

## Тепловое воздействие при лазерной резке

Лазерная резка является популярным методом раскроя листовых материалов. Лазерные системы способны легко изготовить деталь любой формы и размера; их контроллеры могут задавать траекторию и параметры реза, позволяя автоматизировать рабочий процесс. Дошло до того, что достаточно просто показать машине чертеж и сказать, сколько таких деталей нам нужно – паллет с вырезанными заготовками будет готов в считанные минуты. Существует, однако, опасность, связанная с таким уровнем автоматизации: она заставляет забыть, что лазерная резка – термический процесс и лазерное излучение плавит металл. Зачастую, это можно не учитывать, но при точной резке важно знать о возможных побочных эффектах.

### Основы

Металлы и большинство неметаллов режутся лазером одним из двух схожих методов. Первый метод заключается в фокусировке излучения на поверхности материала, его плавлении и последующем удалении расплава струей газа. Второй метод схож с первым, за исключением того, что газ взаимодействует с материалом, создавая благоприятные условия для резки. Схематический вид оборудования представлен на рис.1 Лазерный пучок, проходя вертикально, фокусируется линзой на поверхности (или ниже уровня поверхности) материала. Пространство между линзой и материалом закрывается камерой, которая сжимает поступающий газ и выпускает его через сопло в место реза.

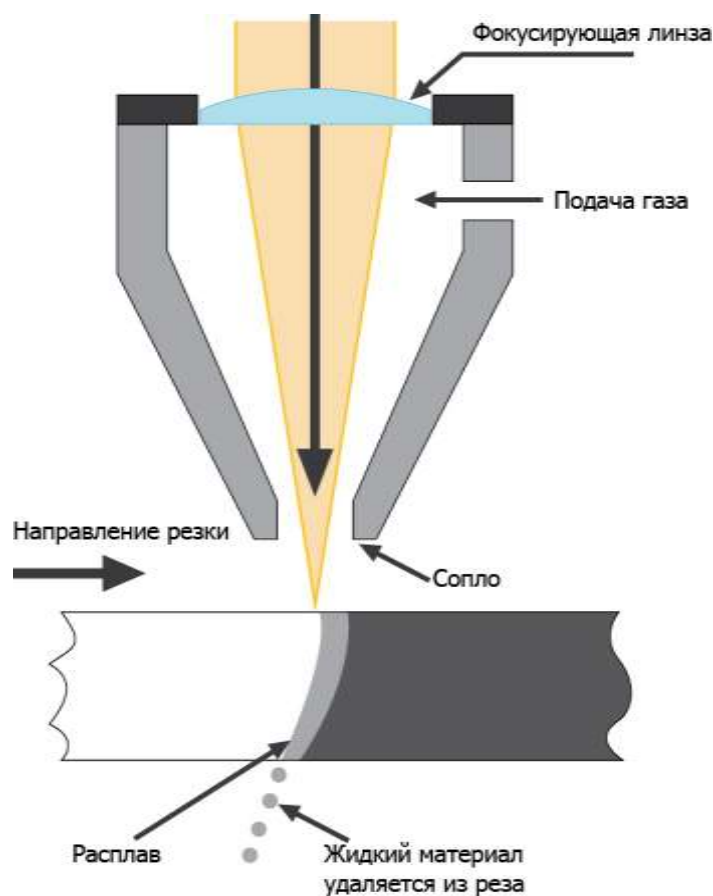


Рис. 1. Общая схема процесса

## **Важные характеристики процесса:**

Металлы плавятся, а не испаряются. Это означает, что лазерная резка возможна только в том случае, когда лазер проходит через всю толщину материала, чтобы расплав мог быть удален.

Металл удаляется газом, а не лазером. Лазерный луч служит только для плавления материала. Многие процессы при лазерной резке зависят в большей степени именно от потока газа, нежели от параметров лазерного излучения.

Фронт реза немного отклонен от вертикали. Это означает, что процесс очень чувствителен к поляризации и, таким образом, с увеличением толщины материала, не достигает нижнего края реза.

## **Углеродистая сталь**

Самое распространенное применение лазеров в производстве – раскрой листов углеродистой стали. В качестве вспомогательного газа чаще всего используется кислород. Энергия, высвобождаемая при реакции  $2\text{Fe} + \text{O}_2$  с образованием  $2\text{FeO}$ , в грубом приближении равна энергии самого лазерного излучения. Таким образом, использование кислорода вдвое увеличивает производительность процесса в сравнении с использованием инертного газа. Температура в области реза, при использовании кислорода, выше, что делает расплав более текучим и простым в удалении струей газа. Однако край реза покрывается тонкой пленкой оксида железа, что неблагоприятно сказывается при последующей сварке.

Чистота используемого кислорода оказывает существенное воздействие на скорость и качество процесса. Тесты показали, что снижение чистоты кислорода с 99,998% до 99,5% снижает скорость более чем на 20%. Почему так происходит не вполне очевидно. Экзотермическая реакция между сталью и кислородом не замедляется значительно при столь незначительной потере концентрации кислорода. Похоже, что сама сила данной реакции является причиной её чувствительности к загрязнению.

На Рис. 2 изображен схематический разрез процесса резки, показывающий, почему малое количество инертных загрязнений оказывает такое сильное воздействие на реакцию. Расплав стали имеет очень высокое сродство к кислороду и, соответственно, забирает его из газа. При этом расплав не вступает в реакцию с включениями, такими как азот, оставляя их в потоке газа. Ниже по краю реза формируется аэродинамический слой, скорость течения газа в котором ниже и происходит смешение. Концентрация примесных атомов значительно увеличивается в этом граничном слое, так как кислород забирается расплавом. Соответственно, концентрация кислорода составляет уже не 99,5%, а гораздо меньший процент, что в результате приводит к более низкой скорости реакции, температуре и скорости резки.

Подобный эффект наблюдается и при резке листов толщиной более 10мм. Даже если из сопла выходит чистый газ, он взаимодействует с воздухом и имеет значительную

примесь азота на дне прореза. Производительность процесса при работе с толстыми материалами может быть значительно увеличена при использовании составного сопла, которое окружает центральную коаксиальную струю газа круговым потоком меньшей мощности. Этот круговой поток гарантирует, что поступающий в рабочую зону газ останется кислородом.



Рис. 2 Схематический вид реза при резке в кислороде

Бороздки на кромке, часто наблюдаемые при лазерной резке, возникают из-за экзотермической реакции железа с кислородом. Фронт расплава движется быстрее, чем лазерное пятно, пока не останавливается нерасплавленным материалом. Тогда пятно догоняет данный фронт и цикл повторяется. Соответствующие комбинации лазерной мощности, скорости перемещения и силы потока газа снижают данные колебания и позволяют добиться гладкого реза. При увеличении потока кислорода, колебания становятся сильнее, что делает рез более грубым.

## Тепловые эффекты в стали

Лазерная резка осуществляется благодаря плавлению металла, что приводит к появлению различных эффектов.

В холоднокатаных низкоуглеродистых сталях край материала становится менее твердым. Причина тому – наличие зоны отжига толщиной в несколько тысячных дюйма. Зачастую, это не является проблемой при последующей финишной обработке или для конечного изделия.

Однако если уровень углерода превосходит 0,3% (средне- и высокоуглеродистые стали), в поверхностном слое образуется мартенсит, повышающий твердость стали. Когда материал в области реза нагревается до температуры плавления ( $T_{пл} = 2800^{\circ}\text{F} = 1500^{\circ}\text{C}$ ), граничная область также нагревается. Сталь, температура которой повышается выше  $1650^{\circ}\text{F}$  ( $900^{\circ}\text{C}$ ) превращается в аустенит, который, быстро охлаждаясь, переходит в мартенсит – именно он образует закаленную сталь.

В некоторых случаях данный эффект может быть полезен – например, когда требуется одновременно вырезать и закалить край детали, повышая его стойкость к истиранию. В

других ситуация – может стать проблемой, так как наличие пор в закаленном слое может привести к образованию микротрещин.

Высокие скорости процессов при лазерной резке приводят к появлению специфических микроструктур в прокатной стали. Хотя сталь переходит в аустенит выше 1650°F, конечный материал неоднороден. Углерод, присутствующий в форме карбида железа, должен диффундировать в малоуглеродистые ферритовые зоны. Если исходная структура была крупнозернистой, время, необходимое для диффузии, превосходит длительность нагрева. После охлаждения высокоуглеродистые области становятся твердыми, а низкоуглеродистые – мягкими. Такие структуры имеют очень низкие механические свойства.

## **Легированные стали**

Низколегированные стали, такие как 4140 и 8620, очень хорошо поддаются лазерной резке. Стали с более высоким включением легирующих элементов (многие конструкционные стали) режутся не так хорошо. Многие легирующие элементы, такие как хром, повышают вязкость расплава и образуют оксиды, оставляющие темную пленку на поверхности и формирующие шероховатый край реза при толщине более четверти дюйма. В любой легированной стали с достаточным содержанием углерода при резке образуется мартенсит.

## **Нержавеющая сталь**

Так как все нержавеющие стали представляют собой высокохромистые сплавы, при резке в струе кислорода они ведут себя, как описано выше: кромка покрывается значительным слоем оксида хрома. Во многих случаях это является нежелательным для последующего процесса использования детали. Замена кислорода азотом, который не вступает в заметную реакцию с нержавеющей сталью, позволяет избежать формирования данного слоя.

Инертный газ заставляет создавать температуру плавления исключительно силами лазерного излучения, что, естественно, снижает скорость процесса и толщину обрабатываемого материала в сравнении с процессом, использующим кислород. Вязкость расплава довольно высока и его адгезия к нижнему краю реза представляет определенную проблему.

## **Алюминий**

Алюминий и его сплавы характеризуются высокой отражательной способностью и теплопроводностью. Это делает их относительно трудными материалами для лазерной обработки. Многие алюминиевые сплавы, особенно серии 2000 и 7000, склонны к образованию микротрещин на кромке реза. В аэрокосмической промышленности (основном потребителе данных сплавов) такие микротрещины недопустимы, так как они снижают усталостную прочность деталей. Использование деталей возможно только после удаления поверхностного слоя механически, что, ввиду высокой стоимости, делает

лазерную резку нецелесообразной. Для изготовления деталей для аэрокосмической промышленности применяют гидроабразивную резку, которая не создает нагрева в зоне резки.

## **Титан**

Титан и сплавы на его основе интенсивно взаимодействуют с кислородом и азотом. Если титан режется в струе кислорода, то на кромке образуется толстый слой твердых и хрупких оксидов и нитридов, что делает детали непригодными для многих задач. Тот же эффект наблюдается при резке в азоте. Единственными газами, пригодными для лазерной резки, являются инертные газы, такие как аргон и гелий. Хотя аргон, будучи более дешевым, чем гелий, кажется наиболее предпочтительным, его использование может привести к определенным металлургическим сложностям. Перегрев кромки может изменить фазовое состояние Ti-6Al-4V и привести к образованию альфа-структуры, что недопустимо для многих задач аэрокосмической промышленности, так как снижает усталостную прочность материала. Гелий, имеющий большую теплоемкость и теплопроводность, часто смешивают с аргоном для обеспечения охлаждения во время резки. Обычно достаточно 25%-ой смеси гелия с аргоном, но иногда используется и 50%-ая.

## **Воздействие на неметаллы**

Лазеры способны обрабатывать очень широкий диапазон материалов, вне зависимости от их твердости и электропроводности.

## **Кварц**

Высокая стойкость к тепловому удару позволяет обрабатывать кварц, как металл. Для этого используются CO<sub>2</sub> лазеры, работающие в непрерывном режиме, так как кварц слабо поглощает излучение Nd:YAG лазеров (1064нм). Напряжения, вызванные тепловым расширением, зачастую снимаются отжигом готовых деталей.

## **Органические материалы**

Органические материалы хорошо поддаются лазерной резке. Необходимая для этого энергия обычно гораздо ниже, чем требуется для резки неорганических материалов, что позволяет производить резку на больших скоростях и использовать лазеры меньшей мощности. Однако многие органические материалы выделяют токсичные продукты при лазерной резке, что необходимо учитывать, чтобы обезопасить оператора и окружающую среду.

## **Пластик**

Широкий диапазон полимеров может быть разрезан лазерами. Луч вызывает плавление, испарение или сгорание материала. Термопласты, такие как полипропилен и пенопласт, режутся плавлением материала, тогда как термореактивные материалы, такие как фенольные и эпоксидные смолы, режутся путем сгорания. Горючие материалы зачастую

оставляют углеродистый налет на кромке реза, кроме того их испарения являются довольно опасными для человека.

## **Заключение**

Лазерная резка – не волшебная палочка. Метод с успехом справляется с одними материалами, но, являясь термическим процессом, может привести к нежелательным эффектам при обработке других.

# **The Thermal Effects of Laser Cutting**

---

*reprinted from The Fabricator, January 1997*

**Originally presented at the Alternative Methods for Precision Sheet Metal Fabricating Conference, June 1996, San Jose, CA**

**by Leonard Migliore**

**Перевод Цимбал А.Л.**