Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. -594 с. С. 444-447.

11. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А., Ласуков А. А. Изготовление модельной и штамповой оснастки с использованием технологии послойного синтеза // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Наука і освіта '2005». Том 59. Техніка. –Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. -82 с.

12. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Скорость процесса спекания порошков импульсным лазерным излучением // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Труды III Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х т.– ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2005.-Т.1. – 36-37 с.

13. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Изготовление металлических изделий методами послойного синтеза // XI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 29 марта-2 апреля 2005 г. Труды в 2-х т. –Томск: Изд-во Томского политехн. Ун-та, 2005. –Т.1.-404с. С. 216-218.

14. Сапрыкин А. А. Повышение производительности технологии селективного лазерного спекания // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: Материалы III международной научно-технической конференции. – Тюмень: Феликс, 2005. -364с.

15. Патент на полезную модель 39102 РФ, МПК7 В22С 7/00, В32В 21/13. Модель-прототип/ А. А. Сапрыкин, В. С. Чернов, В. И. Субботин, С. М. Петров. – Заявка №2004105203; Заявл. 24.02.2004; Оpubл. 20.07.2004, Бюл. №20.

16. Патент на изобретение 2262741 РФ, МПК7 G06Т 17/20, 17/40. Способ лазерно-компьютерного макетирования/ А. А. Сапрыкин, С. И. Петрушин, А. В. Вальтер, С. В. Пономаренко. –Заявка №2004117265/09; Заявл. 07.06.2004; Оpubл. 20.10.2005, Бюл. №29

17. Патент на изобретение 2268493 РФ, МПК7 G06Т 17/20, 17/40. Способ лазерно-компьютерного макетирования/ А. А. Сапрыкин, С. И. Петрушин, Н. А. Сапрыкина. –Заявка №2004119122; Заявл. 24.06.2004; Оpubл. 20.01.2006, Бюл. №02.

18. Патент на полезную модель 52348 РФ, МПК7 В22С 23/00, G02В 26/10. Устройство для сканирования единичного слоя при послойном лазерном синтезе прототипов / А. А. Сапрыкин, Н. А. Сапрыкина –Заявка №2004105204; Заявл. 24.02.2004; Оpubл. 27.03.2006, Бюл. №9.

19. Сапрыкин А. А., Сапрыкина Н. А. Оценка производительности технологий послойного синтеза прототипов и методы ее повышения // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х т.– ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2006.-Т.1. – 30-32 с.

Подписано в печать _____ . Формат 60x84 1/16

Печать – ризография. Ус.п.л. _____

Тираж 100 экз. Заказ _____

Отпечатано _____