

димо выполнение условия:  $J \geq \Delta P_y / \Delta \text{дет.}$

### Литература

1. Пуховский Е.С., Мясников Н.Н. «Технология гибкого автоматизированного производства. – К.: Техника, 1989.- 207 с.
2. Старков В.К. «Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве». – М.: Маш-ние, 1989. – 296 с.
3. Агафонов В.В. «Обеспечение жесткости станка при проектировании». – Вестник Брянского государственного технического университета №2 (10), 2006, с.97-101,
4. СТ СЭВ 145-88

### **Оптимизация технологического процесса лазерной обработки с позиций системно-синергетического анализа**

к.т.н. Исаков В.В.  
ФГУП ММПП «Салют»

*Аннотация.* В статье проанализированы подходы к проблеме оптимизации процесса лазерной обработки для решения актуальных задач технологии машиностроения. Разработана методика оптимизации технологии лазерной обработки, основанная на синергетической схеме оценки ключевых параметров. Результаты оптимизации на основе рекуррентного соотношения позволяют сформулировать требования к технологической эффективности лазерного метода обработки.

*Ключевые слова:* лазерная обработка, оптимизация технологии, системно-синергетический анализ

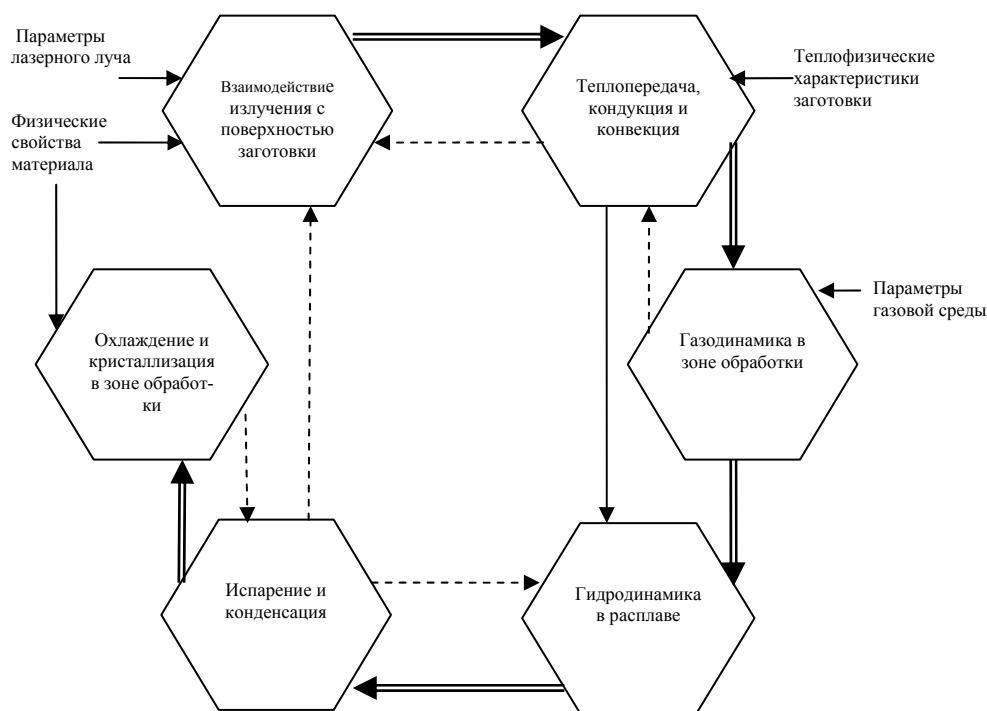
**Введение.** Технология лазерной обработки стала в настоящее время неотъемлемой составной частью наукоемкого машиностроительного производства. Лазерную технологию используют для резки, сварки, маркировки, поверхностной обработки самых различных материалов. Для обеспечения высокого качества, производительности и экономической эффективности необходимо процесс лазерной обработки оптимизировать таким образом, чтобы были достигнуты его предельные возможности. Традиционные методы оптимизации базируются на поиске экстремальных значений максимума или минимума целевой функции  $D_i(x)$  одной или нескольких переменных [1]. Теория экстремальных задач стоит на простом соображении – обращении в нуль производной оптимизируемого функционала. Решение конкретных задач оптимизации осуществляется с помощью методов математического программирования.

В последние годы разработано множество алгоритмов в области решения задач математического программирования как при наличии ограничений, так и для безусловной оптимизации. В этой связи следует отметить, что постановка и сведение задач оптимального проектирования к задаче математического программирования неизбежно содержат элементы субъективизма. Для его преодоления в постановках задач скалярной оптимизации используют подходы, связанные с именем В. Парето (1848-1923). Целью оптимального проектирования при этом является построение области компромиссов, называемой также множеством неулучшаемых альтернатив. Оптимальные по Парето альтернативы исчерпываются решениями параметрической задачи оптимизации вида,  $\sum_i \mu_i D_i(x) \rightarrow \max, x \in X$ . Варьирование параметров  $\mu_i$  позволяет перебрать все паретовские решения искомой задачи.

**Проблема.** Для успешного применения этих процедур оптимизации, в первую очередь, требуются функциональные зависимости, адекватно описывающие переменные, действующие в лазерной технологической системе. Необходимо подчеркнуть, что получить приемлемые соотношения в виде целевых функций удается далеко не всегда. Анализ показывает, что

при плавном изменении управляющих параметров характеристики процесса могут изменяться скачкообразно. Схема задачи анализа процесса лазерной обработки представлена на рисунке 1. Ее структуру можно интерпретировать в виде ориентированного графа, у которого гексагональные вершины именуют событиями, ребра - операциями перехода из предшествующего события к последующему. Особенность графа заключается в том, что события связаны между собой не только прямыми, но и обратными связями. Инверсные во времени операции показывают взаимосвязь между последующими и предшествующими событиями. Очевидно, что при возникновении сильной положительной обратной связи между событиями процесс лазерной обработки может содержать стадии, носящие автоколебательный или взрывной характер.

Действительно, из приведенной схемы (рисунок 1) видно, насколько сложна взаимосвязь между ключевыми событиями процесса лазерной обработки, например, между теплопередачей, гидродинамикой и кристаллизацией расплава. При оптимизации такого рода сложных технологических систем, относящихся к классу систем большой размерности, постановка задач оптимизации часто перестает отражать суть проблемы. Это обусловлено тем, что при анализе и постановке задачи происходит накопление смысловых неточностей. Возникает противоречие: чем больше учтено фактов, тем хуже становится модель оптимизации. Из этого можно сделать вывод: большое число переменных свидетельствует, что в задаче не определено и не выделено главное.



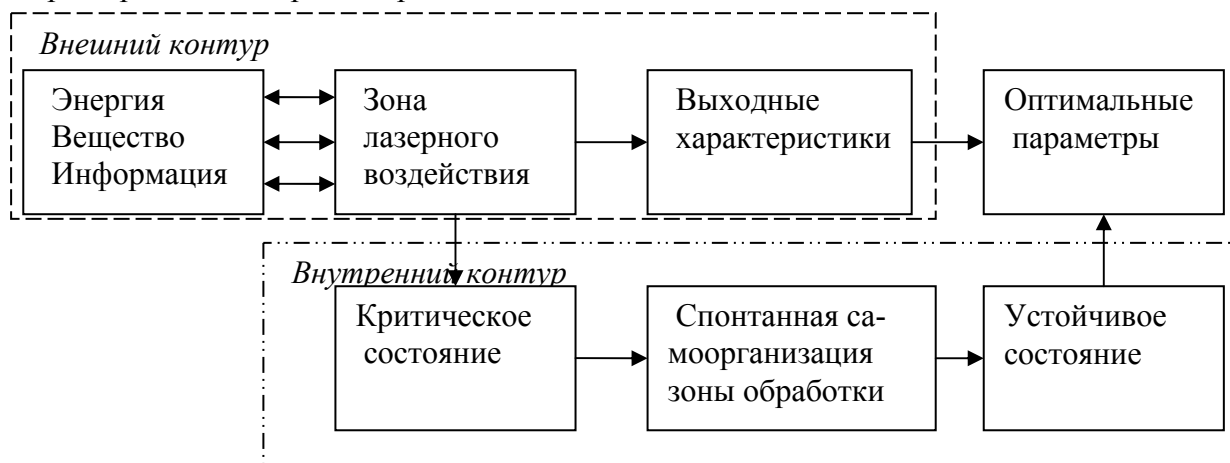
**Рисунок 1 – Схема задачи анализа процесса лазерной обработки**

Лазерная обработка, как метод обработки материалов концентрированными потоками [2], обеспечивает тепловую плотность мощности более  $10^5 \dots 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , поэтому процесс нагрева приобретает мультипликативную природу. Это означает, что создаваемый энергией лазерного луча тепловой поток, который в равновесных условиях диссипации являет собой источник беспорядка, в условиях далеких от равновесия превращается в активный источник самоорганизующегося порядка. Система «лазерный луч – обрабатываемая заготовка» становится синергетической. Термин синергетика, в переводе с греческого, означает – совместное действие, сотрудничество. Системно синергетический анализ проблемы оптимизации лазерной обработки позволяет сформулировать вопрос о том, каким образом для достижения наилучших показателей следует учитывать естественные внутренние взаимосвязи в искомой

технологической системе. Например, в какой степени температурное поле в зоне лазерной обработки за счет газодинамических и плазменных процессов влияет на величину потока лазерной энергии, вводимого в материал. Методология синергетики (теории самоорганизации) ставит основной вопрос и позволяет выяснить, как из множества свойств, сторон, параметров реально функционирующей системы рождается главный основной параметр порядка. В таком случае оптимизация лазерной технологии должна базироваться на содействии процессам самоорганизации, а не навязывании определенного поведения технологической системе.

Цель настоящей работы - разработать методiku оптимизации процесса лазерной обработки, раскрывающую первоначальную неопределенность на основе принципа: от сложного – к целостной простоте.

**Постановка задачи.** Различают три типа процессов самоорганизации. Первый – это самозарождение организации, т.е. возникновение из некоторой совокупности целостных объектов определенного уровня новой целостной системы со своими специфическими закономерностями. Первый тип называется спонтанной самоорганизацией. Второй тип – это саморегуляция внутренних процессов, благодаря которым система поддерживает определенный уровень организации (самоорганизации) при изменении внешних условий ее функционирования. Здесь действуют механизмы отрицательной обратной связи, т.е. второй тип можно именовать управляемой самоорганизацией. Третий тип – это процесс самоорганизации, связанный с совершенствованием и саморазвитием таких систем, которые способны накапливать и использовать прошлый опыт, т.е. самообучающиеся системы. Для проявления процессов самоорганизации третьего типа сложно организованная технологическая система должна содержать элементы, обладающие памятью. Самообучающиеся системы в последнее время стали предметом пристального изучения в синергетике [3]. Проблеме саморегуляции технологических систем на основе фундаментальных подходов к решению задачи устойчивости много внимания уделяет теория автоматического управления. Нас, в первую очередь, будет интересовать влияние спонтанной самоорганизации на определение оптимальных параметров процесса лазерной обработки.



**Рисунок 2 – Синергетическая схема оптимизации процесса лазерной обработки**

На рисунке 2 показана синергетическая схема оптимизации процесса лазерной обработки, содержащая два совместно действующих контура: внешний и внутренний. Внешний контур воплощает классический подход. Зона лазерного воздействия (ЗЛВ), возникающая в обрабатываемой заготовке, – это «черный ящик», на вход которого подают энергию, вещество и информацию, выходные характеристики ЗЛВ отражают линейаризованные функциональные взаимосвязи. На их основании рассчитывают оптимальные параметры процесса обработки. Внутренний контур раскрывает процессы в ЗЛВ через явление самоорганизации. Как было отмечено ранее, спонтанная самоорганизация возникает после достижения в ЗЛВ критически неустойчивого динамического состояния (точки бифуркации). Благодаря взаим-

ному усилению пространственных и временных флуктуаций рождается синергетическая структура, эффективность которой превышает сумму эффекта от отдельных составляющих. В результате ЗЛВ переходит в новое устойчивое структурное состояние, которое воплощает собой достижение оптимальных параметров процесса.

**Исходные предпосылки.** При исследовании процесса лазерной обработки будем различать три стадии. Первая стадия - это формирование ЗЛВ посредством спонтанной самоорганизации в неподвижной заготовке. На первой стадии происходит прожиг первичного отверстия при резке и перфорации либо проплавление на заданную глубину при сварке и наплавке. Вторая стадия – это непосредственно формирование области лазерной обработки (ОЛО) в неравновесных условиях при перемещении ЗЛВ по заданной траектории. На второй стадии формируется контур лазерного реза при получении детали из исходной заготовки либо сварной шов для создания неразъемного соединения деталей. Третья стадия – это стадия релаксации ЗЛВ в равновесное состояние после прекращения подачи лазерного излучения. На третьей стадии ЗЛВ охлаждается в естественных или искусственных условиях окружающей среды, что приводит к скоростной кристаллизации расплава и сопровождающим ее структурно-фазовым превращениям в прилегающем слое.

Для каждой стадии процесса обработки можно выделить свой параметр порядка – локальный критерий оптимальности. Критерий оптимальности для первой стадии – это максимальная глубина ЗЛВ, для второй стадии – производительность процесса обработки, для третьей – качество поверхности лазерно-изготовленных деталей (шероховатость, волнистость). Понятно, что локальные критерии оптимальности должны быть связаны между собой, например, согласно принципу, действующему в системной триаде: каждая пара критериев находится в соотношении дополнительности, а третий задаёт меру совместности.

В такой постановке процесс лазерной обработки целесообразно оптимизировать с единых позиций: как при импульсном, так и непрерывном режимах воздействия лазерного излучения. Это правомерно, поскольку, во-первых, при лазерной обработке непрерывным излучением, как известно, все сопутствующие процессы в ЗЛВ имеют прерывистый, автоволновой характер. Импульсной обработке дискретность присуща по определению. Во-вторых, режимы лазерной генерации современного технологического оборудования, в зависимости от обрабатываемой заготовки, программируют в широком диапазоне: от единичных импульсов до непрерывного спектра.

**Математическая модель.** Для оптимизации технологического процесса лазерной обработки удобно, на наш взгляд, предположить, что независимая переменная (время)  $t$  изменяется дискретно и мы имеем дело с последовательностью событий  $x = \{x_i\}_{i=0}^{\infty}$ . В этом случае искомую динамическую систему можно представить в виде точечного отображения:

$$x_{n+1} = \vec{\varphi}(x_n), \quad (1)$$

где:  $\vec{\varphi}$  – функция, связывающая между собой положение двух следующих одна за другой точек  $x_n, x_{n+1}$  при  $n = 1, 2, \dots$

Формально отображение может быть записано в виде рекуррентного соотношения:

$$X_{j+1} = f(X_j), j = 0, 1, 2, \dots; X = (x_1, \dots, x_n); f = (f_1, \dots, f_n). \quad (2)$$

Использование точечных отображений вместо дифференциальных уравнений весьма полезно как в силу их наглядности, так и в вычислительном отношении, поскольку при переходе к отображению размерность изучаемой системы уменьшается на единицу.

У отображений могут существовать неподвижные и периодические точки, а также особенности, размерность которых нецелая. Примечательно, что исследование отображений, для которых обратное отображение неоднозначно, приводит к фракталам. Двумерные, сохраняющие площадь, отображения –

$$x_{n+1} = \varphi_1(x_n, y_n), y_{n+1} = \varphi_2(x_n, y_n) - \quad (3)$$

можно свести к изучению отображения, зависящего от одного параметра [4].

На основе вышеизложенного оптимизацию каждой стадии процесса лазерной обработки рационально выполнять с помощью модели, представляющую собой одномерное вещественное отображение вида:

$$x_{n+1} = f(x_n, \mu), n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

где:  $\mu$  - действительный параметр, зависящий от того, какую стадию процесса мы рассматриваем.

**Результаты оптимизации.** В качестве примера рассмотрим первую стадию процесса лазерной обработки, применив для этого модель ограниченного роста размера глубины  $h$  ЗТВ. Одномерное отображение имеет вид :

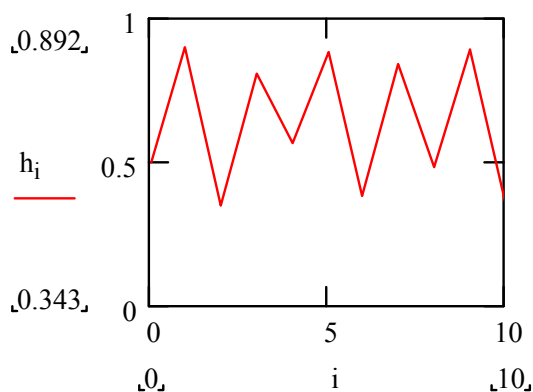
$$h_{n+1} = 4\mu h(1 - h), n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Первый член данного уравнения описывает естественный рост глубины ЗТВ за счет действия тепловой энергии лазерного луча  $W_L$ , а второй член – уменьшение глубины ЗТВ вследствие конкуренции между тепловложением и теплоотводом. Значение параметра  $\mu = \frac{W_L}{W_L + W_D}$  находится в интервале  $0 \dots 1$  и являет собой безразмерную величину, поскольку содержит энергию разрушения  $W_D$ . Очевидно, что при  $W_L \gg W_D, \mu \approx 1$  и напротив при  $W_L \ll W_D, \mu \approx 0$ .

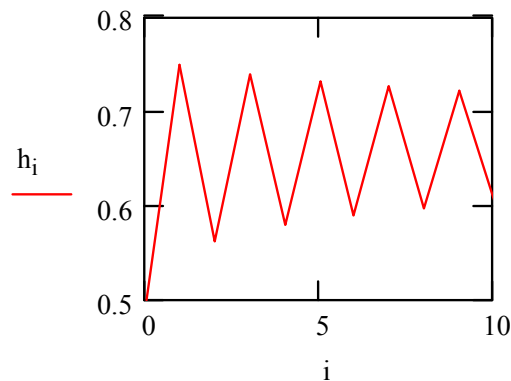
Численный анализ уравнения (5) в MathCAD показывает, что характер решения определяется параметрами  $\mu$  и  $h_0$ .

На рисунке 3 приведены результаты расчета глубины ЗТВ при больших значениях параметра  $\mu$ . Глубина реза непостоянна – хаотический режим.

При уменьшении параметра  $\mu$  наблюдается переход процесса лазерной обработки в автоколебательный режим. В этом случае говорят, что происходит бифуркация (раздвоение) неподвижной точки на два осциллирующих значения (в нашем случае при  $\mu = 0,75$   $h_1 = 0,71; h_2 = 0,62$ ). Этот процесс показан на рисунке 4.



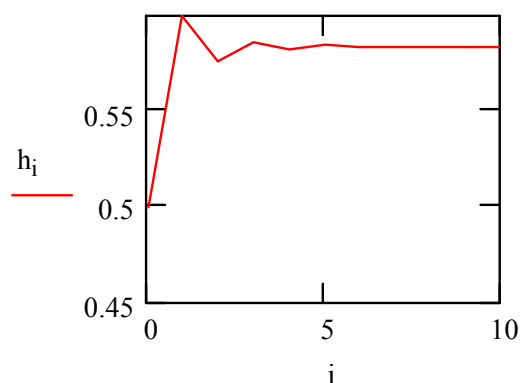
**Рисунок 3 – Хаотический режим процесса лазерной обработки, при  $\mu = 0,8924$**



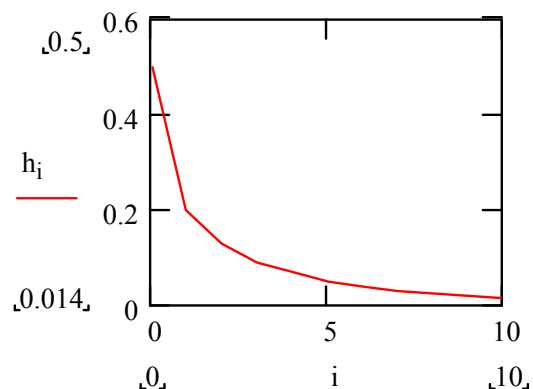
**Рисунок 4 – Автоколебательный режим процесса лазерной обработки, при  $\mu = 0,75$**

Изменяя значение  $\mu$  до меньших значений, можно убедиться, что при  $\mu = 0,6$  глубина ЗТВ достигает стационарного (установившегося) режима, который приведен на рисунке 5.

Если значение  $\mu$  не превышает 0,23 при любом значении  $h_0$ , глубина ЗТВ не возрастает, а напротив уменьшается (рисунок 6).



**Рисунок 5 – Стационарный режим обработки,  $\mu = 0,6$**



**Рисунок 6 – Отсутствие роста глубины ЗТВ при  $\mu = 0,2$**

### Выводы

Методика оптимизации процесса лазерной обработки на основе системно-синергетического анализа состоит в следующем. В отличие от известных теоретических методов решения экстремальных задач оптимизируемой функциональной зависимости, основанных на обращении в нуль производной, предлагается применять рекуррентные соотношения. Параметр оптимизации выбирают по соотношению величин тепловложения и теплоотвода в ЗЛВ. Точку бифуркации определяют по двум близким значениям оптимизируемой переменной вблизи этой области, плавно снижают величину параметра оптимизации и определяют стационарный режим, соответствующий постоянной глубине ЗТВ.

### Литература

1. Босс В. Лекции по математике. Т.7: Оптимизация. Изд.2-е, стереотипное.- М.: КомКнига, 2007.- 216 с.
2. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. М.:Издательство МЭИ, 1998.162 с.
3. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику: Учебное руководство.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1990.-272 с.
4. Морозов А.Д., Драгунов Т.Н., Войкова С.А. и др. Инвариантные множества динамических систем в Windows. М.: Эдиториал УРСС, 1998.- 240 с.

### **Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок**

д.т.н. проф. Коликов А.П., к.т.н. с.н.с. Лютцау А.В., к.т.н. доц. Лисунец Н.Л.,  
к.т.н. проф. Гладков В.И., к.т.н. проф. Шпунькин Н.Ф.  
НИТУ «МИСиС», ОАО «НИИТавтопром», МГТУ «МАМИ»  
8.916.225.64.33, [kiod.MAMI@bk.ru](mailto:kiod.MAMI@bk.ru)

*Аннотация.* Приводится экспериментальная и расчетная методика и результаты исследования остаточных напряжений при холодной деформации металлов неразрушающим способом рентгеновской дифрактометрии. Описаны результаты оценки качества осесимметричных деталей по критерию остаточных напряжений при их изготовлении многопроходной ротационной вытяжкой листовых заготовок.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, ротационная вытяжка, листовая заготовка, осесимметричные детали, рентгеновский дифрактометр.

Одним из важных технологических направлений в автомобилестроении является лис-