

# ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ПРОШИВКИ НАЧАЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ

В.С.Майоров, С.В.Майоров, М.Д.Хоменко

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Шатура.*

*E-mail: mvs-laser@list.ru ; http://www.laser.ru*

A necessary operation in laser cutting is punching of an initial inlet in the material. The requirements to accurate unfailing in-cut are different from those to perforation of holes, so the optimal conditions of laser action will be different in principle. The main thing is to avoid high-intensity short pulses and to use less intense impulses with rather long negative-going trailing edge.

## Введение

Лазерная резка – один из наиболее востребованных процессов лазерных технологий обработки материалов в промышленности. За последние четверть века опубликовано огромное количество научных работ, связанных как с весьма сложной физикой процесса, так и с его практическими технологическими особенностями. При этом подавляющее большинство теоретических моделей и исследований связано именно с формированием лазерного реза. Вместе с тем обязательным в начале каждого контура лазерного реза является пробивка начального отверстия в материале - врезка. Лазерная перфорация отверстий достаточно подробно исследовалась как самостоятельный процесс, но на неё обращали мало внимания как на вспомогательную технологическую операцию при лазерной резке. Вместе с тем требования к врезке иные, чем при перфорации отверстий; соответственно, другими будут и рекомендованные режимы лазерного воздействия.

При перфорации отверстий главными требованиями являются геометрические характеристики отверстия: диаметр и минимизация эллипсности, минимальное отклонение от соосности, достижение максимального аспектного отношения «глубина/диаметр». Соответственно, используются специальные импульсные или частотные лазеры, часто с модуляцией добротности, и т.п.

Для врезки всё это маловажно и на первый план выходят другие параметры. Для врезок следует обращать внимание на следующие показатели качества:

- а) размер зоны с дефектами на поверхности материала;
- б) застывшие на поверхности листа капли от выплесков металла;
- в) время пробивки отверстия.

Основной режим генерации лазеров в установках для резки – непрерывный, хотя у современных машин есть и различные импульсно-периодические режимы. Представленные на рынке лазерные комплексы в своих технологических таблицах отдают приоритет пункту (в) и в определённой степени – пункту (б). На критерий (а) внимания практически не обращается (ведь они ориентированы на массовое машиностроительное производство). Но есть ряд задач, где критерий (а) – главный. В первую

очередь это - прецизионное машиностроение, а также лазерные технологии в дизайне и рекламе (где размер вырезаемых элементов сопоставим с диаметром сфокусированного лазерного луча).

### **Постановка задачи**

Глубокое плавление возможно только при значительном прогибе поверхности расплава и образовании парогазового канала, эволюция которого зависит от характеристик падающего лазерного излучения. Учитывая, что параметры эффективного теплового источника в канале зависят от его конфигурации и динамики её изменения во времени, явление пробивки отверстий следует рассматривать как сложный самосогласованный процесс, полное описание которого должно включать в себя нестационарную тепловую задачу с учётом множества одновременно протекающих процессов [1].

Одной из первых работ, в которой была сформулирована проблема соответствия темпа ввода энергии характеру развития процессов тепло и массопереноса при лазерной сварке, была работа [2]. Идеологически эта работа близка нашей задаче. В ней в качестве исходных были взяты следующие соображения:

- для увеличения эффективности процесса следует повышать температуру облучаемой поверхности;
- увеличение температуры поверхности на определённой стадии приведёт к выбросу жидкого металла из ванны расплава, что является недопустимым;
- следовательно, необходимо найти такую форму импульса излучения, при которой температура поверхности в течение всего основного времени воздействия излучения была бы постоянной и равной максимальному значению для выбранных условий задачи.

Поставленная задача сводится к обратной задаче Стефана, в которой необходимо определить временную зависимость поверхностного источника тепла, обеспечивающего заданную температуру облучаемой поверхности при сварке.

Образование и рост парогазового канала при импульсном нагреве сопровождается вытеснением расплава на поверхность, в связи, с чем и при прошивке отверстий возникает проблема выброса частиц жидкого металла из ванны расплава. Оптимальный режим врезки с учётом критериев (а) и (б) должен обеспечивать продвижение фронта плавления на всю толщину материала без выноса и выплеска капель жидкого металла из зоны нагрева.

При перфорации отверстий обычно стремятся настолько повысить плотность мощности лазерного излучения на материале и уменьшить длительность импульса (ов), чтобы перейти к режиму развитого испарения с минимальной толщиной жидкой фазы. Это приводит к характерным дефектам на поверхности вокруг пробитых отверстий.

В настоящей работе предлагается другой подход – не повышение энергетических параметров, а их разумное снижение с учётом выбора оптимальной формы импульса лазерного излучения.

## **Оптимизация режимов врезки**

### Критерии подхода к проблеме оптимизации режимов врезки

Как было указано во введении, при пробивке отверстий при врезке в металл основное внимание будет обращать на следующие показатели качества:

- а) размер зоны с дефектами на поверхности материала;
- б) застывшие на поверхности листа капли от выплесков металла.

Очевидно, что режим лазерного нагрева должен обеспечивать эффективное плавление металла и одновременно не допускать заметного превышения температуры кипения, чтобы давление отдачи паров не приводило к выплёскиванию жидкого металла. При достижении границей расплава нижней поверхности материала струя вспомогательного газа выдувает жидкость вниз. Давление газа не должно быть слишком большим, иначе возможны выплески капель на поверхность.

### Теоретические оценки оптимальной формы импульса при врезке

При лазерной врезке в режиме проплавления характерно наличие двух стадий. На первой основными являются процессы нагревания верхней поверхности листового материала до температуры плавления. От времени протекания этой стадии во многом зависит производительность процесса. Вторая стадия определяет качественные характеристики вреза. Проплавление будет оптимальным, если на протяжении второй стадии всё тепло будет расходоваться на увеличение объёма жидкой фазы без её перегрева выше температуры кипения. В отсутствие давления паров отдачи основной причиной формирования заглубления будет термокапиллярная конвекция [3,4] и выплески будут минимальными. Вторая стадия должна заканчиваться при достижении жидкой фазой заглубления нижней границы листа.

Построенная нами теоретическая модель состояла из двух частей. В первой рассматривался нагрев среды тепловым источником постоянной интенсивности до достижения поверхностью материала температуры плавления. Полученное решение использовалось как начальное условие для второй части, в которой находился закон изменения интенсивности теплового источника во времени при условиях, что температура на верхней границе не превышает температуру кипения металла, а время нагрева достаточно для достижения изотермой плавления нижней границы листа. Вычисления проводились численными методами с использованием программы Mathcad. Решение показало, что на второй стадии мощность излучения лазера должна плавно убывать по определённому закону. Из общих соображений это совершенно естественно, совпадает с выводами [2], и далее было подтверждено экспериментально.

## Экспериментальное исследование влияния формы и энергетика лазерных импульсов на качество врезок

Наши эксперименты проводились на лазерной установке TRUMATIC-SL2530. Были запрограммированы три основные группы циклограмм импульсов излучения при врезке (рис.1): близкой к треугольной с нарастающей

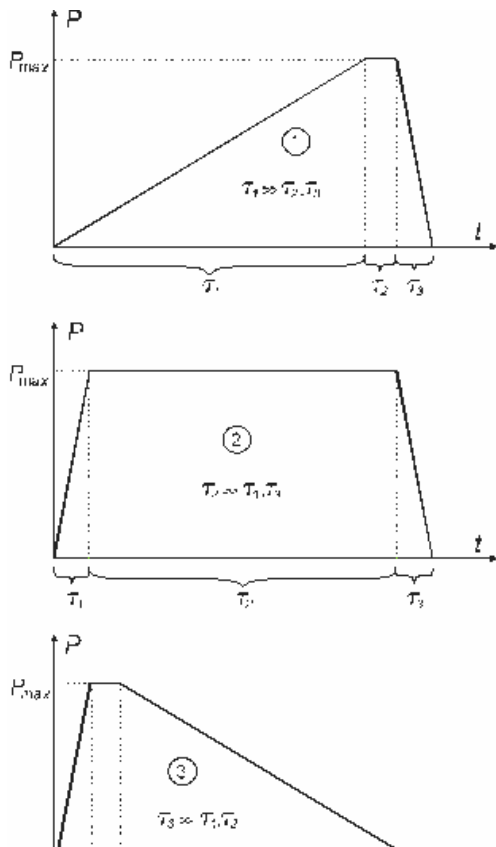


Рис.1. Три группы циклограмм импульсов лазерного излучения: (1) - треугольной с нарастающей мощностью, (2) - прямоугольной формы, (3) - треугольной с падающей мощностью.

мощностью, практически прямоугольной формы, близкой к треугольной с падающей мощностью. В каждой группе варьировалась длительность импульса, максимальная мощность, режим генерации (непрерывный или импульсно-периодический с заданной частотой). Ожидалось, что форма импульсов из последней группы будет наиболее оптимальной. В качестве материала для образцов использовалась нержавеющей сталь 12X18H10T.

На каждом образце при одинаковом режиме выполнялись по 16 врезок для уменьшения статистических ошибок и повышения точности эксперимента. Были измерены верхний и нижний диаметры пробитых отверстий, усреднённые диаметры зоны дефектов (застывшего из жидкой фазы металла) на поверхности и размеры выплесков.

По результатам измерений рассчитывались средние значения всех параметров для каждого образца с учётом среднеквадратичной ошибки эксперимента, и строились графики зависимостей показателей качества от вида циклограмм с учётом режимов лазерного излучения.

Характерные зависимости величины поверхностных дефектов от мощности при врезках с разной формой импульса для непрерывного излучения и для импульсно-периодического излучения приведены на рис.2.

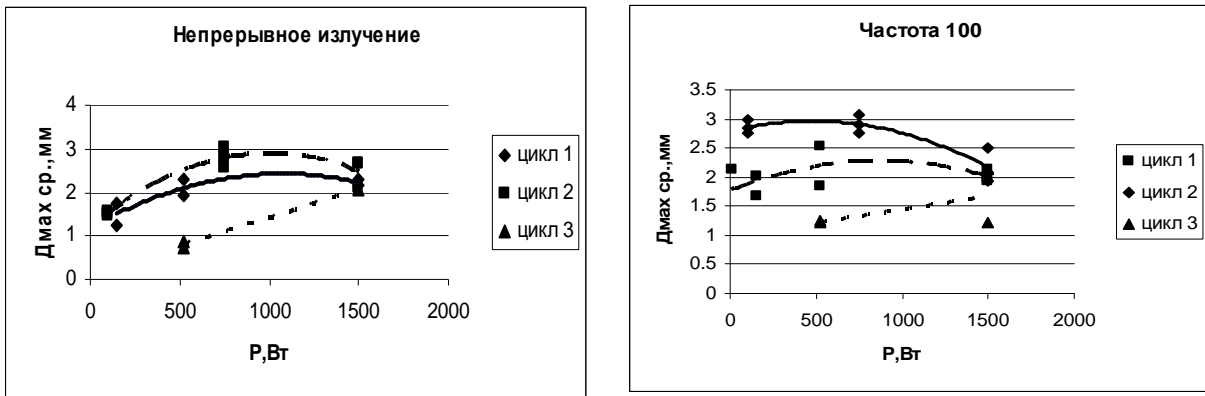


Рис.2. Величина поверхностных дефектов от мощности при врезках с разной формой импульса: (а) - для непрерывного излучения, (в) – для импульсно-периодического излучения.

Видно, что размеры выплесков уменьшаются с уменьшением мощности  $P_{\max}$  (мощность уменьшалась до тех пор, пока пробивка отверстия была ещё возможна); при этом всегда минимальные выплески соответствуют третьей форме цикла врезки.

Практически бездефектные врезки получались на нижней границе  $P_{\max}$  для импульсов с длинным убывающим задним фронтом при непрерывном режиме излучения. Таким образом, проведённые эксперименты подтверждают сформулированные выше принципы и результаты теоретического анализа.

Полученные результаты иллюстрируются фотографиями образцов, приведёнными на рис.3. Наглядно видна разница в качестве врезок, выполненных по стандартной и по предложенной в настоящей работе технологиям.

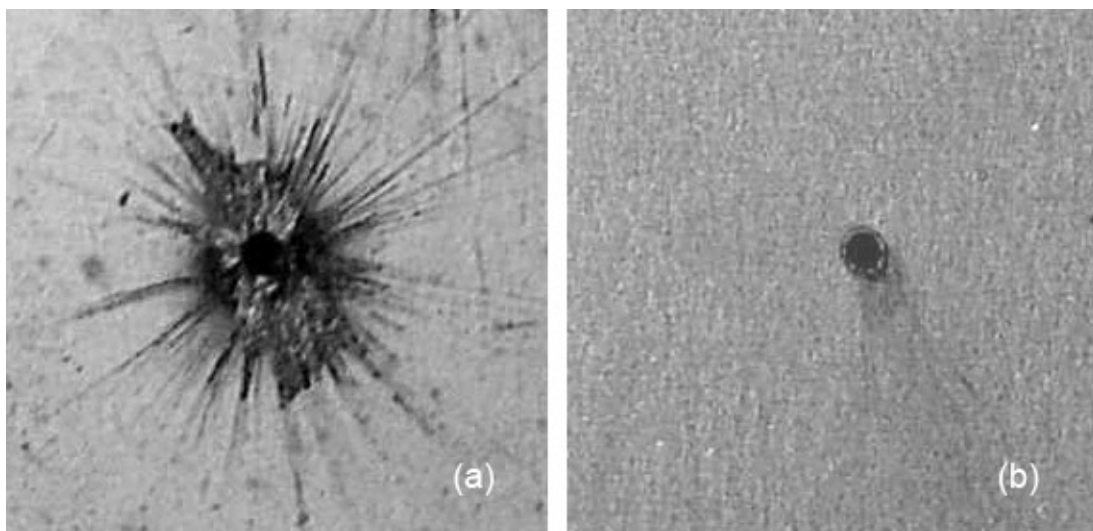


Рис.3. Образцы врезок: а – вид поверхности вокруг отверстия, прошитого многоимпульсным излучением  $CO_2$ -лазера по циклу из первой группы; б – отверстие (врезка), полученное на том же материале и на том же лазере под воздействием длинного (~ 1 с) одиночного лазерного импульса со спадающей интенсивностью по циклу из третьей группы.

## Выводы

Сформулированные требования к прецизионной бездефектной врезке (минимальный размер зоны с дефектами на поверхности материала, отсутствие застывших на поверхности листа капель от выплесков металла) иные, чем при традиционной перфорации отверстий (точность геометрических размеров отверстия, минимальное отклонение от соосности, достижение максимального аспектного отношения «глубина/диаметр»).

Теоретические оценки процесса врезки позволили выявить характерные закономерности энергетики лазерного импульса и вид изменения во времени мощности лазерного излучения, главным из которых является наличие затянутого заднего фронта с убывающей по определённому закону интенсивностью.

Экспериментальные исследования качества врезок для импульсов различной формы (с нарастающей мощностью, прямоугольной, с падающей мощностью) при их различных энергетических и временных параметрах показали хорошее соответствие с теоретическими выводами.

1. В.С.Голубев. Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением // Препринт ИПЛИТ РАН № 83, г. Шатура. 1999, 150 с.
2. Ю.А.Афанасьев, П.П.Волосевич, И.И.Галигузова, А.П.Канавин, С.В.Каюков, Б.И.Леванов, М.В.Якобовский. Оптимизация режима импульсной лазерной сварки // В сб. Лазерная технология. Вильнюс, Институт физики АН ЛитССР. 1988. № 6, с. 106.
3. А.А.Углов, И.Ю.Смуров, А.Г.Гуськов, К.Н.Тагиров. Нестационарный термокапиллярный массоперенос при лазерном легировании металлов // Инженерно-физический журнал. 1989. т. 56, № 5, с. 199-205.
4. Р.Д.Сейдгазов, В.Г.Низьев, В.Э.Гофман. О механизме удаления расплава импульсом ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера // ПОВЕРХНОСТЬ. Физика, химия, механика. 1992, № 3, с. 18-21.